

文章编号: 2095-4980(2017)04-0607-06

基于多进制检测的可见光多层成像通信系统

李湘东, 刘洛琨

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为适应多用户需求, 提出了一种基于多进制检测的可见光多层成像通信系统。依不同优先权将发送信息加载在分集程度不同的各层发送单元上。优先权越高, 分集程度越高, 信息的鲁棒性相对较高但传输速率较低; 相反的, 优先权越低, 复用程度越高, 信息的传输速率相对较高但鲁棒性较低。结合系统模型, 利用基于最大似然检测的多进制检测算法实现了信息提取。最后, 通过仿真实验验证了系统的可行性。在保证系统检测性能和算法复杂度相对较低的同时, 实现了多层成像通信系统的稳定传输。

关键词: 光成像通信; 信息叠加; 多进制检测; 最大似然检测

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0607

Multi-layer optical camera communication system based on M-ary detection

LI Xiangdong, LIU Luokun

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

Abstract: A multi-layer Optical Camera Communication(OCC) system based on M-ary detection is proposed to adapt to the needs of multiuser. According to different priorities, the message is loaded on each layer which has diverse degrees of diversity. The higher-priority data is transmitted in higher diversity mode with higher robustness but lower data rate, whereas the lower-priority data is sent using higher multiplexing scheme with higher data rate but lower robustness. Combined with the OCC system model, the message can be detected by using an M-ary detection algorithm based on Maximum Likelihood (ML) detection. Finally, computer simulations verify the system feasibility. With reliable and low-complexity detection, the multi-layer OCC transmission system can be achieved stably.

Keywords: Optical Camera Communication; information superimposition; M-ary detection; Maximum Likelihood detection

可见光通信凭借其高速、泛在、绿色等优点, 受到人们越来越广泛的关注^[1-3]。可见光通信通常使用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为发送端, 采用强度调制/直接检测的方法, 利用光电检测器(Photo Detector, PD)来进行接收。近年来随着手持(车载)终端的大量普及, 利用终端上的相机作为接收端来进行通信的理念被提出并迅速发展。由于是对相机接收到的每帧图像进行处理, 因此又被称为可见光成像通信^[4]。目前可见光成像通信在智能交通^[5]、室内精确定位^[6]以及隐视通信^[7-8]等领域具有广泛应用。

针对可见光成像通信的研究主要集中在分析系统的信道容量^[9]、研究通信影响因素^[10-11]、构建系统模型等, 并搭建了不同场景下的实验方案^[12]。双层成像通信(叠加编码调制)^[13-15]最早由日本学者提出, 应用于智能交通系统中, 将发送信息按重要性进行加权分类, 高优先权数据采用高分集方式加载在下层信息中, 鲁棒性较高但传输速率较低, 适合远距离传输; 相应的, 低优先权数据采用高复用方式加载在上层信息中, 传输速率较高但鲁棒性相对较低, 适用于近距离传输。文献[13]采用一种低复杂度的求和检测算法, 可以基本实现对发送信息的检测。文献[14]通过对编码进行改进, 使检测性能获得一定程度的提升。通过对双层成像通信系统的收发模型进一步优化, 文献[15]提出了基于最大似然检测的低复杂度检测算法, 性能较求和检测具有较大提升。

由于可见光成像通信的应用场景比较多样化, 一方面, 传输信息的种类往往不同, 这就为信息的加权分类提供了基础, 一般来说, 系统的信令信息、收发端的同步信息等系统关键信息具有决定性作用, 且所占传输数据量

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-04-05

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2013AA013603)

通常较小,同时不同传输信息的数据量大小往往也有差异,例如文本、语音等信号的数据量相对较小,而图像、视频信号的数据量通常较大;另一方面,成像通信的信道环境十分复杂,在信道环境恶劣的情况下需要保证重要信息的传输,在信道环境较好时则需要实现高质量通信。因此,分层传输的概念可以被推广到更一般的成像通信场景中。由于发送资源有限,简单的双层成像通信已无法满足传输信息种类的多元化特性,以及对应的接收端多用户的不同需求。

