

基于嵌入式硬盘指示灯的可见光通信系统

荣新驰, 王超*, 任嘉伟, 汪涛, 朱义君

战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001

摘要 研究了基于发光二极管(LED)指示灯的可见光通信系统。在发送端,采用嵌入式个人电脑的硬盘指示灯,搭建硬件实验平台,采集数据并进行统计分析,得到信号模型的参数。在接收端,采用单光子雪崩二极管(SPAD)作为接收机,以提高接收机的灵敏度,扩展系统的通信距离。针对时钟漂移问题,提出一种脉冲宽度长-短键控(PWLSK)调制方案来代替传统的开关键控(OOK)方案,并通过硬件实验进行了验证。实验结果表明,在实验条件下,OOK调制方案的误码率(BER)始终无法降至 10^{-4} 以下,难以满足通信需求。并且在仿真实验中,OOK调制对环境光的强度更敏感,只有在环境光小于 1 lx 时才能降至 10^{-5} 以下。而PWLSK调制方案则可以在环境光强度更高的复杂环境下降低BER。所提方案可以实现即时消息、文件或语音信号的传输。

关键词 光通信; 可见光通信; 发光二极管; 单光子雪崩二极管; 时钟漂移; 误码率分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1806004

Visible Light Communication System Based on Embedded Hard Drive Indicator

Rong Xinchí, Wang Chao*, Ren Jiawei, Wang Tao, Zhu Yijun

Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract In this article, we study the visible light communication system based on light-emitting diode(LED) indicator. In the transmitter, we employ the hard drive indicator of an embedded personal computer to build a hardware experimental platform. We statistically collect and analyze data to obtain the parameters of the signal model. In the receiver, we employ the single-photon avalanche diode (SPAD) as the receiver to improve the sensitivity of the receiver and extend the communication distance of the system. To solve the problem of clock drift, we propose a pulse width long-short keying (PWLSK) modulation scheme to replace the traditional on-off keying (OOK) scheme; we verify the scheme by hardware experiments. The experimental results show that under the experimental conditions, the bit error rate (BER) of the OOK modulation scheme can not be reduced to below 10^{-4} , which is difficult to meet the communication requirements. Additionally, simulation experiments show that the OOK modulation is more sensitive to ambient light intensity, and can be reduced to 10^{-5} only when the ambient light intensity is less than 1 lx , while PWLSK modulation scheme can reduce its BER in complex environments with higher ambient light intensity. Based on the above analysis, the proposed scheme can realize the transmission of instant message, file, or voice signal.

Key words optical communications; visible light communication; light emitting diode; single photon avalanche diode; clock drift; bit error rate analysis

OCIS codes 060.4510; 070.4340; 030.5260; 060.4785

1 引 言

近年来,作为补充射频技术的一种新的通信方案,基于发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)引起了人们广泛的关注。VLC系统具有频谱宽、安全

性高、节能环保等优点,可用于室内高速无线通信、室内导航、室内定位等诸多领域^[1-6]。

事实上,除了用于室内照明的普通LED灯具,大量的LED光源分布在电脑、手机等电子终端设备的显示屏、指示灯中。一般情况下,这些LED光源

收稿日期: 2020-03-24; 修回日期: 2020-04-25; 录用日期: 2020-06-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801903)、国家自然科学基金(61671477, 61901524)、中国博士后科学基金(2019M663477)

* E-mail: xxcwangchao@163.com

通常只是用作状态指示器,用来指示设备的当前状态,如开机、读取数据或系统错误。然而一些实验结果也表明,这些 LED 指示灯也可以创造性地作为一些典型的 VLC 系统的发射端^[7-8]。

当前,几乎所有的电子设备上可发光的元器件都已经开始被用作通信系统的发射端。文献[9]将一个液晶显示屏用作通信发射机,文献[10]则利用键盘指示灯来发送光学信号,而在文献[11]中,硬盘(HDD)状态灯也被用于通信系统的发射端,在文献[12]中,显示器上的 LED 灯也被用于通信。而关于可发光元器件实际的调制方式,目前主要采用的方式仍为开关键控(OOK)。文献[13]尝试采用二进制频移键控(B-FSK)代替 OOK。文献[14]同时使用了一排路由器状态指示灯,并提出了一些联合调制方案来提高有效性。然而,在对实际采集到的单灯信号进行统计后发现,由于只能采用间接控制的方式进行调制,信号存在严重的时钟漂移问题,即使采用可靠性最好的 OOK 调制,仍不能将误码率(BER)降低到 10^{-4} 以下,难以满足通信需求。为了满足发射光照射度微弱的条件,本文将广泛应用于光子计数的单光子雪崩二极管(SPAD)器件作为接收机。与传统的加性高斯白噪声模型不同,SPAD 接收机的输出服从准泊松分布,其统计模型在文献[15]中有详细的分析论证。而在实验层面,文献[16]和[17]分别使用 SPAD 设计了在远程水下和

