

# An Implementation of Channel Estimation Based on MIMO-OFDM Video Transmission System

Yan Lu, Suqin He, An Tang

Beijing University of Chemical Technology, Beijing  
Email: [luyankuku@126.com](mailto:luyankuku@126.com)

Received: Apr. 6<sup>th</sup>, 2015; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2015; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 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

---

## Abstract

Because of its advantage of spectrum effectiveness and multi-path transmission, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system gains extensive attention. OFDM technology combining with MIMO technology which can be faster and more reliable has become the key of fourth generation wireless communication. In order to support MIMO-OFDM system to conduct wireless real-time transmission of high-definition video, a channel estimation scheme is needed in receiver to overcome frequency selective fading. In this paper, the channel estimation scheme applies least square algorithm to estimate the channel parameter on reference signal position, and adopts two-dimensional linear interpolation algorithm to estimate the channel parameter on user data position. The scheme is implemented and optimized by pipeline architecture of binary tree and Advanced Extensible Interface. According to test, this scheme occupies less FPGA resources, and is able to overcome channel fading in laboratory environment.

## Keywords

OFDM, MIMO, FPGA, Channel Estimation

---

# 一种MIMO-OFDM视频传输系统 信道估计的实现

路 延, 何苏勤, 唐 安

北京化工大学，北京  
Email: [luyankuku@126.com](mailto:luyankuku@126.com)

收稿日期：2015年4月6日；录用日期：2015年4月23日；发布日期：2015年4月29日

## 摘要

正交频分复用(OFDM)系统因为其频谱利用率高、多径传输性能好的优点，得到了研究者的极大关注。结合多输入多输出(MIMO)技术的OFDM系统更是以其传输可靠性高，速度快，已经成为了第四代无线通信技术的关键。为了支持基于MIMO-OFDM的高清视频双向传输系统进行无线传输，需要在接收链路中设计一种信道估计方案来对抗多径传输带来的频率选择性衰落。本文提出了一种基于参考信号的信道估计的FPGA实现方案。该方案采用最小二乘算法(LS)在频域进行参考信号位置信道估计，通过时域频域二维线性插值算法得到用户数据位置信道参数，并利用二叉树流水线技术及AXI-Stream总线协议进行模块化设计，结构优化。经测试，该方案占用FPGA资源少，并且能够在实验室环境下有效抵抗信道衰落。

## 关键词

OFDM, MIMO, FPGA, 信道估计

## 1. 引言

信道估计是 OFDM 中的关键技术，其目的是给出接收端进行的信道均衡、信号检测、信道质量测量和软译码等处理时所需要的信道参数，其性能直接关系到整个 OFDM 通信系统误码率性能[1] [2]。

基于参考信号(RS)的 OFDM 的信道估计方法主要包括 LS 算法和 MMSE 算法：LS 算法简单，适用于一般无线环境；MMSE 算法可靠性较高，但过于复杂[3] [4]。结合 MIMO 技术的 OFDM 系统上的信道估计要考虑对每根接收天线接收到多根发射天线的导频进行分离，以及对多根接收天线接收数据进行协调处理[5]。目前在 FPGA 上进行 MIMO-OFDM 系统信道估计的设计方案还比较少，一些传统方案[5]-[7]中，每条信道都需要设置一个信道估计器来估计导频位置信道频率响应，插值估计通过复数乘法器实现，这样将会消耗大量的硬件资源。本文基于文献[8]中的 MIMO-OFDM 系统，在 ML605 开发板上进行信道估计的方案设计实现。根据系统应用环境，考虑资源消耗与复杂度，采用 LS 估计算法以及线性插值算法进行模块化设计，具有良好的扩展性。基于传统信道估计方案对 LS 估计模块进行精简，对插值模块内插系数计算进行优化，减少 FPGA 运算单元及存储单元消耗。经测试，将该方案加入视频传输系统后，视频信号清晰稳定。

