

实验 2: MIMO 系统设计

whh allesgutewh@gmail.com

1 实验内容

1. 解释 MIMO 技术的基本原理。
2. 实现 MIMO 通信仿真系统设计。
3. 采用 LMMSE 接收机，绘制误码率曲线。
4. 扩展内容：采用 MIMO 空时码或其他技术，分析其对误码率的改进；
5. 扩展内容：加入信道编解码，分析其对误码率的改进。

2 实验原理

本实验用到了实验 1 中的 QPSK 调制解调和信道编解码技术，信道采用与实验一相同的瑞利衰落加 AWGN，由于实验 1 对上述内容已有较详细介绍，本文不再赘述。该部分仅介绍本实验中用到的“新技术”。

2.1 MIMO 技术

MIMO 技术 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 系统，该技术最早是由 Marconi 于 1908 年提出的，它利用多天线来抑制信道衰落。信道容量随着天线数量的增大而线性增大。也就是说可以利用 MIMO 信道成倍地提高无线信道容量，在不增加带宽和天线发送功率的情况下，频谱利用率可以成倍地提高。利用 MIMO 技术可以提高信道的容量，同时也可以提高信道的可靠性，降低误码率。前者是利用 MIMO 信道提供的空间复用增益，后者是利用 MIMO 信道提供的空间分集增益。[1]

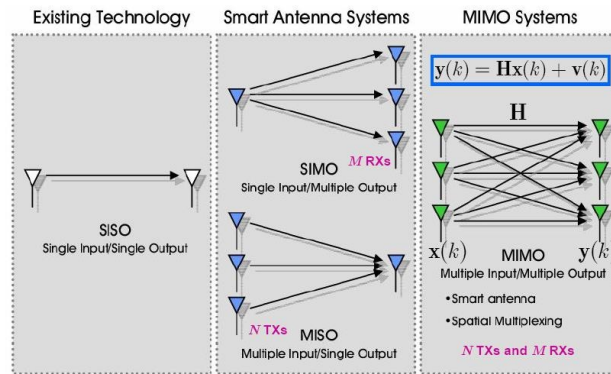


图 1: MIMO 基本模型 [2]

如图1所示，MIMO 技术有四个基本模型——单发单收 (SISO)、单发多收 (SIMO)、多发单收 (MISO)、多发多收 (MIMO)。根据香农定理，SISO 的信息论容量受限于链路信噪比，由

$$C = \log_2(1 + \gamma)(bps/Hz)$$

其中 $SNR = \gamma = P_T/\sigma_v^2$, 每提升单位 bps/Hz 需要增加几倍的发射功率; 对于 MISO 和 SIMO, 天线组提供发射/接收分集对抗衰落, 其容量 $C = \log_2(1+k\gamma)(\text{bps}/\text{Hz})$ 相对于 SISO 成慢的对数增长; 对于 MIMO, 双天线组提供了发射和接收分集, 其容量 $C = \log_2(1+MN\gamma)(\text{bps}/\text{Hz}) \approx Q\log_2(1+\gamma)(\text{bps}/\text{Hz})$ 相对于 MISO 和 SIMO 成对数增长, 相对 SISO 成线性增长。由此可见, 增加天线数量是提高信道容量的有效手段。

由于引入了空间分集, 不可避免的增大了信道间的干扰, 此时要考虑在接收端考虑信道估计选择合适的接收方式, 同时对编码过程进行优化, 选择将编码技术与天线阵技术结合的空时码。

2.2 LMMSE 接收机

一般情况下, 信号的接收模型可以表示为 $y = Hx + n$, 其中 y 表示接收信号, x 表示发送信号, H 为信道传输矩阵, n 为加性信道噪声。

在信道估计中, 常见的有 LS (最小二乘) 估计和 MMSE (最小均方) 估计两种方法; MMSE 算法是在 LS 算法的基础上发展的, 主要目的是为了消除噪声的影响, 在性能上优于 LS 估计, 但复杂度过高, 特别是矩阵的求逆过程是相当的复杂, 在实际应用中难以实现。因此引入计算复杂度相对于 MMSE 较小的 LMMSE 算法, 其估计准则如下 [3]:

$$H_{MMSE} = \arg \min_H E\|H - \hat{H}\|$$

可简化为 $\hat{H}_{MMSE} = R_{HH}(R_{HH} + \sigma_n^2(XX^H)^{-1})^{-1}\hat{H}_{LS}$, 其中 R_{HH} 表示信道的自相关矩阵, σ_n^2 为高斯白噪声方差。为了降低复杂度, 用信号统计均值 $E\{(XX^H)^{-1}\}$ 代替 $(XX^H)^{-1}$, 即 $E\{(XX^H)^{-1}\} = E(|\frac{1}{X}|^2)I$, 故 LMMSE 估计可以表示为:

$$\hat{H}_{LMMSE} = R_H(R_{HH} + I\frac{\beta}{SNR})^{-1}\hat{H}_{LS}$$

式中 β 的取值与调制方式有关, 当调制方式为 QPSK 时, 取为 1, 16QAM 时为 $\frac{17}{9}$ 。

2.3 Space-Time Coding 空时码

空时编码是 MIMO 技术领域的一个研究热点。常见的空时码有空时块码 (STBC)、空时格码 (STTC)。空时码的主要思想是利用空间和时间上的编码实现一定的空间分集和时间分集, 从而提高系统抗衰落性能、降低误码率。[1] 其本质是将信号经过给正交编码后由多根天线发送, 由于经过正交编码后的信号相互独立, 所以在接收端可以容易的将信号区别开来。在接收端只需进行简单线性合并即可获得发送信号。

下面以最简单的两天先发送分集为例进行介绍, 这一编码方式称为 Alamouti STBC 编码。它将发送信号经过下述变换映射为发送信号矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$

则天线 1 和 2 的发送信号向量分别为 $\mathbf{x}^1 = [x_1, -x_2^*]$, $\mathbf{x}^2 = [x_2, x_1^*]$, 显然, 两路信号相互正交, 即 $\mathbf{x}^1 \cdot (\mathbf{x}^2)^H = x_1x_2^* - x_2^*x_1 = 0$; 若采用两发一收的系统, 接收端相邻两个符号周期接收到的信号可表示为:

$$\begin{cases} r_1 = h_1x_1 + h_2x_2 + n_1 \\ r_2 = -h_1x_2^* + h_2x_1^* + n_2 \end{cases}$$

其中 n_1 、 n_2 分别表示第一、二个符号的 AWGN 样值。将两天线发送信号序列的正交性推广到多个发送天线可以得到一般的正交 STBC 设计方法，以获得完全的分集增益。其接收机译码结构如图2所示。

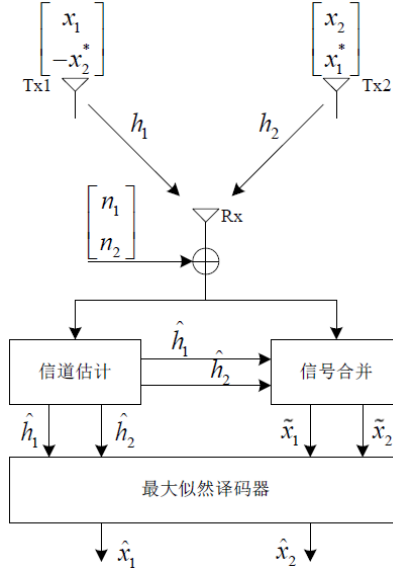


图 2: 2 发 1 收空时码译码结构 [2]

3 仿真实验细节

本实验仿真第一阶段包括 MIMO 系统设计和 LMMSE 接收，使用了实验一中的 QPSK 调制解调方式，同时使用瑞利衰落信道并加入高斯白噪声；第二阶段加入了空时码和信道编码以进一步降低误码率提高系统可靠性。

3.1 MIMO 系统设计

本次仿真实验选用 4×4 MIMO 技术，第一阶段仅使用空分复用技术，信道使用与实验一相同的瑞利衰落加高斯白噪声，接收端使用 LMMSE 接收机。

具体流程为：

- 随机信号生成;
- 串并变换将信号分配到四个发射天线;
- 对每个天线的信号使用 QPSK 方式调制后发射;
- 经过瑞利衰落信道并添加高斯白噪声;
- 4×4 MIMO 的 LMMSE 接收;
- 对接收到信号进行 QPSK 解调;
- 将四个接收天线的解调信号进行并串变换恢复原始序列，进行误码分析。

