

基于摄像头的MIMO可见光无线通信系统

高俊英¹ 王德昌² 姚建国^{1,3}

¹南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003

²南京金智视讯技术有限公司, 江苏 南京 211100

³南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003

摘要 给出了一种涉及多光源的多输入多输出(MIMO)可见光无线通信(VLC)系统。通过编程模拟出 n 个发射光源, 分别发射 n 路不同的码流。无线信号接收端用摄像头来采集无线信号, 对采集到的信号使用图像处理技术来识别各个传输通道的信息, 并进一步恢复出 n 路码流。实验结果表明, 实验中出现的少量误码均可被正确纠正, 发送端发送的信号码流在接收端均可被正确地恢复出来。提出的系统通过更改信号接收机制, 规避了基于光电二极管接收信号的现有系统所存在的光源布局与同步难题及多径干扰问题。提出的多通道信号传输与接收方式, 提高了光源利用率, 因其可操作性而具有实用价值。

关键词 光通信; 可见光通信; 摄像头; 图像处理; 多输入多输出

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0106004

MIMO Visible Light Wireless Communication System Employed Camera-Based Receiver

Gao Junying¹ Wang Dechang² Yao Jianguo^{1,3}

¹College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China

²Wiscom Vision Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211100, China

³Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China

Abstract A novel multiple-input multiple-output (MIMO) visible light communication (VLC) system is proposed, by applying multi-lights. n lights are simulated by software and different signal sequences are sent, respectively. In the receiver, camera is employed to receive the wireless signals. After that, the image processing algorithms are defined to recognize and restore the signal sequences and the n signal sequences can be recovered. The result demonstrates that the minority error codes appeared in the experiments all can be rectified accurately, and the signal sequences sent in the transmitting end all can be restored in the receiving end exactly. The presented approach evades the layout problem of lighting, the synchronization problem, and the multipath interference problem existed in the presented system based on the photodiode receiver by altering the mechanism of signal receiving. The way of transferring and receiving the signals based on multi-channels presented increases the use ratio of light source, and it possesses more practical value because of its operability.

Key words optical communications; visible light communication; camera; image processing; multiple input multiple output

OCIS codes 060.2605; 060.4230; 060.4510

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-08-30

作者简介: 高俊英(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事可见光无线通信方面的研究。E-mail: gjyqz@sina.cn

导师简介: 姚建国(1965—), 男, 研究员, 主要从事无线通信理论与关键技术方面的研究。

E-mail: yaojg@njupt.edu.cn

1 引 言

无线光通信具有可靠性高、保密性好、无电磁干扰、无需频谱认证、性价比高等优点^[1-2]。可见光通信是一种使用发光二极管(LED)的无线光通信技术,室内通信系统的发展要求和LED技术的发展推动了可见光通信技术的研究^[3-4]。日本在可见光通信(VLC)领域的研究始于2000年,2007年建立了可见光通信标准。2008年美国自然科学基金会成立了“智能照明工程研究中心”,最终目标是在照明系统中嵌入一个通信网络,提供泛在性的光通信手段。欧盟在相关研发项目中已经验证了特定条件下高达500 Mb/s的数据传输能力^[5]。国内在2011年国家863重大专项指南中,也涉及到了“基于LED照明的室内、室外短途通信技术及系统”,期望能够达到双向10 Mb/s数据传输速率并申请一批专利^[6]。

在VLC通信系统中,LED同时具有照明和通信功能^[7]。现有的可见光无线通信系统中大多使用光能量检测传感器来接收信号^[8-9]。为了解决VLC通信速率受限于LED调制带宽的问题^[9],同时为了在室内的任意位置都能较好地接收信号,带来了多光源协同合作的问题,如多光源布局困难和多径延迟产生的码间干扰(ISI)等问题^[10],现有系统也因此难以实用。另外,前述使用多光源协作来传输一路信号的机制也在一定程度上限制了传输带宽并造成资源及成本的浪费。

本文提出一种新的可见光无线信号接收机制,改用摄像头采集信号^[11-12]。该方法根据光亮度来接收和恢复信号^[13],无需使用多个光源的合理布局来保证光能量空间分布的均匀性。再者,摄像头采集的一幅图像中可以同时包含若干个光源,各个光源可以发送不同的信号,故而本文同时应用多输入多输出(MIMO)技术实现多通道信号传输和接收^[14-17],提高了光源利用率。介绍了基于摄像头的MIMO可见光无线通信系统原理^[18],介绍了此系统的模拟仿真结果,并进行算法分析,最后给出算法处理后的实验结果。

2 基于摄像头的MIMO可见光无线通信系统原理

可见光通信的原理是将信号调制到用于日常照明的LED灯上,利用该设备的快速明暗闪烁进行数据传输^[4]。本文所述MIMO室内可见光并行通信系统,是多光源单接收的可见光通信系统,其核心思想是建立空间并行传输通道^[9],在不增加带宽与发射功率的情况下,成倍提高无线通信的质量与数据速率。另外,系统接收端应用摄像头采集信息,根据光强度来接收和恢复信号,用空间接收方式代替点接收方式。

