

毫米波大规模 MIMO 系统中的预编码技术

Precoding Techniques in Millimeter Wave Massive MIMO Systems

张钰/ZHANG Yu
赵雄文/ZHAO Xiongwen

(华北电力大学, 北京 102206)
(North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

下一代无线通信系统致力于达到每秒吉比特以上的数据吞吐率以支持高速率的多媒体业务。毫米波频段(30~300 GHz)尚存在大量未使用的频谱,可利用的频带宽,信息容量大,成为下一代通信系统中提高数据速率的主要手段。然而,毫米波通信面临的一个主要问题是自由空间路损使得接收端信号产生大幅度衰减。不仅如此,当信号穿过雨、雾或收发两端之间存在障碍物时,衰减会更加严重,甚至会引起信号中断。因此,克服信号传输过程中的衰减和损耗,提升系统容量成为毫米波通信技术研究的主要方向。

大规模多进多出(MIMO)技术是在基站端部署大规模阵列,与传统MIMO相比能够有效抵抗不同用户之间的干扰,显著提升系统的容量。毫米波频段的天线尺寸很小,为配备大规模天线阵列提供了可能。基站天线数量可远大于用户数,故系统可以获得很高的复用增益、分集增益和阵列增益。另外,大规模MIMO能够将信号能量聚焦在很窄的波束上,有效

收稿日期: 2018-02-17
网络出版日期: 2018-05-11
基金项目: 北京市自然科学基金(17L20052);
国家自然科学基金(61771194)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 03-0026-006

摘要: 大规模多输入多输出(MIMO)技术能够大幅度提升系统容量,降低不同用户间的干扰,但因其系统中信道维度高、信道估计和预编码算法复杂等因素,使得系统软硬件开销都会增大。将大规模MIMO系统的预编码算法分为数字、模拟和混合3种类型,并对3类预编码算法进行了归纳对比,总结出不同预编码算法的优缺点和适用场景。将信道估计方案分为训练估计和盲估计,归纳总结了2类方案的优缺点,并指出合理利用大规模MIMO的信道稀疏性能够改善信道估计的质量,减少估计开销。

关键词: 毫米波;大规模MIMO;预编码算法;信道估计

Abstract: Massive multiple-input multiple-output (MIMO) technology can greatly increase the system capacity and reduce the interference between different users. However, due to the high channel dimension, complex channel estimation and precoding algorithms, the hardware and software overhead of the system will increase. In this paper, the precoding algorithms are classified into three types: digital algorithm, analog algorithm and hybrid algorithm. The advantages and disadvantages of different algorithms and applicable scenarios are summarized and compared. In addition, the channel estimation scheme is divided into training-estimation and blind-estimation, and the characteristics of the two schemes are compared. It is pointed out that the channel sparsity of massive MIMO can improve the quality of channel estimation and reduce the estimation cost.

Key words: millimeter wave; massive MIMO; precoding algorithms; channel estimation

地提升了能量效率。在大规模MIMO系统中,预编码技术是下行链路中至关重要的信号处理技术,其利用发送端的信道状态信息(CSI),将调制过的符号流变换成适应当前信道的数据流,将信号能量集中到目标用户附近,有效对抗衰减和损耗,提升了系统性能。因此,研究毫米波大规模MIMO系统中的预编码技术对推进下一代无线通信的发展有重要意义。

1 预编码技术概述

预编码技术是在下行链路的发送端利用CSI对发送信号进行预处

理,将不同用户及天线之间的干扰最小化,并将信号能量集中到目标用户附近,使接收端获得较好的信噪比(SNR),提高系统信道容量。预编码最关键的2个挑战是获取CSI和预编码矩阵。由于大规模天线的使用,信道矩阵和预编码矩阵维度增高,算法复杂度、系统硬件成本和实现难度都会增大。已有很多研究工作针对降低系统计算复杂度和开销展开:文献[1]中,作者提出用牛顿和切比雪夫迭代估计信道矩阵的逆,以降低迫零(ZF)预编码方案中求逆的计算量;文献[2]中,作者采用基于统计信道信

息的预编码,统计信道状态相较于即时信道状态变化慢,可采用简单的长期反馈方式或信道互易性得到,大大减少了系统开销;文献[3]中,作者采用信漏噪比(SLNR)代替信干噪比(SINR)作为多用户MIMO场景下预编码矩阵求解的优化目标,有效地避免了非确定性多项式(NP)难度的相关问题。

