

基于 MIMO 技术的可见光通信系统的研究

王旭颖 梁忠诚

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210046)

摘要: 讨论了 MIMO 技术思想在可见光并行通信系统中的应用, 探索并构建了一种更加高效的室内 VLC 并行通信系统。根据该方案搭建了实物演示系统, 验证了其可行性, 应用透镜搭建成像系统, 进一步完善了系统模型, 通过实验演示验证了其可行性。

关键词: 可见光通信; LED; 并行通信; MIMO

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2013)01-056-04

Research of the visible light communication system based on MIMO technology

WANG Xu-ying, LIANG Zhong-chen

(Department of Opt-electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: Discussed the application of MIMO in visible light parallel communication system. explore and construct a more efficient VLC parallel communication system which is suitable for indoor. According to this plan set up a physical demonstration system and to validate its feasibility, the lens is applied to build the imaging system, further improved the system model, the feasibility of this method has been verified by the experiment.

Key words: VLC; LED; parallel communication; MIMO

0 引言

可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 是一种建立在白光 LED 高速发光响应特性基础上的新兴光无线通信技术^[1]。这项技术可以把通信能力构建在 LED 照明之中, 减轻 RF 频带的拥挤程度, 并为光通信提供一种全新的宽带接入方式^[2,3]。与射频无线通信相比, VLC 具有无电磁干扰、发射功率高、信道容量大和设备兼容性好等突出优点。实验证明, 从 LED 照明系统中获得无线通信能力是可行的, 将无线通信能力嵌入未来 LED 照明系统中, 不仅是无线通信技术的一个发展方向^[4], 也可能是光无线接入网的一个发展目标^[5], 目前已受到业界的重视。

现有高频率响应的 LED 价格昂贵, 且仅限于实验室中使用, 限制了 VLC 通信速率的提高^[6]。因此, 我们尝试应用一种基于多路输入多路输出 (MIMO) 技术的

可见光并行通信系统, 由一个 LED 阵列同时传送多路信号, 从而提高系统的传输速率。本文将介绍基于 MIMO 技术的可见光并行通信原理以及通信系统的构建和实验。

1 基于 MIMO 技术的可见光并行通信系统原理

可见光并行通信系统的关键技术是 MIMO 技术。该系统主要借鉴 MIMO 技术中多路信号同时实现收发传输模式, 以及接收端对接收到信号的后续识别解码思想, 系统原理如图 1 所示。

在普通的可见光通信系统中, 通常需需要精准的定位技术为特定的探测器, 来描述发射源的空间位置, 这就意味着要设计出复杂的、特定的物理系统。

MIMO 技术只所以不用过于要求设计复杂的物理系

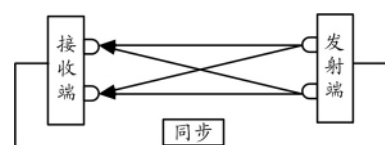


图 1 VLC 并行通信系统原理示意图

收稿日期: 2012-08-31。

作者简介: 王旭颖 (1987-), 女, 硕士生, 主要研究方向为信息光学及其应用。

统,是因为它不需要信号光源精准地打在单个探测器上。MIMO 技术可以“学习”信道矩阵,通过这个矩阵估算出系统所传输的数据^[7]。从而量化每一个信源和探测器间产生的信道串扰。

MIMO 系统的接收端信号处理过程涉及到逆矩阵的运算,所以其 H 矩阵必须是满秩矩阵,这也意味着系统发射端的天线阵列和接收端的阵列的空间相对位置必须是非对称的。

图 1 中,采用可调 LED 阵列作为发射端,电信号经过特定调制加载到 LED 阵列上,可以同时以多路光信号的形式发射出去。系统的接收端是由光电检测器件组成的多天线阵列,该阵列可同时接收多路 LED 光信号。每一路 LED 光信号将通过自由空间信道同时照射到组成接收天线阵列的每一个光电检测器上。接收端的数据采集芯片会将采集到的模拟信号发送给信号处理芯片。在这里采集到的信号最终将被解码为发射端所要传输的原始信息。

2 基于 MIMO 技术的可见光并行通信系统的构建

2.1 光学 MIMO 系统模型

我们在天花板上预装了 4 个白光 LED 阵列,每个 LED 阵列除了负责提供室内照明外,还负责在同一时间内独立传输数据流。该系统的接收端由 4 个独立的光电检测器件构成,以两行两列的形式布局在正方形区域的 4 个顶角处^[8-10]。从 LED 阵列上发射的光信号将同时被所有探测器接收到。每个探测器的相对距离和角度是不一样的,因此,对来自不同 LED 阵列的光信号的感应强度也是有差异的。

