MIMO 技术

zfzdr

2020 年 9 月 15 日起

目录

1 MIMO 预编码

1.1 点对点 MIMO 系统模型

$$y = Hx + z \tag{1}$$

其中，$y \in C^{N_r \times 1}$，$x \in C^{N_t \times 1}$，$z \in C^{N_r \times 1}$，发送端总能量为 $E\{x^H x\} = P$，噪声功率谱密度为 N_0，即 $E\{zz^H\} = N_0 I_{N_r}$，且

$$\begin{aligned} R_{yy} &= E\{yy^H\} \\ &= HR_{xx}H^H + N_0 I_{N_r} \end{aligned} \tag{2}$$

1.2 系统容量

$$\begin{aligned} I(x;y) &= H(x) - H(x|y) \\ &= H(y) - H(y|x) \\ &= H(y) - H(Hx + z|x) \\ &= H(y) - H(z|x) \\ &= H(y) - H(z) \end{aligned} \tag{3}$$

其中，z 是满足复高斯随机分布的多维向量，因此当且仅当 y 也满足复高斯随机分布时，上式取得最大值，且

$$\begin{aligned} H(y) &= log_2|\pi e R_{yy}| = log_2|\pi e HR_{xx}H^H + \pi e N_0 I_{N_r}| \\ H(z) &= log_2|\pi e N_0 I_{N_r}| \end{aligned} \tag{4}$$

于是，

$$I(x;y) = log_2 \left| I_{N_r} + \frac{HRxxH^H}{N_0} \right| \tag{5}$$

1.3 传输侧无 CSI

假设每根天线上的发送信号能量相等且相互独立，即 $R_{xx} = \frac{P}{N_t} I_{N_t}$，则

$$\begin{aligned} C &= log_2 \left| I_{N_r} + \frac{P}{N_t N_0} H H^H \right| \\ &= \sum_{i=1}^{N_t} log_2 (1 + \frac{P}{N_t N_0} \lambda_i) \end{aligned} \tag{6}$$

1.4 传输侧有 CSI

预编码提高信道容量

对信道矩阵 H 使用 SVD 分解，即 $H = U \Sigma V^H$，一般假设 $Nr > Nt$, 则

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{\lambda_{N_t}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

令调制后信号能量表示为 $\tilde{x}$，预编码后的发送信号能量为 $x = V^H \tilde{x}$, 则

$$\begin{aligned} y &= Hx + z \\ &= U \Sigma V^H V \tilde{x} + z \\ &= U \Sigma \tilde{x} + z \end{aligned} \tag{8}$$

$$U^H y = U^H U \Sigma \tilde{x} + U^H z => \tilde{y} = \Sigma \tilde{x} + \tilde{z} \tag{9}$$

上式展开为

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \vdots \\ \tilde{y}_{N_t} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{N_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{\lambda_{N_t}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \vdots \\ \tilde{x}_{N_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \\ \vdots \\ \tilde{z}_{N_t} \\ \vdots \\ \tilde{z}_{N_r} \end{bmatrix} \tag{10}$$

即

$$\tilde{y}_i = \sqrt{\lambda_i}\tilde{x}_i + \tilde{z}_i, i = 1, \cdots, r.\square\square\ r = N_t \tag{11}$$

原始的 MIMO 信道等效为 r 个 SISO 信道，每个 SISO 信道的信道容量可以表示为：

$$C_i(P_i) = log_2(1 + \frac{\lambda_i P_i}{N_0}) \tag{12}$$

其中，P_i 表示第 i 根天线上的信号能量，且

$$E\{x^H x\} = \sum_{i=1}^{N_t} E\{|x_i|^2\} = \sum_{i=1}^{N_t} P_i = P \tag{13}$$

于是，信道总容量为：

$$C = \sum_{i=1}^{N_t} C_i(P_i) = \sum_{i=1}^{N_t} log_2(1 + \frac{\lambda_i P_i}{N_0}) \tag{14}$$

可以通过注水算法优化功率分配，达到更大的信道容量，即

$$\begin{aligned} C &= \arg\max_{\{P_i\}} \sum_{i=1}^{N_t} C_i(P_i) = \sum_{i=1}^{N_t} log_2(1 + \frac{\lambda_i P_i}{N_0}) \\ s.t\ &\sum_{i=1}^{N_t} P_i = P \end{aligned} \tag{15}$$

