

Hardware-Friendly Channel Estimation for High-Order MIMO Systems

Mengjiao Zhang¹, Junhui Gao¹, Fan Cao¹, Peiwen Jiang², Xintong Lu¹

¹National Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing Jiangsu

²School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: mjzhang@seu.edu.cn

Received: Apr. 10th, 2017; accepted: Apr. 25th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

In recent years, the use of multi-antenna module in the mobile terminal has gradually become one of the important directions in the development of communication systems. In order to further develop and prove the relevant algorithms under the condition of terminal multi-antenna and to evaluate the performance of multi-antenna module effectively, it is necessary to establish a software-defined radio (SDR) prototype verification platform based on air port and real-time transmission. In order to improve the working efficiency of the test platform and reduce the hardware complexity, it is essential to design well performing and hardware-friendly baseband processing algorithms. In this paper, the general parameters of the system and the time-frequency resource grid are given according to the Long Term Evolution (LTE) standard. Then, Minimum Mean-Squared Error (MMSE) channel estimation algorithm in the multi-input multi-output (MIMO) prototype verification platform is discussed, and the simulation link is built on this basis. Finally, the paper gives the corresponding simulation results and analyzes its performance, proving the feasibility of the scheme.

Keywords

Multi-Input Multi-Output, Low-Complexity, Minimum Mean-Squared Error, Channel Estimation

高阶MIMO系统中硬件可实现的信道估计算法

张梦娇¹, 高君慧¹, 曹凡¹, 姜培文², 卢欣桐¹

¹东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京

²东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京

Email: mjzhang@seu.edu.cn

收稿日期: 2017年4月10日; 录用日期: 2017年4月25日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

近年来,多天线模块在移动终端中的运用已经逐渐成为通信系统发展中的重要方向之一。为了进一步开发和验证相关算法以及有效测试多天线模块的性能,需要建立基于空口的、实时传输的软件无线电(Software-defined Radio, SDR)原型验证平台。为提高测试平台的工作效率、降低其硬件复杂度,需要设计性能良好且硬件可实现的基带处理算法。本文首先根据长期演进技术(Long Term Evolution, LTE)标准,给出系统的基本参数以及时频资源网格,接着研究高阶多输入多输出(Multi-input Multi-output, MIMO)原型验证平台中适用的低复杂度最小均方误差(Minimum Mean-squared Error, MMSE)信道估计算法,并在此基础上构建仿真链路。最后,文章给出相应仿真结果并分析其性能,证明了方案的可行性。

关键词

多输入多输出,低复杂度,最小均方误差,信道估计

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

随着互联网行业和无线通信技术的飞速发展,通信业务量和垂直应用呈现爆炸性增长趋势。为了满足人们对更高数据速率和传输可靠性的要求,长期演进技术(Long Term Evolution, LTE)及升级版 LTE-Advanced 和 LTE-Advanced Pro 应运而生[1]。LTE 的关键技术之一 MIMO 技术利用在发射端或接收端配置多根天线来提高链路性能,已被成功应用在 WiFi 和蜂窝系统中。例如在基于 LTE Release 10 及以上版本的蜂窝系统中,基站可以支持多达 8 个天线端口[2]。LTE 的近几个版本突出了终端多天线的特点,手机终端配备两根天线甚至更多天线的用户设备多天线技术已经成为一种不可逆转的趋势。如何在体积小重量轻的移动终端中部署多天线成为业界广泛研究和讨论的问题,因此适用于终端多天线模式的相关算法设计和开发成为新的课题。

为了缩短研发周期,人们建立基于软件无线电(Software-defined Radio, SDR)的原型验证平台,从而可以进一步开发和证明终端多天线算法、测试最新设计的多天线模块。在正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统中,为了在接收机端补偿信道的影响,需要发射前导或者导频信号进行信道估计,计算出子载波上的信道响应。在选择 OFDM 系统的信道估计技术时,需要满足硬件友好特性的信道估计算法。