根据预编码矩阵作用于基带或射频(RF)可将预编码方案分为数字基带预编码、模拟射频预编码和混合预编码。在数字基带预编码中,传统的线性和非线性预编码都可以直接应用到大规模MIMO系统中,但非线性预编码的计算复杂度过高,线性方案更占优势。模拟预编码能显著减少系统硬件开销,但需要牺牲部分性能。混合预编码作为近年来兴起的方案,能结合数字预编码和模拟预编码的优点,在硬件开销和系统性能之间折中。

信道估计根据其是否引入了训练信号可分为训练估计和盲估计,训练估计需要给每个用户设计不同的导频序列。由于小区内存在大量用户,大规模MIMO存在着严重的导频污染。盲估计直接根据接收到的数据估计信道和发送信号,由于基站端部署了大规模天线,估计算法的复杂度和计算量都很高。本文根据以上分类对大规模MIMO系统中现有的预编码算法和信道估计方案进行总结分析,并提出相关建议。

2 预编码方案

2.1 数字预编码

数字基带预编码是在数模转换前用矩阵处理调制的符号流。该方案要求RF链数量和天线数目相同,能达到很好的系统性能。传统MIMO系统中的线性和非线性预编码方案都可以直接应用到大规模MIMO系统中作为数字基带预编码方案,但非线性预编码如脏纸(DPC)等算法复杂

度较高,随着天线数增加计算复杂度会激增。此外,GAO X^[4]等人做了实际测量,发现在大规模MIMO系统中,采用低复杂度的线性预编码就可实现DPC预编码98%的性能。因此,毫米波大规模MIMO中一般采用线性预编码,常见的线性预编码包括最大比传输(MRT)、ZF、最小均方误差(MMSE)和截断多项式展开(TPE)。

(1) MRT

MRT在很多文献中又被称为匹配滤波方案(MF)^[5-6],其预编码矩阵和用户端接收信号可表示为:

$$W_{MRT} = \beta H \quad (1)$$

$$y_{MRT} = \sqrt{\rho} \beta H^H H s + n \quad (2)$$

其中, β 是缩放因子,用来约束信号发送功率。MRT方案的核心思想是最大化目标用户的信号增益^[5,7],但不考虑不同用户间的干扰,仅适用于信道相关度低的场景,在高度相关性信道下,该方案的性能会急剧下降。另外,随着基站天线数的增加, H 中的信道矢量趋向于相互正交,使得 $H^H H$ 近似于一个对角阵,MRT方案的性能开始逐渐显现出来^[8],因此MRT方案则更适用于基站天线数较多的场景。

(2) ZF

MRT方案只关注目标用户的有用信号,忽略了不同用户间的干扰。ZF正好相反,其致力于消除不同用户间的干扰,不考虑噪声的影响,ZF方案预编码矩阵和接收信号向量可表示为:

$$W_{ZF} = \beta H (H^H H)^{-1} \quad (3)$$

$$y_{ZF} = \sqrt{\rho} \beta H^H H (H^H H)^{-1} s + n \quad (4)$$

ZF方案在SNR较高的区域能达到很好的系统和速率;在SNR较低的区域,由于其忽略了噪声的影响,系统可达总速率没有MRT方案高^[9]。ZF方案需要对 $K \times K$ 维矩阵进行求逆运算,运算量会随着用户数增长而

增加,因此ZF方案适用于用户数较少的场景。

(3) 正则迫零方案(RZF)

大规模MIMO系统中,RZF被视为最实用并且性能可靠的预编码方案之一^[12],其基本思想是最小化接收信号与发射信号之间的均方误差,因此又被称为最小均方误差预编码方案(MMSE)。其预编码矩阵和接收信号计算如下:

$$W_{RZF} = \beta H (H^H H + \xi I_K)^{-1} \quad (5)$$

$$y_{RZF} = \sqrt{\rho} \beta H^H H (H^H H + \xi I_K)^{-1} s + n \quad (6)$$

其中, ξ 是正则化系数,与基站总传输功率 P 及噪声功率 σ^2 相关。RZF预编码结合了ZF和MRT方案的优点,当 $\xi \rightarrow 0$,式(5)成为ZF方案,当 $\xi \rightarrow \infty$ 时,式(5)演变成MRT方案^[10];RZF需要对矩阵求逆,计算复杂度达到 $3MK^2$ ^[11],因此该方案适合用户数量较少的场景。另外,很多文献也提出可以采用复杂度较低的迭代算法代替RZF中的求逆运算^[11,12]。

(4) TPE

TPE是在RZF方案的基础上演变而来的^[13],其基本思想是用矩阵多项式逼近RZF方案中矩阵的逆,根据文献[14]中的引理1,可将式(5)通过一系列变换得到TPE预编码矩阵:

$$W_{TPE} = \sum_{l=1}^{J-1} \omega_l (H^H H)^l H^H \quad (7)$$

$$y_{TPE} = \sqrt{\rho} \sum_{l=1}^{J-1} \omega_l (H^H H)^l H^H s + n \quad (8)$$