最优解为

$$\begin{aligned} P_i^{opt} &= (\mu - \frac{N_0}{\lambda_i})^+, i = 1, \cdots, r \\ &\sum_{i=1}^{N_t} P_i = P \end{aligned} \tag{16}$$

1.5 MIMO 注水算法

1.6 经典预编码算法

参考文献 [**?**]

起源 MIMO 无线通信技术最早广泛应用于 WiFi 技术上（IEEE 802.11ac/n),WiMax 技术（IEEE 802.16e）,4G(LTE/LTE-A) 等系统。最早的 MIMO 思想来源于点对点的 MIMO 系统，接着发展出了 MU-MIMO, 每个用户配备一个单天线。

Algorithm 1: 注水算法

Step1: 迭代计算 p=1, 计算 $\mu = \frac{N_t}{r-\rho+1}$

Step2: 用 μ 计算 $\gamma_i = \mu - \frac{N_t N_0}{E_x \lambda_i}, i = 1, 2, \cdots, r-p+1$

Step3: 若分配到最小增益的信道能量为负值，即设

$\gamma_{r-p+1} = 0, p = p+1$，转至 Step1

若任意 γ_i 非负，即得到最佳注水功率分配策略

1.6.1 线性预编码

Matched Filter(MF)

$$W_{MF} = \sqrt{\alpha} H^H \tag{17}$$

ZF

$$W_{ZF} = \sqrt{\alpha} H (H^H H)^{-1} \tag{18}$$

RZF(或 MMSE)

$$W_{MMSE} = \sqrt{\alpha} H (H^H H + X + \lambda I_K)^{-1} \tag{19}$$

TPE

$$W_{TPE} = \sum_{j=0}^{J-1} w_j (H^H H)^j H^H \tag{20}$$

优缺点对比 优缺点如图1所示。

1.7 基于 AI 的预编码算法

1. *Kyeongbo Kong, Woo-Jin Song, Moonsik Min, Deep-learning-based precoding in multiuser MIMO downlink channels with limited feedback, 2008.0417*

   基于深度学习的均衡，反馈和预编码，下行 MU-MIMO 系统。基站侧发送预编码使用 transmitter DNN 实现，每个 receiver DNN 引入二值化层来模仿量化过程，从而使能端到端训练。由于二值化层的引入导致网络的梯度失真从而容易陷入局部极小值，网络训练过程中引入了辅

TABLE II
ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF THE MF, ZF, RZF, TPE, AND PZF PRECODING TECHNIQUES

SC precoding techniques	Advantages	Disadvantages
MF	-Near optimal performance if there are more BS antennas than users -Low computational complexity -Better performance at lower SNRs	-Unable to achieve full diversity at high spectral efficiency -Suffering from error floors for all positive multiplexing gains -Having lower achievable rate in the case of less BS antennas -Not robust against interuser interference
ZF	-Low computational complexity -Higher power efficient -Better performance at high SNRs -Decoupling a multi-user channel into independent single-user channels -Achieving a large portion of dirty paper coding capacity	-Noise amplification and power penalty if the channel is highly correlated -Unable to support too many users -Medium complexity
RZF	-Guaranteed optimality if the ratio between the SINR requirement and the average channel attenuation is the same for all users	-Requiring matrix inverse calculation, leading to high complexity -Suffering from error floors for all positive multiplexing gains
TPE	-Scalable computational complexity, thus computationally efficient -Balancing precoding complexity and system throughput -More suitable for real-time hardware implementation	-Lower order techniques having limited performance -Higher performance requiring considerably more hardware
PZF	-Highly desirable closed-form performanc -Low complexity -Facilitating multistream processing -Large power gain	-Spectral efficiency being tightly upper bounded by the ZF precoder

图 1: 优缺点对比

助训练网络作为教导网络，有效避免陷入局部极小值。与传统的线性预编码相比，该网络通过端到端训练达到了更高的和速率。

2. *Novel MMSE Precoder and Decoder Designs Subject to Per-antenna Power Constraint for Uplink Multiuser MIMO Systems, I-Tai Lu, Jialing Li and Enoch Lu, 2009*

   关于多用户 MIMO 上行预编码的文章，理论比较多。文中提到，最经典的点对点 MIMO 系统在发送总功率一定时，最优预编码矩阵有最优解，但是在每根天线的功率有限或扩展到多用户 MIMO, 闭式解不存在，对于 MU-MIMO，每个用户总功率有限时，可以通过两种方法寻找数值解，TCIO 和 GIA。