本文致力于寻找硬件易实现的低复杂度的最小均方误差(Minimum Mean-squared Error, MMSE)信道估计算法。通过优化算法降低 MMSE 计算的复杂度从而更适合硬件实现的特点,借助 MATLAB 工具研究了 MMSE 算法在误比特率和数据吞吐量方面的结果。最终从理论分析和软件仿真两方面分析这种信道估计算法的性能优劣从而为系统设计中选择此方案提供依据。

2. 参数设计

本节将从基本参数和时频资源网格两方面介绍系统基本参数设计。现在的蜂窝系统操作模式包括时

分复用(Time Division Duplexing, TDD)和频分复用(Frequency Division Duplexing, FDD)两种[3], 而中国只有 TDD 模式。TDD 模式相对于 FDD 的优点之一是具有信道互易性下行链路的发送端作为上行链路的接收端可以很容易获取信道状态信息, 节省了额外的系统开销, 因此本系统采用 TDD 操作模式。在当前的设置下, 本测试平台操作的很多参数与基于 TDD 的 LTE 蜂窝系统相同, 如表 1 所示[4]。

在表 1 所示参数基础上, 时频资源网格可以按如下方式合理分配: 图 1 即为所采用的类似 LTE 的帧结构。每个 10 ms 的无线帧分成 10 个子帧, 每个子帧包含两个时隙共 14 个 OFDM 符号。第一个子帧用于基站和用户设备最初的初始化而其他的子帧用于数据传输。具体的说, 0 号子帧中第 1 个 OFDM 符号用来放置主同步序列(Primary Synchronization Signal, PSS)序列以供同步使用, 其余 13 个 OFDM 符号不摆放任何符号。1 号至 9 号子帧采用相同的结构, 每个时隙的 7 个 OFDM 符号依次摆放: 下行导频序列、下行导频序列、下行用户数据、下行用户数据、下行导频序列、下行用户数据、下行用户数据。

从图 1 中可以看出, 本文所构建的 4×8 MIMO 系统主要考虑下行链路, 除第 1 个子帧用于空口同步外, 其它子帧都用于上、下行传输。由于采用 LTE 的导频插入方式, 下行链路的发送端天线端口数为 4, 因此在一个时隙中, 第 1、2、5 个 OFDM 符号用于发送下行导频, 剩余 OFDM 符号用于发送下行用户数据, 不同天线端口的导频摆放方式见图 2。根据第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)确定的 LTE-Advanced 标准, 一组正交导频在频域有规律且不连续的分配。为了方便操作, 用 0 填补剩余的子载波。图中彩色方格代表插入导频数据, 白色方格表示插零, 灰色方格为用于传输数据的资源元素(Resource Element, RB), 为简化系统的硬件实现, 在本系统中, 用于传输导频的 OFDM 符号除应放置导频符号的资源元素插入导频外其余资源元素都插零。

Table 1. Design of general parameters

表 1. 基本参数设计

参数	变量	值
终端天线数量	N_{UE}	8
基站天线数量	N_{BS}	4
带宽	W	20 MHz
FFT 点数	N_{FFT}	2048
数据子载波数量	N_{SC}	1200
导频子载波数量	N_{pilot}	200
CP 类型	-	一般