室外的 VLC 系统,利用实际的现场可编程门阵列(FPGA)上的一个红色 LED 状态指示灯对远程 VLC 系统进行了分析。

针对这些问题,本文建立了一个包含 HDD LED 状态指示灯和 SPAD 检测器的 VLC 实验系统,并建立信号统计模型。针对模型中出现的时钟漂移问题,提出了一种有效的脉宽长-短键(PWLSK)调制方案。在已有信号模型参数的基础上,对参数进行优化设计,给出选择调制参数时的一般准则。最后,将优化后的方案应用于实验系统,验证了信号模型的正确性和方案的优越性。此类系统的优势主要有三点:指示灯在大多数网络设备中普遍存在,推广性强;系统不需要额外的硬件开销,安装简单,使用方便;提供了一种新的信息交换方式,不仅可以成为电缆和射频传输方式的重要替代品,而且也迎合了“万物互联”的发展趋势,这也是未来 6G 发展的核心理念。

2 实验系统建立与信号模型分析

通过调制一个 HDD LED 指示灯来快速地发送有用的信息,这个指示灯被 SPAD 接收机收集,并被一个示波器观察。然后,通过统计分析给出信号模型。

2.1 基于 HDD 指示灯的 SPAD 实验系统设置

搭建的实验系统如图1所示。首先在发射端,

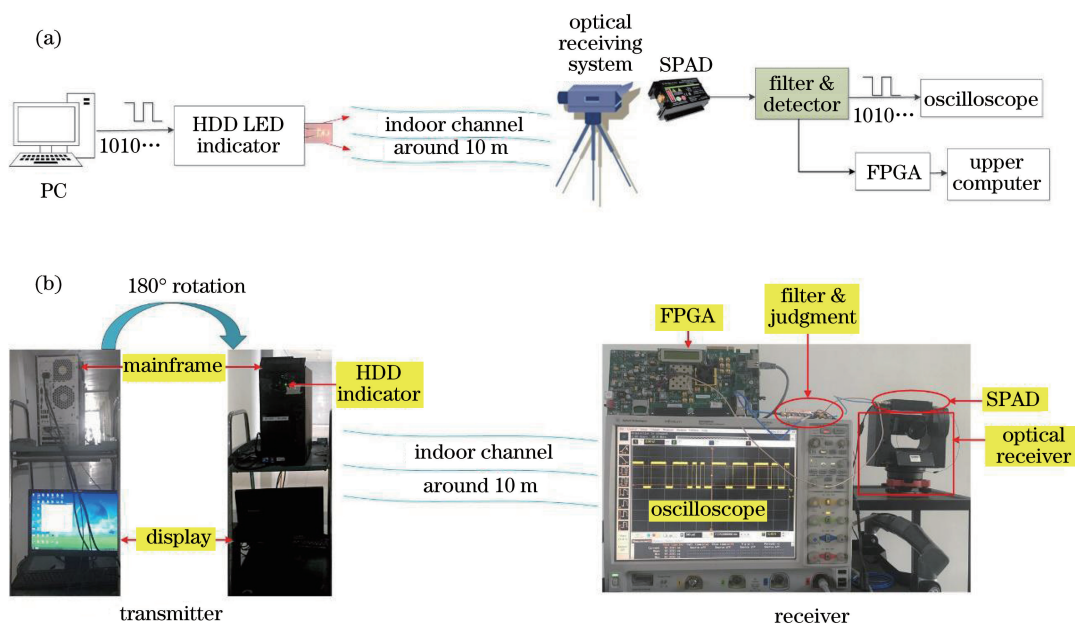


图 1 基于 HDD 指示灯的 SPAD-VLC 实验系统。(a)实验示意图;(b)实验链路示意图

Fig. 1 Experimental system of SPAD-VLC based on HDD indicator. (a) Schematic of experiment; (b) schematic of experimental link