2.2 发射端与接收端的设计

发射端采用 4 只型号为 Cree XLamp XP-G Q5 的白光 LED 照明灯组成 LED 信号发射阵列。该阵列采用边长为 0.2m 的正方形布局,如图 2 所示。接收端采用 4 个大平面 PIN 光电探测器组成接收天线阵列,其几何布局采用边长为 0.1m 的正方形,如图 3 所示。光

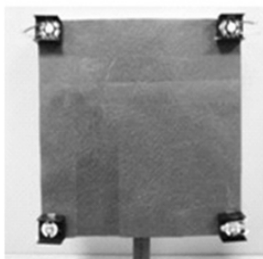


图 2 发射端实物图

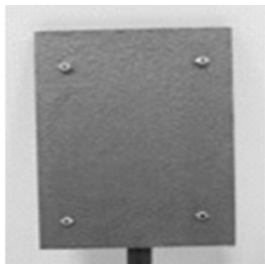


图 3 接收端实物图

电探测器产生的响应电流一般是很微弱的,不便于直接检测。为了解决这一难题,在该接收天线阵列后接入了前置放大电路,如图 4 所示。实验中设定收发距离为 30cm 垂直放置。注意,发射端所在的平面与接收端

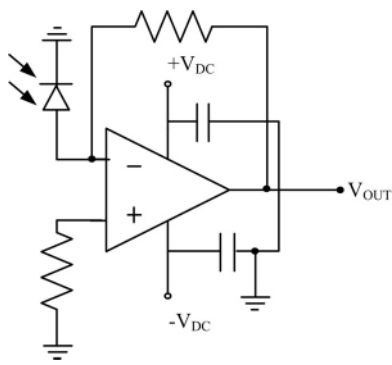


图 4 前置放大电路

所在的平面需形成一定角度,以满足 H 矩阵的满秩,并用 $\pm 12V$ 的直流电驱动放大电路。

2.3 描述信道特性的 H 矩阵

信号在 MIMO 系统中的传播可以用一个信道矩阵(为方便起见,本文称其为 H 矩阵)来描述。室内自由空间信道是一个相对稳定的空间信道,当系统的发射天线阵列与接收天线阵列的自身位置以及两者的相对位置给定时,该信道的特性也将被唯一的 H 矩阵所限定。该系统在正式工作开始时会通过自动“学习”来获取 H 矩阵。假定该系统的发射端是一个正方形 LED 阵列,其 LED 个数为 K 。用一维向量 N_T 表示这些 LED,用一维向量 N_R 表示用于接收的探测器。通过计算所有从第 i 个发射器的 K 个 LED 传播到第 j 个接收器的能量总和,估算出发射器件 i 和探测器件 j 之间的直流增益 h_{ij} ,得到 H 矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{1j} & \cdots & h_{1N_r} \\ h_{i1} & h_{ij} & \cdots & h_{iN_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_n1} & h_{i2} & \cdots & h_{N_nN_r} \end{bmatrix}$$

3 基于 MIMO 技术的可见光并行通信系统的实验与结果

3.1 实验中 H 矩阵的具体学习过程

系统的发射端按照同步时钟信号单独点亮每一路用于传送光信号的 LED 阵列,也就是单位时间内只保持其中某一路信号为“通”,而其它所有通路都为“断”。

系统的接收端按照同步时钟信号,分别记录每一路信号单独为“通”时,采集芯片采集到的探测数据,并根据这些数据建立信道矩阵 H 。系统通过“学习”得到 H 矩阵后,开始正式传输信息。这时,系统的接收端

可以将接收到的采集数据以矩阵的形式与信道矩阵 H 的逆矩阵做相乘运算。用设定了判决门限的比较器对处理过的结果进行 A/D 转换,进而将还原的数字信号传至信宿区。

在实验中,由于光电探测器的响应数据随时间变化会有一定的抖动,所以要考虑去抖动方案。另外,实验室无法做到零噪音环境,所以也要考虑去噪音方案。鉴于这两方面的考虑,我们采用 4 路信号同时测量,并将测量数据与噪音数据的差值取绝对值作为“学习” H 矩阵的原始数据。我们先分别对 LED 阵列和光电探测器阵列的每个独立器件进行编号,例如,4 个 LED 灯分别被标为一号灯、二号灯、三号灯和四号灯,接收器则分别为 1、2、3、4 号。