其中, ω_l 为标量系数, J 代表多项式阶数。事实上, $J=1$ 时,多项式变为 $W_{TPE} = \omega_1 H^H$,即MRT预编码矩阵, $J=K$ 时可得到RZF预编码矩阵。采用TPE预编码算法可避免复杂的求逆运算,且多项式各级求解可同步进行以提高运算效率。另外,由于可以对参数 J 进行拆分,该算法易于通过硬件实现。但从性能上看,只有当 J 很大时,其性能才能逼近RZF算法,

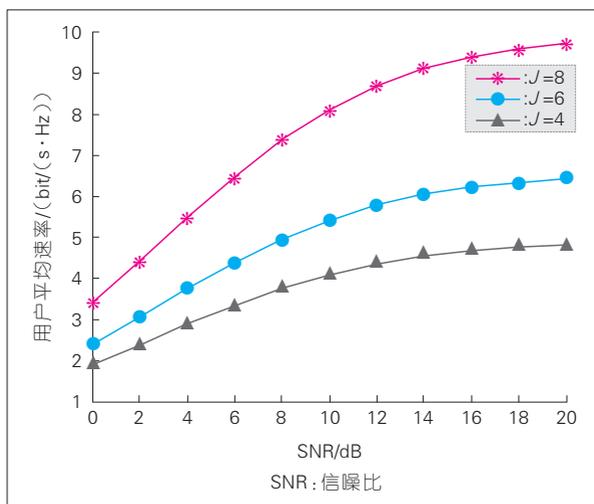
J 越大硬件开销也越大。另外, TPE 算法只有在基站天线数远大于用户数时, 才能近似达到 RZF 的性能, 当基站天线数减少或者用户数变多时, 其性能都会受到影响而变差。本文基于莱斯信道模型对 TPE 算法性能进行验证, 仿真结果如图 1, 可看出随着多项式级数增加, 系统用户平均速率越来越高。表 1 总结归纳了上述几种数字预编码方案的优缺点。

2.2 模拟预编码

模拟预编码是在数模转换之后对输入符号流进行处理。这类方案可将多根天线同时连到一条 RF 链上, 非常适用于大规模 MIMO 系统天线数很多的情况, 能显著降低系统硬件成本, 且计算复杂度较低。模拟预编码根据采用器件的不同可分为 2 类: 第 1 类是基于相移的方案, 利用低成本的移相器控制每个天线发射信号的相位; 第 2 类是基于天线选择的方案, 利用成本更低的 RF 开关激活需要工作的部分天线。

(1) 基于相移的方案

寻找合适的相移矩阵是基于相移方案的关键, 最简单的方法是提取信道矩阵中元素的相位作为相移矩阵^[15], 但在实际应用中由于所使用相移器的限制, 必须对 $M \times K$ 个相位进行量化, 量化误差会使预编码方案的



▲ 图 1 不同多项式级数下 TPE 算法性能

▼ 表 1 不同数字预编码方案优缺点

预编码方案	优点	缺点
MRT/MF	<ul style="list-style-type: none"> 最大化目标用户的信号增益 计算复杂性低 在低信噪比区域性能较好 基站天线数足够多时, 能够达到近似最优的性能 	<ul style="list-style-type: none"> 没有考虑用户之间的干扰 基站天线数较少时, 系统可达速率较低
ZF	<ul style="list-style-type: none"> 计算复杂性低 在高信噪比区域性能较好 消除了多用户信道间的干扰 能够达到近似于脏纸编码的性能 	<ul style="list-style-type: none"> 如果信道高度相关噪声会被放大 需要进行信道求逆 不能支持多数量用户
RZF/MMSE	<ul style="list-style-type: none"> 综合了 MF 和 ZF 的优点, 同时考虑干扰和噪声的影响 	<ul style="list-style-type: none"> 需要进行信道求逆 不能支持多数量用户
TPE	<ul style="list-style-type: none"> 避免求逆, 提高运算效率 在预编码的复杂性和系统吞吐量之间折中 在基站天线数远远大于用户数时能达到较好的性能 	<ul style="list-style-type: none"> 性能受多项式级数限制 高性能需要大量硬件消耗 基站天线数较少时系统可达速率较低