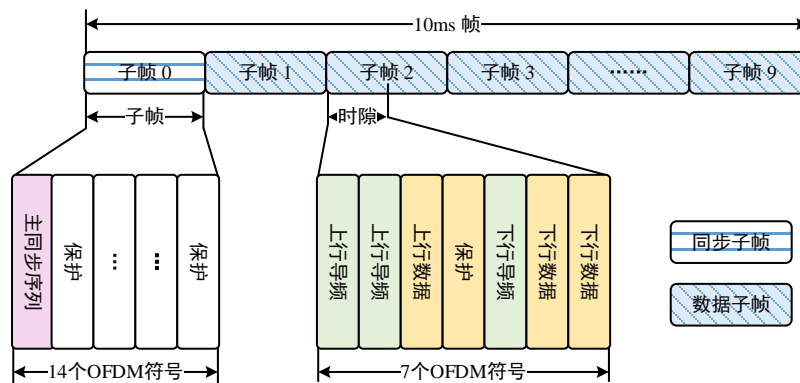


Figure 1. System frame structure

图 1. 系统帧结构

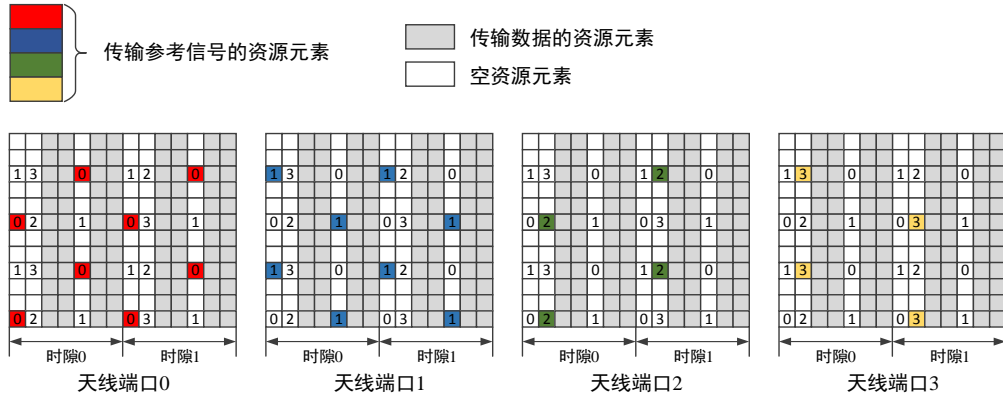


Figure 2. Pilot allocation of four antenna ports
图 2. 四天线端口的导频放置方式

3. 硬件可实现的信道估计算法

在发射数据符号前还需要发送前导或者导频符号，从而接收设备可进行信道估计。信道估计算法的设计很大程度上影响了整个通信系统的性能。本节将主要研究硬件可实现的低复杂度 MMSE 信道估计算法。

3.1. MMSE 信道估计

当传输导频符号时，一组独立的高斯信道如下所示建模

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{N} \quad (1)$$

假设所有子载波是正交的， \mathbf{X} 是一个对角线元素为导频的对角矩阵。 \mathbf{y} 是一个大小为 N 的接收导频矢量， \mathbf{h} 是大小为 N 的频域的信道衰落矩阵， \mathbf{N} 代表独立同分布的复数零均值方差为 σ_n^2 高斯噪声矩阵。假设噪声 \mathbf{N} 与信道矩阵 \mathbf{h} 不相关。在此基础上根据[5] MMSE 信道估计结果可表示为：

$$\mathbf{h}_{\text{mmse}} = \mathbf{R}_{hy} \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{y} \quad (2)$$

其中互相关矩阵为：

$$\mathbf{R}_{hy} = \mathbb{E}[\mathbf{h}\mathbf{y}^H] = \mathbf{R}_{hh} \mathbf{X}^H \quad (3)$$

接收信号 \mathbf{y} 的自相关矩阵为：

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbb{E}[\mathbf{y}\mathbf{y}^H] = \mathbf{X}\mathbf{R}_{hh} \mathbf{X}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (4)$$

而 $\mathbf{R}_{hh} = \mathbb{E}[\mathbf{h}\mathbf{h}^H]$ 是大小为 $N \times N$ 的信道自相关矩阵。把式(4)和(4)代入式(1)，MMSE 估计可以按如下式(5)表示：

$$\mathbf{h}_{\text{mmse}} = \mathbf{R}_{hh} \left[\mathbf{R}_{hh} + \sigma_n^2 (\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1} \right]^{-1} \mathbf{h}_s \quad (5)$$

