

基于可见光通信的隐式信息服务系统

朱环宇 朱义君

信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 提出了一种基于可见光通信(VLC)的隐式信息服务系统。将隐式信息嵌入载体图像或视频中,既保证原有图像、视频的正常显示,又能使隐式信息被成像器件获取并由相应算法解码恢复。对众多广告信息进行人眼视觉不可见的推送,可以有效地避免广告轰炸,实现针对目标人群的定向宣传。本系统易于移植于手机、平板电脑等手持设备操作平台。实验验证了系统的可行性,对影响系统性能的主要因素进行了评估。

关键词 光通信; 隐式信息传输; 可见光; 光学成像通信

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0906008

Invisible Information Casting System Based on Visible Light Communication

Zhu Huanyu Zhu Yijun

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

Abstract An invisible information casting system based on visible light communication (VLC) is proposed. Invisible information is embedded in normal displayed images which can be captured by imaging devices and recovered by corresponding decoding algorithms under the premise of displaying original images and videos normally. Transmitting advertisement information in the invisible way can avoid the harassment by mass media and realize directional advertisement to the target customers. The system is easy to be transplanted to many handheld devices like cell phones and pads. Finally, the system feasibility is verified and the main factors which affect the system performance are evaluated through experiments.

Key words optical communications; invisible information transmission; visible light; optical camera communication

OCIS codes 060.2605; 060.4510

1 引言

可见光通信具有许多独特的优点,因此引起了世界范围的广泛关注^[1-2]。传统的可见光通信系统通常分别使用发光二极管(LED)和光电探测器(PD)传输和检测信号。最近,一种称为光学成像通信(OCC)的新型可见光通信系统发展迅速。数码相机这类的图像传感器被用于获取由LED阵列或者液晶屏(LCD)发送的图像信息^[3-4]并输出对应的电信号以代表接收到光功率的空间分布,进而从接收到的图像中恢复出传送的信息。

日常生活中,由LED或LCD构成的诸如电子广告牌、电脑和电视屏幕这类显示设备随处可见^[5-7]。这些设备每天都会发送出大量的宣传广告,对大多数用户来说这些广告并没有提供有意义的信息,但对于商业用户来说不依靠广告轰炸就难以实现有效的商业宣传。一种基于可见光通信(VLC)的信息推送方法为解决这个问题提供了参考^[8]。在文献[8]的系统中,人眼无法察觉到的信息被嵌入到电子广告牌或电视、电脑屏幕显示的图像或视频上,而这些信息可以被数码相机所捕获,经过解码算法处理后从中即可恢复出隐式信息。

收稿日期: 2015-03-27; 收到修改稿日期: 2015-05-19

基金项目: 国家863计划(2013AA013603)

作者简介: 朱环宇(1990—),男,硕士研究生,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: zhuhuanyu777@163.com

导师简介: 朱义君(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事可见光通信等方面的研究。E-mail: xxgzhu@126.com.

通常,隐式传输可以用于向有需要的用户深入介绍屏幕中正常显示的商品,甚至直接推送该产品的购买链接。使用隐式信息服务系统取代可见的广告介绍和推广商品,可以在确保相应产品宣传效果的前提下减少对用户的广告骚扰。具体来说,如果用户对显示的商品感兴趣,就可以通过手机拍照的方式得到嵌入在商品图像中的隐式信息。例如,希望购买电视中某位演员同款服装的人过去需要网络搜索后才有可能得到不一定准确的商品信息,通过使用本系统,他们使用手机对电视中该商品的画面进行拍摄,通过软件对得到图片进行处理后,便可获取加载在画面中的诸如商品详情和购买链接这样的隐式信息。

本系统以LED阵列或LCD作为信号发送端,使用安装有摄像头的设备进行数据接收。嵌入的隐式信息可以应用解码算法由拍摄到的图像中恢复出来。这样的信息推送系统在广告和大型场馆导航等领域具有广泛的应用前景。截至2013年,在中国有超过4亿的智能手机用户,这些具备安装应用程序功能和高性能相机的设备为系统的推广带来了巨大的发展潜力^[9-11]。智能手机的普及使得二维码(Quick Response Code)得到广泛应用,与之相比,隐式信息服务系统需要使加载的信息不为人察觉;同时由于单帧图像承载的信息量有限,作为信息服务系统还必须处理多帧动态传输带来的同步问题。