MF: 匹配滤波
MMSE: 最小均方误差

MRT: 最大比传输
RZF: 正则迫零方案

TPE: 截断多项式展开
ZF: 迫零

性能大打折扣。文献[16]中, 作者采用功率迭代的方法求解一组相位集合, 该算法在迭代 3~4 次之后就能收敛, 但需要发送端不停地向接收端发送训练序列, 训练开销较大。

(2) 基于天线选择的方案

开关模拟预编码(OABF)方案^[17], 采用廉价的 RF 开关代替模拟移相器。发送信号时, 选择激活有更好信道条件且相位相近的天线子阵列来产生发射波束, 选择天线时基于最大化 SNR 准则。该方案能够获得全天线增益和全分集增益, 但其性能无法超越基于相移的方案, 两者可达总速率的差值上界为 $2 \log \pi$ 。文献中仿真结果表明: 这类方案在基站天线数

较多的时候性能较好。在选择工作天线时还可采用功率最大标准^[18], 选取功率最大的信道向量对应的发送天线集合, 这种方案不用进行 SNR 计算, 复杂度较低, 但天线增益低, 总体性能较差。

基于天线选择的方案与基于相移的方案相比可进一步降低硬件成本和功耗, 但其性能要差于基于相移的预编码方案, 且其需要一定复

杂度的天线选择算法的支撑, 选择算法的复杂度会随着天线数量的增加呈指数增长^[19]。总体来说, 模拟预编码方案不需要为每个发射天线配置一条 RF 链, 大大降低了硬件成本, 但其缺乏对信号幅度的调节, 所以性能普遍没有数字预编码方案好。表 2 总结了上述 2 类模拟预编码方案的优缺点。

2.3 混合预编码

大规模 MIMO 系统中, 数字预编码方案能达到很好的系统性能, 但需要给每个发射天线配置一条 RF 链, 成本昂贵。模拟预编码在经济上比数字预编码更受欢迎, 但模拟预编码矩阵中每个系数拥有恒定的模, 缺乏幅度的控制, 其性能比数字预编码差。混合数字/模拟预编码技术结合了 2 种方案的优点, 在支持幅度调节和相位调节的同时, 减少 RF 链数。

常用的 2 种混合预编码发端结构如图 2 所示^[20], 图 2a) 是复杂结构, 每个 RF 链通过移相器和所有天线相连, 每个天线阵元输出所有射频信号的线性组合; 图 2b) 是低复杂性结构, 天线阵列被分为 N 个子阵列, 每个 RF 链分别与子阵列相连, 降低了系统的复杂性。基带传输数据流经数字预编码器作用形成 N 个输出流, 并上变频到 RF 链上, 然后再经模

▼表2 不同模拟预编码方案的优缺点

预编码方案	优点	缺点
基于相移的方案	<ul style="list-style-type: none"> 可对信号相位进行调节 所有天线都被激活,天线增益高 成本低 	<ul style="list-style-type: none"> 不能调节信号幅度
基于天线选择的方案	成本低	<ul style="list-style-type: none"> 只有部分天线被激活,天线增益低 不能调节信号相位和幅度 同一时间只能服务一个用户

拟预编码器映射到 M 个天线上发送出去。图2中的RF链由数模转换器(DAC)/模数转换器(ADC)、混频器、功放组成。

(1) 复杂结构混合预编码

文献[21]中的移相器迫零(PZF)方案基于图2a)中复杂结构,提取信道矩阵的相位形成模拟预编码矩阵,经模拟预编码矩阵作用后的信道作为基带等效信道,在基带上,使用ZF方案求解数字预编码矩阵。其预编码矩阵由2个部分组成,在射频上,模拟预编码矩阵可以表示为:

$$F_{ij} = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j\varphi_{ij}} \quad (9)$$

其中, F_{ij} 表示矩阵 F 的第 (i,j) 个元素, φ_{ij} 表示信道矩阵 H 第 (i,j) 个元

素的相位。在基带上,数字预编码矩阵可表示为:

$$W_{PZF} = H_{eq}^H (H_{eq} H_{eq}^H)^{-1} \Lambda \quad (10)$$

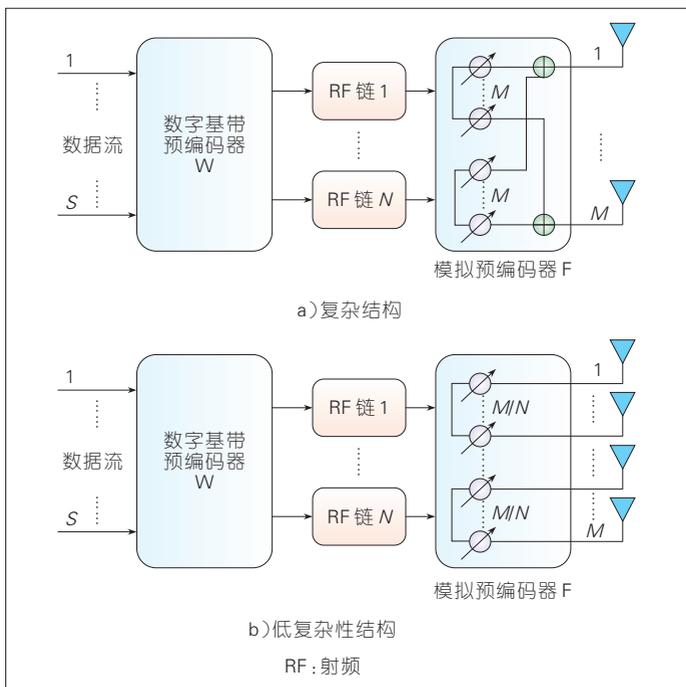
其中, H_{eq} 是经 F 作用后的等效信道, $H_{eq} = H^H F$, Λ 是用于限制发送信号功率的对角阵。可以看出:等效信道 H_{eq} 是 $K \times K$ 维的矩阵。相较于原始信道矩阵,行数从 M 行降到 K 行,

大大减少了求逆运算的复杂度。另外,PZF方案可以支持同时传输 K 路数据流,并且只需要 K 个RF链;但其性能会不同程度地受到ZF方案的约束,永远不能超过

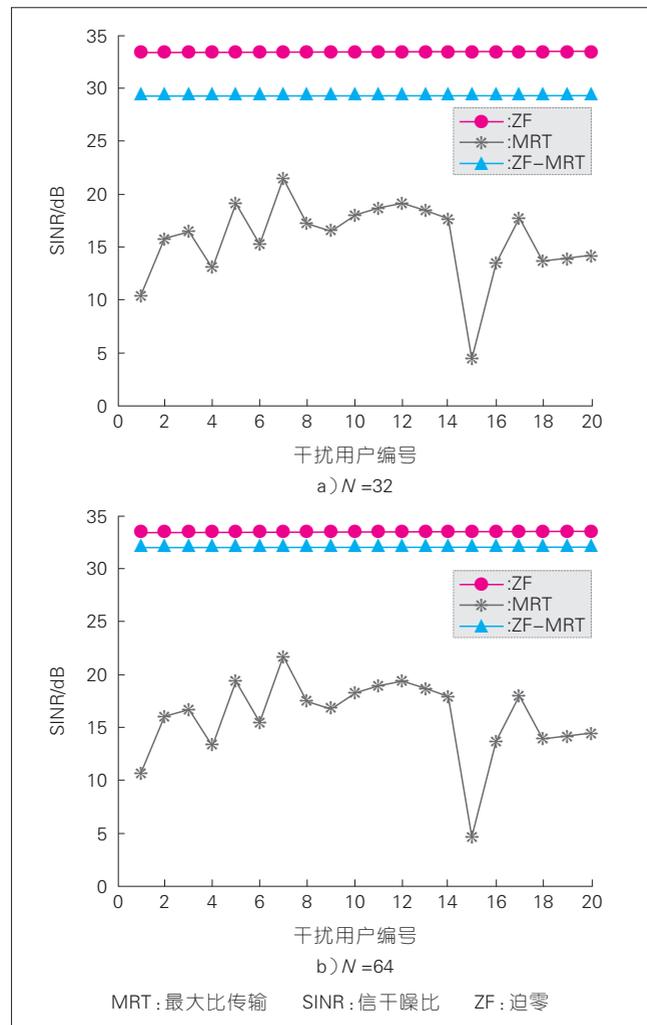
ZF方案。

(2) 低复杂结构混合预编码

文献[22]中,作者则基于图2b)中的结构,结合ZF和MRT方案,将天线阵列分为若干组,组内采用MRT方案,组间采用ZF方案。文中我们基于实测小小区场景对所提方案进行性能仿真,结果证明:该方案与ZF方案的SINR相差1dB时,需要的RF数量减少为ZF方案的1/25。ZF-MRT方案的RF链数可以任意调节,但RF链数越少,性能也会越差。本文中,我们基于莱斯信道模型,对ZF、MRT、ZF-MRT 3种方案的性能进行仿真对比。如图3所示,当RF链数由64个减少至32个时,ZF-MRT方案可达到的SINR也随之降低,因此需



▲图2 混合预编码系统结构



▲图3 混合预编码方案ZF-MRT性能仿真

要牺牲系统性能来减少 RF 链的数目。另外, ZF-MRT 方案性能也会受到 ZF 方案的约束, 永远无法超越 ZF 方案。表 3 总结了 2 种混合预编码方案的优缺点。