其中，为了增强程序可读性，QPSK 的调制解调部分将实验一的程序封装成函数；瑞利衰减参数 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 也与实验一相同，针对高斯白噪声的信噪比进行误码分析。

第二阶段加入了空时码和信道编码。利用空时码的正交性代替简单的空分复用，提高可靠性；同时使用信道纠错编码进一步降低误码率。具体流程修改为：

- 随机信号生成;
- 串并变换将信号分配到四个发射天线;
- 信道编码;
- QPSK 调制;
- STBC 编码后发送至信道;
- 经过瑞利衰落信道并添加高斯白噪声;
- 对接收到信号依次进行最大似然解码、QPSK 解调、信道解码;
- 将四个接收天线的解调信号进行并串变换恢复原始序列, 进行误码分析。

3.2 LMMSE (线性最小均方误差) 接收机

由于本实验使用的是 4×4 MIMO 技术, 对每组发射信号对应的接收信号的 H 阵是一个 4×4 的方阵, 该信道模型可描述为 [4]

$$Y_{4 \times 1} = H_{4 \times 4} X_{4 \times 1} + N_{4 \times 1}$$

$$N \sim CN(0, \sigma^2 I_4)$$

$$E[X] = 0_4, E[X^2] = I_n$$

其中 X 表示发送端发送的信号, H 表示信道传输矩阵, σ^2 表示噪声平均功率, Y 表示接收端接收到的信号。

基于 LMMSE 的原理, 对其进行检测, 有检测矩阵

$$D = H^H (H H^H + \sigma^2 I_4)^{-1}$$

则接收机接收信号对应的原始信号为 $\hat{X} = DY$, 其中 \hat{X} 表示 LMMSE 接收机恢复得出的发送信号值, Y 表示接收机接收到的实际信号。

3.3 空时编码

将两发一收的 Alamouti STBC 编码原理推广到四发射天线, 将四根天线传输的信号分别表示为 x_1, x_2, x_3, x_4 , 考虑到 QPSK 调制信号为复数, 其信号发送矩阵为 [5]

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & -x_3 & -x_4 & x_1^* & -x_2^* & -x_3^* & -x_4^* \\ x_2 & x_1 & x_4 & -x_3 & x_2^* & x_1^* & x_4^* & -x_3^* \\ x_3 & -x_4 & x_1 & x_2 & x_3^* & -x_4^* & x_1^* & x_2^* \\ x_4 & x_3 & -x_2 & x_1 & x_4^* & x_3^* & -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$$

该矩阵有 8 列, 表示四天线上信号需要八个符号才能完成传输, 由此可见 STBC 通过牺牲编码速率换取更高的可靠性。

为了便于译码，实验过程中假定在每组信号发射周期 (8 个符号周期) 内信道处于平坦衰落即 H 阵不变。

解码时要先根据信道特性得到每个天线接收到的信号，再根据 ML(最大似然) 进行译码，译码的同时可以进行 QPSK 解调，方法是译码过程中将结果映射到 QPSK 调制后的信号上，译码完成后得到的就是 QPSK 解码后的形式。

3.4 信道编码

本实验中采用与实验 1 相同的 (7, 4) 汉明码进行信道编码，原理及具体实现细节见实验 1 报告，此处不再赘述。

具体实现过程中针对实验 1、2 两系统的接收信号差异进行了微调。

4 仿真结果及分析

仿真阶段分别对仅使用空分复用技术 LMMSE 接收机误码率、使用 STBC 误码率、使用 STBC 并加入 (7, 4) 汉明码信道编码误码率进行分析，三阶段得到的结果如图3、4、5所示。其中每次仿真生成的随机序列信号数量为 16000 个，可认为实验结果可靠。

