

# 一种可见光隐式成像通信帧同步补偿算法

李明超, 胡赞鹏, 姚祥文, 唐燕群, 沈智翔

信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 为解决可见光隐式成像通信中收发两端不同步的问题, 分析了显示屏与相机链路间的特性, 将收发端不同步问题总结为丢帧和混合帧问题。针对丢帧和混合帧问题, 建立了合理的接收帧数学模型。从该模型出发, 分析差异帧绝对值的空间均值特性, 提出丢帧检测算法; 分析差异帧绝对值的行均值特性和差异帧行方差特性, 提出混合帧模糊区域检测算法。仿真和实验结果表明, 提出的帧同步补偿算法能够有效解决丢帧和混合帧问题, 达到了良好的帧同步效果, 改善了系统误码性能, 实现隐式信息的可靠传输。

**关键词** 光通信; 光成像通信; 帧同步补偿算法; 隐式传输

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0106002

## Frame Synchronization Compensation Algorithm for Visible Light Implicit Imaging Communication

Li Mingchao, Hu Yunpeng, Yao Xiangwen, Tang Yanqun, Shen Zhixiang

*Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China*

**Abstract** To solve the unsynchronized problem between the transmitter end and the receiver end in visible light implicit imaging communication, we analyze the characteristics of display camera link, and summarize the unsynchronized problems as frame loss and frame fusion. Aiming at the frame loss and frame fusion, we establish a reasonable mathematical model for received frames. Based on the model, a frame loss detecting algorithm is proposed by analysis of spatial mean characteristics of difference frame absolute values, and a frame fusion fuzzy region detecting algorithm is proposed by utilization of row mean characteristics of difference frame absolute values and row variance characteristics of difference frames. The simulation and experimental results show that the proposed frame synchronization compensation algorithms can solve the frame loss and frame fusion effectively, achieve good frame synchronization effect, improve system bit error rate performance, and complete reliable transmission of implicit information.

**Key words** optical communications; optical imaging communication; frame synchronization compensation algorithm; implicit transmission

**OCIS codes** 060.4510; 060.2350; 150.1135; 120.7000

## 1 引 言

近年来,随着高分辨率相机在手持电子终端中的普及,以及相机与环境实现交互获取数据,可见光成像通信应运而生<sup>[1-3]</sup>。在可见光光谱上进行操作,利用发光二极管或显示屏作为发送端,相机作为接收端,通过光学视距信道传输信息,逐渐成为可见光通信的一个新趋势<sup>[4]</sup>。目前可见光成像通信主要有

显式和隐式两类,其中显示成像通信最常见的应用是二维码;而隐式成像通信旨在人眼视觉无感的情况下实现信息的隐式传输,逐渐吸引了越来越多学者们的关注。

目前关于可见光隐式成像通信的研究取得了一定的进展。文献[5]利用数字水印的方式实现信息隐式传输;文献[6]利用色彩互补的条形码实现信息隐式传输;文献[7]利用计算机视觉中 alpha 信道的

**收稿日期:** 2017-07-13; **收到修改稿日期:** 2017-08-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(61601516)

**作者简介:** 李明超(1993—),男,硕士研究生,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: vlc\_lmc@163.com

**导师简介:** 胡赞鹏(1978—),男,副教授,硕士生导师,主要从事多天线合成与可见光通信等方面的研究。

E-mail: hyp1978@126.com

概念,简化了信息嵌入过程,实现实时信息隐式传输;文献[8]利用人眼视觉暂留特性,提出互补帧设计方案,实现信息隐式传输;文献[9]综合考虑文献[6-8],获得了更好的隐式效果以及更快的传输速率。以上研究虽然取得了一定进展,但还是难以保证信息传输的可靠性,其主要原因是显示屏-相机链路之间的帧同步问题,上述研究基本上忽略了该问题。文献[9]虽然注意到帧同步问题,但其只要求相机帧速率是显示屏刷新率的两倍,减轻了帧同步问题的影响,同时提高了接收端硬件要求。

显示屏-相机之间的帧同步问题是由不理想的硬件特性造成的,包括不稳定的显示屏刷新率和相机帧速率,显示屏按行刷新特性和 CMOS 卷帘特性等。不理想的硬件特性主要导致两种帧同步问题:丢帧<sup>[10]</sup>和混合帧<sup>[10-11]</sup>,其中混合帧是必然存在的,而丢帧是随机发生的。针对帧同步问题,已有相关文献进行了初步的研究。文献[10]通过设计发送端编码方式,利用帧间颜色标记和纠错码来补偿帧同步问题;文献[11]针对混合帧问题,将接收帧建模为相邻两帧的线性叠加,提出混合帧缝隙检测算法,但是没有考虑随机丢帧和噪声对模型的影响,也没有分析透视失真对算法性能的影响。

基于以上分析,本文在显示屏刷新率和相机帧速率相等的前提下,采取发送端互补帧<sup>[6,8-9]</sup>设计方案,在接收端补偿帧同步问题。首先对显示屏以及相机的时间行为进行建模,建立接收端视频帧的数学模型。该模型引入混合因子表征相邻两帧的混合,引入时延因子表征丢帧,同时考虑噪声的影响;其次基于模型解释帧同步问题,利用差异帧统计特性补偿帧同步问题;最后通过实验分析了算法在不同嵌入强度和透视失真参数下的性能,以及算法对系统误码性能的影响。

## 2 系统模型

### 2.1 发送端模型

发送端采用互补帧<sup>[6,8-9]</sup>设计方案,

$$x_k(i, j) = y_k(i, j) + d_k(i, j), \quad (1)$$

$$d_k(i, j) = (-1)^{(k \bmod 2)} \times s_{\lfloor k/K \rfloor}(\lfloor iB_1/M \rfloor, \lfloor jB_2/N \rfloor)\Delta, \quad (2)$$