3 信道估计

在上述所有预编码方案中, 预编码矩阵 W 的求解都离不开信道矩阵 H , 因此对信道矩阵的估计是预编码处理中不可或缺的一步。大规模 MIMO 系统中, 信道矩阵呈现稀疏结构^[23], 适当利用毫米波大规模 MIMO 的信道稀疏性有助于改善信道估计的质量减少估计开销。

(1) 训练估计

训练估计中, 发送端发送导频序列, 接收端根据接收到的信号估计 CSI。所需导频序列数量随着系统中的用户数增大而增大, 导频序列的数量越多, 不同序列之间产生干扰的可能性也越大, 导频污染也越严重, 因此在这类估计方案中, 在不影响信道估计质量的前提下应尽可能地减少导频序列的数量。基于大规模 MIMO 信道的稀疏性, 利用压缩感知技术可以减少训练序列的数量^[24-26]。在文献[24]中, 作者首先建立了稀疏性信道模型, 在该模型基础上提出一种分布式压缩感知方案, 在用户端感知压缩信道并将感知到的信息反馈回基站, 基站端根据反馈信息采用正交匹配追踪算法恢复 CSI。文献[26]中作者的基本思路与文献[24]一致, 在 CSI 恢复阶段采用了贝叶斯稀疏信号重建算法。文献[27]中, 为降低导频开销, 作者提出基于旋转恒定技术 (ESPRIT) 的超分辨率信道估计方案。利用毫米波信道角度稀疏性, 先估计低维等效信道, 然后采用高分辨率算法从低维信道中估计到达角 (AOA) 和离开角 (AOD) 并利用最小均方误差准则计算路径增益, 最后根据 AOA、AOD 以及路径增益重建高维信道。

(2) 盲估计

盲估计不发送专门的导频序列, 仅利用接收信号本身和发送信号的内在特点进行信道估计, 它不会产生训练开销, 但估计准确度没有训练估计好^[28]。盲估计中, 信道估计问题可建模为稀疏矩阵分解问题, 然后利用字典学习算法, 如 K 均值奇异值分解 (K-SVD)^[29]、随机逼近 (SPAMS)^[30]、双线性广义近似消息传递^[31] (BiG-AMP) 等求近似解, 在这些学习方法中 K-SVD 性能最差, 但所需迭代次数较低, SPAMS 在 SNR 较低的区域 (10 ~ 25 dB) 性能表现突出, 但迭代次数很高, 且性能会随着 SNR 增高逐渐衰退。Big-AMP 正好相反, 在 SNR 较高 (大于 25 dB) 的区域性能表现突出。文献[23]中, 作者对 Big-AMP 提出改进, 考虑到大规模 MIMO 中信道保持不变的相干时间 T 通常大于用户数量 K , 因此在字典学习之前先将观测信号矩阵 Y 映射到发送信号 X 所在的空间上, 改进方案在 SNR 较高 (大于 20 dB) 的区域性能优势突出。表 4 总结了 2 类信道估计方案的优缺点。

4 结束语

在大规模 MIMO 系统中, 采用数字基带预编码方案可以达到较好的性能, 但硬件开销很大。其中, 当系统中天线数很多或对噪声的消除要

求较高时应优先采用 RZF 预编码; 系统天线数较少或信道高度相关时, 应采用 ZF 预编码; 当系统对算法复杂度和性能都有较高要求, 应考虑采用 TPE 算法。模拟预编码方案可使用在成本不可观的情况下, 其中基于天线选择的方案对系统硬件成本要求最低。在对系统性能和硬件开销都有较高要求的情况下, 可以采用混合预编码方案, 其中 PZF 方案适用于多路数据流同时传输的情形, ZF-MRT 方案能灵活调节 RF 数, 可根据实际需要系统在性能和硬件开销间折中。

在信道估计中, 训练估计可利用压缩感知技术减少导频序列的数量进而减少导频污染, 适用于实时数据传输以及用户数量较少的场景。在盲估计中, 可以将估计问题建模为稀疏矩阵分解问题, 这类非凸优化问题一般难以求得最优解, 可利用字典学习方法求得近似解。在信道资源紧张时, 应优先考虑盲估计。

现有的大规模 MIMO 系统预编码技术的研究多局限于单天线用户场景, 有必要扩展到多天线用户场景。另外, 很多理论结果是基于瑞利衰落信道得出, 未来的研究工作有必要扩展到其他信道模型及实测信道。最后, 现有研究大多数基于静态场景, 对移动场景下的预编码技术研究较少。因此, 大规模 MIMO 系统预编码