为了更好地满足多用户需求以及充分地利用发送资源,本文提出可见光多层成像通信系统模型(以 3 层为例进行分析),多层成像通信系统可以使传输信息的划分准则更加多样化,中间层的引入可以满足部分信息或用户对通信可靠性和有效性的双重要求。发送信息按不同优先权依次加载在分集程度不同的各层发送单元上,最终将各层信号叠加起来发送。采用基于最大似然检测的多进制检测算法实现了各层信息的提取,与求和检测相比,算法具有更好的检测性能,实现了多层成像通信系统的稳定传输。

1 系统模型

在发送端,每个发送单元上加载的信号实际是各层信号的叠加。将信息划分优先权后,随着优先权的逐渐降低,信息按照分集程度逐渐减小,复用程度逐渐增加的方式加载在各层的发送单元上,然后将信息叠加起来发送。假设下、中、上层每帧传送的比特数比值为 $1:S:Q$,令 $T=Q/S$,每比特占用的发送单元数比值为 $Q:T:1$ 。现有一包含 $I \times J$ 个发送单元的发送阵列,在时隙 k ,第 (i,j) 个发送单元(对应中层第 (m,n) 个分集块)上加载的信号 $x_{i,j}[k]$ 为:

$$x_{i,j}[k] = A[k] + B_{m,n}[k] + C_{i,j}[k], \quad i=1,2,\dots,I; j=1,2,\dots,J; m=1,2,\dots,M; n=1,2,\dots,N \quad (1)$$

式中: $S=M \times N, Q=I \times J$, $A[k] \in \{-\alpha, +\alpha\}$ 为下层公共信号, $B_{m,n}[k] \in \{-\beta, +\beta\}$ 为第 (m,n) 个分集块上的中层信号, $C_{i,j}[k] \in \{-\gamma, +\gamma\}$ 为第 (i,j) 个发送单元上加载的上层信号,各层均为开关键控调制信号。

这里,信号 $x_{i,j}[k]$ 的取值是可正可负的,而可见光通信通常采用的是强度调制/直接检测,即要求发送单元的驱动信号为正信号。通过引入直流分量,将信号映射到非负区间上,以满足发送单元的驱动需求。假设接收端实现的是准确接收(高清相机在一定距离内完美对焦,即不考虑各发送单元之间的干扰),由于相机接收类似于强度检测,接收到的信号是非负的。为推导方便,将信号的直流分量滤除,逆映射成双极性信号。

在接收端,第 k 个时隙接收到的信号为 $I \times J$ 维矩阵 $\mathbf{Y}[k]$,为方便推导,需将 $I \times J$ 维矩阵 $\mathbf{Y}[k]$ 转换为 Q 维向量 $\mathbf{y}[k]$,二者的转换关系不唯一。为后续处理方便,首先将各层信号按分集块划分,从最下层开始,每层信号某一分集块上所包含的上一层信号分集块采用常见的顺序行列变换方式排列,自下而上,直到最上层信号排列完毕。例如在该系统中,下层共 1 个分集块上包含 S 个中层分集块,那么中层各分集块采用 $s=(m-1) \times N + n$ 的方式排列;中层第 s 个分集块上包含 T 个上层分集块,采用类似方式进行排列。最终得到的 Q 维向量 $\mathbf{y}[k]$ 可以表示为:

$$\mathbf{y}[k] = A[k]\mathbf{e} + \mathbf{U}_B \mathbf{B}_S[k] + \mathbf{C}[k] + \mathbf{n}[k] \quad (2)$$

式中: $A[k]$ 表示叠加在各发送单元上的公共信号, $\mathbf{e}$ 为 Q 维单位向量,即 $\mathbf{e}=[1,1,\dots,1]^T$; $\mathbf{B}_S[k]$ 为排列后的中层信号; $\mathbf{U}_B$ 为 S 维到 Q 维的扩展矩阵; $\mathbf{C}[k]$ 表示信号变换后对应的上层信号;噪声向量 $\mathbf{n}[k]$ 可以建模为加性高斯白噪声^[16],其中 $\mathbf{n}[k]=[n_1, n_2, \dots, n_Q]^T$ 。

2 检测算法

目前,针对可见光双层成像通信系统的检测算法主要有求和检测和快速最大似然检测两种算法。对于可见光多层成像通信系统,本文将求和检测算法进行了适当的推广,而快速最大检测算法由于条件复杂,本文对信号进行适当处理后,提出了基于最大似然检测的多进制检测算法。