式中  $y_k(i, j)$  为第  $k$  帧原始视频帧;  $d_k(i, j)$  为第  $k$  帧嵌入数据;  $x_k(i, j)$  为叠加信息后的第  $k$  帧视频帧;  $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$  代表发送端图像像素坐标,  $M$  和  $N$  为图像高和宽。为提高系统性能,通常采取分集和复用的方式将图像等大小分块,总共分

$B_1 \times B_2$  块,在同一像素块内传输相同信息,在不同像素块内传输不同信息,并且每  $W$  帧切换一次数据。调制方式如(2)式所示,  $d_k(i, j)$  由序列  $s_q(b_1, b_2)$  调制生成,  $s_q(b_1, b_2)$  等概率取值 1 和 -1, 由 1 和 0 映射得到;  $\bmod$  为取模运算;  $\lfloor \cdot \rfloor$  为向上取整运算;  $\Delta$  代表嵌入信息的强度(理论取值 0~255), 较大的  $\Delta$  有利于信息的恢复,但不利于信息的隐藏。在这种信息嵌入方式下,当显示屏刷新率高于人眼临界闪烁频率(40~50 Hz)<sup>[8]</sup>时,人眼不可察觉。

### 2.2 接收端模型

假设显示屏和相机完美对准,并且显示屏在相机的焦距处,显示屏像素和相机像素一一对应,并且到达相机的光信号能量不会损失<sup>[12]</sup>。为保证相机能够成功捕获全部嵌入信息,相机帧速率应高于或等于显示屏刷新率<sup>[13]</sup>。本文考虑两者速率相等的情况。基于文献[10-11],接收端视频帧数学模型为

$$\tilde{x}_k(i, j) = [1 - \lambda_k(i, j)]x_{k+\tau_1}(i, j) + \lambda_k(i, j)x_{k+\tau_2}(i, j) + n_k(i, j), \quad (3)$$

式中  $\tilde{x}_k(i, j)$  为接收帧;  $0 \leq \lambda_k(i, j) \leq 1$  为混合因子,代表发送端相邻两帧在当前接收帧中的混合比例;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  为丢帧带来的时延因子,  $n_k(i, j)$  为加性高斯白噪声,均值为 0, 方差为  $\sigma^2$ 。

解决丢帧和混合帧问题所考虑的侧重点不同,故需合理简化上述模型。丢帧问题只需从整体上考虑视频帧随时间的变化规律,可以忽略帧内部不同混合因子之间的差异。假设混合因子在某一帧内保持不变,相邻帧混合因子缓慢变化,(3)式可以简化为

$$\tilde{x}_k(i, j) = (1 - \lambda_k)x_{k+\tau_1}(i, j) + \lambda_k x_{k+\tau_2}(i, j) + n_k(i, j). \quad (4)$$

混合帧问题需要检测某一帧内的模糊区域,需要考虑一帧内混合因子的变化,由于 CMOS 传感器对同一行像素同时曝光<sup>[14]</sup>,因此可假设同一行内像素的混合因子相同<sup>[11]</sup>, (3)式可简化为

$$\tilde{x}_k(i, j) = [1 - \lambda_k(i)]x_{k+\tau_1}(i, j) + \lambda_k(i)x_{k+\tau_2}(i, j) + n_k(i, j). \quad (5)$$

## 3 接收端帧同步问题

隐式信息经显示屏推送,在接收端被相机捕获,由于帧同步问题的存在,在进一步处理之前需要补偿帧同步问题。接收端首先将接收帧进行分组,同一组内嵌入数据相同,不同组内嵌入数据不同,因此只需考虑同一组内接收视频帧的帧同步问题。利用

差异帧统计特性分别讨论丢帧和混合帧,进而补偿帧同步问题。

### 3.1 丢帧问题

将接收端前后两帧的差值定义为差异帧,记为  $\Delta\tilde{x}_{(k,k-1)}(i,j)$ , 则

$$\Delta\tilde{x}_{(k,k-1)}(i,j) = \tilde{x}_{k-1}(i,j) - \tilde{x}_k(i,j), \quad (6)$$

将差异帧绝对值的空间均值记为  $M(k,k-1)$  或

$$\Delta\tilde{x}_{(k,k-1)}(i,j) = \tilde{x}_{k-1}(i,j) - \tilde{x}_k(i,j) \approx (2 - 4\lambda_k)d_k(i,j) + n_{k-1}(i,j) - n_k(i,j), \quad (8)$$

则差异帧绝对值的空间均值  $M(k,k-1)$  为

$$M(k,k-1) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sigma \cdot \exp\left[-\frac{f^2(\lambda_k)}{4\sigma^2}\right] + \left\{1 - 2 \cdot Q\left[\frac{f(\lambda_k)}{\sqrt{2}\sigma}\right]\right\} f(\lambda_k), \quad (9)$$

式中  $f(\lambda_k) = (4\lambda_k - 2)\Delta$ ,  $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$ 。具体推导过程如下。

假设随机变量  $X$  服从正态分布,记为  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 则

$$\begin{aligned} E(|X|) &= \int_{-\infty}^{+\infty} |x| \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \int_{-\infty}^{+\infty} |x+\mu| \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = \\ &= \int_{-\mu}^{+\infty} (x+\mu) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx + \int_{-\infty}^{-\mu} (-x-\mu) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = \\ &= \int_{-\mu}^{+\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx + \int_{-\infty}^{-\mu} (-x) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx + \int_{-\mu}^{+\infty} \mu \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx + \\ &= \int_{-\infty}^{-\mu} (-\mu) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) + \left[1 - 2Q\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)\right]\mu. \end{aligned} \quad (10)$$