▼表 3 不同混合预编码方案优缺点

预编码方案	优点	缺点
PZF	<ul style="list-style-type: none"> 支持多路数据流传输 功率增益大 	<ul style="list-style-type: none"> 不能调节 RF 链数目 性能受到 ZF 方案约束
ZF-MRT	<ul style="list-style-type: none"> 可以调节 RF 链数目 等效信道维数小, 计算复杂度低 	<ul style="list-style-type: none"> 需要牺牲系统性能换取更少的硬件开销 性能受到 ZF 方案约束

MRT: 最大比传输 ZF: 迫零 PZF: 移相器迫零 RF: 射频

▼表 4 2 类信道估计方案优缺点

估计方法	优点	缺点
训练估计	<ul style="list-style-type: none"> 估计准确度高 算法复杂度低 	<ul style="list-style-type: none"> 信道资源开销大 在用户数较多的场景会产生严重的导频污染 适合实时数据传输
盲估计	<ul style="list-style-type: none"> 不需要开辟额外的信道资源, 资源开销小 	<ul style="list-style-type: none"> 估计准确率低 字典学习算法收敛速度慢, 算法复杂度高 不能有效跟踪信道变化

的技术研究仍需进一步深入,未来的研究工作可针对以上几个方向展开。

参考文献

- [1] ZHANG C, LI Z, YAN F, et al. A Low-Complexity Massive MIMO Precoding Algorithm based on Chebyshev Iteration [J]. IEEE Access, 2017, (5):22545–22551. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2760881
- [2] ZHANG C, LU Z, HUANG Y, et al. Statistical Beamforming for FDD Massive MIMO Downlink Systems [C]// IEEE/CIC International Conference on. USA: IEEE, 2015:1–6. DOI: 10.1109/ICCChina.2015.7448643
- [3] MA J, ZHANG S, LI H, et al. Base Station Selection for Massive MIMO Networks With Two-Stage Precoding [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(5):598–601
- [4] GAO X, EDFORS O, RUSEK F. Linear Precoding Performance in Measured Very-Large MIMO Channels[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Vehicular Technology. USA:IEEE, 2011:1–5. DOI: 10.1109/VETEFC.2011.6093291
- [5] FENG C, JING Y, JIN S. Interference and Outage Probability Analysis for Massive MIMO Downlink with MF Precoding [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(2): 366–370. DOI: 10.1109/LSP.2015.2511630
- [6] ATAPATTU S, HARMAWANSA P, TELLAMBURA C, et al. Exact Outage Analysis of Multiple-User Downlink with MIMO Matched-Filter Precoding [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(12):2754–2757. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2749302
- [7] FENG C, JING Y. Modified MRT and Outage Probability Analysis for Massive MIMO Downlink under Per-Antenna Power Constraint[C]//Proceedings of the 17th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). USA:IEEE, 2016:3–6. DOI: 10.1109/SPAWC.2016.7536897
- [8] ZHU J, BHARGAVA V, SCHÖBER R. Secure Downlink Transmission in Massive MIMO System with Zero-Forcing Precoding [C]// Proceedings of the 20th Conference on European Wireless, 2014. Spain: VDE, 2014: 14–16
- [9] LYU T K. Capacity of Multi-User MIMO Systems with MMSE and ZF Precoding [C]// 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). USA: IEEE, 2016:1083–1084. DOI: 10.1109/INFCOMW.2016.7562264
- [10] MULLER A, COUILLET R, BJORNSON E, et al. Interference-Aware RZF Precoding for Multicell Downlink Systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(15):3959–3973. DOI: 10.1109/TSP.2015.2423262
- [11] MULLE A R, KAMMOU A, BJORNSON E, et al. Linear Precoding Based on Polynomial Expansion: Reducing Complexity in Massive MIMO (Extended Version) [J]. IEEE Journal Selected Topics Signal Process, 2014, 8(5): 861–875. DOI: 10.1186/s13638–016–0546–z
- [12] MUKUBWA E, SOKOYA O A, IICEY D S. Comparison and Analysis of Massive MIMO Linear Precoding Schemes in the Downlink [C]// 2017 IEEE Conference on AFRICON. USA: IEEE, 2017:187–191. DOI: 10.1109/ICC.2012.6364360
- [13] SIFAOU H, KAMMOU A, SANGUINETTI L, et al. Polynomial Expansion of the Precoder for Power Minimization in Large-Scale MIMO Systems[C]// 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2016:1–6. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510948
- [14] MULLER A, ABLA K A, BJORNSON E. Efficient Linear Precoding for Massive MIMO Systems Using Truncated Polynomial Expansion[C]//Proceedings of the 8th Conference on Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). USA:IEEE, 2014:273–276. DOI: 10.1109/SAM.2014.6882394