H 矩阵的获得与计算如下:通过系统对每路 LED 灯单独点亮的响应采集相应数据,经噪声处理得到 H 矩阵如下:

$$H = \begin{bmatrix} 0.51 & 0.11 & 0.21 & 0.06 \\ 0.20 & 0.24 & 0.10 & 0.07 \\ 0.32 & 0.08 & 0.42 & 0.11 \\ 0.22 & 0.07 & 0.21 & 0.25 \end{bmatrix}$$

至此,系统已经通过“学习”得到了描述信道特性的 H 矩阵,并计算出其逆矩阵。此时,系统接收了一组随机数据 0011。系统发射信息 0011 时采集的数据如表 1 所示。

表 1 系统发射信息 0011 时采集的数据

数据位:0001	四号灯点亮/V	所有灯关闭 (背景噪声)/V	去除噪声后/V
1 号光电探测器	0.12	0.39	0.27
2 号光电探测器	-0.29	-0.12	0.17
3 号光电探测器	0.36	0.89	0.53
4 号光电探测器	0.40	0.87	0.47

结合这组数据有 $R=[0.27,0.17,0.53,0.47]^T$, R 矩阵描述了通信过程中,系统接收端光电探测器阵列所接收到的一组模拟数据。结合式子 $\text{Test}=H^{-1} \times R$ 有:

$\text{Test}=[0.0015,-0.0113,0.9872,1.0526]^T$ 得到 Test 后,将其结果与判定门限设为 0.5 的比较器进行比较,最终得到了准确的原始信息: $\text{Test}=[0,0,1,1]^T$ 。

3.2 实验结果分析

实验通过将 H 矩阵的逆矩阵 R 矩阵(由实际测量数据构成)与接收端接收到的采集数据的乘积推算出 T 探测矩阵,将 T 矩阵的结果与判定门限为 0.5 的比

较器进行比较,最终得到了 0011。这个数据与系统发射的随机数据 0011 吻合。通过实验证明,本文所构建的基于 MIMO 思想的可见光并行通信系统是可行的。

4 成像系统

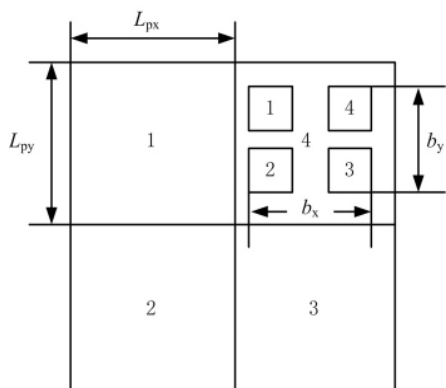
4.1 成像系统接收机理

一般非成像系统的光接收机使用一个光汇聚器(通常是非成像的)和一个单一的检测器。相对非成像系统而言,成像系统的接收机由单一的光集中器(通常是成像透镜),结合一个能分割成若干像元的光检测器组成。由于非成像系统接收机具有体积大、集成度不够高、结构复杂且有位置限制的缺点,因此我们又引入了成像接收机系统。

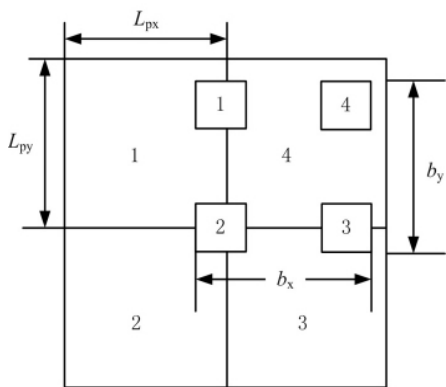
假设探测器每个象元的大小为 $L_{px} \times L_{py}$,4 个 LED 阵列在探测器阵列上的像的大小为 $b_x \times b_y$,如图 6 所示。如果 $L_{px} > b_x, L_{py} > b_y$,且 4 个 LED 阵列的像全部落在了一个检测器的象元内,这样接收到的信号就不能被恢复。也就是说,只有 $L_{px} < b_x, L_{py} < b_y$,且信号落在探测器上,保证 4 个探测器都能探测到信号,接收到的信号才能被恢复。

如果接收到的光信号分布如图 6 (a) 所示,LED4 收到其他信号的平均干扰值是相等的,导致 H 矩阵不再满秩,从而无法求逆矩阵,也就无法恢复出发送信号。

但如果接收到的光信号分布如图 6 (b) 所示,像元 4 中不仅收到 LED4 的光信号,也收到 LED1、LED2 和 LED3 的部分信号,可以表示为信道 1、信道 2 和信道 3 对信道 4 的干扰,在