当  $X \sim N(-\mu, \sigma^2)$  时,

$$\begin{aligned} E(|X|) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) + \left[1 - 2Q\left(\frac{-\mu}{\sigma}\right)\right](-\mu) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) + \\ &= \left\{1 - 2\left[1 - Q\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)\right]\right\}(-\mu) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) + \left[1 - 2Q\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)\right]\mu \end{aligned} \quad (11)$$

即当  $X \sim N(\pm\mu, \sigma^2)$  时,  $E(|X|) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sigma \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}\right) + \left[1 - 2Q\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)\right]\mu$ 。

考虑接收端丢帧情况,若第  $k$  帧是第  $\tau$  次丢帧,则接收端第  $k-2, k-1, k$  帧可以表示为

$$\tilde{x}_{k-2}(i,j) = (1 - \lambda_{k-2})x_{k+\tau-2}(i,j) + \lambda_{k-2}(i,j)x_{k+\tau-3}(i,j) + n_{k-2}(i,j), \quad (12)$$

$$\tilde{x}_{k-1}(i,j) = (1 - \lambda_{k-1})x_{k+\tau}(i,j) + \lambda_{k-1}x_{k+\tau-2}(i,j) + n_{k-1}(i,j), \quad (13)$$

$$\tilde{x}_k(i,j) = (1 - \lambda_k)x_{k+\tau+1}(i,j) + \lambda_kx_{k+\tau}(i,j) + n_k(i,j), \quad (14)$$

因此丢帧情况下差异帧可以表示为

$$\Delta\tilde{x}_{(k-1,k-2)}(i,j) = \tilde{x}_{k-2}(i,j) - \tilde{x}_{k-1}(i,j) \approx -2\lambda_{k-2}d_{k+\tau}(i,j) + n_{k-2}(i,j) - n_{k-1}(i,j), \quad (15)$$

$$\Delta\tilde{x}_{(k,k-1)}(i,j) = \tilde{x}_{k-1}(i,j) - \tilde{x}_k(i,j) \approx (2 - 2\lambda_k)d_{k+\tau}(i,j) + n_{k-1}(i,j) - n_k(i,j). \quad (16)$$

则丢帧情况下差异帧绝对值的空间均值  $M_L(k-1, k-2)$  和  $M_L(k, k-1)$  可以表示为

$$M_L(k-1, k-2) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sigma \cdot \exp\left[-\frac{f_1^2(\lambda_k)}{4\sigma^2}\right] + \left\{1 - 2Q\left[\frac{f_1(\lambda_k)}{\sqrt{2}\sigma}\right]\right\} f_1(\lambda_k), \quad (17)$$

$$M_L(k, k-1) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sigma \cdot \exp\left\{-\frac{[2\Delta - f_1(\lambda_k)]^2}{4\sigma^2}\right\} + \left\{1 - 2Q\left[\frac{2\Delta - f_1(\lambda_k)}{\sqrt{2}\sigma}\right]\right\} [2\Delta - f_1(\lambda_k)], \quad (18)$$

式中  $f_1(\lambda_k) = 2\lambda_k\Delta$ 。

$M_L(k, k-1)$ , 其中  $M(k, k-1)$  代表不丢帧情况,  $M_L(k, k-1)$  代表丢帧情况, 则

$$\begin{cases} M(k, k-1) = E[|\Delta\tilde{x}_{(k,k-1)}(i,j)|] \\ M_L(k, k-1) = E[|\Delta\tilde{x}_{(k,k-1)}(i,j)|] \end{cases} \quad (7)$$

考虑接收端不丢帧情况, 则  $\tau_1 = 1, \tau_2 = 0$ 。假设原始视频帧随时间缓慢变化, 即  $y_k(i, j) \approx y_{k-1}(i, j)$ 。差异帧可以简化为

仿真观察差异帧绝对值的空间均值随混合因子  $\lambda_k$  的变化趋势。图 1(a) 为  $M(k, k-1)$  的变化趋势, 可以看出  $M(k, k-1)$  关于  $\lambda_k = 1/2$  对称, 呈现先减再增的趋势; 图 1(b) 为  $M_L(k-1, k-2)$  的变化趋势, 可以看出其随  $\lambda_k$  单调递增; 图 1(c) 为  $M_L(k, k-1)$  的变化趋势, 可以看出其随  $\lambda_k$  单调递

减。对比图 1(a)~(c), 可以发现丢帧使得差异帧绝对值的空间均值特性发生明显变化。图 1(d) 为  $|M(k, k-1) - M_L(k-1, k-2)|$  和  $|M(k, k-1) - M_L(k, k-1)|$  的变化趋势, 可以看出无论  $\lambda_k$  取何值, 两者之间总有其一取值较大, 利用这一较大的差值可以检测丢帧位置。