图1为使用图像传感接收器的MIMO无线VLC原理框图^[20]。通过发生器产生 n 路信号,每路信号调制一盏LED。通过摄像头(聚焦透镜及图像传感器)将 n 个LED拍在图像序列上, n 个光源将成像在图像的不同位置。计算机不停地接收图像序列并检测像素点上的光亮度,通过图像处理技术来辅助恢复出各个光源所发送的码流。

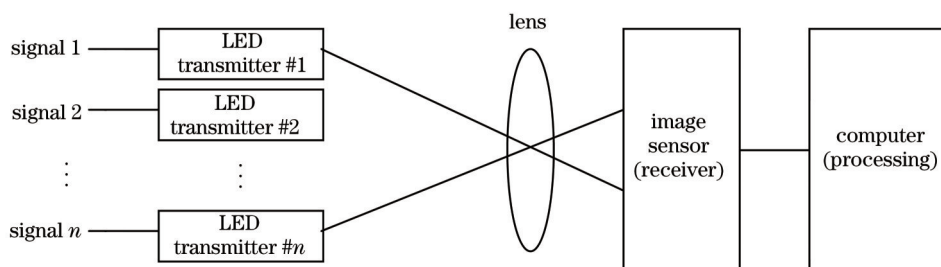


图1 使用图像传感接收器的MIMO无线VLC原理框图

Fig.1 Functional block diagram of MIMO wireless VLC employing image sensor receiver

可见光通信系统的发送端采用的光源是发光二极管(LED),其因良好的开/关性能而得到广泛使用。除此之外,使用具有照相功能的便携式电子设备的闪光灯也是一种可行的选择。本实验在华硕电脑K40AB上采用计算机软件模拟LED来为该系统提供信号发生器,其光源为visual studio中由C语言编程模拟出的 3×3 LED光源阵列(共9个光源),各个光源发送不同的信号流。

在接收端,摄像机适于接收上述光源所发出的可见光,但并不以此为限。本文所说的摄像机可以是独立的摄像机,也可以是集成到各种电子设备^[21],例如手机、平板电脑、笔记本电脑、数码相机、MP3、MP4播放

器(如苹果公司的 itouch)等摄像头。实验采用三星智能手机 GT-i8552 中的摄像头进行接收。实验需在黑暗条件下进行,避免背景光对信号的接收产生影响。

3 算法研究

实验中接收端采用摄像头接收信号之后需要在 Matlab 中进行图像处理。本章主要研究如何应用适当的算法,对采集到的信号进行正确的信号恢复及误码纠正。具体处理过程如下:

3.1 信号采集

图像传感器有两种接收模式:条带检测模式和区域检测模式。条带检测模式意味着图像传感器上只有一列像素点可用于检测光强度。区域检测模式意味着所有像素点都可以检测光强度。实验中,采用区域检测模式。