## 2. MIMO-OFDM 接收端链路模型

图 1 显示的是用于进行视频实时传输的双层物理层接收链路模型。接收端信号经过 OFDM 解调后，分离出用户数据信号和参考信号。信道估计模块利用接收到的参考信号与本地存储的参考信号共轭相乘得到信道参数[9]，根据 MIMO 分集空频解码公式，将用户数据信号与信道参数整理后输出给 MIMO 解码模块进行处理，从而减少无线信道干扰。系统全局时钟频率为 100 MHz，系统带宽 10 MHz，子载波数量为 600 个，MIMO 采用  $2T \times 2R$  天线矩阵。

## 3. 信道估计模块总体设计

本文进行的信道估计模块设计，首先在 Xilinx ISE 上使用 VHDL 语言进行建模，并加入到接收端链

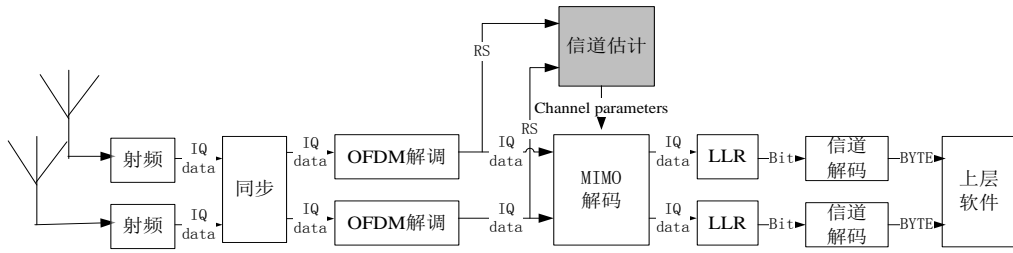


Figure 1. Architecture of receiver of video transmission system  
图 1. 视频传输系统接收链路模型

路中进行仿真测试;之后在 Xilinx XPS 上将物理链路作为硬件外设挂载到系统中,配置 Microblaze IP 核;最后将接收端和发送端程序分别下载到两块 ML605 开发板中,在发送端接上摄像机和视频服务器,接收端通过解码器解码,在显示器上可以看到摄像机捕获的视频图像。

信道估计模块采用双层链路结构,分别对两根接收天线的接收数据进行处理。顶层模块由四种模块构成:LS 估计模块、内插模块、数据处理模块和输出模块,如图 2 所示。

图 2 中 RS00 和 RS10 分别表示接收天线 0 所接收到的两根发送天线发送的参考信号,RS01 和 RS11 分别表示接收天线 1 所接收到的两根发送天线发送的参考信号。LS 估计模块接收到参考信号(Reference signal, RS)后估计出 RS 所在位置的信道参数  $h_{rs}$ ,并输出给内插模块;内插模块根据导频图案,利用接收到的导频位置信道参数,通过频域和时域插值计算用户数据位置的信道参数  $h$ ,并存储在 RAM 中;数据处理模块接收用户数据,并将数据整理成 MIMO 解码模块需要的格式后输出给输出模块;输出模块利用从 OFDM 解调模块接收到的用户数据地址,从 RAM 中提取相应用户数据位置的四条信道(两根发射天线分别到两根接收天线)的信道参数,将用户数据与信道参数一同输出。

为方便以后对物理链路进行优化升级,各项功能采用模块化设计,模块外部接口统一采用 AXI-Stream 接口,模块之间通过一个具有 AXI-Stream 格式接口的 FIFO 进行数据缓冲相连,如图 3。

AXI-Stream 协议下,时钟上升沿到来时,接收端或者发送端的 READY 和 VALID 两个握手信号同时为“1”时完成一次数据传输。FIFO 输出的 READY 信号为“1”时,指示 FIFO 未满载;FIFO 输出 VALID 信号为“1”时,指示 FIFO 中存在有效数据。

视频传输系统采用 LTE 下行规定的帧结构与导频图案[10],如图 4 所示。导频图案中白格表示承载用户数据及控制信息的资源粒子(RE),黑格表示承载导频数据的 RE,叉格表示不承载任何信息的空白 RE。