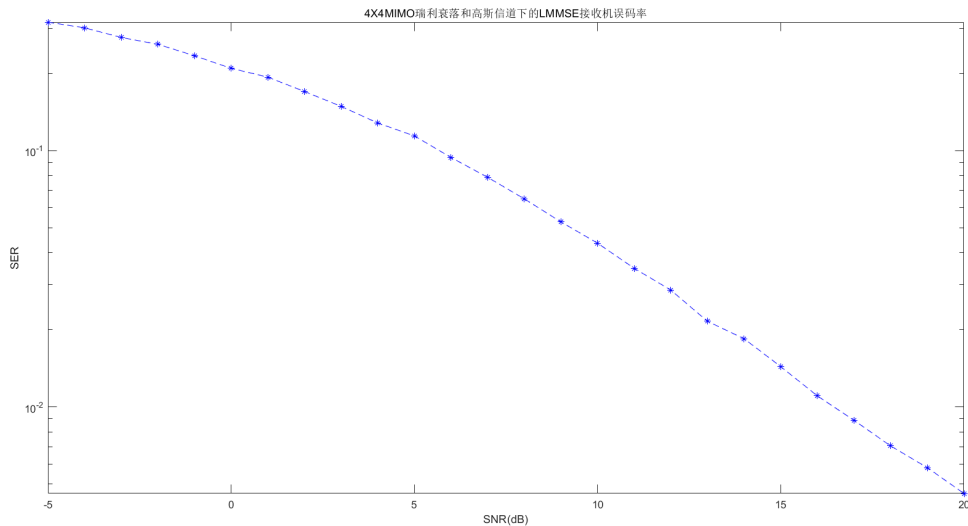


图 3: LMMSE 接收机误码率

图3展示了 4×4 MIMO 系统仅使用空分复用技术，利用 LMMSE 接收机得到的误码性能，其中 SNR 以 dB 为单位，图中 SNR 范围为 -5dB~20dB。由图可知提高 SNR 可显著降低误码率，在 SNR 达到 20 时误码率数量级下降至 10^{-2} 。

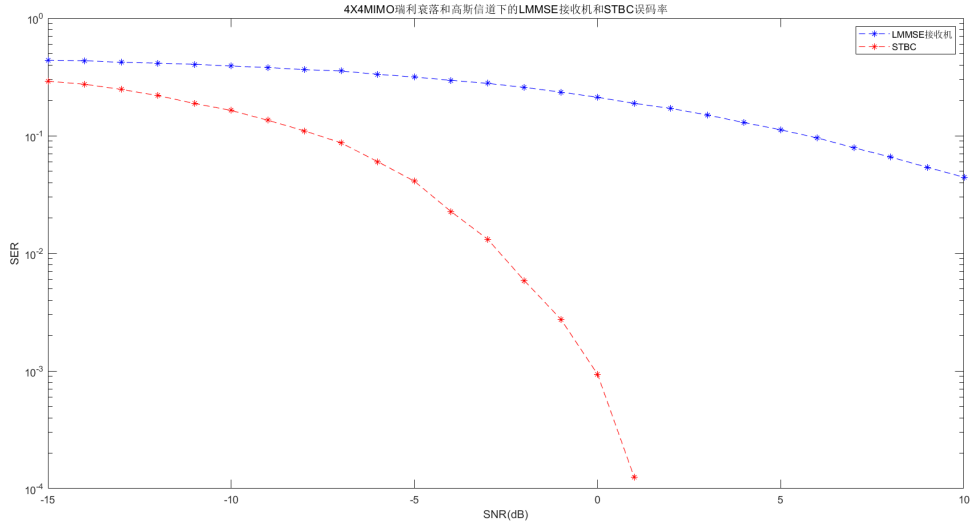


图 4: LMMSE 接收机与 STBC 误码率对比

图4展示了该系统使用 STBC 的误码率与上一阶段不使用空时码误码率对比, 其中蓝色曲线为第一阶段绘制的不加空时码、使用 LMMSE 接收机的系统误码率, 红色曲线为第二阶段使用了 STBC 的系统误码率, 由于加入 STBC 的系统在 SNR 为 5 时降低到非常低的水平, 故此图绘制的 SNR 范围选为-15dB~10dB, 由仿真结果可知, STBC 误码率显著低于不使用空时码的情况, 但系统为此付出的代价是需要用八倍于第一阶段的时间发送相同的信号数量, 体现了时间性能与可靠性的矛盾。

