

Research on Channel Detection Algorithm Based on Massive MIMO Communication System

Junhui Gao, Mengjiao Zhang, Fan Cao, Jiawei Wang, Feng Ji

School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu
Email: 213133243@seu.edu.com

Received: Apr. 5th, 2017; accepted: Apr. 21st, 2017; published: Apr. 25th, 2017

Abstract

Channel detection is an indispensable module in massive MIMO communication systems, which often determines the performance of the entire communication system. The main function of channel detection is to deal with the channel matrix obtained by channel estimation to get the signal vector sent by the users. In this paper, we introduce the maximum ratio combining algorithm and the linear minimum mean square error detection algorithm based on QR decomposition, and establish the system model to simulate the uplink data transmission. The simulation results show that the performance of the linear minimum mean square error algorithm based on QR decomposition is superior to the maximum ratio combining algorithm.

Keywords

Massive MIMO, Channel Detection Algorithm, QR Decomposition

基于大规模MIMO的信道检测算法研究

高君慧, 张梦娇, 曹凡, 汪佳玮, 吉峰

东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京
Email: 213133243@seu.edu.com

收稿日期: 2017年4月5日; 录用日期: 2017年4月21日; 发布日期: 2017年4月25日

摘要

信道检测是大规模多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)系统中不可缺少的重要模块,

往往决定着整个通信系统性能的好坏。信道检测的主要作用是将信道估计后得到的信道矩阵进行运算处理,从而得到发送的信号矢量。本文介绍了硬件可实现的最大比合并检测算法和基于QR分解的线性最小均方误差检测算法,并建立系统传输模型,对上行链路数据传输过程进行仿真。仿真结果表明,基于QR分解线性最小均方误差算法的性能要优于最大比合并算法。

关键词

大规模MIMO, 信道检测算法, QR分解

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类进入 21 世纪以来,互联网产业和移动通信技术飞速发展。为适应移动互联网和物联网时代终端设备和通信业务量的爆炸性增长,人们掀起了对第五代移动通信系统(fifth-generation, 5G)的研究热潮。其中,大规模多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术,作为第五代移动通信系统最有潜力的无线传输技术之一,引起了国内外学术界和工业界的极大关注[1]。大规模 MIMO 技术,是指在同一时频资源条件下基站端配置的天线数远远多于小区内用户数的技术。理论研究表明,大规模 MIMO 技术在提高系统的数据传输效率、频谱效率、能量效率方面有着巨大优势[2] [3],势必会在下一代移动通信系统中发挥着巨大作用。

在大规模 MIMO 系统中,随着基站端天线数量成倍增长,基站端各个处理模块的硬件开销和运算处理复杂度也相应的增加。其中,作为基站端基带数据处理的关键模块, MIMO 检测的算法设计与实现方案将显著影响系统性能。在众多 MIMO 检测算法中,线性检测器由于其较低的实现成本和复杂度,得到了广泛使用。然而在大规模 MIMO 系统中,线性检测器中的矩阵求逆操作复杂度进一步提高,大大增加了硬件实现的难度。因此,选择和设计适合大规模 MIMO 系统的检测算法是非常重要的。

本文重点研究大规模 MIMO 系统中硬件可实现的线性检测算法。首先搭建大规模 MIMO 系统传输模型,然后结合系统模型详细介绍硬件友好的最大比合并检测算法和基于 QR 分解的线性最小均方误差检测算法,最后对上行链路进行仿真,比较分析两种算法的性能。

本文中,所用符号的相关说明见表 1。

2. 系统模型

如图 1 所示,本文考虑基于 TDD 模式的单小区多用户大规模 MIMO 系统,系统采用 OFDM 调制技术,对应的子载波数为 N 。假设基站配备 M 根天线服务于同一时频资源下的 K ($K \ll M$) 个随机分布的单天线用户。对于上行链路,基站端在子载波 n 处接收到的 $M \times 1$ 维信号矢量为 $\mathbf{y}_n = [y_{1,n}, y_{2,n}, \dots, y_{M,n}]^T$,其表达式可以表示为:

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{z}_n \quad (2.1)$$

其中 \mathbf{H}_n 表示 $M \times K$ 维的上行信道矩阵; $\mathbf{x}_n = [x_{1,n}, x_{2,n}, \dots, x_{M,n}]^T$ 表示 $K \times 1$ 维归一化的各用户发送信号矢量; $\mathbf{z}_n = [z_{1,n}, z_{2,n}, \dots, z_{M,n}]^T$ 表示 $M \times 1$ 维的加性复高斯白噪声矢量,其分量满足独立同分布,均值为 0,方差为 σ^2 。