其中：

$$\mathbf{h}_s = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 & \mathbf{y}_1 & \dots & \mathbf{y}_{N-1} \\ \mathbf{x}_0 & \mathbf{x}_1 & \dots & \mathbf{x}_{N-1} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

是 \mathbf{h} 的最小二乘(Least Square, LS)估计结果。

3.2. 低复杂度实现方案

当载波数量比较多时，矩阵计算的复杂度激增不利于硬件实现，所以提出了低复杂度硬件可实现的

MMSE 算法。传统上使用软件进行功能模块的仿真开发的原因在于编程方便，可以节省开发时间，且浮点数的运算会比使用定点数的硬件更为精准。但是在 LTE 的标准下，如果要处理一个帧的数据，软件所需要的耗时会大于 10 ms。为了能够达到及时的处理，使用硬件是必须的。虽然硬件运算速度非常快，其缺点是开发耗时。以 LTE 频宽 20 MHz 为例，若在该标准下进行 MMSE 信道估计，利用导频与子载波时间的相关性，需要进行 1200×200 二维复数矩阵与 200×1 复数矩阵的乘法，计算复杂度非常大。因此，开发低复杂度 MMSE 信道估计算法是非常有必要的。

低复杂度 MMSE 信道估计算法使用噪声加权和信道相关特性。信道自相关矩阵中高相关度的元素对估计器的性能有很大的影响而低相关度的元素影响减弱很多。因此，本小节应用相关带宽的概念提出一种低复杂度 MMSE 信道估计技术。将信道自相关矩阵分割成子矩阵是为了降低矩阵乘法和矩阵求逆的复杂度，子矩阵的大小是由信道相关带宽 B_c 决定的。相关带宽 B_c 定义了信道相邻频率之间的一系列的高相关度，频域上的相关度可以超过 50%。采用[6]中的低复杂度 MMSE 估计，公式如下：

$$\mathbf{h}_{\text{mmse}} = \mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{h}}} \left[\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{h}}} + \sigma_n^2 (\mathbf{X}\mathbf{X}^H)^{-1} \right]^{-1} \tilde{\mathbf{h}} \quad (7)$$

其中， $\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{y}$ 是 \mathbf{y} 的最小平方估计， $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{h}}}$ 和 $\mathbf{R}_{\tilde{\mathbf{h}}}$ 是 \mathbf{R} 的一部分， \mathbf{R} 如下所示。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & r_{1,N_{\text{FFT}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N_{\text{FFT}},1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

\mathbf{R} 中元素含义是衰落矩阵 \mathbf{h}_p 和 \mathbf{h}_q 之间的均匀信道相关性，表达式如下所示：

$$r_{p,q} = \begin{cases} 1, & p = q \\ 1 - e^{-\frac{j2\pi L \frac{p-q}{N_{\text{FFT}}}}{j2\pi L \frac{p-q}{N_{\text{FFT}}}}}, & p \neq q \end{cases} \quad (9)$$

这只取决于子载波之间的距离 $p-q$ 和循环前缀(Cyclic Prefix, CP)的长度 L 与子载波数量 N 之间的比值 L/N [7]。实际上，性能的提升和复杂度的增加之间需要平衡。因此，低复杂度的 MMSE 信道估计算法的可行性得到证明。

4. 链路仿真

本小节在上述参数与信道估计算法的基础上，搭建单小区 MIMO 系统的链路级仿真，给出误比特率(Bit Error Rate, BER)与吞吐量曲线，并分析比较不同调制方式下的性能。