2.1 求和检测

假设各层信号的取值是等概的,在时隙 k ,对接收信号进行求和运算,那么求和公式

$$\sum_Q \mathbf{y}[k] = \sum_Q A[k] + \sum_Q B[k] + \sum_Q C[k] + \sum_Q \mathbf{n}[k] \quad (3)$$

式中 $B[k] = \mathbf{U}_B \mathbf{B}_S[k]$ 表示扩展后的中层信号,由于各层信号的取值等概,噪声为高斯白噪声,因此 $\sum_Q B[k]$,

$\sum_Q C[k], \sum_Q n[k]$ 的值均近似为 0, 进而可以得到下层信号的判定准则

$$\hat{A}[k] = \alpha \cdot \text{sign} \sum_Q y[k] \quad (4)$$

在每个分集块 s 上, 包含 T 个 $y[k]$ 信号, 分集块 s 上的叠加信号 $y_{s,T}[k]$ 可以表示为

$$y_{s,T}[k] = A[k]e_T + B_s[k]e_T + C_{s,T}[k] + n_{s,T}[k] \quad (5)$$

式中: $A[k]$ 是下层公共信号; $B_s[k]$ 表示分集块 s 上加载的中层信号; e_T 为 T 维单位向量, 即 $e_T = [1, 1, \dots, 1]^T$; $C_{s,T}[k]$ 是分集块 s 上加载的 T 维上层信号, $C_{s,T}[k] \subset C[k]$; $n_{s,T}[k]$ 表示分集块 s 上的高斯白噪声, $n_{s,T}[k] \subset n[k]$ 。那么, 类似于 $A[k]$ 的判定, 在分集块 s 上有

$$\hat{B}_s[k] = \beta \cdot \text{sign} \left(\sum_T (y_{s,T}[k] - \hat{A}[k]) \right) \quad (6)$$

此时, $\hat{C}_{s,T}[k] = \gamma \cdot \text{sign}(y_{s,T}[k] - \hat{B}_s[k]e_T)$, 对所有的分集块分析、计算后可以最终得到中层信号 $\hat{B}_s[k]$ 和上层信号 $\hat{C}[k]$ 。可以看出, 求和算法仅有加法运算, 即算法的复杂度是线性的, 实现相对简单。

2.2 多进制检测

使用最大似然检测算法, 目标函数为

$$\{\hat{A}[k], \hat{B}_s[k], \hat{C}[k]\} = \arg \min_{A \in \{-\alpha, \alpha\}, B_s[k] \in \{-\beta, \beta\}, C[k] \in \{-\gamma, \gamma\}} \sum_Q \|y[k] - A[k]e - U_B B_s[k] - C[k]\|^2 \quad (7)$$

直接使用穷尽搜索, 算法将会随着 Q 和 S 的增加而变得复杂度极高。为了降低算法的复杂度, 对式(7)进行简化, 将下、中 2 层综合进行考虑, 以中层的每一个分集块 s 为研究对象, 加载在上面的下、中层信号记为 $P_s[k]$, 有

$$P_s[k] = A[k] + B_s[k], \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (8)$$

因此, 叠加信号 $P_s[k]$ 的取值范围为 $\{-\beta - \alpha, -\beta + \alpha, \beta - \alpha, \beta + \alpha\}$, 如果令 $\lambda_1 = \beta + \alpha$, $\lambda_2 = \beta - \alpha$, 那么 $P_s[k] \in \{-\lambda_1, -\lambda_2, \lambda_2, \lambda_1\}$ 。

分集块 s 上的叠加信号 $y_{s,T}[k]$ 可以表示为

$$y_{s,T}[k] = P_s[k]e_T + C_{s,T}[k] + n_{s,T}[k] \quad (9)$$

将其看作下层为四进制调制的可见光双层成像通信系统, 其中 $P_s[k]$ 表示下层四进制公共信号, 公式中其余变量含义与式(5)中相同。

结合文献[15]的处理方法以及之前对基于最大似然检测的可见光多进制双层成像通信系统的研究, 归纳推导出更一般化的多进制检测方案, 任取 $\{p, q\} \subset \{-\lambda_1, -\lambda_2, \lambda_2, \lambda_1\}$ (假定 $p > q$), 令

$$\begin{cases} y_{s,p}[k] = y_{s,T}[k] - pe_T \\ y_{s,q}[k] = y_{s,T}[k] - qe_T \end{cases} \quad (10)$$