Table 1. Symbol description
表 1. 符号说明

符号	符号说明
$(\cdot)^H$	矩阵或矢量的共轭转置
$(\cdot)^T$	矩阵或矢量的转置
$(\cdot)^{-1}$	矩阵的逆矩阵
I_K	K 行 K 列的单位矩阵

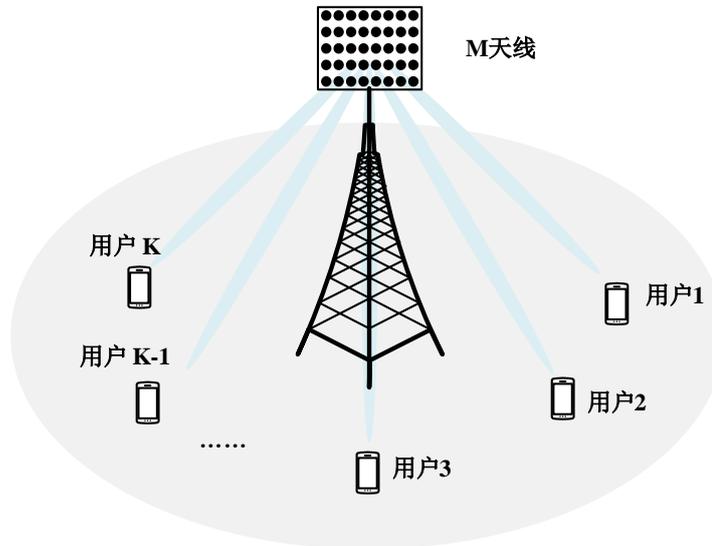


Figure 1. A single-cell multi-user massive MIMO system
图 1. 单小区多用户大规模 MIMO 系统场景图

3. 大规模 MIMO 系统中的线性检测算法

对于线性检测器，需要确定其加权矩阵，然后将加权矩阵与接收数据相乘来达到信道检测恢复原始数据的目的。其中，比较常见的线性检测算法包括最大比合并(Maximum-Ratio Combining, MRC)检测、迫零(Zero Forcing, ZF)检测与线性最小均方误差(Liner Minimum Mean Square Error, LMMSE)检测。最大比合并检测算法形式简单，易于实现，但性能较差；迫零检测算法与最大合并比算法相比，性能较优，但放大了噪声对传输系统的影响；线性最小均方误差算法性能要优于前两者。因此本文选择了结构最为简单的最大比合并和性能最优的线性最小均方误差这两种检测算法作为研究对象，使其适应于大规模 MIMO 系统的应用实现。

3.1. 最大比合并(MRC)检测算法

本文假设，基站侧进行信道估计后，在子载波 n 处得到的信道估计值为 $\tilde{\mathbf{H}}_n$ 。根据信道估计的结果，当基站端采用 MRC 检测算法时，在子载波 n 处对应的加权矩阵为：

$$\mathbf{W}_{\text{lmmse},n} = (\tilde{\mathbf{H}}_n)^H \quad (3.1)$$

从 3.1 式可以看出，采用 MRC 检测算法得到的加权矩阵 $\mathbf{W}_{\text{lmmse},n}$ 结构简单，只是对信道矩阵进行共轭转置，从大规模 MIMO 系统的硬件设计难易程度分析，这种检测算法易于实现。

3.2. 基于 QR 分解的线性最小均方误差(QR-LMMSE)检测算法

根据信道估计的结果，对于传统的 LMMSE 检测器，在子载波 n 处对应的加权矩阵 $\mathbf{W}_{\text{lmmse};n}$ [4]为：

$$\mathbf{W}_{\text{lmmse};n} = \left[\left(\tilde{\mathbf{H}}_n \right)^H \tilde{\mathbf{H}}_n + \sigma^2 \mathbf{I}_K \right]^{-1} \left(\tilde{\mathbf{H}}_n \right)^H \quad (3.2)$$

其中， \mathbf{I}_K 表示 $K \times K$ 的单位矩阵。

从 3.2 式可以看出，为了得到加权矩阵需要进行矩阵求逆的操作，对于大规模 MIMO 系统而言，随着基站端天线数目的增长，上式所对应的矩阵求逆的维度也会进一步增加。因此，对于采用 LMMSE 检测器的系统无论是硬件开发的难度，还是硬件资源的成本都会随之大大增加，从而一定程度限制了大规模 MIMO 系统的物理可实现性。