图 2 和图 3 为两个不同时刻的模拟光源,图 4 和图 5 为采集到的信号的光亮度分布情况,图 6 和图 7 为图 4 和图 5 对应的三维分布情况。

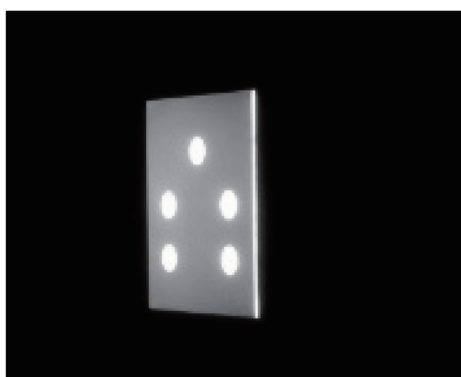


图 2 t_1 时刻的 LED 模拟光源

Fig.2 LED simulative light source at t_1

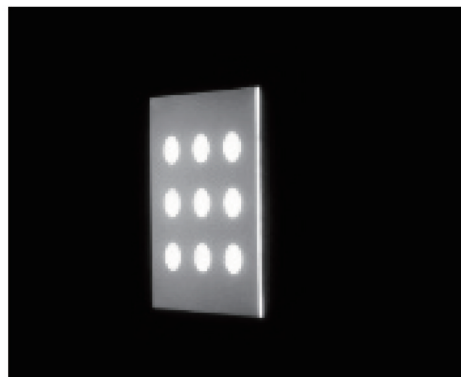


图 3 t_2 时刻的 LED 模拟光源

Fig.3 LED simulative light source at t_2

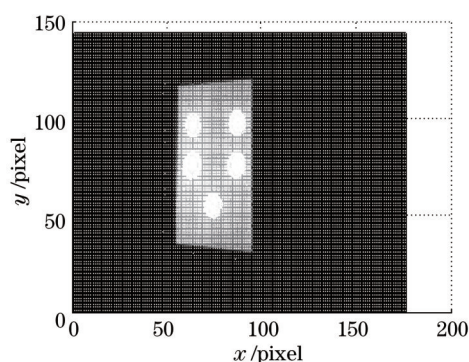


图 4 t_1 时刻的 LED 光亮度空间分布

Fig.4 Space distribution of optical intensity at t_1

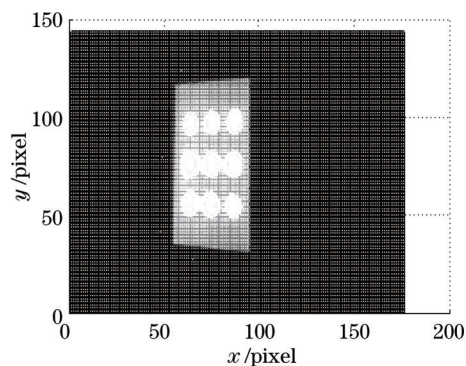


图 5 t_2 时刻的 LED 光亮度空间分布

Fig.5 Space distribution of optical intensity at t_2

3.2 信号码流的恢复

实验中使用 3×3 的模拟光源矩阵,9 个光源分别循环发送码流 $\{1,0\}$ 、 $\{1,0,0\}$ 、 $\{1,0,1\}$ 、 $\{1,1,0\}$ 、 $\{1,0,0,0\}$ 、 $\{1,0,0,1\}$ 、 $\{1,0,1,1\}$ 、 $\{1,1,0,0\}$ 、 $\{1,1,0,1\}$,每收到 12 个码即可解析一次。选取如图 2~7 所示的 t_1 和 t_2 时刻采集到的信号图像,首先对其计算灰度分布的直方图:

$$H(i) = \sum_{x,y} h[I(x,y)], \quad i = 0, \dots, 255 \quad \text{and} \quad h[I(x,y)] = \begin{cases} 1, & I(x,y) = i \\ 0, & \text{other} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $H(i)$ 表示灰度分布直方图中第 i 级灰度的分布值,即整幅图像 I 中灰度为 i 的像素数,共有 0~255 的 256 级灰度; $I(x,y)$ 代表采集到的图像 I 在坐标位置 (x,y) 处的像素灰度值。 t_1 和 t_2 时刻所采集信号图像的直方图分布分别如图 8 和图 9 所示。其中灰度值最小的 9 级对应的黑色区域太大,会影响目标灰度级分布的查看,因而

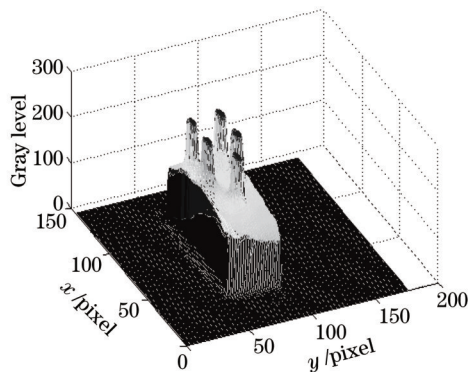


图 6 t_1 时刻的LED光亮度三维分布

Fig.6 Three-dimensional distribution of LED optical intensity

at t_1

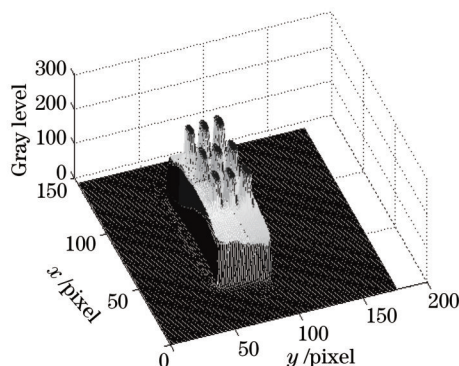


图 7 t_2 时刻的LED光亮度三维分布

Fig.7 Three-dimensional distribution of LED optical intensity

at t_2

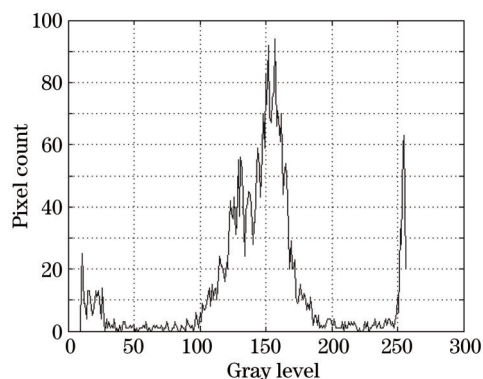


图 8 t_1 时刻所采集图像的灰度分布直方图

Fig.8 Image gray distribution histogram at t_1

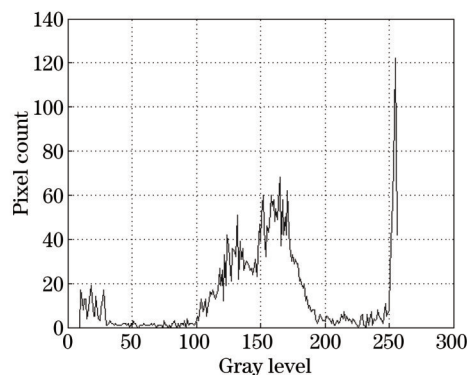


图 9 t_2 时刻所采集图像的灰度分布直方图

Fig.9 Image gray distribution histogram at t_2

在计算直方图之前做了清零操作。

由灰度直方图分布可见,光源区域的灰度值在200以上,75~199是背景光的灰度范围。这些分段值可以由图像处理算法得到,直接选取而不再详述相关图像处理算法。用200作为分段值可以将采集到的图像二值化。二值化后的图像分别如图10和图11所示。

