



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107332801 A

(43)申请公布日 2017. 11. 07

(21)申请号 201710378868.9

(22)申请日 2017.05.25

(71)申请人 南京邮电大学

地址 210023 江苏省南京市新模范马路66号

(72)发明人 田峰 尚力 凌海涛 周亮 杨震

(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 许方

(51) Int. Cl.

H04L 27/26(2006.01)

H04L 27/00(2006.01)

H04B 7/0413(2017.01)

H04N 9/64(2006.01)

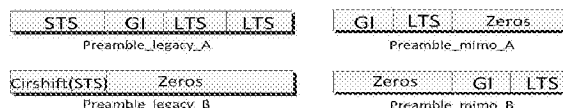
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,其考虑到WARP平台已有单天线SISO-OFDM的设计框架,通过改进形成最终的空间复用2\*2MIMO-OFDM系统,根据IEEE802.11n标准制定的前导码Preamble结构,改进设计满足2发送2接收的空间复用MIMO-OFDM系统所需的帧结构,采用对角线结构的训练序列进行信道估计;对要传输的图像编写降维以及合成的算法,在发送端发送流数据之前,将图像转化为相互独立且互不相同的数据流分别进行处理;在接收端将多条互不相关的空间数据流合成图像;由于发射机与接收机时钟晶振的不匹配导致的载波频率偏移,采用ML最大似然载波频率偏移算法对解调之前的空间数据流进行补偿,以消除载波频偏带来的解调后星座图的相位旋转。



1. 一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,其特征在于:具体包含如下步骤:

步骤1,将发送端接收到的三维彩色图像数据转化为一维彩色图像数据;

步骤2,将步骤1获取的一维彩色图像数据进行串并变换,分离成两路互不相同的数据流,均经过OFDM调制后,对前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据进行封装组帧,再将封装组帧后的前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据传送至WARP的缓存中,待触发之后,将前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据传送至发射端;

步骤3,当接收端接收到前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据,对前导码进行帧同步处理、消除载波频率偏移以及利用MIMO训练序列进行信道估计;

步骤4,接收端通过步骤3把经过载波频率偏移补偿之后时域数据转化成频域,根据2\*2的矩阵方程反解出发送数据,再将反解求得的发送数据进行合成,恢复出原图像。

2. 根据权利要求1所述的一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,其特征在于:

所述步骤1具体包含如下步骤:

步骤1.1,三维彩色图像的降维通过MATLAB来实现,利用MATLAB中的imread函数读取本地图像img,将读取的img进行(:,Xi)操作(Xi=1,2,3),分别降维得到img\_r,img\_g,img\_b三组十进制表示的二维矩阵,通过dec2bin()以及矩阵转置,分别将三组十进制表示的矩阵转为三组一维的二进制字符串,并通过fprintf()将字符串数据保存到txt文本文件中;

步骤1.2,通过fscanf()获取txt文本中的字符串数据,根据调制方式的不同,对字符串数据进行分组:当调制方式为QPSK时,通过reshape()函数将二进制字符串数据整形为2\*N的矩阵,转置之后再由bin2dec()得到uint8型的数据,再经过double()以及reshape()操作,最终得到tx\_data\_r,tx\_data\_g,tx\_data\_b三组double型的一维彩色图像数据。

3. 根据权利要求1所述的一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,其特征在于,在步骤2中,采用与IEEE802.11n标准协议相似的帧结构,对前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据进行封装组帧。

4. 根据权利要求1所述的一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,其特征在于,在步骤2中,所述前导码包含短训练序列、长训练序列以及用于信道估计的训练序列。

5. 根据权利要求1所述的一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,其特征在于,在步骤3中,所述帧同步以及载波频率偏移消除以及信道估计具体包含以下几个步骤:

步骤3.1,帧同步处理通过前导码中的STS和LTS分别进行粗同步以及细同步处理:接收端接收到的数据与前导中预先设置好的LTS做互相关,通过设置阈值的方式找出四个相关峰,经相关器后得出差值等于64的相关峰,此相关峰值加上保护间隔的长度32即可得到MIMO训练序列的起始位置mimo\_training\_ind,数据的起始位置payload\_ind=mimo\_training\_ind+192,前导码中LTS的起始位置lts\_ind=mimo\_training\_ind\_g-160;

步骤3.2,利用前导码中的2个重复周期的LTS进行ML最大似然载波同步,消除由收发两端晶振频率的不同引起的载波频率偏移;