本文在结合硬件成本以及实现的复杂度两方面，根据文献[5] [6] [7]利用矩阵的 QR 分解来解决矩阵求逆的问题。文献[8] [9]给出了 LMMSE 平方根的广义公式，依据本文的系统模型，基于 QR 分解的加权矩阵 $\mathbf{W}_{\text{lmmse};n}$ 可以重写如下：

令

$$\mathbf{W}_{\text{lmmse};n} = \left(\mathbf{B}^H \mathbf{B} \right)^{-1} \left(\tilde{\mathbf{H}}_n \right)^H \quad (3.3)$$

其中

$$\mathbf{B}^H \mathbf{B} = \left(\tilde{\mathbf{H}}_n \right)^H \tilde{\mathbf{H}}_n + \sigma^2 \mathbf{I}_K \quad (3.4)$$

通过矩阵的 QR 分解，矩阵 \mathbf{B} 可以表示为：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_n \\ \sigma \mathbf{I}_K \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{Q}_2 \end{bmatrix} \mathbf{R} \quad (3.5)$$

其中 $(M+K) \times K$ 维的矩阵 \mathbf{Q} 是一个正交阵可以分解为 $M \times K$ 维的矩阵 \mathbf{Q}_1 和 $K \times K$ 维的矩阵 \mathbf{Q}_2 ，矩阵 \mathbf{R} 是一个 $K \times K$ 维的上三角矩阵。从 3.5 式，可以得到：

$$\sigma \mathbf{I}_K = \mathbf{Q}_2 \mathbf{R}; \quad \mathbf{R}^{-1} = \frac{\mathbf{Q}_2}{\sigma} \quad (3.6)$$

因此，将 3.5 式以及 3.6 式带入 3.3 式，加权矩阵 $\mathbf{W}_{\text{lmmse};n}$ 可以写为：

$$\mathbf{W}_{\text{lmmse};n} = \frac{\mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_1^H}{\sigma} \quad (3.7)$$

基于 3.3 式和 3.7 式，在系统硬件实现阶段，可采用文献[5] [10]提出的实际硬件可实现的方法作为硬件实现方案，该方案基于改进的 Gram-Schmidt 正交化方法来计算矩阵 $\mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2$ 。

无论采用上述何种检测算法，上行链路中一旦获得加权矩阵，则发送信号的估计值 $\tilde{\mathbf{x}}_n$ 便可得到，结果如 3.8 式所示：

$$\tilde{\mathbf{x}}_n = \mathbf{W}_{\text{lmmse};n} \mathbf{y}_n \quad (3.8)$$

4. 仿真分析

4.1. 仿真参数设置

在本节中，将对大规模 MIMO 系统进行上行链路仿真，相关的系统仿真参数如表 2 所示。其中，采用的仿真信道模型为空间信道模型[11] (Spatial Channel Model, SCM), SCM 信道模型基本参数如表 3 所示。

Table 2. System simulation parameters
表 2. 系统参数标准

参数	符号	值
基站天线数	M	128
移动台(用户)数目	K	0-11
系统采样率	f_s	30.72 MS/S
系统带宽	B	20 MHZ
子载波间隔	Δf	15 KHZ
FFT 大小	N_{FFT}	2048
数据子载波	N_{sc}^D	1200
保护子载波	N_{sc}^G	848
每个时隙 OFDM 符号数	N_s	7
调制方式	-	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
循环前缀长度	L_t	160 (符号 0) 144 (符号 1-6)