### 3.1. LS 估计模块

LS 估计模块主要用 LS 算法估计出 RS 位置的信道参数  $\hat{H}$ 。设接收到的 RS 为  $Y$ ,本地存储的 RS 为  $X$ 。根据 LS 算法得到:

$$\hat{H} = X \times Y \tag{1}$$

由于  $X$  与  $Y$  均为复数,设  $X = (a + bi)$ ,  $Y = (c + di)$ ,带入式(1)后得到:

$$\hat{H} = ac + bd + (ad - bc)i \tag{2}$$

根据式(2),运用二叉树流水线技术对 LS 估计器进行设计。二叉树流水线结构能够充分发挥 FPGA 并行流水线的优势,提高系统计算效率,减少寄存器消耗。在流水线设计时,首先需要选择合适的流水线级数来减少处理延时。例如对于  $N$  个数据参与处理,并且需要经过七次相乘或者相加运算得到结果的算式,在实现时流水线级数应该设置为  $\lceil \log(N) \rceil$ 。其次,每一级流水线不能承担过多的计算,否则会降低整体流水线处理速度。本文中 LS 估计器的设计采用三级流水线,每一级流水线承担一次运算任务,延时一个时钟周期,如图 5 所示。

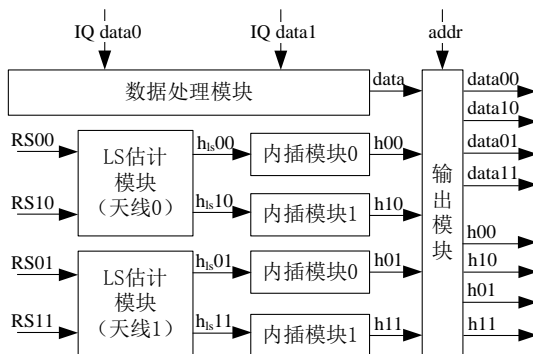


Figure 2. Architecture of channel estimation module  
图 2. 信道估计模块顶层结构

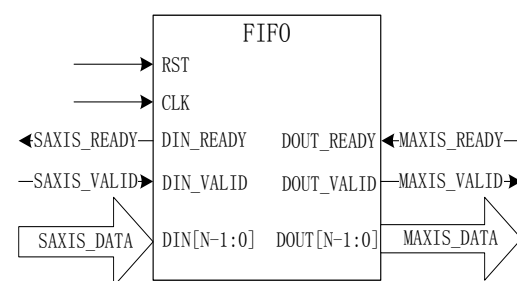


Figure 3. Architecture of AXI-Stream interface  
图 3. AXI-Stream 协议接口结构

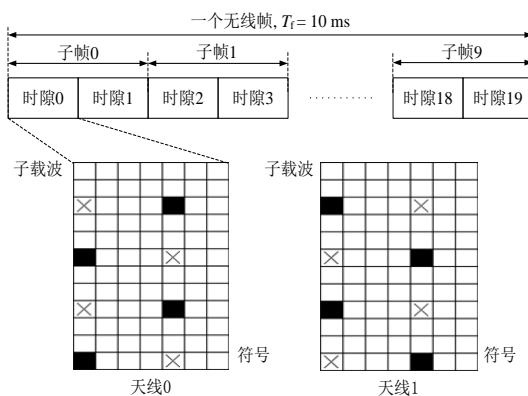


Figure 4. The frame structure and the double-antenna pilot pattern of the system  
图 4. 系统帧结构与双天线导频图案

本地 RS 由 Matlab 生成后，存入 ROM 当中，由状态机控制 ROM 地址，输出相应的 RS。传统信道估计方案中，每根接收天线需要两个 LS 估计器进行 RS 位置信道参数估计[5] [6]。以天线 0 接收到的 RS 为例，RS00 以及 RS01 分别需要一个 LS 估计器以及一个存储本地 RS 的 ROM 进行参数估计。由于天线 0 和天线 1 发送的 RS 相同，本方案中将 RS00 和 RS01 合并后，利用状态机控制交替输入到一个 LS 估计器，减少一半运算单元以及 ROM 等资源的使用。

### 3.2. 内插模块

内插模块根据导频图案进行线性插值。首先进行频域插值，以天线 0 发送的导频图案为例。频域插

值公式如式(3)所示。

$$\hat{H}(l+n, k) = \left(1 - \frac{n}{N_f}\right) \hat{H}_p(l, k) + \frac{n}{N_f} \hat{H}_p(l + N_f, k) \quad (3)$$