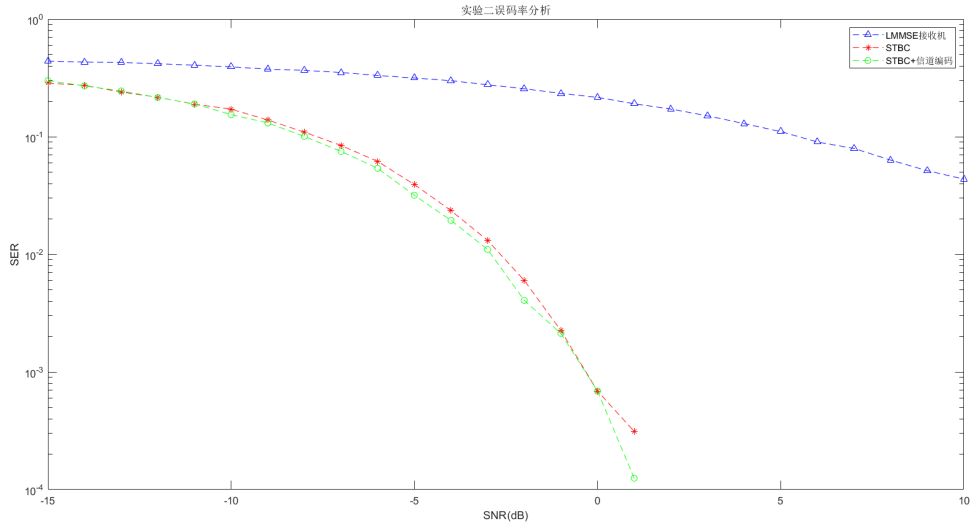


图 5: 实验二三种误码率对比

图5展示了该系统在图4的基础上在 STBC 编码的同时加入信道编码后的误码率对比, 其中蓝色曲线为第一阶段绘制的不加空时码、使用 LMMSE 接收机的系统误码率, 红色曲线为第二阶段使用了 STBC 的系统误码率, 绿色曲线是在红色曲线系统的基础上增加信道编码后的系统误码率, 此图绘制的 SNR 范围仍为-15dB~10dB, 由仿真结果可知, 在加入信道编码后误码率进一步下降, 但同时信道编码也增加了要传输的信号序列长度, 接收端复杂度也进一步提升, 体现了系统可靠性与传输速率和接收机复杂度的矛盾。

5 总结与反思

通过本实验仿真可以得到 MIMO 技术通过空分复用技术可以大大提升系统容量，在合理设计接收机信道估计的情况下能达到不错的误码性能；引入 STBC 和信道编码均能提升系统的可靠性，但随之而来的是传输速率的降低。STBC 的一大优势在于利用了天线阵和编码技术结合的思想，其时间性能虽有所降低，但误码性能提升明显且在接收端仅需进行线性运算，复杂度要低于需要引入矩阵求逆的 LMMSE 接收机。

实验过程中因为对矩阵运算和 MATLAB 语言特性的不熟练走了许多弯路，尤其是在对 STBC 进行译码过程中，虽然理论上其计算时间是线性的，但由于接收矩阵变换非常复杂，加之多路信号要用到高维矩阵，无数次遭受等式左右维度不匹配的问题，最终不得不采取一组信号作为一个循环的方式，一步步检查各阶段输出，经过数日调试最终成功译码，但每个信号周期一次循环的方法使得代码运行时间较长，由于涉及高维矩阵运算，加上对 STBC 译码过程理解不够透彻，虽进行多次修改，目前仍没有找到更加简洁优雅的方法。

参考文献

- [1] “实验二：mimo 系统设计,” 上海交通大学电子工程系. [Online]. Available: https://oc.sjtu.edu.cn/courses/31108/files/2643987?module_item_id=446705
- [2] 刘涛, “第五章 4G&5G 无线蜂窝通信系统及关键技术,” 上海交通大学电子工程系, 2021. [Online]. Available: https://oc.sjtu.edu.cn/courses/31108/files/2707548?module_item_id=452347
- [3] 练柱先, 余江, and 徐丽敏, “一种改进的 LMMSE 信道估计算法,” 计算机科学, 2014.
- [4] “MIMO-MMSE 检测几种表达.” [Online]. Available: https://blog.csdn.net/qq_23152205/article/details/108865536
- [5] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM 无线通信技术及 MATLAB 实现*. 电子工业出版社, 2013, ch. 10.