至此得到了当前时刻点亮状态下光源的位置和大小信息。在时间轴上累计记录下各个光源的位置:

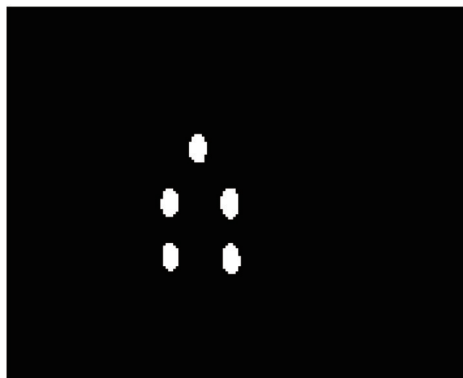


图 10 t_1 时刻的LED模拟光源二值化图像

Fig.10 Binary image of LED simulation photosource at t_1



图 11 t_2 时刻的LED模拟光源二值化图像

Fig.11 Binary image of LED simulation photosource at t_2

$$I_{t,t}(x,y) = \begin{cases} I_{t,t-1}(x,y) + 1, & I_b(x,y) = 1 \\ I_{t,t-1}(x,y), & I_b(x,y) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $I_{t,t-1}(x,y)$ 表示到 $t-1$ 时刻为止所记录的指示光源位置的图像中坐标 (x,y) 处的值, $I_b(x,y)$ 表示二值化后的图

像 I_t 在坐标位置 (x, y) 处的像素值。(2)式在时间轴上统计出属于光源的所有像素位置,所得到的到 t 时刻为止的光源位置图像 $I_{i,t}$ 可用于后续的信号分离和恢复过程。

得到9个灯在图像中的位置和大小信息之后,可使用图像处理中的形态学操作和聚类操作等来分离出各个灯的位置及其所属的像素点。为简化操作,直接取各个灯的中心位置来做后续研究,由此得到所采集的各个灯的信号码流图。仅列出接收到的前三个灯的信号码流图,如图12所示。

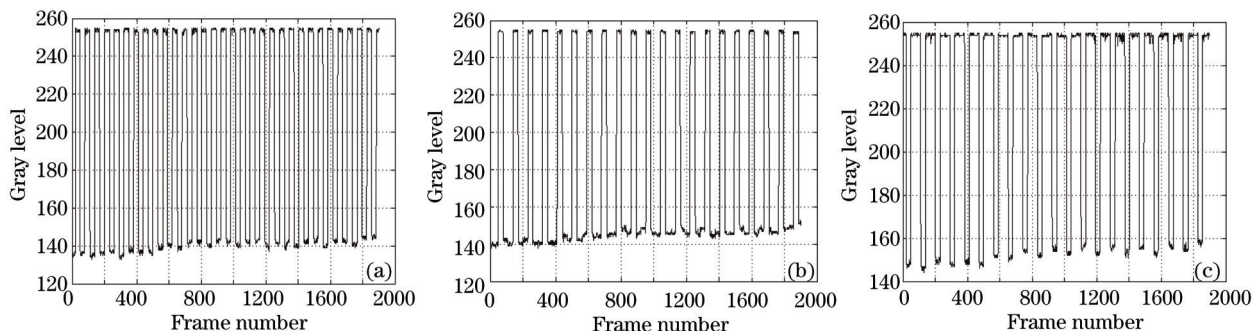


图12 所采集到的各个灯的信号码流图。(a) LED1; (b) LED2; (c) LED3

Fig.12 Received signal flows sent by each LED. (a) LED1; (b) LED2; (c) LED3

3.3 信号处理过程

由信号码流图可见,在光源点亮和熄灭的状态下,接收到的光强度并非是平滑或绝对相同的,而是有波动的。而且,由于受到背景光的影响,熄灭状态下灯位置的光亮度总体分布也是变化的,为了能有一个自适应的适当阈值来恢复出信号码流中的0和1值,提出一种基于多高斯模型的方法来实时更新灯亮和灯灭状态下的亮度值分布,并使用最近邻分类法来对各个信号码做判别。