步骤3.3,通过低复杂度LS算法计算发送接收支路上各个子载波的空间信道矩阵,从而完成信道估计。

## 一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及软件无线电信息传输技术领域,涉及一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法。

### 背景技术

[0002] 无线通信环境是一个随时间变化的不稳定系统,理论研究不能假定一个恒定信道模型。因此需要一个以算法验证为主、系统级的通信测试软件无线电平台来应对未来更加复杂的通信环境。同时无线通信技术的迅猛发展让各种通信协议标准及通信设备跟新越来越快,如新旧设备无法兼容将导致巨大的资源浪费,各通信协议之间不能相互兼容也将制约通信技术的发展。软件无线电平台是一个兼具标准性、通用性以及模块化等不同特点的硬件平台。通过对软件的编程来满足各种系统协议的通信功能,系统升级只需要升级软件即可。先进的软件无线电平台,既能测试不同通信系统的信道模型,还能验证通信算法性能,并且可以更好的估算通信技术的可行性。因此一个好的软件无线电平台是研究和开发无线通信系统的重要基础。由莱斯大学主导的WARP平台是一个可编程、可扩展的软件无线电平台,WARP平台开源所有硬件设计的软件支持包,必要时只需要升级系统资源库,就可实现对整个系统的升级。

[0003] 近年来无线通信中数据、图像、音频等多媒体应用的不断发展,整个系统对传输速率和容量的要求也越来越高;与此同时无线通信设备的迅猛增长以及信道环境越来越复杂,有限的频谱资源越趋紧张,因此,在有限的传输带宽下,空间复用成为了提高系统传输速率,扩大系统容量的最佳途径。

### 发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是针对背景技术中所涉及的缺陷,考虑到已有框架只能在单天线的基础上进行简单随机数的传输,本发明提供一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,该方法扩展了单天线SISO-OFDM系统,增加了用于信道估计的训练序列,编写了图像的降维以及合成算法,对接收端的数据帧进行帧同步、载波同步、均衡,从而恢复出原始图像。在WARP平台上通过软件编程实现多天线的传输,可以根据需要任意修改信号的调制方式以及传输的频段;同时在相同的发射功率下,接收端图像质量虽然略低于SISO-OFDM系统,但是可以实现传输速率的提升,增加系统容量。

[0005] 本发明为解决上述问题采用如下的技术方案:

[0006] 一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,具体包含如下步骤:

[0007] 步骤1,将发送端接收到的三维彩色图像数据转化为一维彩色图像数据;

[0008] 步骤2,将步骤1获取的一维彩色图像数据进行串并变换,分离成两路互不相同的数据流,均经过OFDM调制后,对前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据进行封装组帧,再将封装组帧后的前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据传送至WARP的缓存中,待触发之后,将前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据传送至发射端;

[0009] 步骤3,当接收端接收到前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据,对前导码进行帧同步处理、消除载波频率偏移以及利用MIMO训练序列进行信道估计;

[0010] 步骤4,接收端通过步骤3把经过载波频率偏移补偿之后时域数据转化成频域,根据 $2 \times 2$ 的矩阵方程反解出发送数据,再将反解求得的发送数据进行合成,恢复出原图像。

[0011] 作为本发明一种基于 $2 \times 2$ MIMO-OFDM系统的图像传输方法的进一步优选方案,所述步骤1 具体包含如下步骤:

[0012] 步骤1.1,三维彩色图像的降维通过MATLAB来实现,利用MATLAB中的imread函数读取本地图像img,将读取的img进行 $(:;X_i)$ 操作( $X_i=1,2,3$ ),分别降维得到img\_r,img\_g、img\_b三组十进制表示的二维矩阵,通过dec2bin()以及矩阵转置,分别将三组十进制表示的矩阵转为三组一维的二进制字符串,并通过fprintf()将字符串数据保存到txt文本文件中;

[0013] 步骤1.2,通过fscanf()获取txt文本中的字符串数据,根据调制方式的不同,对字符串数据进行分组:当调制方式为QPSK时,通过reshape()函数将二进制字符串数据整形为 $2 \times N$ 的矩阵,转置之后再由bin2dec()得到uint8型的数据,再经过double()以及reshape()操作,最终得到tx\_data\_r、tx\_data\_g、tx\_data\_b三组double型的一维彩色图像数据。

[0014] 作为本发明一种基于 $2 \times 2$ MIMO-OFDM系统的图像传输方法的进一步优选方案,在步骤2中,采用与IEEE802.11n标准协议相似的帧结构,对前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据进行封装组帧。