对应最小欧氏距离

$$\begin{cases} z_{s,p} = \min_{C_{s,T}[k] \in \{\gamma, -\gamma\}} \|y_{s,p}[k] - C_{s,T}[k]\|^2 \\ z_{s,q} = \min_{C_{s,T}[k] \in \{\gamma, -\gamma\}} \|y_{s,q}[k] - C_{s,T}[k]\|^2 \end{cases} \quad (11)$$

目标函数转化为寻找所有最小欧氏距离的最小值, 显然, $C_{s,T}[k]$ 与 $y_{s,p}[k]$ (或 $y_{s,q}[k]$) 符号相同时, 式(11)取得最小值。在将接收信号 $y_{s,p}[k]$ 所在实数轴划分为区间 $I = (-\infty, q]$, $II = (q, p]$ 和 $III = (p, +\infty)$ 后, 比较变量 $z_{s,pq} = z_{s,p} - z_{s,q}$ 的表达式可以简化为

$$z_{s,pq} = \sum_{y_{s,T}[k]} [-2(p-q)y_{s,T} + p^2 - q^2] - \sum_{y_{s,T}[k] \in I} 2\gamma(p-q) + \sum_{y_{s,T}[k] \in II} [4\gamma y_{s,T} - 2\gamma(p+q)] + \sum_{y_{s,T}[k] \in III} 2\gamma(p-q) \quad (12)$$

由比较变量的符号可以确定 $z_{s,p}$ 和 $z_{s,q}$ 的大小关系。

对 $\{p, q\}$ 取遍 $\{-\lambda_1, -\lambda_2, \lambda_2, \lambda_1\}$ 对应的最小欧氏距离 $z_{s,p}$ 和 $z_{s,q}$, 计算出所有的比较变量后, 代入多进制检测中的比较算法, 即可确定所有最小欧氏距离中的最小值 $z_{s,\min}$ 。此时 $\hat{P}_s[k]$ 与 $z_{s,\min}$ 中 $P_s[k]$ 值相对应, 进而得到对应的 $\hat{A}_s[k]$ 和 $\hat{B}_s[k]$, 同时, 可得 $\hat{C}_{s,T}[k] = \gamma \cdot \text{sign}(y_{s,T}[k] - \hat{P}_s[k]e_T)$ 。

结合上述对分集块 s 上的各层信号的判定准则, 类似的, 对所有分集块进行检测, 可以得到下层信号 $\hat{A}_s[k]$ 、中层信号 $\hat{B}_s[k]$ 以及上层信号 $\hat{C}[k]$, 这里向量 $\hat{A}_s[k]$ 表示每个分集块 s 上检测出的下层信号, 通过类似于举手表决 (少数服从多数) 的判定准则, 可以最终得到下层信号 $\hat{A}[k]$:

$$\hat{A}[k] = \alpha \cdot \text{sign} \left(\sum_s \hat{A}_s[k] \right) \quad (13)$$

综合以上推导、比较及判定准则, 可以得到基于多进制检测的可见光多层成像通信系统检测算法。将下层公共信号 $A[k]$ 的幅值 α , 中层各分集块上加载信号 $B_{m,n}[k]$ 的幅值 β , 上层各发送单元上加载信号 $C_{i,j}[k]$ 的幅值 γ , 以及接收到的信号 $y[k]$ (分集块划分后拆分为 $y_{s,T}[k]$) 分别依区间代入比较变量中, 结合多进制检测比较算法及判定准则, 可以实现可见光多层成像通信系统中各层信息的检测与提取。算法的复杂度主要体现在比较变量的计算, 由比较变量 $z_{s,pq}$ 的计算公式可以看出, 只进行了常数系数的加权求和, 因此算法的复杂度也是线性的。不过, 由于 $\{p,q\}$ 的选取 (增加复杂度) 以及先判定再计算的比较算法 (降低复杂度) 的实现, 会使算法的复杂度产生 $C_4^2/2=3$ 倍 (与层数相关) 的增加, 因此多进制检测算法只适用于层数较少的多层成像通信系统。