首先,为光源设置两个高斯模型 $N[I_{i,t}(x_c, y_c); \mu_{i,on}, \sigma_{i,on}^2]$ 和 $N[I_{i,t}(x_c, y_c); \mu_{i,off}, \sigma_{i,off}^2]$ 。即:灯亮时, $I_{i,t}(x_c, y_c)$ 服从于 $N(\mu_{i,on}, \sigma_{i,on}^2)$; 灯灭时, $I_{i,t}(x_c, y_c)$ 服从于 $N(\mu_{i,off}, \sigma_{i,off}^2)$ 。初始时刻选取 $(\mu_{i,on}=255, \sigma_{i,on}=10)$ 和 $(\mu_{i,off}=100, \sigma_{i,off}=40)$ 。 $I_{i,t}(x_c, y_c)$ 表示第 i 个光源在 t 时刻采集到图像的中心坐标 (x_c, y_c) 处的像素灰度值,在后面的讨论中,在不引起混淆时,简称为 $I_{i,t}$ 。

由前述步骤为9个光源建立起了共18个高斯模型,如表1所示。

表1 各个光源的高斯模型

Table 1 Gaussian models of each light source

	Model when light is on	Model when light is off
LED1	$N(I_{1,t}; \mu_{1,on}, \sigma_{1,on}^2)$	$N(I_{1,t}; \mu_{1,off}, \sigma_{1,off}^2)$
LED2	$N(I_{2,t}; \mu_{2,on}, \sigma_{2,on}^2)$	$N(I_{2,t}; \mu_{2,off}, \sigma_{2,off}^2)$
LED3	$N(I_{3,t}; \mu_{3,on}, \sigma_{3,on}^2)$	$N(I_{3,t}; \mu_{3,off}, \sigma_{3,off}^2)$
LED4	$N(I_{4,t}; \mu_{4,on}, \sigma_{4,on}^2)$	$N(I_{4,t}; \mu_{4,off}, \sigma_{4,off}^2)$
LED5	$N(I_{5,t}; \mu_{5,on}, \sigma_{5,on}^2)$	$N(I_{5,t}; \mu_{5,off}, \sigma_{5,off}^2)$
LED6	$N(I_{6,t}; \mu_{6,on}, \sigma_{6,on}^2)$	$N(I_{6,t}; \mu_{6,off}, \sigma_{6,off}^2)$
LED7	$N(I_{7,t}; \mu_{7,on}, \sigma_{7,on}^2)$	$N(I_{7,t}; \mu_{7,off}, \sigma_{7,off}^2)$
LED8	$N(I_{8,t}; \mu_{8,on}, \sigma_{8,on}^2)$	$N(I_{8,t}; \mu_{8,off}, \sigma_{8,off}^2)$
LED9	$N(I_{9,t}; \mu_{9,on}, \sigma_{9,on}^2)$	$N(I_{9,t}; \mu_{9,off}, \sigma_{9,off}^2)$

对新采集到图像中各个光源中心像素的灰度值,分别计算其属于灯亮和灯灭状态的概率:

$$P_{i,on} = \exp\left[-\frac{(I_{i,t} - \mu_{i,on})^2}{2\sigma_{i,on}^2}\right], \quad (3)$$

$$P_{i,off} = \exp\left[-\frac{(I_{i,t} - \mu_{i,off})^2}{2\sigma_{i,off}^2}\right], \quad (4)$$

式中 $i=1, \dots, 9$, 对应着 9 个光源。此处的公式中去除了用于归一化的系数 $(2\pi\sigma^2)^{-1/2}$, 以便于求得一个值在 $[0,1]$ 之间的概率值。

由高斯分布特性可知, 在某高斯模型 2.5 倍的标准偏差范围之内的区域约占该高斯分布的 95%, 故而该系统使用 2.5σ 作为阈值来检验灯中心坐标处的亮度值是否符合灯亮或灯灭时候的亮度分布:

$$S_{i,t} = \begin{cases} 1, & |I_{i,t} - \mu_{i,on}| \leq 2.5\sigma_{i,on} \\ -1, & |I_{i,t} - \mu_{i,off}| \leq 2.5\sigma_{i,off} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $S_{i,t}$ 表示 t 时刻第 i 个光源的可能状态, 1 表示该灯当前为点亮状态, -1 表示该灯当前为熄灭状态, 0 表示未知状态, 可能是由于误码或者背景突然有较大的变化造成的干扰所致。若灯处于点亮状态, 则用(6)式更新该灯点亮时的亮度分布模型:

$$\begin{aligned} \mu_{i,on} &= P_{i,on} I_{i,t} + (1 - P_{i,on}) \mu_{i,on}, \\ \sigma_{i,on} &= P_{i,on} (|I_{i,t} - \mu_{i,on}|) + (1 - P_{i,on}) \sigma_{i,on}. \end{aligned} \quad (6)$$

对应地, 若灯处于熄灭状态, 则用(7)式更新该灯熄灭时的亮度分布模型:

$$\begin{aligned} \mu_{i,off} &= P_{i,off} I_{i,t} + (1 - P_{i,off}) \mu_{i,off}, \\ \sigma_{i,off} &= P_{i,off} (|I_{i,t} - \mu_{i,off}|) + (1 - P_{i,off}) \sigma_{i,off}. \end{aligned} \quad (7)$$