[0015] 作为本发明一种基于 $2 \times 2$ MIMO-OFDM系统的图像传输方法的进一步优选方案,在步骤2中,所述前导码包含短训练序列、长训练序列以及用于信道估计的训练序列。

[0016] 作为本发明一种基于 $2 \times 2$ MIMO-OFDM系统的图像传输方法的进一步优选方案,在步骤3中,所述帧同步以及载波频率偏移消除以及信道估计具体包含以下几个步骤:

[0017] 步骤3.1,帧同步处理通过前导码中的STS和LTS分别进行粗同步以及细同步处理:接收端接收到的数据与前导中预先设置好的LTS做互相关,通过设置阈值的方式找出四个相关峰,经相关器后得出差值等于64的相关峰,此相关峰值加上保护间隔的长度32即可得到MIMO 训练序列的起始位置mimo\_training\_ind,数据的起始位置payload\_ind=mimo\_training\_ind+192,前导码中LTS的起始位置lts\_ind=mimo\_training\_ind\_g-160;

[0018] 步骤3.2,利用前导码中的2个重复周期的LTS进行ML最大似然载波同步,消除由收发两端晶振频率的不同引起的载波频率偏移;

[0019] 步骤3.3,通过低复杂度LS算法计算发送接收支路上各个子载波的空间信道矩阵,从而完成信道估计。

[0020] 本发明采用以上技术方案与现有技术相比,具有以下技术效果:

[0021] 1.在发送端相同功率下,空间复用MIMO-OFDM的接收端信噪比和误码率略低于SISO-OFDM 传输方式,图像质量稍差,但是可以实现传输速率的翻倍;

[0022] 2.接收端采用载波频率偏移补偿算法,消除了收发设备时钟晶振不同步导致的接收星座图的相位旋转。

## 附图说明

[0023] 图1是前导码中MIMO训练序列的帧结构图;

- [0024] 图2是接收端互相关器搜索到的相关峰图；
- [0025] 图3.1是未消除载波频率偏移后的星座图；
- [0026] 图3.2是消除载波频率偏移后的星座图；
- [0027] 图4.1是未消除载波频率偏移后的星座图；
- [0028] 图4.2是消除载波频率偏移后的星座图；
- [0029] 图5.1是发送端的图像；
- [0030] 图5.2是SISO-OFDM系统接收的图像；
- [0031] 图5.3是空间复用2\*2MIMO-OFDM系统接收的图像；
- [0032] 图6是相同发射功率下,SISO-OFDM系统和空间复用2\*2MIMO-OFDM系统在接收端的信噪比；
- [0033] 图7是本发明发送端流程图；
- [0034] 图8是本发明接收端流程图。
- [0035] 具体实现步骤
- [0036] 下面结合附图对本发明的技术方案做进一步的说明：
- [0037] 通信双方首先在同一个局域网内按照预先设置的IP地址进行通信,每块WARP板上的两个射频天线的工作频段均为2.4GHz,中心频点为2.462GHz,采用WARP硬件规划的第11信道,通信双方按照相同的频段以及码率实现图像的传输。
- [0038] 一种基于2\*2MIMO-OFDM系统的图像传输方法,具体包含如下步骤：
- [0039] 步骤1,如图7所示,将发送端接收到的三维彩色图像数据转化为一维彩色图像数据；
- [0040] 步骤2,将步骤1获取的一维彩色图像数据进行串并变换,分离成两路互不相同的数据流,均经过OFDM调制后,对前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据进行封装组帧,再将封装组帧后的前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据传送至WARP的缓存中,待触发之后,将前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据传送至发射端；
- [0041] 步骤3,如图8所示,当接收端接收到前导码和经过OFDM调制后的一维彩色图像数据,对前导码进行帧同步处理、消除载波频率偏移以及利用MIMO训练序列进行信道估计；
- [0042] 步骤4,接收端通过步骤3把经过载波频率偏移补偿之后时域数据转化成频域,根据2\*2的矩阵方程反解出发送数据,再将反解求得的数据进行合成,恢复出原图像。
- [0043] 所述步骤1具体包含如下步骤：
- [0044] 步骤1.1,三维彩色图像的降维通过MATLAB来实现,利用MATLAB中的imread函数读取本地图像img,将读取的img进行(:,Xi)操作(Xi=1,2,3),分别降维得到img\_r,img\_g,img\_b三组十进制表示的二维矩阵,之后通过dec2bin()以及矩阵转置,分别将三组十进制表示的矩阵转为三组一维的二进制字符串,并通过fprintf()将字符串数据保存到txt文本文件中；
- [0045] 步骤1.2,通过fscanf()获取txt文本中的字符串数据,根据调制方式的不同,对字符串数据进行分组:当调制方式为QPSK时,通过reshape()函数将二进制字符串数据整形为2\*N的矩阵,转置之后再由bin2dec()得到uint8型的数据,再经过double()以及reshape()操作,最终得到tx\_data\_r,tx\_data\_g,tx\_data\_b三组double型的一维数据
- [0046] 1.图像的降维处理