4.1. 仿真流程

基于设计的基本参数，以一个单小区 MIMO 系统为例，此系统使用 OFDM 技术带宽 20 MHz 基站天线数 $N_{\text{BS}} = 4$ 而用户天线数 $N_{\text{UE}} = 8$ 。如图 3 所示，发射机端准备一个二进制数据流并把原始比特数据通过合理的调制方式映射成符号。调制方式包括正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)与正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)的 16 符号形式 16QAM 和 64 符号形式 64QAM。之后一系列复数样本进行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)并计算 CP。接下来导频或者数据符号转换到模拟域并通过 N_{BS} 个发射天线发送出去。在接收机端，首先通过 PSS 的自相关性辨识无线帧的起始位置从而实现基站和用户设备的同步化。接下来应用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)并移除 CP 把时域信号重新变回频域信号。为消除噪声影响和充分利用子载波相关性，应用低复杂

度最小均方差(MMSE)算法[5]。在得到估计信道之后,应用基于 QR 分解的 MMSE 检测然后进行 QAM 解调即可恢复二进制比特数,由此可以评估系统的性能[8]。

4.2. 结果分析

不同调制方式下误比特率性能和数据吞吐量随不同发送数据流变化的数值规律用 MATLAB 仿真的结果展示如下:

1) 误比特率性能: 如图 4 所示误比特率随输入信噪比变化的情况。一方面,在 QPSK 调制方式下信噪比为 4 dB 时,误比特率为 10^{-4} 的结果在没有信道编码的情况下是可以接受的。另一方面,更高的调制阶导致了更差的误比特率性能,所以选择合适的调制方式是很必要的。除此之外,总数据吞吐量这一指标也列入考量范围。

2) 总数据吞吐量: 在误比特率基础上,系统的总吞吐量可以按如下方式计算:

$$T_{\text{total}} = \sum_{i=0}^3 N_{\text{sym}} \times (1 - \text{BER}_i) \times N_{\text{QAM}}, \quad (10)$$

其中, N_{QAM} 是每个已调信号的比特数, N_{sym} 是每秒钟数据符号的数量如下式所示

$$N_{\text{sym}} = \frac{4 \times N_{\text{sc}}}{0.5 \text{ ms}} \times \frac{9}{10} \quad (11)$$

值得一提的是每 0.5 ms 的时隙有四个数据符号并且有 19 个无线帧用于传输。如图 5 所示,明显可以看出采用高阶调制的系统数据吞吐量更大,因此误比特率性能和数据吞吐量之间应该有一个很好的权衡。



Figure 3. Block diagram of the system

图 3. 系统流程框图

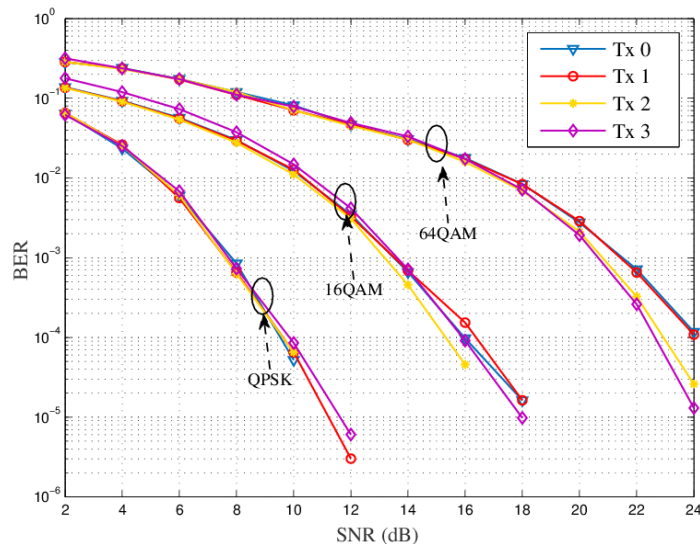


Figure 4. BER performance of different Tx streams with different modulation schemes