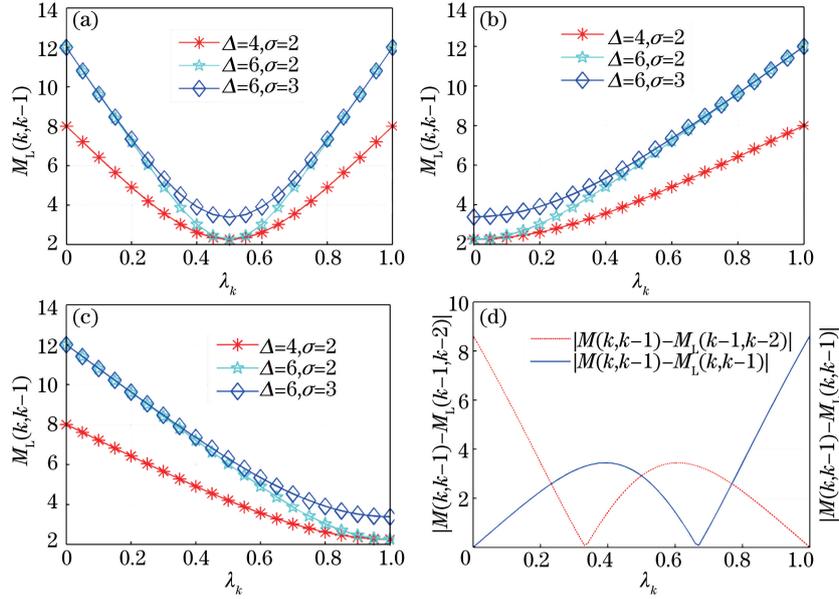


图 1 不同参数下差异帧的空间均值特性变化趋势。(a)  $M(k, k-1)$ ; (b)  $M_L(k-1, k-2)$ ; (c)  $M_L(k, k-1)$ ; (d)  $|M(k, k-1) - M_L(k-1, k-2)|$  和  $|M(k, k-1) - M_L(k, k-1)|$

Fig. 1 Variation tendency of the difference frame mean characteristics for different parameters. (a)  $M(k, k-1)$ ; (b)  $M_L(k-1, k-2)$ ; (c)  $M_L(k, k-1)$ ; (d)  $|M(k, k-1) - M_L(k-1, k-2)|$  and  $|M(k, k-1) - M_L(k, k-1)|$

因此判断丢帧的准则如下:

1) 若  $|m(k, k-1) - \hat{M}(k-1, k-2)| > T_1$  或  $|m(k, k-1) - \hat{M}(k, k-1)| > T_1$ , 则认为  $k, k-1, k+1$  为可能的丢帧位置, 其中  $\hat{M}(k, k-1)$  为  $M(k, k-1)$  的估计值;

2) 排除虚假的丢帧位置, 真实丢帧位置  $k_r = \arg \min_{k-1 \leq l \leq k+1} [m_1(l)]$ 。其中  $m(k, k-1) = (MN)^{-1} \times \sum_{i,j=1}^{i=M, j=N} |\bar{x}_{k-1}(i, j) - \bar{x}_k(i, j)|$  为利用实际接收帧计算的差异帧绝对值的空间均值, 可以利用  $m(k, k-1)$  得到。另外  $m_1(k) = (MN)^{-1} \sum_{i,j=1}^{i=M, j=N} |\bar{x}_{k-2}(i, j) +$

$\bar{x}_{k+2}(i, j) - \bar{x}_k(i, j) - \bar{x}_{k+1}(i, j)|$ 。

证明过程如下。

若假设接收端第  $k$  帧为第  $\tau$  次丢帧, 则  $M_L(k-1, k-2)$  或  $M_L(k, k-1)$  与  $M(k, k-1)$  有明显差异, 即  $|m(k, k-1) - \hat{M}(k-1, k-2)| > T_1$  或  $|m(k, k-1) - \hat{M}(k, k-1)| > T_1$ , 前者可能是第  $k$  帧或  $k-1$  帧丢失造成, 后者可能是第  $k$  帧或  $k+1$  帧丢失造成, 因此判定  $k, k-1, k+1$  为可能的丢帧位置。

定义  $M_L(l) = E[|\bar{x}_{l-2}(i, j) + \bar{x}_{l+2}(i, j) - \bar{x}_l(i, j) - \bar{x}_{l+1}(i, j)|]$ , 根据假设

$$M_L(k) \approx E[|n_{k-2}(i, j) + n_{k+2}(i, j) - n_k(i, j) - n_{k+1}(i, j)|], \quad (19)$$

$$M_L(k-1) \approx E[|2\lambda_k \Delta + n_{k-3}(i, j) + n_{k+1}(i, j) - n_{k-1}(i, j) - n_k(i, j)|], \quad (20)$$

$$M_L(k+1) \approx E[|2(\lambda_k - 1)\Delta + n_{k-1}(i, j) + n_{k+3}(i, j) - n_{k+1}(i, j) - n_{k+2}(i, j)|], \quad (21)$$

易证  $M_L(k) \leq M_L(k-1)$  且  $M_L(k) \leq M_L(k+1)$ 。因此真实丢帧位置  $k_r$  最小化  $M_L(l)$ ,  $k_r =$

$\arg \min_{k-1 \leq l \leq k+1} [M_L(l)]$ , 即  $k_r = \arg \min_{k-1 \leq l \leq k+1} [m_1(l)]$ , 证毕。

具体算法流程如图 2 所示。利用图 2 所示算法

检测得到丢帧位置,然后丢掉丢帧位置前面的一帧,即可恢复原始嵌入信息的正反叠加顺序。

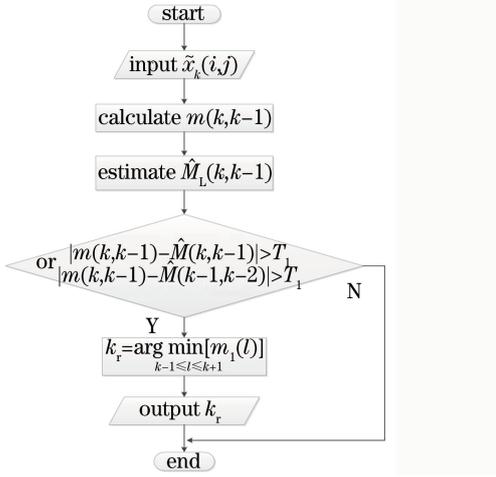


图 2 流程图

Fig. 2 Frame loss detecting algorithm flow chart

### 3.2 混合帧问题

在 3.1 节的基础上进一步讨论混合帧问题,利用差异帧绝对值的行均值特性和差异帧行方差特性检测混合区域。假设经过丢帧检测和处理后接收帧表示为  $x'_k(i, j)$ 。混合帧如图 3 所示,图 3(a)、(b)分别表示  $\lambda_k \approx 1$  和  $\lambda_k \approx 0$  时的差异帧,此时人眼难以察觉到混合;图 3(c)表示  $\lambda_k \approx 0.5$  时的差异帧,人眼可以明显察觉到混合,其上部与图 3(b)中上半部分相同,下部与图 3(a)下半部分相同,中间部分为模糊区域。若直接利用差异帧进行数据判决会导致