[0047] 发送端的图像数据通过MATLAB进行降维处理,利用MATLAB中的imread函数读取本地图像img,由于彩色图像是一个三维的矩阵,因此将读取的img进行(:,:,Xi)操作(Xi=1,2,3),分别降维得到img\_r,img\_g,img\_b三组十进制表示的二维矩阵,之后通过dec2bin()以及矩阵转置,分别将三组十进制表示的矩阵转为三组一维的二进制字符串,并通过fprintf()将字符串数据保存到txt文本文件中。之后通过fscanf()获取txt文本中的数据,根据调制方式的不同,对数据进行分组。由于本发明中数据调制方式为QPSK,故通过reshape()函数将二进制字符串数据整形为2\*N的矩阵,转置之后再由bin2dec()得到uint8型的数据,再经过double()以及reshape()操作,最终得到tx\_data\_r、tx\_data\_g、tx\_data\_b三组double型的一维数据。

#### [0048] 2. 帧结构的设计

[0049] MIMO-OFDM系统与SISO-OFDM系统最大的不同在于发送和接收机之间有多条并行的支路同时进行数据的发送和接收,信道估计的前提就需要能够区分各发送接收支路的信道矩阵,然后再进行估计。考虑到空间复用MIMO-OFDM系统在帧同步、载波同步、以及MIMO信道估计方面的要求,本发明通过采用与IEEE802.11n标准制定的前导为基础,改进设计满足2发送2接收的空间复用MIMO-OFDM系统需要的新前导结构,如图1所示。前导分为两个部分,前半Preamble\_legacy\_A/B用于载波频率偏移(CFO)的消除,包含30个周期16比特的STS和2.5个周期的LTS;另一半Preamble\_mimo\_A/B用于信道估计,包含半个周期的保护间隔GI以及一个周期的LTS,而对角线结构的LTS满足该路径时隙发送训练序列数据S时,其他的路径不发送任何数据。

#### [0050] 3. 帧同步处理

[0051] 帧同步的实现方式通过前导中的STS和LTS分别进行粗同步以及细同步处理。STS是由30个16bit周期循环的前导码组成,接收信号通过自相关,可以在帧开始到达时找到一个值很大的平坦相关曲线,大概会维持480个采样时间,可以用于做粗同步;然后将接收到的波形与之前系统设定的LTS值做互相关就可得到4个相关峰,如图2所示,再通过设置阈值的方式找到峰值相差为64的峰值位置,该位置加上GI的长度就是OFDM符号训练序列的起始位置mimo\_training\_ind,数据的起始位置payload\_ind=mimo\_training\_ind+192,前导码中LTS的起始位置lts\_ind=mimo\_training\_ind\_g-160。

#### [0052] 4. 载波频率偏移(CFO)的补偿

[0053] 由于整个符号的调制采用OFDM,而OFDM系统仅满足正交性原理所需要的最小频率间隔,尽管正交形式的频率间隔会提高整个系统的频带利用率,但是一个较小的频率偏差就会使各正交的子载波采样点位置产生偏离,产生载波间干扰(ICI),因此,需要在OFDM解调之间对载波频率偏移进行补偿。设接收端收到的信号为 $y_n$ ,在归一化载波频率偏差 $\epsilon$ 的影响下接收信号可以进一步表示为: $r_n = y_n e^{j2\pi f_\epsilon n T_{\text{sample}}}$ ,其中 $f_\epsilon$ 为载波频率偏移相位角, $n$ 表示接收数据的长度, $T_{\text{sample}}$ 表示采样频率,此时 $r_n$ 为发生载波频率偏移后接收端实际接收的信号,设 $D$ 表示前导中连续训练序列的周期, $L$ 表示相关结果的累加长度,则延迟相关变量DelayCor可以表示为:

$$\begin{aligned}
 \text{DelayCor} &= \sum_{n=0}^{L-1} r_n r_{n-D}^* = \sum_{n=0}^{L-1} y_n e^{j2\pi f_s n T_{\text{sample}}} \left( y_{n-D} e^{j2\pi f_s (n-D) T_{\text{sample}}} \right)^* = \sum_{n=0}^{L-1} y_n y_{n-D}^* e^{j2\pi f_s D T_{\text{sample}}} \\
 &= e^{j2\pi f_s D T_{\text{sample}}} \sum_{n=0}^{L-1} y_n y_{n-D}^* \quad (\text{公式 1})
 \end{aligned}$$