其中  $N_f$  表示频率方向 RS 间隔,  $\hat{H}_p(l + N_f, k)$  表示频率  $(l + N_f)$ 、时间  $k$  位置上的信道响应。通过从估计模块获得的 hls 估计出 RS 所在 OFDM 符号上(符号 0 和符号 4, 以符号 0 为例)RS 位置之间的信道参数, 存入相应的 FIFO 中。每个符号中有 100 个 RS, 所以循环 99 次。循环过后将边沿处子载波信道参数直接赋值为最近的 RS 位置的信道参数。流程如图 6 所示。

然后进行时域线性插值, 时域插值公式如式(4)所示:

$$\hat{H}(l, k+m) = \left(1 - \frac{n}{N_t}\right) \hat{H}_p(l, k) + \frac{n}{N_t} \hat{H}_p(l, k + N_t) \quad (4)$$

其中  $N_t$  表示时间方向导频间隔,  $\hat{H}_p(l, k + N_t)$  表示频率  $l$ 、时间  $(k + N_t)$  位置上的信道响应。通过 fifo 中由频域插值得到的符号 0 和符号 4 的信道参数估计出其他符号上所有子载波的信道参数, 将其映射到相应符号 RAM 中的对应地址当中, 便于输出模块用接收到的数据地址读取相应位置的信道参数。由于系统配置子载波数为 600 个, 所以设置循环 600 次。时域插值中符号 0 和符号 4 的每个符号的信道参数需要使用 2 次, 因此在第一次接收并进行插值计算后, 该符号信道参数将存入临时 fifo (temp)中以备下一轮循环插值使用。流程如图 7 所示。

为了减少 FPGA 中有限的乘法器资源消耗, 计算内插系数时通过输入数据移位计算来实现。传统插值估计在内插系数分母不为  $2^n$  时, 需要使用乘法器将输入数据和预先存储在 ROM 中的插值系数相乘[7]。本设计中, 当内插系数分母不为  $2^n$  时, 选择在数据低位增加 8 位数据小数位长度, 移位计算出原始数据的多个  $2^n$  分之 1, 通过二叉树流水线相加后再截取高 16 位数据得到, 如公式(5) (6) (7) (8)所示, 系数误差控制在  $2^{13}$  分之 1 左右。

$$\frac{1}{3}x \approx \left[\left(\frac{1}{2^{13}} + \frac{1}{2^{12}}\right) + \left(\frac{1}{2^{10}} + \frac{1}{2^8}\right) + \left(\frac{1}{2^6} + \frac{1}{2^4}\right) + \frac{1}{2^2}\right]x \quad (5)$$

$$\frac{1}{6}x \approx \left[\left(\frac{1}{2^{13}} + \frac{1}{2^{11}}\right) + \left(\frac{1}{2^9} + \frac{1}{2^7}\right) + \left(\frac{1}{2^5} + \frac{1}{2^3}\right)\right]x \quad (6)$$

$$\frac{2}{3}x \approx \left[\left(\frac{1}{2^{13}} + \frac{1}{2^{11}}\right) + \left(\frac{1}{2^9} + \frac{1}{2^7}\right) + \left(\frac{1}{2^5} + \frac{1}{2^3}\right) + \frac{1}{2}\right]x \quad (7)$$

$$\frac{5}{6}x \approx \left[\left(\frac{1}{2^{13}} + \frac{1}{2^{12}}\right) + \left(\frac{1}{2^{10}} + \frac{1}{2^8}\right) + \left(\frac{1}{2^6} + \frac{1}{2^4}\right) + \left(\frac{1}{2^2} + \frac{1}{2}\right)\right]x \quad (8)$$