至此, 良好状态下传输的码流即可被恢复出来, 理想状态下可恢复出所发送的 0 和 1 序列。但若遇到误码或瞬间的环境强烈干扰, 则当前灯的状态是未知的, 尚无法恢复所传输的信号, 还需要后续步骤来纠正码字及自适应调整亮度分布模型。

对于误码的纠正, 可根据当前亮度相对于亮灭高斯分布的距离, 使用近邻算法来判别灯的状态:

$$S'_{i,t} = \begin{cases} 1, & \mu_{i,on} - I_{i,t} \leq I_{i,t} - \mu_{i,off} \\ -1, & \text{other} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $S'_{i,t}$ 表示 $S_{i,t}$ 所对应的判别状态, 显然地, 对于 $S_{i,t}$ 已经确定为点亮/熄灭状态的情况, $S'_{i,t}$ 的结果和 $S_{i,t}$ 的结果一致; 只有当 $S_{i,t}$ 的结果为未知状态时, $S'_{i,t}$ 和 $S_{i,t}$ 才不同。

为了在环境背景光变化的情况下能正常高质量地通信, 需要在当前亮度值匹配不上亮和灭两个高斯模型的情况下也能正确地更新模型, 根据(8)式得出的状态判别结果形成灯亮和灯灭两个子序列 $A_{i,on}$ 和 $A_{i,off}$:

$$A_{i,on} = \{(S'_{i,t}, S_{i,t}) | S'_{i,t} = 1\}, \quad (9)$$

$$A_{i,off} = \{(S'_{i,t}, S_{i,t}) | S'_{i,t} = -1\}. \quad (10)$$

子序列的长度 N 表示反应的灵敏度, 即系统对噪声和干扰的灵敏度。 N 越大则系统抗干扰能力越强, 但对正常的背景光变化需要较长的时间来更新模型, 该更新不影响最终恢复的码流, 即近邻分类算法能在绝大多数情况下保证背景光变化不会导致大量的误码; N 越小则系统对噪声越敏感, 但对正常背景光变化所需要的模型更新时间也越短。

然后根据 $S'_{i,t}$ 的结果选择要更新的高斯模型, 并在对应的 $A_{i,on}$ 或 $A_{i,off}$ 上使用卷积运算来给出更新的速率/幅度, 如(11)式^[22]所示:

$$P_{i,s}^+(t) = f[P_{i,s}^-(t - N + 1, t - N + 2, \dots, t)] = \frac{1}{\sum_{j=1}^N K(N-j)} \sum_{j=1}^N [P_{i,s}^-(j) \times K(N-j)], \quad (11)$$

$$K(x) = \exp(-x),$$

$$P_{i,s}^-(t) = \begin{cases} 1, & S'_{i,t} = s \quad \text{and} \quad S_{i,t} = 0 \\ 0, & S'_{i,t} = s \quad \text{and} \quad S_{i,t} = s \end{cases},$$

式中 $P_{i,s}^-(t)$ 是在对应的 $A_{i,on}$ 或 $A_{i,off}$ 上计算得到的, 而非在接收到的原始序列上计算的。

最后,将算出的更新权重 $P_{i,s}^+(t)$ 代入(6)式或(7)式去修正高斯模型:若 $S'_{i,i}=1$,则代入(6)式:

$$\begin{aligned} \mu_{i,on} &= P_{i,s}^+(t)I_{i,t} + [1 - P_{i,s}^+(t)]\mu_{i,on}, \\ \sigma_{i,on} &= P_{i,s}^+(t)(|I_{i,t} - \mu_{i,on}|) + [1 - P_{i,s}^+(t)]\sigma_{i,on}. \end{aligned} \quad (12)$$

对应的,若 $S'_{i,i}=-1$,则代入(7)式:

$$\begin{aligned} \mu_{i,off} &= P_{i,s}^+(t)I_{i,t} + [1 - P_{i,s}^+(t)]\mu_{i,off}, \\ \sigma_{i,off} &= P_{i,s}^+(t)(|I_{i,t} - \mu_{i,off}|) + [1 - P_{i,s}^+(t)]\sigma_{i,off}. \end{aligned} \quad (13)$$

4 实验结果分析

图 13 显示了前 3 个灯所发送信号的恢复结果。其中左列的 3 幅图是接收到的 3 路信号码流,每一路码流由一个光源所发送,各个光源所发送的码流各不相同;中间列的 3 幅图显示的是恢复出来的码流,根据其高低信号分布可以转换为 0-1 序列的码流,分别对应着前文所述的 3 个码流序列;右列的 3 幅图将恢复之后的各个码字叠加在中间列的图上所形成,与左侧图对比可见高低信号之间分布的若干误码已被纠正成对应的正确码字。