通过个人电脑(PC)的操作系统(Windows XP)来控制 HDD 指示灯明暗闪烁。系统中的 HDD 指示灯实际上就是一个普通的 LED 指示灯,功率在 10 mW 左右。实验于 16:00 左右在黑暗的走廊里进行。SPAD 接收机距离发射端 10 m 左右。通过照度计(Z-10,EVERFINE 远方公司)测量 SPAD 周围的环境光强度,一般不超过 20 lx。为了更好地收集微弱信号和尽可能地扩展可用的通信距离,在接收机前端利用一个定制的光学接收系统来聚光,并将商用 SPAD 器件(SPCM-AQRH-15-FC, Excelitas Technologies Sensors 公司)作为通信接收机。信号光和环境光都进入 SPAD 转换成电信号,SPAD 器件与示波器(DSO9064A, Agilent Infiniium 公司)连接,用于观测采集到的信号。在非协作通信的情况下,SPAD 只能采取主动淬灭的方式。如果信号是经过编码的,还需要在接收到的信号和上位机之间插入一个 FPGA 来解码。

2.2 嵌入式指标系统的统计信号模型

HDD 指示灯本质上也是一个小的 LED 灯,它

表 2 读取不同大小数据块时所需时间的统计结果

Table 2 Statistical result of time required for reading data blocks with different sizes

Size of data block	Mean time of '1'/ μs	Standard deviation(SD) of '1'	Mean time of '0'/ μs	SD of '0'
512 bit	16.99	2.081031255	46.00	7.39
1 Kbit	22.26	0.992079378	45.00	6.51
2 Kbit	25.69	0.923113752	49.87	6.33
4 Kbit	29.02	2.492730863	151.01	47.52
8 Kbit	43.59	8.237449243	167.75	34.18
16 Kbit	72.94	9.207778145	233.91	34.56
32 Kbit	132.97	14.416490390	405.52	52.65
64 Kbit	252.56	19.134171000	526.45	47.55
128 Kbit	485.37	20.323264890	903.53	105.49
256 Kbit	1194.79	40.334883100	1849.08	215.64
512 Kbit	2522.98	78.288233400	3319.68	280.03
1 Mbit	4884.80	115.300698300	6149.43	300.75
2 Mbit	24692.01	2021.909583000	19701.97	5526.06
4 Mbit	42324.28	3244.816692000	41420.29	9187.67
8 Mbit	80702.07	3852.408366000	71546.44	7384.11

从表 2 可以看出,读取特定大小的数据块时所需时间仍然具有随机性,这就会出现随机时钟漂移和定时同步错误的问题。传统 OOK 调制方案的结果如图 2(a)所示,预设同步头,在同步头中间尝试传输训练序列“1010110010011100”,可以看到,由于时钟漂移问题,两个“0”的信号持续时间可能比单个“0”的持续时间更短,这导致的错码将严重影响系统的通信性能。

在硬盘驱动器处于工作状态时被点亮。它由主板的芯片组直接控制。其任务是控制指示灯来产生有用的信号,但没有可用的通用应用程序接口来驱动软件点亮 HDD 指示灯,因此,只能通过控制硬盘进行“读”或“写”的特定操作来间接地控制指示灯。而指示灯发光的时长取决于读取或写入硬盘的数据块的大小。从理论上讲,读取或写入一个大小为 S 的数据块将在 T_{on} 的时间内点亮 HDD 指示灯,而在 T_{off} 的时间内,无硬盘读写操作将导致指示灯休眠 T_{off} 时间。

如表 1 所示,指示灯发光的持续时间似乎与数据块的 S 有关。显然,当 PC 读取不同大小的数据块时,所需的时间不同。对实验系统采集到的大量信号进行统计分析,结果如表 2 所示。

表 1 系统操作对应的时间

Table 1 Corresponding time of system operations

OS operation	HDD LED state
Read/write	LED-ON for $T_{\text{on}}(S)$
Sleep	LED-OFF for T_{off}

3 信号设计与理论分析

这一部分给出 PWLSK 的理论分析和数学模型。选择合适的雪崩次数在单比特信号持续时间内的决策统计量,并给出 BER 的计算公式。选择几组数据块分别用来传输“0”和“1”,并对各组的 BER 进行测试和比较。