[0055] 根据ML估计可以得到载波频率偏差 $\hat{f}_s$ ：

$$\hat{f}_s = \frac{1}{2\pi D T_{\text{sample}}} \arctan\left(\sum_{n=0}^{L-1} y_n y_{n-D}^*\right) \quad (\text{公式 2})$$

[0057] 经补偿后即可消除载波频率偏移的影响,接收端得到修正后的信号 $\hat{y}_n$ ：

$$\hat{y}_n = r_n e^{-j2\pi \hat{f}_s n T_{\text{sample}}} \quad (\text{公式 3})$$

[0059] 图3.1是未消除载波频率偏移后的星座图;图3.2是消除载波频率偏移后的星座图;可见接收端未补偿载波频率偏移后解调恢复的星座图,可以发现解调后的载波发生大面积的偏移,解调之后的图像发生了较大的扭曲;图4.1是未消除载波频率偏移后的星座图;图4.2是消除载波频率偏移后的星座图;星座图基本校正了星座图的偏差。

#### [0060] 5. LS信道估计

[0061] 发射机通过 $N_t$ 条发送支路分别向 $N_r$ 条接收支路发送信息,接收端依靠前导码中MIMO训练序列对信道进行识别。因此,当第 $i$ 条支路发送训练序列的时候,其他支路不发送任何数据,这样 $N_t$ 条发送支路需要 $N_t$ 个时隙来发送训练序列,接收端 $N_r$ 在连续接收到 $N_t$ 个时隙后就可对信道进行估计。设长训练序列在第 $K$ 个子载波上发送的数据为 $S$ ,则在该子载波上接收机上的 $N_r$ 条接收支路在连续 $N_t$ 个时隙内所接收到的数据可以表示为:

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} R_1(1) & R_1(2) \\ R_2(1) & R_2(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & S \end{bmatrix}, \text{其中 } R_i(j) \text{ 表示了接收机第 } i \text{ 条接收支路在第 } j \text{ 个}$$

时隙内收到的数据,  $\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$  为 $N_r * N_t$ 维信道矩阵。从中可以发现,当发送的训练序列成对

角线结构  $\begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & S \end{bmatrix}$  时,接收端就可以区分出发送接收各个支路的信道信息。由此,可以得到:

$$[0063] \quad \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1(1) & R_1(2) \\ R_2(1) & R_2(2) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & S \end{bmatrix}^{-1}, \text{进而得到} \begin{cases} H_{11} = R_1(1) * S \\ H_{12} = R_1(2) * S \\ H_{21} = R_2(1) * S \\ H_{22} = R_2(2) * S \end{cases}, \text{从而解出的 } H_{ij} \text{ 就是}$$

各条支路上的信道增益。

#### [0064] 6. 数据恢复

[0065] 接收端两条支路接收到的两组已修正后的数据分别记为 $Y_1$ 和 $Y_2$ ,发送端发送的数据分别记为 $X_1$ 和 $X_2$ ,由信道估计分别得到的两组发送接收支路的信道增益为 $[H_{11}H_{12}]$ 和

$[H_{21}H_{22}]$ ,由此,可以得到两组矩阵方程:  $\begin{cases} H_{11}X_1 + H_{12}X_2 = Y_1 \\ H_{21}X_1 + H_{22}X_2 = Y_2 \end{cases}$ , 而通过信道估计以及载波频率

偏移补偿已求出四条支路上的增益 $H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}$ 以及修正后的接收端信号 $Y_1$ 和 $Y_2$ ,因

此,当信道线性无关时,联立两个矩阵方程组,进而可以求得 $X_1$ 和 $X_2$ 。之后对得到的矩阵 $X_1$ 和 $X_2$ 用 `reshape()` 操作整形形成一个行向量,解调完成后即可得到的二进制double类型的数据,再通过`cat`函数对上述反解得到的三个矩阵进行合成,即可得到传输的图像。