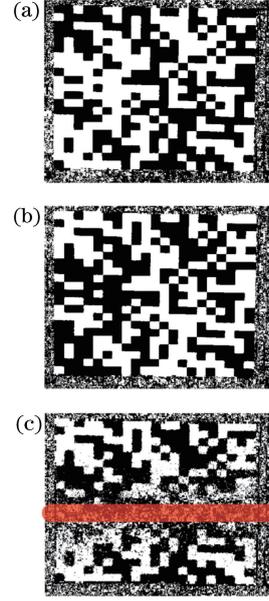


图 3 混合帧示意图。(a)  $\lambda_k(i, j) \approx 1$ ;  
(b)  $\lambda_k(i, j) \approx 0$ ; (c)  $\lambda_k(i, j) \approx 0.5$

Fig. 3 Demonstration of frame fusion. (a)  $\lambda_k(i, j) \approx 1$ ;  
(b)  $\lambda_k(i, j) \approx 0$ ; (c)  $\lambda_k(i, j) \approx 0.5$

误码率较大,因此需要对其进行适当的同步补偿以减轻混合帧的影响。混合帧问题需要检测模糊区域,而模糊区域是由于该区域混合因子近似为 0.5,导致差异帧几乎由噪声决定。因此混合帧问题可以等效为检测混合因子近似为 0.5 的区域。

定义差异帧  $\Delta \tilde{x}'_{(k,k-1)}(i, j)$  第  $i$  行绝对值的行均值为  $M_i(k, k-1)$ , 则

$$M_i(k, k-1) \approx E\{|[2 - 4\lambda_k(i)] \cdot d_k(i) + n_{k-1}(i) - n_k(i)|\} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma \cdot \exp\left\{-\frac{f^2[\lambda_k(i)]}{4\sigma^2}\right\} + \left\{1 - 2Q\left\{\frac{f[\lambda_k(i)]}{\sqrt{2}\sigma}\right\}\right\} f[\lambda_k(i)] \quad (22)$$

式中  $f[\lambda_k(i)] = [4\lambda_k(i) - 2]\Delta$ 。

定义差异帧  $\Delta \tilde{x}'_{(k,k-1)}(i, j)$  第  $i$  行的方差为  $V_i(k, k-1)$ , 则

$$V_i(k, k-1) = E\{[\Delta \tilde{x}'_{(k,k-1)}(i)]^2\} - E^2[\Delta \tilde{x}'_{(k,k-1)}(i)] = E\{[2 - 4\lambda_k(i)]^2 \cdot d_k^2(i)\} + E\{[n_{k-1}(i) - n_k(i)]^2\} - E^2\{[4\lambda_k(i) - 2] \cdot d_k(i) + n_{k-1}(i) - n_k(i)\} = E\{[2 - 4\lambda_k(i)]^2\} \Delta^2 + 2\sigma^2 \approx [2 - 4\lambda_k(i)]^2 \Delta^2 + 2\sigma^2. \quad (23)$$

令  $V'_i(k, k-1) = V_i(k, k-1) / \sigma \sqrt{\pi}$ , 定义差异帧  $\Delta \tilde{x}'_{(k,k-1)}(i, j)$  第  $i$  行的方均比  $R(i)$  为

$$R(i) = V'_i(k, k-1) / M_i(k, k-1). \quad (24)$$

$M_i(k, k-1)$ 、 $V'_i(k, k-1)$  以及方均比  $R(i)$  随混合因子的变化趋势如图 4 所示。

可以得到当且仅当  $\lambda_k(i) = 0.5$  时,

$$R(i) \Big|_{\lambda_k(i)=0.5} = \frac{2\sigma^2}{2\sigma/\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} = 1, \text{ 即图 4 红线所代}$$

表的位置,并且  $R(i) \Big|_{\lambda_k(i) \neq 0.5} > R(i) \Big|_{\lambda_k(i)=0.5}$ 。因此利用  $\lambda_k(i) = 0.5$  时方均比的特性可以检测差异帧的模糊区域。假设模糊区域为集合  $S$ , 因此检测差异帧模糊区域准则为:若  $|R(i_0) - 1| \leq T_2$ , 则  $i_0 \in S$ 。

具体算法流程如图 5 所示,利用图 5 算法可以检测差异帧的模糊区域,根据检测出来的区域进一步处理后解码可提高解调性能。

综上,考虑接收端同步补偿,该系统框图如图 6

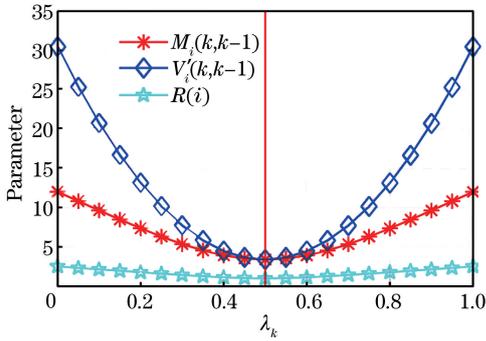


图 4  $M_i(k, k-1)$ 、 $V_i'(k, k-1)$

以及  $R(i)$  随混合因子的变化趋势 ( $\sigma=3, \Delta=6$ )

Fig. 4 Variation of  $M_i(k, k-1)$ ,  $V_i'(k, k-1)$  and  $R(i)$  with mixing factor ( $\sigma=3, \Delta=6$ )