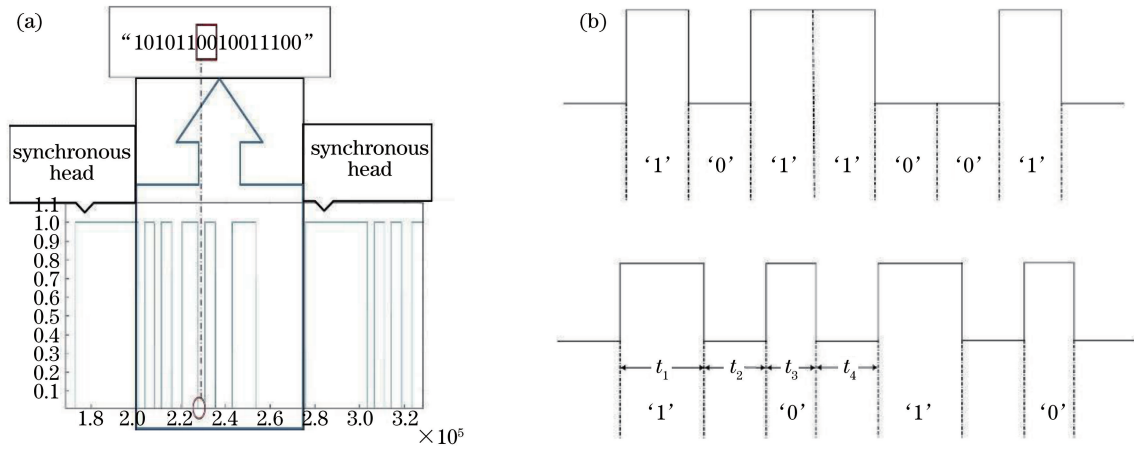


图 2 传统 OOK 调制和 PWLSK 调制对比。(a)时钟漂移问题示意图;(b)波形示意图

Fig. 2 Comparison between traditional OOK modulation and PWLSK modulation.

(a) Schematic of clock drift; (b) schematic of waveform

3.1 脉冲宽度长-短键调制的信号方案

通过改变数据块的大小来间接控制指示灯发光的持续时间(T_{on})。图 2(b)为设计的调制方案示意图。首先,选择两种不同大小的数据块,当需要传输“1”时,程序将命令硬盘读取较大的数据块 1 次,用时 t_1 ;然后, HDD 指示灯将等待时间 t_2 ,直到下一个位出现。类似地,当需要传输“0”时,程序将命令 HDD 指示灯读取较小的数据块 1 次,用时 t_3 ,并等待时间 t_4 。信号产生过程的流程如图 3 所示。

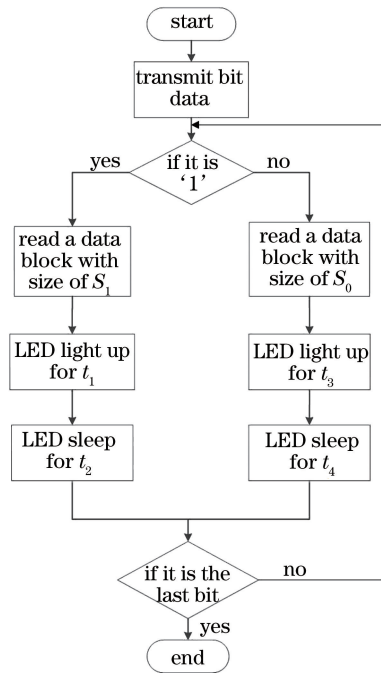


图 3 信号产生过程的流程图

Fig. 3 Flow chart of signal generation process

对于 LED 发射机,读取不同大小数据块所需时间的平均值和方差已经在表 2 中给出。因此,该方

案的主要问题是选择适当大小(S_0 和 S_1)的数据块。经过详细地观察,有几种现象。

1) 0 位和 1 位所需的平均时间会随着数据块大小的增加而增加。如图 4(a)所示,除了数据块大小大于 1 Mbit 之外,其他情况下平均时间的增长趋势是近似线性的,这是因为最大数据块是 1 Mbit。当读取大小超过 1 Mbit 时,数据块大小已经超过电脑的寄存器大小,一次取址操作已经不够了。而多次取地址的操作将使消耗的时间不再呈线性关系,需要更长的时间,这就降低了效率。考虑到通信的有效性,不再讨论大于 1 Mbit 的数据块。