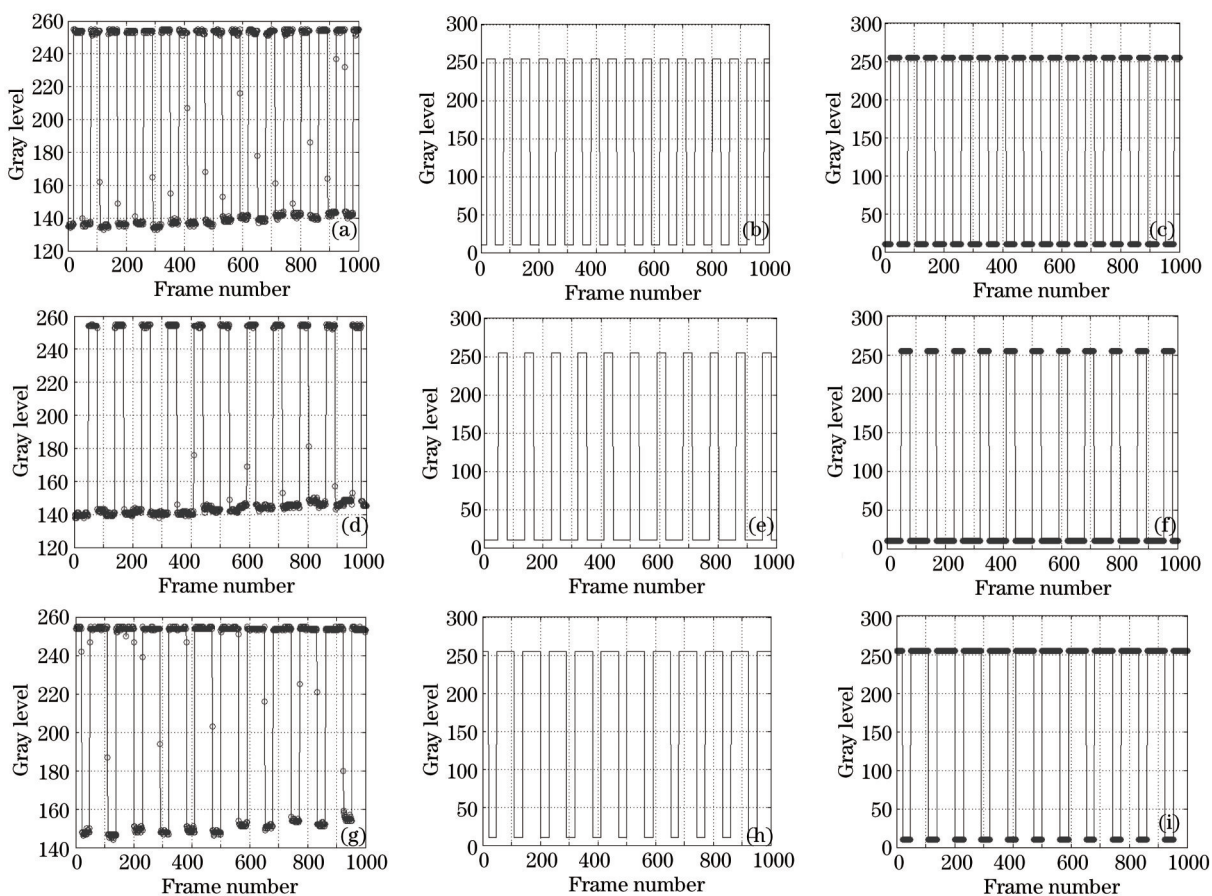


图 13 各个灯所接收到及所恢复出来的信号。(a)~(c) LED1; (d)~(f) LED2; (g)~(i) LED3

Fig.13 Signals received and restored by each LED as a function of time. (a)~(c) LED1; (d)~(f) LED2; (g)~(i) LED3

表 2 为发送端发送的信号码流与接收端恢复出来的的信号码流对比情况。由此可以更加直观地看出,经过上述算法的处理,发送端发送的码流在接收端均可被正确恢复出来。

由上述实验结果图可见,良好状态情况下,各个光源可正确更新灯亮和灯灭状态下的高斯分布模型,所传输的码流可被正确恢复,理想状态下可恢复出所发送的 0 和 1 序列。遇到误码或环境受瞬间的强烈干扰时,光源的当前亮度值匹配不上亮和灭两个高斯模型的情况下,通过近邻算法的使用,也能正确地更新高斯

模型。最终识别出了各个传输通道的信号,并进一步恢复出了 n 路码流。实验中出现的少量误码均可被正确纠正并恢复出原始发送信号。

表 2 发送和接收的信号码流对比情况

Table 2 Comparison of signal sequences sent and received

	Signal sequences which are sent	Signal sequences which are received
LED1	{1,0,...}	{1,0,...}
LED2	{1,0,0,...}	{1,0,0,...}
LED3	{1,0,1,...}	{1,0,1,...}
LED4	{1,1,0,...}	{1,1,0,...}
LED5	{1,0,0,0,...}	{1,0,0,0,...}
LED6	{1,0,0,1,...}	{1,0,0,1,...}
LED7	{1,0,1,1,...}	{1,0,1,1,...}
LED8	{1,1,0,0,...}	{1,1,0,0,...}
LED9	{1,1,0,1,...}	{1,1,0,1,...}