图 4. 不同调制方式下误比特率性能和输入信噪比关系

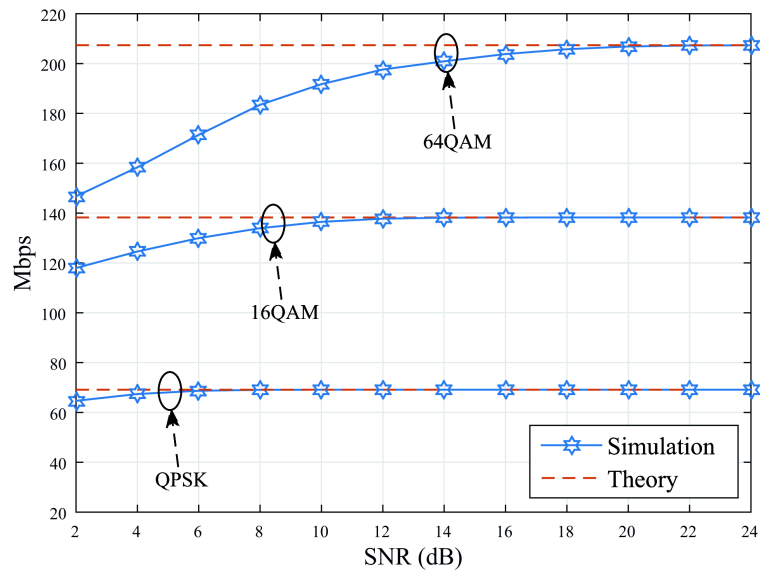


Figure 5. Total throughput of different Tx streams with different modulation schemes. The theoretical throughput is presented as a baseline for each modulation scheme

图 5. 不同调制方式下总数据吞吐量和输入信噪比关系。每种调制方式理论上的数据都呈现为一条基线

从性能上看，低复杂度 MMSE 信道估计算法与传统的 MMSE 相比差距很小，但是从复杂度上来看，前者的复杂度与后者相比大大降低。具体的来说，传统的算法需要计算 1200×200 二维复数矩阵与 200×1 复数矩阵相乘，需要计算 1200×200 次复数乘法和 1200×199 次复数加法。而低复杂度算法只需计算 200 个 6×6 矩阵和 6×1 矩阵乘法，需要 $200 \times 6 \times 6$ 次乘法和 $200 \times 6 \times 5$ 次加法。总的来说，计算的复杂度降到了不足原来的 3%。

5. 结束语

本篇文章提出了一种硬件可实现的信道估计算法：低复杂度 MMSE 算法。通过把 MMSE 中的信道自相关矩阵分割成大小为相关带宽的子矩阵，降低了矩阵计算的复杂度。虽然这种方法带来了性能上的微小损失，但这是性能和复杂度权衡之后的最优化结果。MATLAB 仿真展示了低复杂度 MMSE 性能上的结果，验证了理论推导得分结果。

参考文献 (References)

- [1] Heath, R.W., Honig, M., Nagata, S., Parkvall, S. and Soong, A.C.K. (2016) LTE-Advanced Pro: Part 1. *IEEE Communication Magazine*, **54**, 74-75. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470938>
- [2] Nakamura, T. (2011) Feasibility Study for Further Advancement for E-UTRA (LTE-Advanced). 3GPP TR 36.912 version 9.1.0 Release 9.
- [3] 周广琪, 段红梅, 王加义, 等. 中国移动 LTE-TDD/FDD 融合发展路径探讨[J]. 移动通信, 2014(15): 19-23.
- [4] 李金健. LTE 上下行链路设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] 徐以涛, 王呈贵. OFDM 系统基于自适应定阶的 MMSE 信道估计[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 117-120.
- [6] Noh, M., Lee, Y. and Park, H. (2006) Low Complexity LMMSE Channel Estimation for OFDM. *IEE Proceedings-Communications*, **153**, 645-650. <https://doi.org/10.1049/ip-com:20050026>
- [7] Edfors, O., Sandell, M., van de Beek, J.-J. and Wilson, S.K. (1998) OFDM Channel Estimation by Singular Value Decomposition. *IEEE Transactions on Communications*, **46**, 931-939. <https://doi.org/10.1109/26.701321>

-
- [8] 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.

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