### 3.3. 数据处理模块和输出模块

MIMO 发射分集方案选择 LTE 标准的空频编码。在 MIMO 解码模块进行极大似然译码时, 需要接收对应的用户数据和信道参数来构造判决矢量。根据判决矢量构造公式可以知道, 在每次构造判决矢量时需要两条接受链路上连续两个 RE 上的用户数据和四条信道的信道参数[11]参与计算。数据处理模块分别将接收到的两层链路中连续两个 RE 上用户数据进行串行合并, 然后输出到输出模块。输出模块根据接收到的用户数据地址, 计算两个 RE 地址的信道参数的均值, 和用户数据一同输出给 MIMO 解码模块。

### 3.4. 综合测试与仿真

建模完成后, 需要在 ISE 上进行综合。综合后可以在 ISE 中查看信道估计模块的资源消耗, 如表 1 所示。

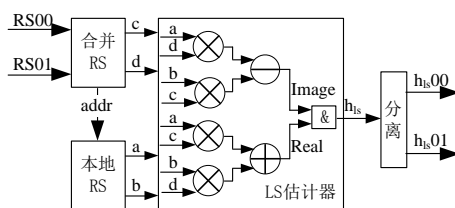


Figure 5. Architecture of LS estimation module  
图 5. LS 估计模块内部结构

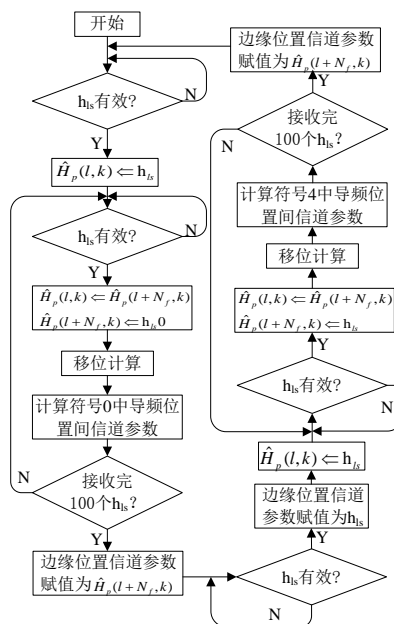


Figure 6. The flow chart of frequency domain interpolation  
图 6. 频域插值流程图

综合成功后将信道估计模块加入到整个 MIMO-OFDM 物理收发链路中，在发送端输入数据源，利用 Modelsim 进行仿真。为了在 FPGA 上进行计算，所有数据都已经量化为 16 位定点小数，其中最高位为符号位，次高位为整数位，其余 14 位为小数位，因此，数据范围在  $-2 \sim +2$  之间。信道参数输出如图 8 所示。

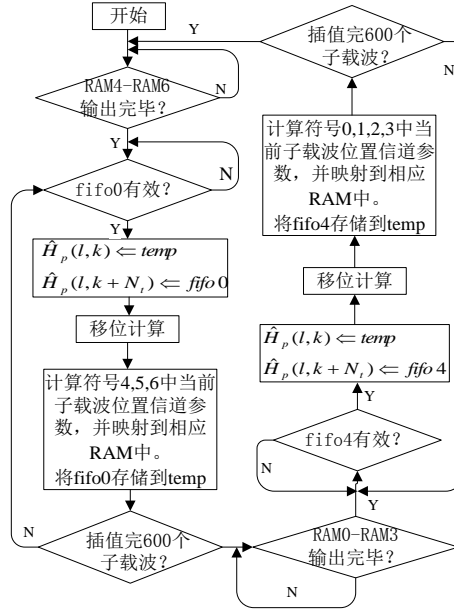
尽管数据处理过程中引入了定点误差和截位误差，信道 00 和信道 11 的信道参数实部的定点 16 位数据(CH00\_OUT\_RE 和 CH01\_OUT\_RE)依然接近 16,384 (即表示 1)。在有线的环境下，由于信道 01 和信道 10 没有接收数据，信道参数的实部和虚部定点 16 位数据接近 0 (0)。MIMO-OFDM 基带传输链路输入输出如图 9 所示，其中 valid 信号表示数据有效性。数据输入链路的发送端(tx)后，接收端(rx)输出数据准确，且没有丢失。因此信道估计模块在有线环境下能够使系统正确恢复发射端数据。