3 仿真分析

在发送端, 需要对各层信号进行功率分配, 为适应不同的分配方案, 要对每个发送单元上的总功率做归一化处理, 即

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1 \quad (14)$$

考虑各层信号的分集增益, 那么将下、中、上层信号的每比特功率分别记为 E_A, E_B, E_C , 有 $E_A = Q\alpha^2$, $E_B = T\beta^2$, $E_C = \gamma^2$ 。显然, α, β, γ 的比值以及 Q, T 大小的选取都会最终影响到各层信号的功率分配结果。实际确定功率分配方案时, 在考虑检测性能较优的同时, 还需要兼顾多层成像通信系统在实际应用中对各层信息鲁棒性需求的不同权重。

本文以 $\alpha : \beta : \gamma = 1 : 2 : 4$ 的比值来建立功率分配模型, 代入式 (14) 可以求得 α, β, γ 的具体值。在 S, Q 的值较小时, 各层每比特分配到的功率 E_A, E_B, E_C 大小相当; 随着 S, Q 值的增加且差距的拉大, 各层信号每比特功率 E_A, E_B, E_C 的差距逐渐提高。表 1 给出了在该功率分配模型下, S, Q 值分别不同时的 2 种方案中各层信号的设计分配及对应的功率速率信息, 其中假设系统的帧速率为 500 fps。

表 1 不同方案下各层功率、速率信息
Table1 Power and rate information of each layer under different designs

	design 1: $S=4, Q=64$			design 2: $S=16, Q=400$		
	lower layer	middle layer	upper layer	lower layer	middle layer	upper layer
priority	high	middle	low	high	middle	low
number of elements per bit	64	16	1	400	25	1
number of bits per layer	1	4	64	1	16	400
power of per bit	3.05	3.05	0.76	19.05	4.76	0.76
data rate (frame rate 500 fps)/kbps	0.5	2.0	32.0	0.5	8.0	200.0

以误块率 (数据块中, 任意一层数据出现误判则认定该数据块为错) 来衡量多层成像通信系统的整体检测性能, 从图 1 中可以看出, 在多层成像通信系统中, 求和检测算法依然存在误差平板, 这是噪声以及实际信号的非等概率出现对求和检测的判定符号产生影响造成的。方案二中, 随着 S, Q 值的增加, 信号的等概出现可能性增加, 算法的误差平板获得一定程度的改善。基于最大似然检测的多进制检测算法不存在误差平板, 在信噪比为 15 dB 左右可实现误块率为 10^{-5} 的检测性能。随着发送单元数的增加, 发生错误的数据块随之增加, 系统的误块率性能会有所下降。

为进一步衡量基于最大似然检测的多进制检测算法的检测性能, 图 2 分析了 2 种方案下各层数据块的误码率性能。可以看出, 在方案一中, 发送单元数较少, 各层信号的误码率差别不大, 下、中、上层信号的误码率性能随着分集程度的减少依次降低。在发送单元数较大的方案二中, 由于上层信号的每比特功率没有改变, 信号的误码率性能与方案一基本相同; 下层信号的功率明显增加, 因此信号检测性能获得显著提升; 中层信号的误码率性能也随着功率的增加得到了一定程度的提高。