2 可见光成像通信系统信道分析

在可见光成像通信系统中,随着收发两端距离、相对角度等使用条件的变化,接收到的图像质量会出现明显改变,影响到对各发送单元的判定、识别,乃至信息可否恢复。信息序列经过发送调制器对每个发送单元阵列进行调制,通过光学系统在成像器件上清晰成像,随后对各像素单元进行强度检测,最终通过接收端解调器恢复信息。

成像系统接收的矢量信号 \mathbf{y} 可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

式中,信道矩阵 \mathbf{H} 由发送端和接收端之间的直流增益组成^[12]。LED可以建模成朗伯辐射模型,所以第 j 个发送端到第 i 个接收端的直流增益^[13-15]可表示为

$$H_{ij} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_{ij}^2} \cos^m \phi T(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (2)$$

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{\frac{1}{2}})$ 为LED的发光阶数,取决于LED的半功率角 $\phi_{\frac{1}{2}}$ 。 A 是PD探测器的物理面积, D_{ij} 是第 j 个发送端到第 i 个接收端之间的距离, ϕ 是LED的发光角, ψ 是接收端光线入射角。 $T(\psi)$ 是光学滤波器的增益, ψ_c 是接收器的视场角(FOV), $g(\psi)$ 是聚光器的增益, n 表示聚光透镜的折射系数。

信道容量与通信距离之间的关系如图1所示,可以看到如果不考虑经过镜头后信号虚化衰减的影响,使

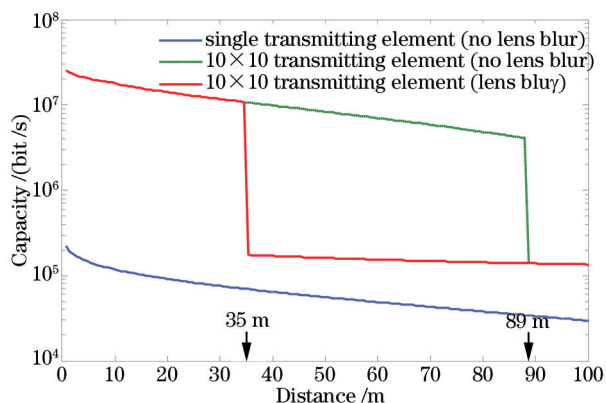


图1 成像通信信道容量与通信距离的关系

Fig.1 Relationship between channel capacity and communication distance in OCC

用 10×10 个均处于复用状态的发送单元,在 90 m 之内可以实现 Mb/s 量级的通信速率。如果考虑成像衰减的影响,发送单元可以复用传输数据的通信距离也随之降低到 35 m 左右。当通信距离增加时,数据需要分集传输,降低了信息传输速率。仿真时所使用的参数值如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
σ_{blur}	0.5
Modulation depth α /cm	5
Angle of incidence ψ /($^{\circ}$)	42
Physical area of PD detector A /(mm^2)	15
l /mm	6
Focal length of lens f / mm	8.5
R	0.54
Φ /($^{\circ}$)	20