3. *Evolution of Uplink MIMO for LTE-Advanced*

   LTE 中上行 MIMO 的技术介绍

4. *Deep Learning based Hybrid Precoding for mmWave Massive MIMO system using ComcepNet, 2020.7*

   提出了新的预编码网络结构”ComcepNet “，该网络结合了复数卷积块和 Inception 网络的特征，展现了比 autoprecoder 更好的性能。

5. *Deep Learning Based Precoder Design in MIMO Systems with Finite-Alphabet Inputs,2020*

   有限元预编码

6. *Deep Learning for Distributed Channel Feedback and Multiuser Precoding in FDD Massive MIMO, 20.07*

   多用户信道估计和反馈问题可以视为一个分布式信源编码问题。与传统的每个用户独立估计信道信息不同，文章提出联合设计导频并且接收端使用 DNN 直接将接收导频映射为反馈 bit，然后基站将所有用户的反馈 bit 直接映射为预编码矩阵，可以显著低提高整机性能。文章进一步提出鲁棒化设计策略，并且泛化 DNN 结构使之适应可变用户和可变的反馈 bit。Numerical results show that the DNN-based approach with short pilot sequences and very limited feedback overhead can already approach the performance of conventional linear precoding schemes with full CSI.

7. *Deep Unfolding for Communications Systems: A Survey and Some New Directions,2019*

   本文综述了深度展开的原理，并讨论了其在通信系统中的最新应用，重点讨论了多天线 (MIMO) 无线系统中的检测和预编码以及纠错码的信念传播译码。

8. *Deep reinforcement learning approach to MIMO precoding problem: Optimality and Robustness, 2020*

   强化学习

9. *Model-Driven Deep Learning for Massive Multiuser MIMO Constant Envelope Precoding*

   常包络预编码设计可以显著降低硬件损耗和功率损耗，但是已有的常包络预编码算法计算复杂度高。文章提出使用模型驱动的方式将深度学习与 conjugate gradient algorithm 结合，原始迭代算法展开并添加可训练参数，通过数据学习有效的参数。仿真结果表明该网络能有效抑制多用户干扰和计算复杂度。

10.

2 Latex 语法学习

2.1 伪代码

http://hustsxh.is-programmer.com/posts/38801.html

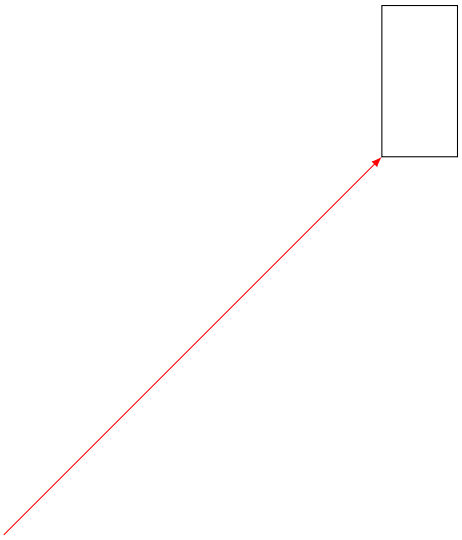
algorithmic 和 algorithmics algorithmic 和 algorithmicx，这两个包很像，很多命令都是一样的，只是 algorithmic 的命令都是大写，algorithmicx 的命令都是首字母大写，其他小写 (EndFor 两个大写)。下面是 algorithmic 的基本命令还有 algorithm2e,latex 的与 algorithm 相关的包常用的有几个，algorithm、algorithmic、algorithmicx、algorithm2e，可以大致分成三类，或者说三个排版环境。最原始的是使用 algorithm+algorithmic，这个最早出现，也是最难用的，需要自己定义一些指令。第二个排版环境是 algorithm+algorithmicx，algorithmicx 提供了一些宏定义和一些预定义好了的环境 (layout)，指令类似 algorithmic。第三个是 algorithm2e，只需要一个包，使用起来和编程的感觉很像，也是我更倾向使用的包。下面是使用 algorithm2e 的例子。[1]

2.2 超链接

需要的宏包 hyperref,

2.3 插入图片

2.4 tikz 绘图



```
1 public class Main {
2     public static void main(String[] args)
3     {
4         System.out.println("Hello,World");
5     }
6 }
```