#### 4. 视频传输测试

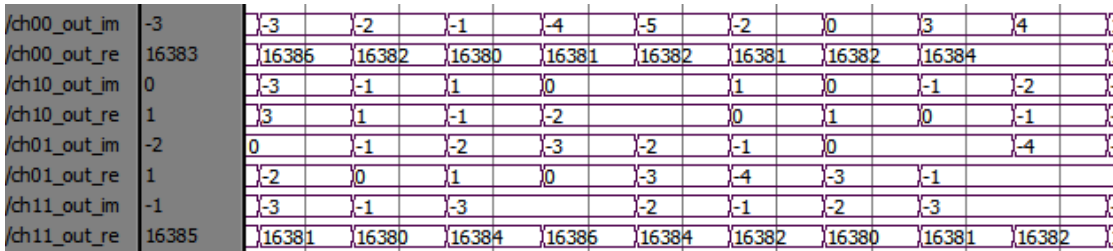
将设计完成的物理层链路的发送端和接收端分别作为外设挂载到 XPS 工程中。配置 ML605 开发板中 Microblaze IP 核，用于在发送端接收并封装视频服务器发送的视频信息，通过逻辑信道发送给物理层链路；在接收端接收并解析物理层的数据信息，发送给视频解码器解码。Microblaze IP 核与物理层链路通过 PLB (Processor Local Bus)总线进行数据传输。配置完成后，将生成的比特流文件下载到 ML605

**Table 1. Hardware resource consumption**  
**表 1. 硬件资源消耗**

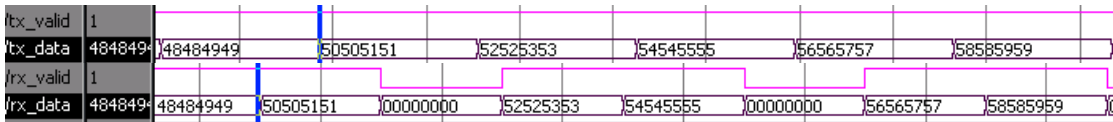
逻辑资源基本单元	传统方案使用/个	优化方案使用/个	减少消耗/%
片上存储器	21724	16955	22
片上 LUTs	19732	15971	19
块状 RAM/FIFO	111	103	7



**Figure 7. The flow chart of time domain interpolation**  
**图 7. 时域插值流程图**



**Figure 8. Simulation of channel parameters output**  
**图 8. 信道估计模块信道参数输出仿真**



**Figure 9. Simulation of input and output of MIMO-OFDM link**  
**图 9. MIMO-OFDM 链路收发仿真**

开发板中，设置摄像机与视频服务器，在接收端视频流通过解码器解码后，显示器上可以看到摄像机拍摄到的视频，如图 10 所示。两套设备置于相邻的两个实验室中，可以看到本地摄像头拍摄图像与接收到的