3 隐式信息服务系统模型

基于可见光通信的隐式信息服务系统可划分为发射端和接收端两部分,系统的模型如图 2 所示。

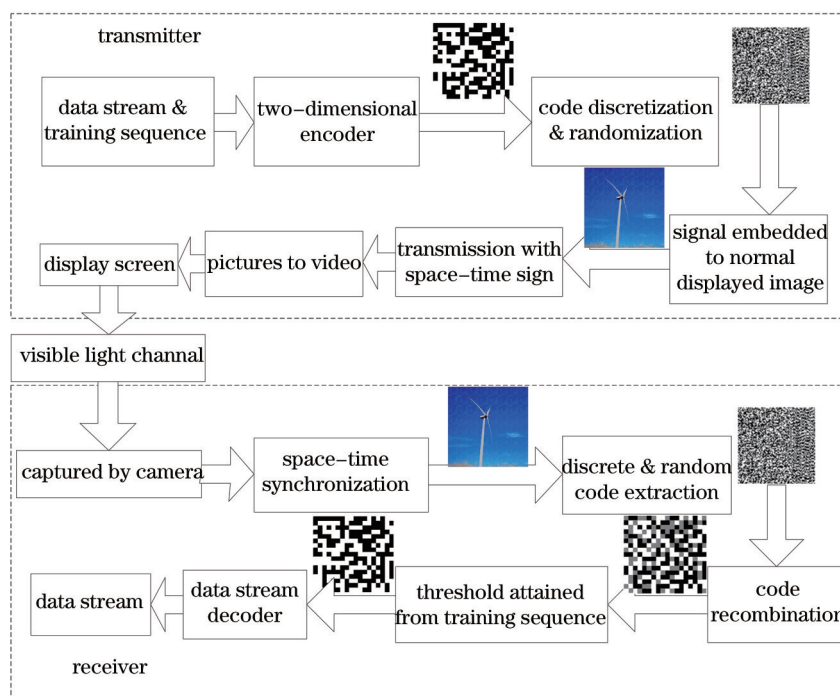


图 2 隐式信息服务系统实现流程

Fig.2 Flow chart of the invisible information casting system

发送端由二维隐式信息编码器、码字离散随机化模块、隐式信息叠加模块、空时标记模块、图片视频转换模块及显示器组成。接收端由数码相机、空时同步模块、离散随机码字提取模块、码字重组模块及门限判决模块组成。

在发射端,将承载隐式信息的图像叠加到用于正常显示的载体图像上。由众多像素组成的像素块作为承载每比特信息的单元,在接收端利用求和检测与相应的检测优化方法恢复出隐式信息。采用开关键控调制(OOK)控制不同块上的强度,并以调制深度 α 的概念来描述两个强度 $\{a, b\}$ 的比值,其中 $a \leq b$ 。 α 的值等于低强度值 a 与高强度值 b 的比值,不同调制深度对载体图像的影响如图 3 所示。随着 α 值的增加,检测性能会显著提高但加载于其中的隐式信息也更易被用户注意到,为降低对用户视觉的影响,系统应在低 α

值的环境下工作。

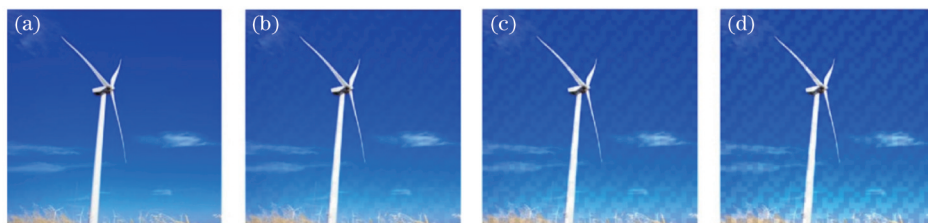


图3 不同调制深度对比。(a) $\alpha=0$; (b) $\alpha=0.05$; (c) $\alpha=0.10$; (d) $\alpha=0.15$

Fig.3 Comparison of different modulation depths. (a) $\alpha=0$; (b) $\alpha=0.05$; (c) $\alpha=0.10$; (d) $\alpha=0.15$