Table 3. SCM channel model parameter settings
表 3. SCM 信道模型参数设置

仿真参数	参数值
场景	Suburban Macro
基站天线	128
用户端天线数	1
用户数	12
基站天线间隔	0.5λ
路径数目	6

4.2. 仿真流程

具体的上行链路仿真过程如下：

针对 128×12 大规模 MIMO 系统，本文参考 LTE 标准，系统上行链路主要采用 OFDM 技术，其数据处理流程如图 2 所示。在上行链路中，从一个标准的无线帧开始时，作为发送端的用户首先产生先导同步序列(Primary Synchronization Signal, PSS)，然后依据数据子帧中 OFDM 符号种类进行相应操作。若当前 OFDM 符号类型为上行导频，则用户生成导频信号，并完成相应的资源映射。若当前 OFDM 符号类型为上行数据，则产生原始的比特数据，并进行 BPSK/QPSK/16-QAM/64-QAM 调制，调制后的数据同样映射到指定位置。当先导同步序列、导频以及上行数据准备就绪后，系统进行 OFDM 调制。调制后的信号通过射频经天线送入无线信道。基站端作为接收端，通过天线以及相关射频接收空中信号，并将接收信号先通过同步模块，完成用户与基站的帧同步，同步之后的数据进行 OFDM 解调，接着根据系统帧结构，若当前 OFDM 符号为导频则进行信道估计，若为上行数据则分别进行 MRC 和基于 QR 分解的 LMMSE 两种信道检测，最后将检测后的数据进行 BPSK/QPSK/16-QAM/64-QAM 解映射还原出原始比特流数据。

4.3. 仿真结果与分析

仿真结果如图 3 和图 4 所示：在仿真中，用户 0-2 均采用 BPSK 调制，用户 3-5 均采用 QPSK 调制，用户 6-8 均采用 16QAM 调制，用户 9-11 均采用 64QAM 调制。在不考虑信道编解码的条件下，仿真结果表明：

在相同的 SNR 条件下，采用四种调制方式得到的误码率关系为：

$$BER_{BPSK} < BER_{QPSK} < BER_{16QAM} < BER_{64QAM} ;$$

在相同的 SNR 和相同的调制方式下，采用两种检测算法得到的误码率关系为：

$$BER_{MRC} > BER_{QR-LMMSE} ;$$

在得到相同的误码率和采用相同的调制方式下，采用两种检测算法时所需的 SNR 关系为：

$$SNR_{MRC} > SNR_{QR-LMMSE} ;$$

综合以上结果说明，基于 QR 分解线性最小均方差检测算法的性能要优于最大比合并检测算法。

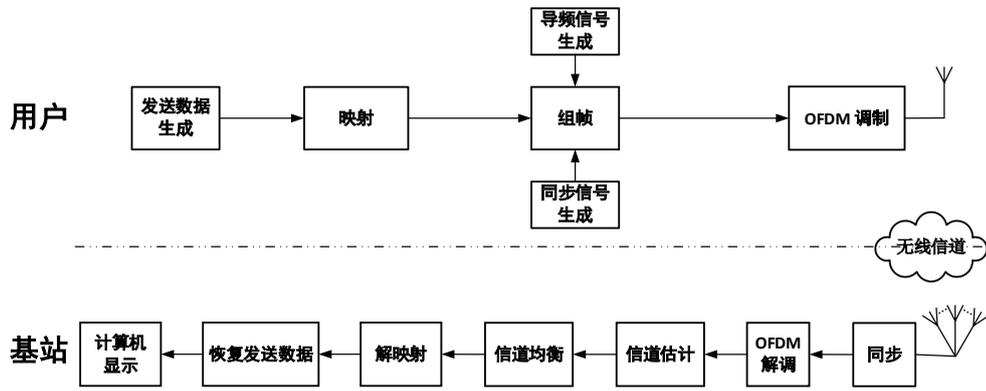


Figure 2. Block diagram of uplink data transmission
图 2. 上行链路数据传输流程框图

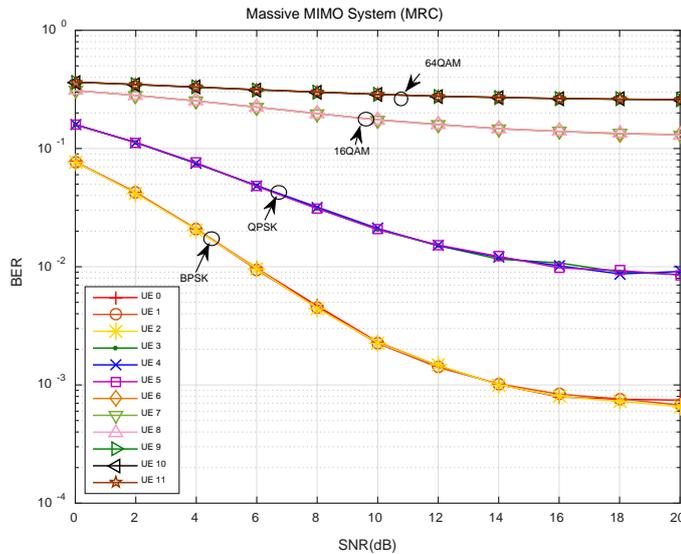


Figure 3. Numerical results of uplink data transmission with the maximum ratio combining algorithm
图 3. 采用最大比合并算法的上行链路仿真图