(a) $L_{px} > b_x, L_{py} > b_y$ 时光信号分布图



(b) $L_{px} < b_x, L_{py} < b_y$ 时光信号分布图

图 6 接收机原理图

H 矩阵中,即为 H_{41} 、 H_{42} 和 H_{43} 的值。通过对 H 矩阵求逆,便可以恢复出 LED4 发送的信号。

4.2 成像系统实验

改进非成像系统的接收端,采用 4 个大平面 PIN 光电探测器组成接收天线阵列,每个 PIN 管的间距为 3mm,依据成像机理,在 PIN 管正前端 2.5cm 处放置凸透镜。发射端与非成像系统一样,采用 4 只型号为 Cree XLamp XP-G Q5 的白光 LED 照明灯组成 LED 信号发射阵列。该阵列采用边长为 0.2m 的正方形布局(如图 2 所示),依据成像机理将接收端与发射端相距 2m 水平垂直放置。应用与非成像系统相同的方法,得到去除噪声后的 H 矩阵如下:

$$H = \begin{bmatrix} 18.8 & 31.2 & 27.7 & 181.4 \\ 26.2 & 20.8 & 173.3 & 33.7 \\ 27 & 188.8 & 20.1 & 68.8 \\ 195 & 41 & 40 & 22 \end{bmatrix}$$

至此,系统已经通过“学习”得到了描述信道特性的 H 矩阵并计算出其逆矩阵。此时,系统分别接收了三组随机数据(1001、0011 和 1101),表 2 为探测器探测到的数据。

表 2 探测器探测到的数据(V)

灯	1001	0011	1101	噪声
1 号探测器	-188	-186.3	-188.5	-6.3
	-65	-188.4	-80.1	-16.9
	-83	-80.4	-193.8	-4
	-192	-61.6	-201	-5

应用非成像系统的算法得:

$$T1,4=[0.8689 \quad -0.0390 \quad -0.0286 \quad 0.9227]$$

$$T3,4=[0.0251 \quad -0.0012 \quad 0.8182 \quad 0.8649]$$

$$T1,2,4=[0.7849 \quad 0.5931 \quad 0.0157 \quad 0.8187]$$

应用非成像系统以 0.5 为判定门限的比较方法可得原始数据为 1001、0011、1101。通过实验可以证明,满足 $L_{px} < b_{xs}$, $L_{py} < b_{ys}$, 且信号落在探测器上,保证 4 个探测

器都能探测到信号的前提下,根据非成像系统的计算方法,接收到的信号可以被恢复。

5 结束语

本文论述了 MIMO 技术思想在可见光并行通信系统方案中的应用,在此基础上构建了基于 MIMO 技术的可见光并行通信系统,通过实验的手段验证了该系统的可行性。实验结果表明,基于 MIMO 技术的成像系统与非成像系统都能够成功实现可见光信号的并行多路传输与接收。相比非成像系统,成像系统的接收机使用单一的光集中器,具有集成度高、结构简单、接收范围广和误码率小等优点,在实际应用中有更高的可行性。

参考文献

- [1] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [2] TANAKA Y, KOMINE T, HARUYAMA S, et al. Indoor visible communication utilizing plural white LEDs as lighting [C]. 12th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 2001, 2: 81-85.
- [3] DOUSEKI T. A batteryless optical-wireless system with white LED illumination [C]. 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004: 2529-2533.
- [4] O'BRIEN D, ZENG L B, HOA L E M, et al. Visible light communications Challenges [C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008, 12: 15-18.
- [5] 刘宏展, 吕晓旭, 王发强, 等. 白光 LED 照明的可见光通信的现状 & 发展[J]. 光通信技术, 2009, 33(7): 53-56.
- [6] 李忻, 黄绶江, 聂在平. MIMO 无线传输技术综述[J]. 无线电工程, 2006, 36(8): 42-47.
- [7] GESBERT D. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems [C]. IEEE J. Sel. Areas Communication, 2003: 281-302.
- [8] GARFIELD M. MIMO space-time coding for diffuse optical communication [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(3): 1108-10.
- [9] HRANILOVIC S A. Pixelated MIMO wireless optical communication system [J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron, 2006, 12(3): 859-74.
- [10] 王晓明, 郭伟玲, 高国, 等. LED- 新一代照明光源[J]. 现代显示, 2005, 33(7): 15-19.

敬告作者

凡向本刊投稿的作者,除提供电子信箱地址外,还请提供联系电话。被录用的稿件在尚未刊登之前,如果作者离开原单位,请及时提供新的联系方式,以便编辑部邮寄稿费和赠送杂志。

本刊编辑部