为确定合理的判定阈值,在承载隐式信息的图像中,某些特定位置的像素块设置为固定的开/关模式。这些作为训练序列的像素块,能够提供判定合理的阈值的依据。

由于在实际应用中,作为发送端的显示屏幕和接收端的数码相机之间的位置关系并不是固定的,接收端的相机拍摄到的图像不仅包含屏幕上的信息,同时也一同拍下了屏幕周围的环境信息。特别是当通信距离较远时,屏幕信息只占拍下图像中的一小部分,对发送端传送的图像信息需进行准确提取,即空间上的同步;另一方面,为实现大量数据的传输,通常以动态图像组成视频的形式传输信息,因此需要实现每帧图像传输速率和照相机拍摄速率在时间上的同步。为此,以在图像中加入一种规则变化的锚点组的方式同时实现空间和时间同步。具体地,某一帧图像中,在该图像的各角中的两角放置锚点,如图4。经过必要的几何校正和基于锚点组位置的霍夫变换处理后,可以实现对图像空间位置的提取。通过识别锚点间相对位置的周期变化,可实现收发端间的时间同步。事实上,尽管隐式服务系统着力于推送的信息不为用户察觉,但也需要在包含有隐式信息的图像中设置特定的提示标志以表明其中加载有可供提取隐式信息。可将锚点组进一步设计为企业标识、品牌商标或特殊符号,锚点组即可用于提示用户该图像中是否加载有隐式信息。

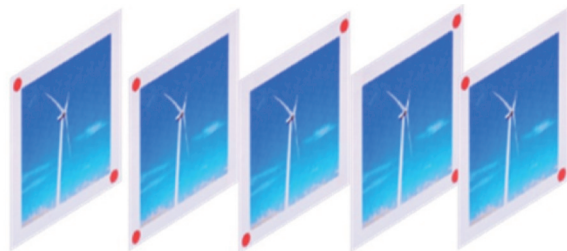


图4 带有空时同步锚点组的图像帧

Fig.4 Image frame transmission with space-time synchronization anchor group

影响系统信息传输速率和误码率(BER)最大的因素是众多的发送单元间的分集与复用的关系。在本系统中,分集指发送阵列中组成单个像素块的 m 个像素,在块内,像素发送相同的信息^[16], m 值直接决定传输的可靠性。复用指将发送端像素阵列划分为 n 个像素块,不同像素块发送不同信息, n 值决定了由每帧图像的信息量。显然,图像像素的总数 $h = mn$, 即像素的数目等于复用程度与分集程度的乘积。当 m 取值小而 n 取值大时,可以提高数据传输速率,误码率也随之上升;相反, m 取值大而 n 取值小时会导致数据传输速率降低,但可以降低误码率。为实现低误码率前提下的高速率数据传输,分集和复用的程度应根据使用环境的变化均衡考虑。此外,由于使用的是强度调制,不同的载体图像也会对系统误码率产生一定影响,强度相对均匀的载体有助于降低传输误码率。

4 实验分析

图5是4幅不同的载体图像,将4幅图像分别显示在分辨率 1440×900 的联想 ThinkVision 显示器上,并在距离 1 m 处由分辨率 4608×3072 的尼康 D3100 数码相机接收,如图6所示。当调制深度 α 的取值为 0.1 时,嵌入载体图像的隐式信息图像几乎对用户不会造成视觉影响,在不同复用和分集程度的下系统的误码率列于表2,使用 32×32 像素点承载 1 bit 信息与 2×2 像素点承载 1 bit 信息相比,使用任意载体图像承载隐式信息,系统的检测误码率均下降超过 96% 。除此之外,通过采取添加训练序列等降低误码率的方式也可

以有效提高系统检测性能;另外,通过对信息码字的冗余编码,二维码可具备高达30%的纠错能力,能够有效纠正传输中出现的错误。表3列出了不同调制深度下的检测误码率,随着调制深度的增加系统检测性能快速的改善,但对人眼的视觉影响也同样提高。因此对一定传输调制深度的系统发送单元选取适当的分集复用发送状态,通过信源编码等方式可以达到通信所需的低误码率。



图5 待加载隐式信息的图像

Fig.5 Images with implicit information to be loaded



图6 带有隐式信息服务系统实际工作环境

Fig.6 Working environment of the invisible information casting system

表2 不同分集与复用程度下的检测误码率

Table 2 BER of detection under different multiplexing and diversity degrees

$\alpha = 0.1$	BER			
$m(\text{diversity})$	2×2	4×4	16×16	32×32
$n(\text{multiplexing})$	256×256	128×128	64×64	32×32
Image 1	0.341	0.233	0.091	0.012
Image 2	0.322	0.224	0.089	0.010
Image 3	0.301	0.209	0.067	0.004
Image 4	0.287	0.191	0.058	0.003
Average	0.312	0.214	0.076	0.007