#### [0066] 7. 性能分析

[0067] 图5.1是原始发送的图片,图5.2是SISO-OFDM系统接收的图像,图5.3是空间复用2\*2MIMO-OFDM系统接收的图像,图6是分别是两种系统接收端平均信噪比图,可以发现相同发射功率下,SISO-OFDM系统下恢复的图像质量比空间复用2\*2MIMO-OFDM系统得到的图像质量要好一些,前者接收端的平均信噪比也要比后者略高3db左右,但通过理论计算可知:在 2.4GHz下编码方式采用QPSK、通过OFDM调制(52个子载波,用于传输的有48个),每次传输提供的有效数据容量为3/4,一次传输的固定时间为4us,工作频宽为40MHz,根据以上因子,计算可知SISO-OFDM系统能提供的传输速率为: $1/4\mu s * (2\text{bit} * 48 * 2 * 3/4) = 36\text{Mbit/s}$ ,而空间复用2\*2MIMO-OFDM系统由于两条空间流传输不同的数据,因此传输速率是SISO-OFDM系统的2倍,为72Mbit/s。同时,随着天线数量的增加,信道容量也随着天线数量增加。可见,空间复用2\*2MIMO-OFDM系统与单天线的SISO-OFDM系统传输的图像相比质量稍差,信噪比略低,但传输速率和容量提升一倍。所以,随着对系统传输速率和容量的要求越来越高,空间复用的优势将会更加明显。