5 结 论

基于摄像头的无线信号接收机制是一个新的研究方向,在实用性和可操作性方面前进了一步。所提出的算法不再需要使用多个光源来协同合作,规避了现有系统中存在的多径干扰和光源布局与同步困难等问题。此接收装置可以同时接收半空间甚至是整个空间(使用全景摄像头)的信号,采用多通道传输室内可见光信号,在扩展传输带宽方面具有一定的创新。

参 考 文 献

- 1 Liu Yang, Zhang Guoan. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090601.
刘 洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090601.
- 2 Lu Qingfeng, Ji Xincheng, Huang Kaizhi, *et al.* Power allocation method for reducing nonlinearity clipping distortion in asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing based visible light communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0706004.
陆庆峰, 季新生, 黄开枝, 等. 降低可见光通信不均匀限幅正交频分复用系统非线性限幅失真的功率分配方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0706004.
- 3 H Elgala, R Mesleh, H Haas. Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(9): 56-62.
- 4 T Komine, M Nakagawa. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- 5 Xu DanTong. Research and Design of Optical Transceiver in Visible Light Communication System Based on White LED [D]. Nanjiang: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.
徐丹彤. 基于白光 LED 的可见光通信系统中光接收发射器的研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- 6 Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system [J]. *Optoelectronics*, 2007, 34(1): 131-134.
丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC 系统的光源布局设计与仿真研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(1): 131-134.
- 7 Gu Yuanpei, He Ning, He Zhiyi. Research on mobile electronic guide system based on lighting LED optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 0406003.
顾元培, 何 宁, 何志毅. 基于 LED 光通信的移动电子导览系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 0406003.
- 8 C Kottke, K Habel, L Grobe, *et al.* Single-channel wireless transmission at 806 Mbit/s using a white-light LED and a PIN-based receiver [C]. 2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2012. 1-4.
- 9 Wang Chao, Zhu Yijun, Yang Yuhong. Interleave-division multiple-access for high-speed visible light communication

- in parallel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0406003.
- 王 超,朱义君,杨育红. 可见光并行高速通信交织分多址技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0406003.
- 10 D C O'Brien, L Zeng, H Le-Minh, *et al.*. Visible light communications: Challenges and possibilities[C]. *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2008. 1-5.
- 11 M Yoshino, S Haruyama, M Nakagawa. High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor [C]. *IEEE Radio and Wireless Symposium*, 2008. 439-442.
- 12 M S Rahman, M M Haque, K D Kim. Indoor positioning by LED visible light communication and image sensor [J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2011, 1(2): 161-170.
- 13 S Zhang, S Watson, J J D McKendry, *et al.*. 1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using CMOS-controlled GaN-based LEDs [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(8): 1211-1216.
- 14 Huang Xingxing, Li Rongling, Wang Yuanquan, *et al.*. Models of MIMO technology-based visible light communication and their technical analysis [J]. *Study on Optical Communications*, 2013, 39(6): 55-57.
- 黄星星, 李荣玲, 王源泉, 等. 基于MIMO技术的可见光通信模型和技术分析[J]. *光通信研究*, 2013, 39(6): 55-57.
- 15 Wan Xuying, Liang Zhongcheng. Research of the Visible Light Communication System Based on MIMO Technology [D]. *Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 2013.
- 王旭颖, 梁忠诚. 基于MIMO技术的可见光通信系统的研究[D]. 南京邮电大学, 2013.
- 16 Chen Juan, Ke Xizheng, Cheng Ting. Difference space time code for free space optical multiple input multiple output system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206004.
- 湛 娟, 柯熙政, 程 婷. 自由空间光多输入多输出系统中的差分空时码[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0206004.
- 17 Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun. Design of multi-element transmitting antenna for indoor visible light communication [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 29(3): 238-242.
- 丁德强, 柯熙政, 李建勋. 室内可见光通信多阵元发射天线优化设计[J]. *应用科学学报*, 2011, 29(3): 238-242.
- 18 K D Dambul, D C O'Brien, G Faulkner. Indoor optical wireless MIMO system with an imaging receiver [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(2): 97-99.
- 19 A H Azhar, T-A Tran, D C O'Brien. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(2): 171-174.
- 20 S M Kim, J B Jeon. Experimental demonstration of 4×4 MIMO wireless visible light communication using a commercial CCD image sensor [J]. *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, 2012, 10(3): 220-224.
- 21 H Ukida, M Miwa, Y Tanimoto, *et al.*. Visual communication using LED panel and video camera for mobile object [C]. *IEEE conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 2012. 321-326.
- 22 Dechang Wang, Xuenan Cui, E Park, *et al.*. Adaptive flame detection using randomness testing and robust features [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 55: 116-125.

栏目编辑: 王晓琰