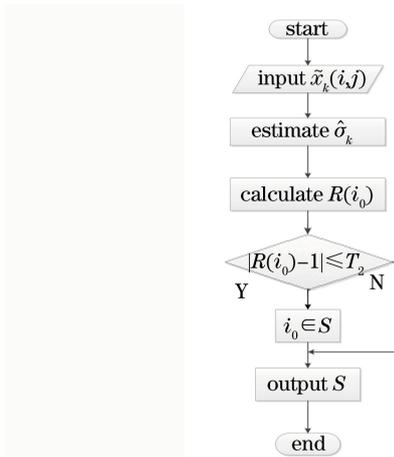


图 5 混合帧混合区域检测算法流程图

Fig. 5 Frame fusion fuzzy regions detecting algorithm flow chart

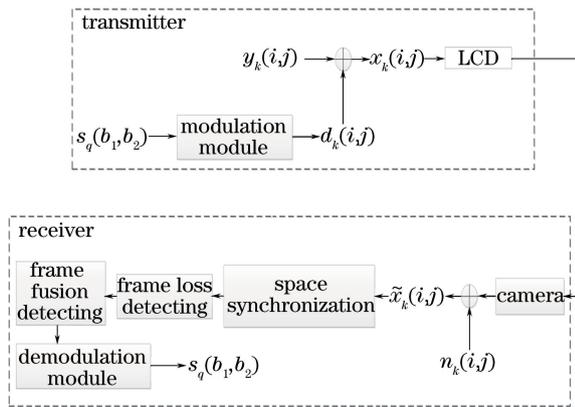


图 6 系统框图

Fig. 6 System diagram

所示,图中 LCD 为液晶显示屏。。

## 4 实验验证

为验证模型的有效性和评估算法,搭建了实际的隐式成像通信系统进行相关测试。对比实际和理

论情况下差异帧绝对值的空间均值变化趋势,说明模型的有效性;验证本文算法在不同透视失真参数下的性能;给出本文算法对整个系统误码率的改善效果。

### 4.1 实验设置

系统的发送端为型号为 PHILIPS-272G5DYEB 的显示器,屏幕尺寸为 27 inch(1 inch=2.54 cm),分辨率为 1920 pixel×1080 pixel,嵌入信息后的视频在发送端以 60 Hz 刷新率进行播放;接收端为 iPhone 6s 手机,视频拍摄帧速率为 60 frame/s,分辨率为 1920 pixel×1080 pixel。经测试,实验室环境下光照强度约为 200 lx。实验验证中拍摄距离为 60~200 cm,拍摄角度为 0°~60°,在单个视频的拍摄过程中,保证发送端与接收端的相对位置保持不变。

### 4.2 实验结果及分析

#### 4.2.1 模型有效性

图 7(a)为嵌入强度分别为 4,6,8,16,分块数为 21×21,不切换数据,拍摄距离  $D$  为 60 cm,拍摄角度  $A$  为 0°情况下,实际差异帧绝对值的空间均值特性随时间的变化趋势,其中曲线中较大的波动表示该位置附近有丢帧。对比图 7(a)和图 1 可以发现,实际差异帧绝对值的空间均值特性随时间的变化趋势符合理论分析,从侧面说明了模型的有效性。图 7(b)给出空间同步示意图。

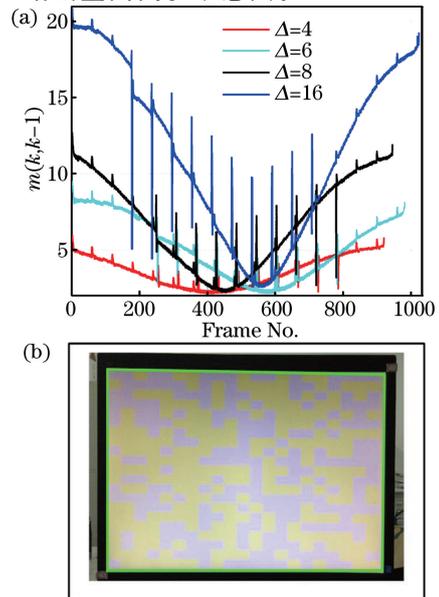


图 7 (a)实际差异帧绝对值均值特性随时间的变化趋势;(b)空间同步示意图

Fig. 7 (a) Variation of mean absolute difference frame with time; (b) demonstration of space synchronization

4.2.2 丢帧检测算法性能分析

为验证本文丢帧检测算法在不同透视失真参数下的性能,利用实际系统在不同透视失真参数下进行拍摄,并通过丢帧检测算法对拍摄得到的视频帧进行检测。性能评估指标采用统计学分类领域的  $F$ -Measure 指标<sup>[15]</sup>,其计算公式为

$$F = \frac{2PP'}{P + P'}, \quad (25)$$

式中  $P$  为准确率,  $P'$  为召回率。

实验中,对原始视频进行数据嵌入时,数据分块为  $21 \times 21$ ,不进行数据切换,单次视频的拍摄时间约为 15 s,在每一种透视失真参数下对同一视频进行 50 次拍摄后进行数据统计。图 8 为无空间同步条件下,丢帧检测算法在不同透视失真参数下的性能。图 8(a)为丢帧检测算法性能随距离  $D$  的变化,从图中可以发现,丢帧检测算法的性能随距离的增加逐渐变差,这是由于随着距离的增大,拍摄得到的视频帧图像中发送端所占的区域逐渐变小;在同一拍摄距离条件下,增大嵌入强度可以改善算法性能。图 8(b)为丢帧检测算法性能随角度  $\theta$  的变化,拍摄距离统一为 80 cm,从图中可以发现,丢帧