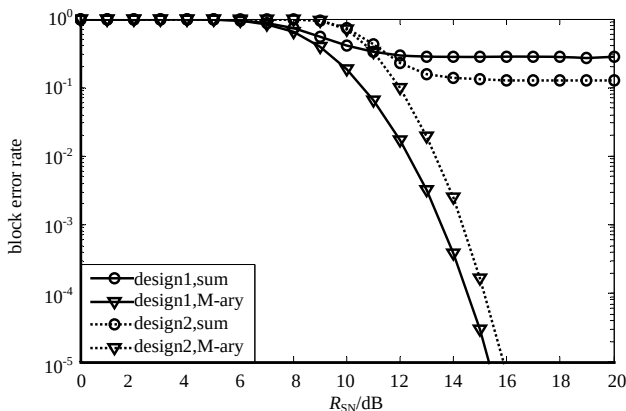


Fig.1 Sum detection and M-ary detection for different designs

图1 不同方案下求和检测与多进制检测性能仿真

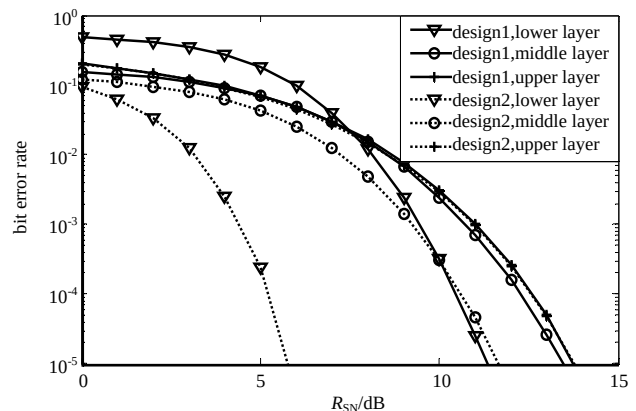


Fig.2 Each layer performance of M-ary detection for different designs

图2 不同方案下多进制检测各层性能仿真

4 结论

为满足多用户对信息速率、鲁棒性的不同需求,以及充分地利用发送资源,本文提出了可见光多层成像通信系统模型,利用基于最大似然检测的多进制检测算法实现了对各层信息的提取,性能明显优于求和检测算法,并通过仿真实验验证了系统的可行性。随着系统层数的增加以及各层信号多阶调制的引入,多进制检测算法的复杂度会急剧增加,此时需要一种更为简便快捷的编码与检测方案。

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] 丁德强, 柯熙政. 可见光通信及其关键技术研究[J]. 半导体光电, 2006, 27(2): 114–117. (DING Deqiang, KE Xizheng. Visible light communication and research on its key techniques[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(2): 114–117.)
- [3] 曾福来, 刘洛琨, 陈候本, 等. 降低可见光 OFDM 系统峰均比的新方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 71–75. (ZENG Fulai, LIU Luokun, CHEN Houben, et al. A new method to reduce the PAPR of OFDM signal in visible light communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1): 71–75.)
- [4] 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. Chicago, Illinois, USA: [s.n.], 2010: 105–112.
- [5] IWASAKI S, WADA M, ENDO T, et al. Basic experiments on parallel wireless optical communication for ITS[C]// 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey: IEEE, 2007: 321–326.
- [6] NAKAZAWA Y, MAKINO H, NISHIMORI K, et al. Indoor positioning using a high-speed, fish-eye lens-equipped camera in Visible Light Communication[C]// 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Montbeliard-Belfort, France: IEEE, 2013: 1–8.
- [7] YUAN W, DANA K, VARGA M, et al. Computer vision methods for visual MIMO optical system[C]// 2011 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. Colorado, Springs, CO, USA: IEEE, 2011: 37–43.
- [8] 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): 108–113. (ZHU Huanyu, ZHU Yijun. Invisible information casting system based on visible light communication[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 108–113.)
- [9] ASHOK A, GRUTESER M, MANDAYAM N, et al. Characterizing multiplexing and diversity in visual MIMO[C]// 2011 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2011: 1–6.
- [10] PERLI S D. Pixnet: designing interference-free wireless links using LCD-camera pairs[M]. Cambridge, Massachusetts (greater Boston), USA: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [11] ASHOK A, GRUTESER M, MANDAYAM N, et al. Rate adaptation in visual MIMO[C]// 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Salt Lake City, USA: IEEE, 2011: 583–591.
- [12] UKIDA H, MIWA M, TANIMOTO Y, et al. Visual communication using LED panel and video camera for mobile object[C]// 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques. Manchester, UK: IEEE, 2012: 321–326.

- [13] NISHIMOTO S,NAGURA T,YAMAZATO T,et al. Overlay coding for road-to-vehicle visible light communication using LED array and high-speed camera[C]//IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington,USA:IEEE, 2011:1704–1709.
- [14] NISHIMOTO S,YAMAZATO T,OKADA H,et al. High-speed transmission of overlay coding for road-to-vehicle visible light communication using LED array and high-speed camera[C]// 2012 IEEE Globecom Workshops. Anaheim USA:IEEE, 2012:1234–1238.
- [15] ZHU H Y,ZHU Y J,ZHANG J K,et al. A double-layer VLC system with low-complexity ML detection and binary constellation designs[J]. IEEE Commun Letters, 2015,19(4):561–564.
- [16] PEREZ-RAMIREZ J,BORAH D K. A Single-Input Multiple-Output optical system for mobile communication:modeling and validation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014,26(4):368–371.

作者简介:



李湘东(1992–), 男, 山东省德州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为可见光通信.
email: lxd0520@foxmail.com.

刘洛琨(1963–), 男, 河南省洛阳市人, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星通信和超宽带无线通信系统.