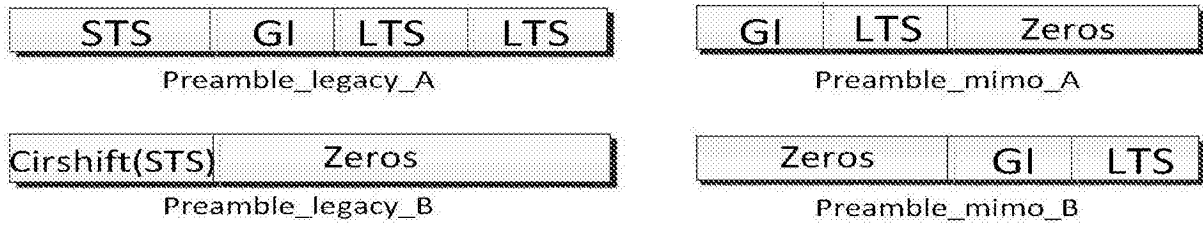


图1

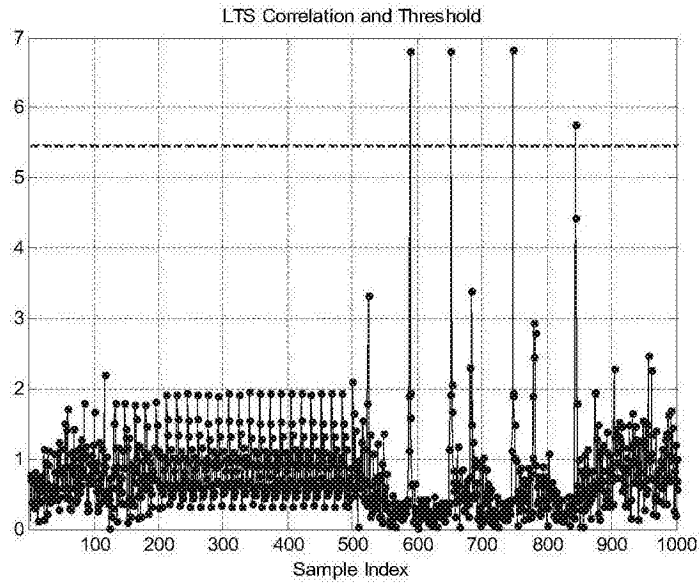


图2

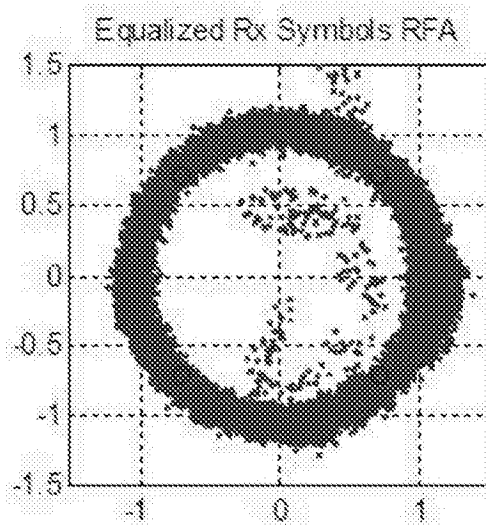


图3.1

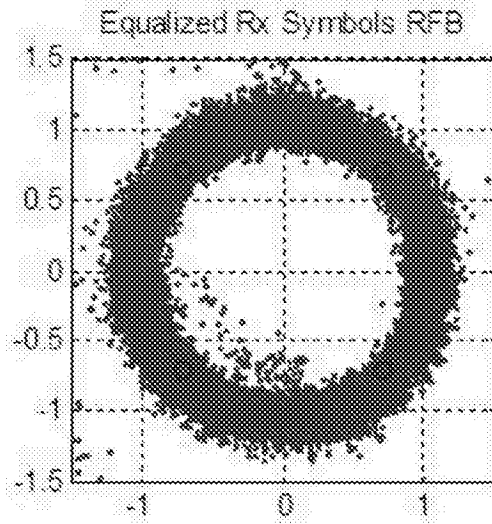


图3.2

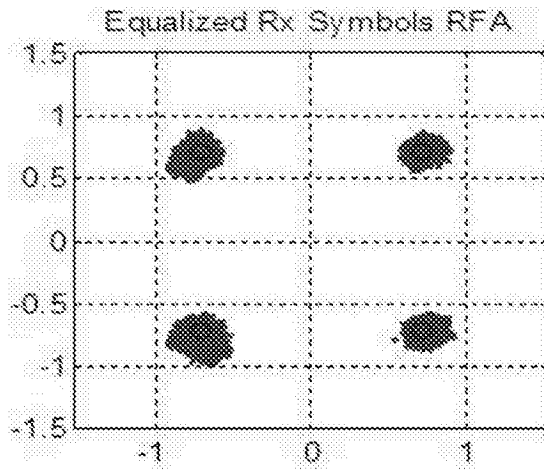


图4.1

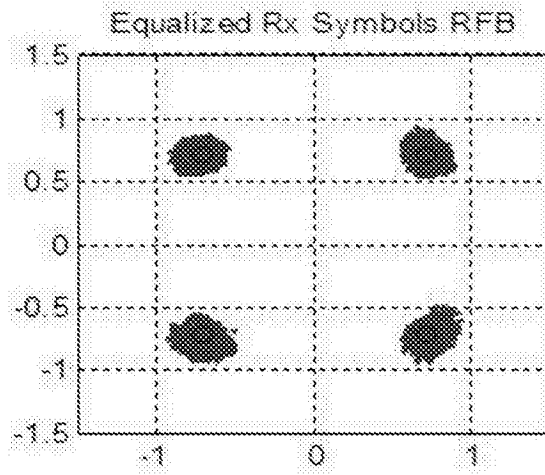


图4.2

发送的图片