- [15] CHEN Y, BOUSSAKTA S, TSIMENIDIS C, et al. Low Complexity Hybrid Precoding in Finite Dimensional Channel for Massive MIMO Systems[C]// 2017 European Conference on Signal Processing Conference (EUSIPCO). USA:IEEE, 2017: 883–887. DOI: 10.1109/SAM.2014.6882394
- [16] XIA P, HEATH R W, GONZALEZ P N. Robust Analog Precoding Designs for Millimeter Wave MIMO Transceivers [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(11): 4622–4634. DOI: 10.1109/ICC.2012.6364360
- [17] ZHANG S, GUO C, WANG T, et al. On-Off Analog Beamforming for Massive MIMO [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, (99): 1–1. DOI: 10.1109/TVT.2018.2789661
- [18] ZHANG J, LI H, HUANG X, et al. User-Directed Analog Beamforming for Multiuser Millimeter-Wave Hybrid Array Systems[C]// Proceedings of the 85th Conference on Vehicular Technology Conference (VTC Spring). USA:IEEE, 2017:1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108387
- [19] MENDEZ R R R, RUSU C, GONZALEZ P N, et al. Hybrid MIMO Architectures for Millimeter Wave Communications: Phase Shifters or Switches[J]. IEEE Access, 2016(4):247–267. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2514261
- [20] MOLISCH A F, RATNAM V, HAN S, et al. Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9):134–141. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600400
- [21] LIANG L, XU W, DONG X. Low-Complexity Hybrid Precoding in Massive Multiuser MIMO Systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 653–656. DOI: 10.1109/LWC.2014.2363831
- [22] TANIGUCHI R, NISHIMORI K, KATAOKA R, et al. Evaluation of Massive MIMO Considering Real Propagation Characteristics in the 20 GHz Band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12):6703–6711. DOI: 10.1109/TAP.2017.2754441
- [23] ZHANG J, YUAN X, ZHANG Y. Blind Signal Detection in Massive MIMO: Exploiting the Channel Sparsity [J]. IEEE Transaction on Communications, 2017, 66(2): 700–712. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2761384
- [24] RAO X, LAU V K N. Distributed Compressive CSIT Estimation and Feedback for FDD Multi-User Massive MIMO Systems [J]. IEEE Transaction Signal Process, 2014, 62(12):3261–3271
- [25] BAJWA W U, HAUPT J, SAYEED A M, et al. Compressed Channel Sensing: A New Approach to Estimating Sparse Multipath Channels [J]. IEEE Proceedings, 2010, 98(6): 1058–1076. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2042415
- [26] MASOOD M, AFIFY L H, AI-NAFFOURI T Y. Efficient Coordinated Recovery of Sparse Channels in Massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(1):104–118. DOI: 10.1109/TSP.2014.2369005
- [27] LIAO A, GAO Z, WU Y. 2D Unitary ESPRIT Based Super-Resolution Channel Estimation for Millimeter-Wave Massive MIMO with Hybrid Precoding [J]. IEEE Access, 2017(5):24747–24757. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2768579
- [28] SRIDHAR V, GABILLARD T, MANIKAS A. Spatiotemporal-MIMO Channel Estimator and Beamformer for 5G [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2016, 15(12):8025–8038. DOI: 10.1109/TWC.2016.2610974
- [29] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: An Algorithm for Designing Overcomplete Dictionaries for Sparse Representation [J]. IEEE Transaction Signal Process. 2006, 54(11):4311–4322. DOI: 10.1109/TWC.2016.2610974
- [30] MARIA J, BACH F, PONCE J, et al. Online Learning for Matrix Factorization and Sparse Coding [J]. Journal of Machine Learning Research, 2010(11):19–60
- [31] PARKER J T, SCHNITER P, CEVHER V. Bilinear Generalized Approximate Message Passing Part I: Derivation [J]. IEEE Transaction on Signal Process, 2014, 62(22): 2014. DOI: 10.1109/TSP.2014.2357776

作者简介



张钰, 华北电力大学电气与电子工程学院信息与通信工程专业博士研究生在读; 主要从事5G毫米波通信中的预编码技术和5G信道建模与仿真研究工作。



赵雄文, 华北电力大学教授、博士生导师, 2002年获赫尔辛基工业大学无线电工程博士学位; 现主要从事5G毫米波信道建模研究和无线通信领域教学工作; 已发表论文110余篇, 其中SCI论文42篇。