表3 不同调制深度下的检测误码率

Table 3 BER of detection under different modulation depths

Image 1	BER			
$m(\text{diversity})$	2×2	4×4	16×16	32×32
$n(\text{multiplexing})$	256×256	128×128	64×64	32×32
$\alpha = 0.05$	0.410	0.358	0.172	0.082
$\alpha = 0.1$	0.341	0.233	0.091	0.012
$\alpha = 0.15$	0.113	0.090	0.056	0.001
$\alpha = 0.2$	0.089	0.045	0.013	0.000

5 结 论

提出了一种基于可见光通信的隐式信息服务系统。通过对正常显示图像的强度施加微小的变化,可实现不为用户察觉的隐式通信,若应用到广告推送等领域既可以为有需要的用户提供便利,也免去了对他人的干扰。使用常见的显示屏和成像器件对一定调制深度与分集、复用程度下的系统性能进行了评估。下一步可以对通信距离、角度与调制深度、分级与复用程度等众多影响系统性能的因素之间的关系进行理论分析和实验,并对系统的调制解调方法加以优化。

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 Zeng L, O'Brien D C, Minh H L, *et al.*. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting[J]. IEEE J Sel Area Commun, 2009, 27(9): 1654-1662.
- 3 Yuan W, Dana K, Varga M, *et al.*. Computer vision methods for visual MIMO optical system[C]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2008, 26(24): 3883-3892.
- 4 Kinoshita M, Yamazato T, Okada H, *et al.*. Motion modeling of mobile transmitter for image sensor based I2V-VLC, V2I-VLC, and V2V-VLC[C]. 2014 Globecom Workshops, 2014: 450-455.
- 5 Ashok A, Gruteser M, Mandayam N, *et al.*. Challenge: Mobile optical networks through visual MIMO[C]. The 16th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2010: 105-112.
- 6 Gao Junying, Wang Dechang, Yao Jianguo. MIMO visible light wireless communication system employed camera-based receivers [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.
- 7 Zhu Huanyu, Zhu Yijun, Zhang Jiankang, *et al.*. A double-layer VLC system with low-complexity ML detection and binary constellation designs[J]. IEEE Commun Lett, 2015: 561-564.
- 8 Yuan W J, Dana K, Ashok A, *et al.*. Dynamic and invisible messaging for visual MIMO[C]. IEEE Applications of Computer Vision Workshop, 2012: 345-362.
- 9 Wang T Q, Sekercioglu Y A, J Armstrong. Analysis of an optical wireless receiver using a hemispherical lens with application in MIMO visible light communications[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(11): 1744-1754.
- 10 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.
- 11 Lu Qingfeng, Ji Xinsheng, 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.
- 12 Fu Hongshuang, Zhu Yijun. Analysis of the correlation of optical multiple-input multiple-output channel using white LED lighting in indoor line of sight environments[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906002.
付红双, 朱义君. 室内直射环境下白光LED的多输入多输出信道相关性分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906002.
- 13 Liu Yang, Zhang Guo'an. 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.
- 14 Tang Danying, Li Honglei, Chen Xiongbin, *et al.*. Effects of detector's nonlinearity on frequency response of visible light communication system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405002.
唐丹颖, 李洪磊, 陈雄斌, 等. 探测器非线性对可见光通信系统幅频响应的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405002.
- 15 Yao Saijie, Xu Haoyu, Wang Liangyou, *et al.*. Research of adaptive predistortion technique for nonlinear LEDs with memory effects [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105007.
姚赛杰, 徐浩煜, 汪亮友, 等. LED记忆非线性自适应预失真技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105007.
- 16 Ashok A, Gruteser M, Mandayam N, *et al.*. Characterizing multiplexing and diversity in visual MIMO[C]. Conference on Information Sciences and Systems, 2011: 1-6.

栏目编辑: 王晓琰