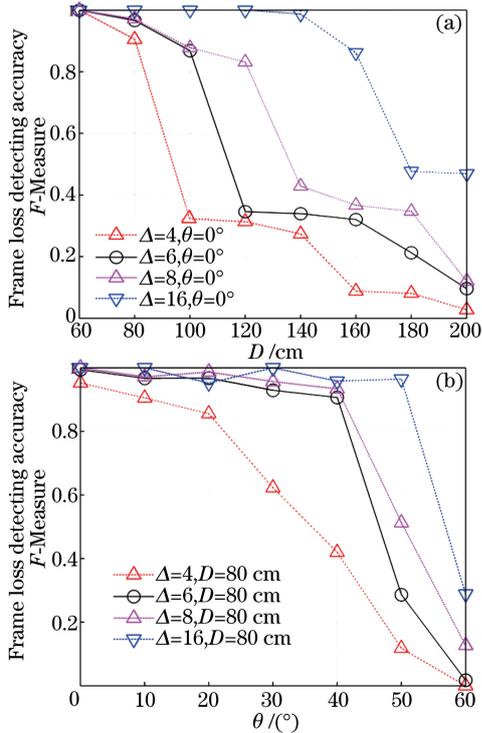


图 8 丢帧检测算法在不同透视失真参数下的性能(无空间同步)。(a)距离;(b)角度

Fig. 8 Performance of frame loss detecting algorithm under different perspective distortion parameters (without space synchronization). (a) Distance; (b) angle

检测算法的性能随角度的增加逐渐变差,这是由于随着角度的增大,发送端显示屏对光反射,导致拍摄视频帧图像的失真和模糊;同时当嵌入强度大于 6 且拍摄角度小于  $40^\circ$  时,检测性能始终高于 90%;在同一拍摄角度下,增大嵌入强度可以改善算法性能。

图 9 为有空间同步条件下,丢帧检测算法在不同透视失真参数下的性能。空间同步指的是在执行丢帧检测算法之前,对接收端拍摄得到的帧图像中的显示屏部分进行检测,如图 6(b)所示。对比图 8 和图 9 可以发现,在相同的透视失真参数下进行空间同步可以极大地改善算法性能,这是由于空间同步过程去除了接收端拍摄帧图像中的背景噪声。

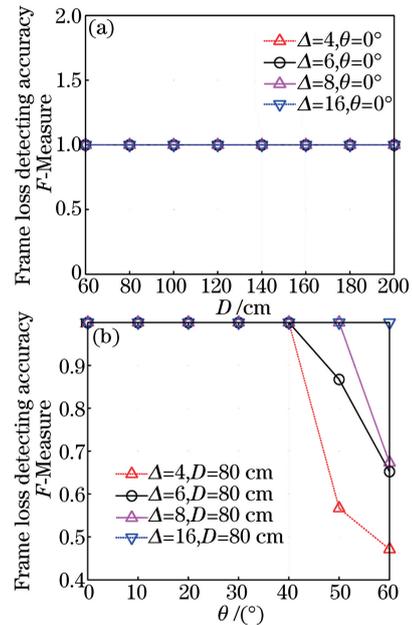


图 9 丢帧检测算法在不同透视失真参数下的性能(空间同步)。(a)距离;(b)角度

Fig. 9 Performance of frame loss detecting algorithm under different perspective distortion parameters (with space synchronization). (a) Distance; (b) angle

4.2.3 混合帧检测算法性能分析

在不同透视失真参数下进行拍摄后通过混合帧检测算法进行检测,以评估混合帧检测算法的性能,评估指标与前文一致。图 10 为空间同步条件下,混合帧检测算法在不同透视失真参数下的性能。图 10(a)为混合帧检测算法性能随距离的变化,从图中可以发现在 2 m 范围内(当拍摄距离为 2 m,角度为  $0^\circ$  时,发送端区域面积占接收端拍摄图像总面积的比例已小于  $1/9$ )算法性能并未随着距离的增大而明显降低,始终处于较高水平,并且嵌入强度对算法性能的影响并不明显;当距离大于 2 m 时,算法性

能随着距离的增大逐渐变差,并且增大嵌入强度可以改善算法性能。图 10(b)为混合帧检测算法性能随角度的变化,从图中可以发现混合帧检测算法随角度的增加性能逐渐变差,这是由于随着角度的增大,发送端显示屏对光反射,导致拍摄视频帧图像的失真和模糊;同时当嵌入强度大于 6 且拍摄角度小于  $30^\circ$  时,算法检测指标始终大于 90%;另外,在同一拍摄角度下,增大嵌入强度可以改善算法性能。

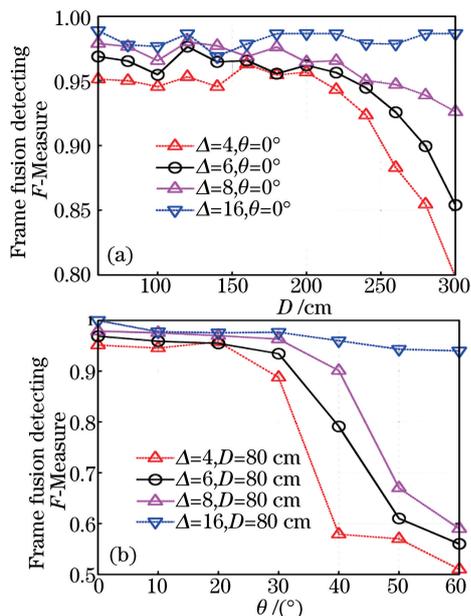


图 10 混合帧检测算法在不同透视失真参数下的性能(空间同步)。(a)距离;(b)角度

Fig. 10 Performance of frame fusion detecting algorithm under different perspective distortion parameters (with space synchronization). (a) Distance; (b) angle