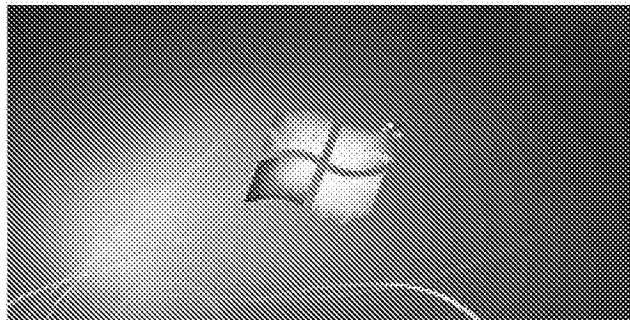


图5.1

接收的图片

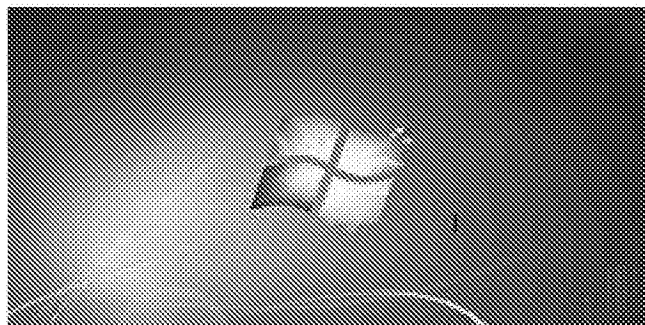


图5.2

接收的图片

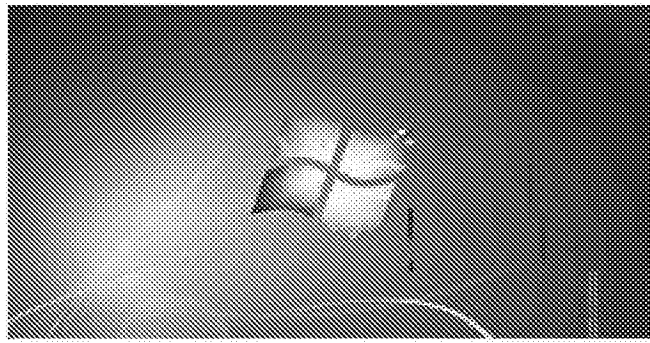


图5.3

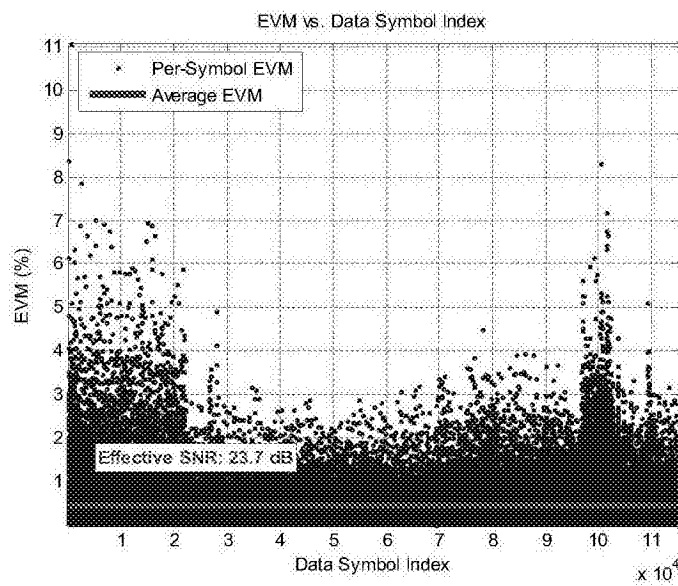
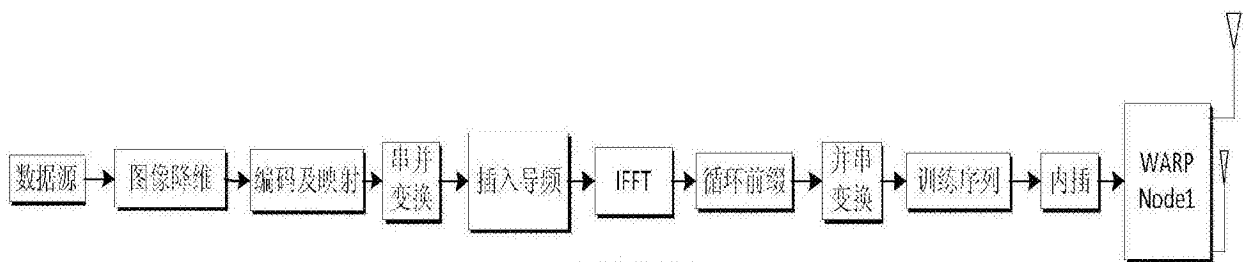
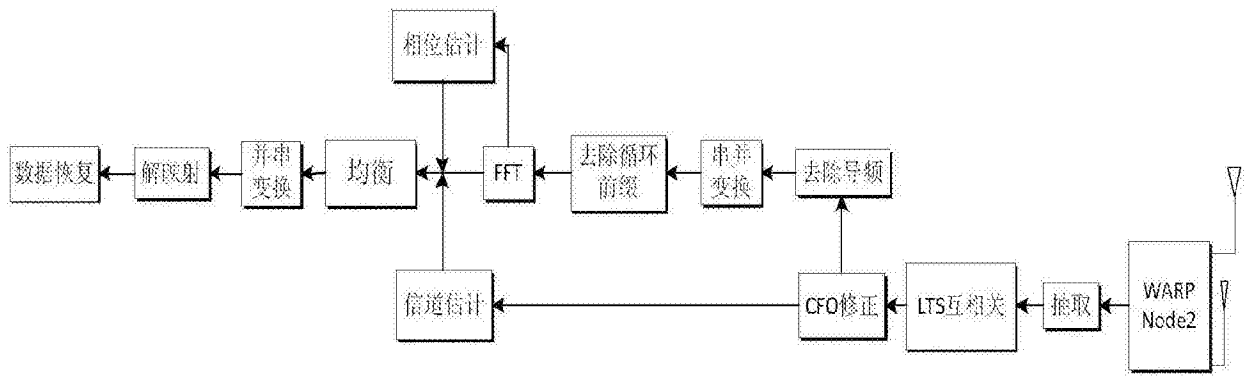


图6



WARP发送端流程图

图7



WARP接收端流程图

图8