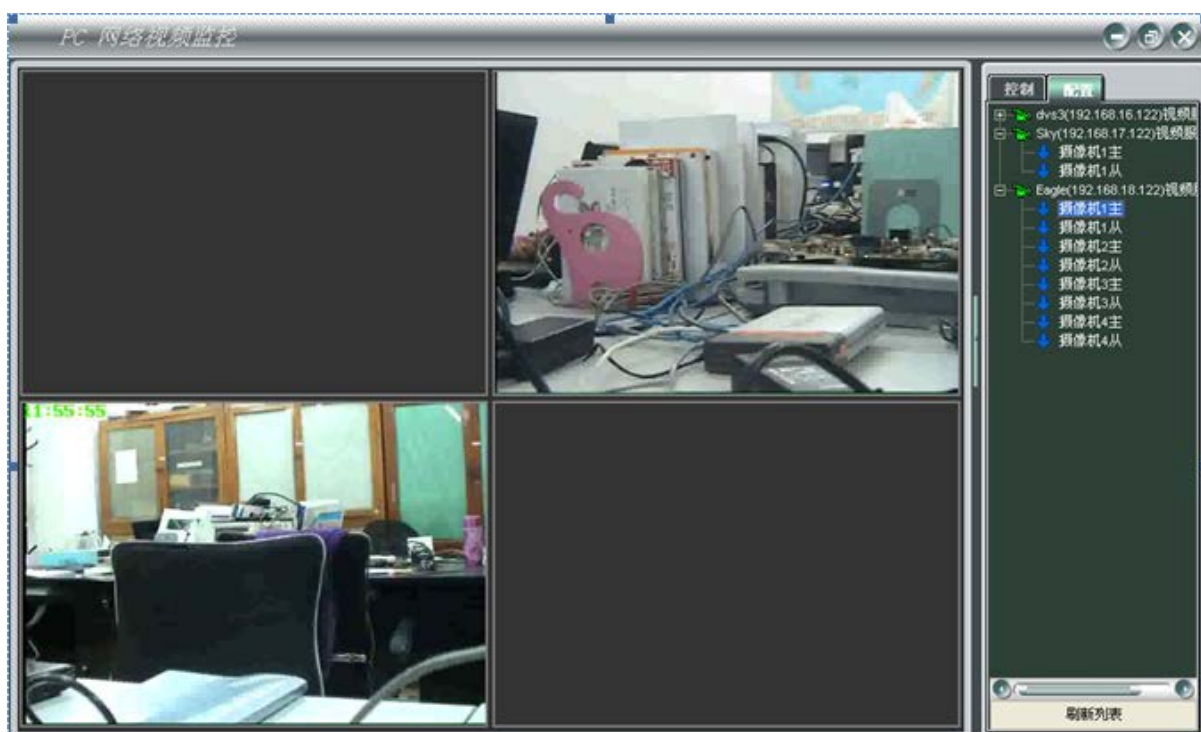


Figure 10. Video transmission test  
图 10. 视频传输测试

图像清晰稳定，验证了在实验室简单环境下信道估计模块可以有效抵抗信道衰落，提高系统传输可靠性。

## 5. 结论

本文针对 MIMO-OFDM 视频传输系统，利用 LS 算法和线性插值算法，设计了一种结构优化，消耗 FPGA 逻辑资源少的信道估计方案，使得 FPGA 芯片上有足够的空间对物理层链路进行进一步的设计。最大支持 282.509 MHz 时钟频率，经测试：加入信道估计后，视频传输系统能够在实验室简单固定的环境下进行无线视频传输，图像清晰稳定。

## 致谢

本文研究由国家自然科学基金资助(61340056)，作者在此感谢所有为本研究提供的支持和帮助的朋友。

## 参考文献 (References)

- [1] 龙九清 (2008) OFDM 系统中信道估计算法研究与仿真. *通信技术*, **01**, 7-8.
- [2] 李巨虎, 陈鹏, 贺志强, 等 (2012) 双选择瑞利信道 MIMO-OFDM 存在信道估计误差分析. *北京邮电大学学报*, **1**, 107-110, 124.
- [3] 曾召华 (2010) LTE 基础原理与关键技术. 西安电子科技大学出版社, 西安.
- [4] 程光军, 王萍, 张庆芳, 等 (2013) LTE-A 下行信道估计算法研究. *电子测量技术*, **10**, 4-37.
- [5] 李小文, 梁琳 (2011) TD-LTE 下行信道估计的 DSP 实现. *电视技术*, **7**, 44-48.
- [6] Park, J.S. and Ogunfunmi, T. (2011) FPGA implementation of channel estimation for MIMO-OFDM. 2011 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 15-18 May 2011, 705-708.
- [7] 王勇, 葛建华, 陆震, 等 (2004) OFDM 系统信道估计算法及其 FPGA 实现. *电路与系统学报*, **6**, 139-142.



- [8] He, S.Q., Tang, A. and Zhang, H.J. (2014) A high-performance implementation of OFDM-MIMO base-band in wireless video system. *Information Technology Journal*, **13**, 1678-1685.
- [9] 黄敏, 李兵兵 (2014) 基于整体最小二乘的联合信道估计及 OFDM 信号检测算法. *电子与信息学报*, **6**, 1448-1453.
- [10] 赵训威, 林辉, 张明, 等 (2010) 3GPP 长期演进(LTE)系统架构与技术规范. 人民邮电出版社, 北京.
- [11] 林云, 何丰 (2010) MIMO 技术原理及应用. 人民邮电出版社, 北京..