#### 4.2.4 误码性能分析

图 11 为本文算法对整个系统误码率的改善效果,其中原始视频嵌入数据分块为  $21 \times 21$ ,进行数据切换( $W=12$ )<sup>[8]</sup>,每次拍摄时间约为 15 s。图 11(a)为不同距离下的误码率改善效果,在相同拍摄距离条件下,本文算法可以有效改善整个系统的误码率;当嵌入强度较大时,改善效果更为明显,这是由于当嵌入强度较小时,一方面信噪比低,另一方面降低了本文算法的性能,进而影响整个系统的误码率;在近距离条件下的改善效果强于远距离时的改善效果,尽管在空间同步条件下距离对本文算法的性能影响不大,但是远距离拍摄会带来失真和模糊,影响整个系统的误码率。图 11(b)为不同角度下的误码率改善效果,在相同的拍摄角度条件下,本文算法可以有效改善整个系统的误码率;与不同距离条件下的结

论类似,嵌入强度越大改善效果越明显,拍摄角度越小改善效果越明显。

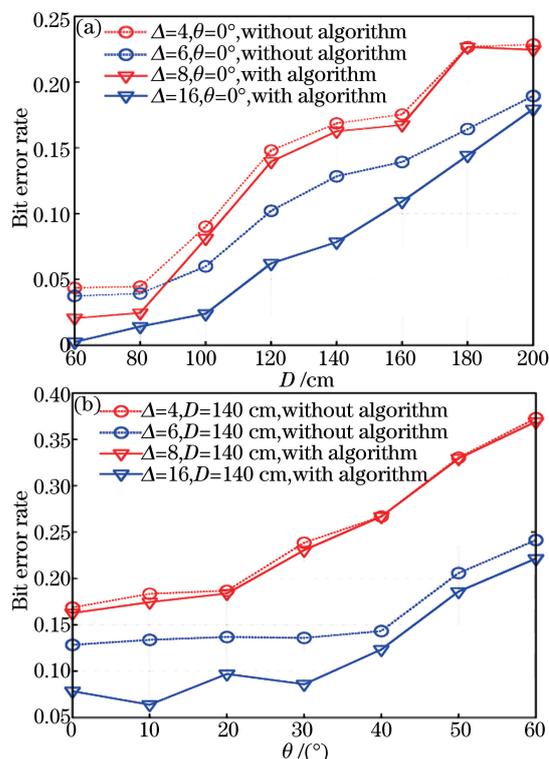


图 11 误码率性能对比(空间同步)。(a)距离;(b)角度  
Fig. 11 Contrast of bit error rate (with space synchronization). (a) Distance; (b) angle

## 5 结 论

通过对显示屏-相机链路进行建模,描述了接收端存在的帧同步问题——丢帧和混合帧问题。利用差异帧统计特性补偿帧同步问题,提出了丢帧检测算法和混合帧模糊区域检测算法,用以改善系统的通信性能。结果表明,在空间同步的前提下,所提算法能够有效补偿帧同步问题,改善系统误码性能。

## 参 考 文 献

- [1] Gao J Y, Wang D C, Yao J G. MIMO visible light wireless communication system employed camera-based receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106004.  
高俊英, 王德昌, 姚建国. 基于摄像头的 MIMO 可见光无线通信系统[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106004.
- [2] Zhu H Y, Zhu Y J. Invisible information casting system based on visible light communication[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906008.  
朱环宇, 朱义君. 基于可见光通信的隐式信息服务系统[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906008.

- [3] Li P X, Yang Y H, Zhu Y J, *et al.* Novel double-layer imaging visible light communication system with layered trace-orthogonal coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1206003.  
李鹏旭, 杨育红, 朱义君, 等. 新型层间迹正交码可见光双层成像通信系统[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1206003.
- [4] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, *et al.* Indoor positioning technology of visible light communication based on CDMA modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106006.  
关伟鹏, 吴玉香, 文尚胜, 等. 基于CDMA调制的可见光通信室内定位技术的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106006.
- [5] Yuan W, Dana K, Ashok A, *et al.* Dynamic and invisible messaging for visual MIMO[C]. *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 2012: 345-352.
- [6] Woo G, Lippman A, Raskar R. VRCodes: Unobtrusive and active visual codes for interaction by exploiting rolling shutter[C]//*Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2012: 59-64.
- [7] Li T, An C, Campbell A T, *et al.* HiLight: Hiding bits in pixel translucency changes[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2015, 18(3): 62-70.
- [8] Wang A, Peng C, Zhang O, *et al.* Inframe: Multiflexing full-frame visible communication channel for humans and devices[C]//*Proceedings of the 13<sup>th</sup> ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, 2014: 1-7.
- [9] Shi S, Chen L, Hu W, *et al.* Reading between lines: High-rate, non-intrusive visual codes within regular videos via implicit code[C]//*Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 2015: 157-168.
- [10] Hu W, Gu H, Pu Q. LightSync: Unsynchronized visual communication over screen-camera links[C]//*Proceedings of the 19<sup>th</sup> ACM Annual International Conference on Mobile Computing & Networking*, 2013: 15-26.
- [11] Shu X, Wu X. Frameuntangling for unobtrusive display-camera visible light communication[C]. *ACM Multimedia Conference*, 2016: 650-654.
- [12] Ashok A, Jain S, Gruteser M, *et al.* Capacity of screen-camera communications under perspective distortions[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 16: 239-250.
- [13] Kim B W, Kim H C, Jung S Y. Displayfield communication: Fundamental design and performance analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5269-5277.
- [14] Do T H, Yoo M. Performance analysis of visible light communication using CMOS sensors[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 309.
- [15] Hripcsak G, Rothschild A S. Agreement, the f-measure, and reliability in information retrieval[J]. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2005, 12(3): 296-298.