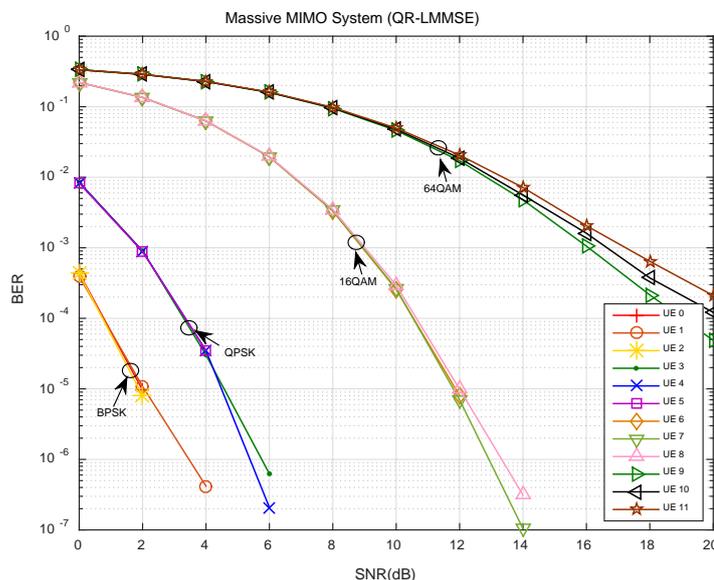


Figure 4. Numerical results of uplink data transmission with the linear least squares error algorithm

图 4. 采用基于 QR 分解的线性最小均方误差算法的上行链路仿真图

5. 结束语

本文建立了基于大规模 MIMO 系统的无线传输模型，具体研究了硬件可实现的最大比合并检测算法和基于 QR 分解的线性最小均方误差检测算法，并进行了上行链路仿真比较分析了两种算法的性能，仿真结果表明，基于 QR 分解的线性最小均方误差检测算法的性能要优于最大比合并检测算法。

参考文献 (References)

- [1] Andrews, J.G., Buzzi, S., Choi, W., *et al.* (2014) What Will 5G Be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **32**, 1065-1082. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>
- [2] Marzetta, T.L. (2010) Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **9**, 3590-3600. <https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092>
- [3] Larsson, E.G., Edfors, O., Tufvesson, F., *et al.* (2014) Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. *IEEE Communications Magazine*, **52**, 186-195. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761>
- [4] Verdu, S. (1998) Multiuser Detection. Cambridge University Press, Cambridge.
- [5] Myllyla, M., Hintikka, J.M., Cavallaro, J.R., *et al.* (2005) Complexity Analysis of MMSE Detector Architectures for MIMO OFDM Systems. *Conference Record of the 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 30 October-2 November 2005, 75-81. <https://doi.org/10.1109/acssc.2005.1599705>
- [6] Echman, F. and Owall, V. (2005) A Scalable Pipelined Complex Valued Matrix Inversion Architecture. *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, **5**, 4489-4492.
- [7] Karkooti, M., Cavallaro, J.R. and Dick, C. (2005) FPGA Implementation of Matrix Inversion Using QRD-RLS Algorithm. *Conference Record of the 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 30 October-2 November 2005, 1625-1629. <https://doi.org/10.1109/acssc.2005.1600043>
- [8] Hassibi, B. (2000) An Efficient Square-Root Algorithm for BLAST. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP'00*, **2**, II737-II740. <https://doi.org/10.1109/icassp.2000.859065>
- [9] Bohnke, R., Wubben, D., Kuhn, V., *et al.* (2003) Reduced Complexity MMSE Detection for BLAST Architectures. *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'03*, **4**, 2258-2262. <https://doi.org/10.1109/glocom.2003.1258637>
- [10] Kim, H.S., Zhu, W., Bhatia, J., *et al.* (2008) A Practical, Hardware Friendly MMSE Detector for MIMO-OFDM-Based

Systems. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, **2008**, Article ID: 267460.
<https://doi.org/10.1155/2008/267460>

[11] (2003) 3GPP: Spatial Channel Model for MIMO Simulations. <http://www.3gpp.org/>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjwc@hanspub.org