2) 对于第 1 位的标准差(SD),除了 512 bit 的数据块对应的 SD 之外,其他规模数据块的 SD 值都在随数据块规模的增大而增加。当选择足够小的数据块时,读取所需的时间可能变得更加随机,这是因为读取一定大小的数据块时需要一些额外的开销,比如对原始数据的寻址、移动指针、在 PC 中传递指令等。这些操作虽然需要的时间较短,但仍会给通信系统引入随机的定时误差,尤其当数据块很小,读取数据块的时间可以与误差时间比拟时。此外,当数据块尺寸太小时,信号持续时间太短,这也可能使其信号在较短的持续时间内由于激发的雪崩次数过少而被淹没在环境光中,从而发生漏检问题。总而言之,考虑到通信的可靠性,数据块大小并非越小越好。因此,将选择不小于 1 Kbit 的数据块。

3) 指示灯不发光的持续时长的标准差总是大于信号发光的持续时间的标准差。信号不发光时引入的定时误差总是更大一些。这是因为在控制指示灯发光时,PC 的硬盘将读取特定大小的数据块而消耗一段相对稳定的时间。但是当指示灯不发光时,

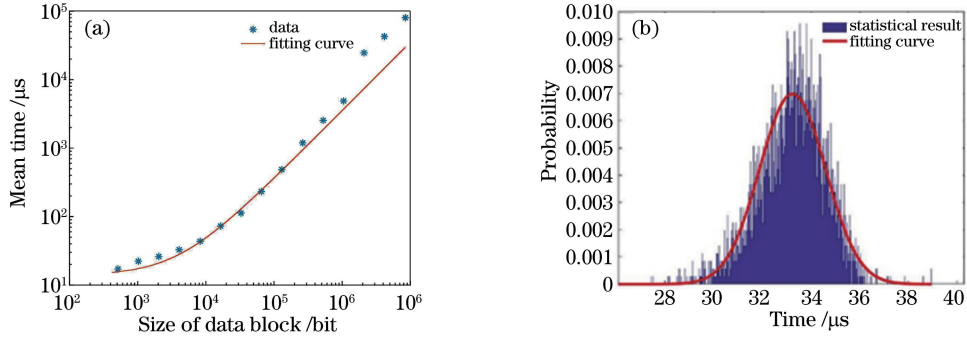


图 4 信号参数统计结果。(a)数据块大小与平均时间的线性度分析;(b) 4 Kbit 数据块分布拟合
Fig. 4 Statistical results of signal parameters. (a) Linearity analysis for data block size and mean time;
(b) distribution fitting of data block with size of 4 Kbit

硬盘没有接收到任何指令,不会进行任何操作。而这时操作系统的调度算法则可以将进程切换到其他应用中执行,从而增加需要时间的标准差。

此外,对所提调制方式中的参数 $t_i, i=1, 2, 3, 4$ 进行分布拟合。由于受大量独立的、不可描述的因素影响,假设时间服从高斯分布来简化模型。同时考虑到时间的非负性约束,最终将分布类型确定为截断的高斯分布,截断值为 a (本文中为 0)。以 4 Kbit 数据块大小为例,拟合结果如图 4(b) 所示,结果与统计数据吻合度较高。

3.2 PWLSK 的理论性能分析

t_i 的概率密度函数(PDF)为

$$f(t_i; \mu_i, \sigma_i, a) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i} \varphi\left(\frac{t_i - \mu_i}{\sigma_i}\right) & t_i > a \\ 1 - \Phi\left(\frac{a - \mu_i}{\sigma_i}\right) & t_i \leq a \\ 0 & t_i \leq a \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为均值为 0、方差为 1 的标准正态分布的 PDF; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积分布函数; μ_i 和 σ_i 分别为均值和标准差。实际上,由于 SPAD 的环境光和饱和效应,SPAD 接收到的波形并不理想,如图 5 所示。

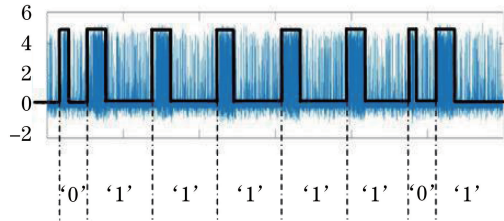


图 5 PWLSK 调制的实际波形

Fig. 5 Actual waveform modulated by PWLSK

SPAD 的数学模型见文献[15]。由于死时间效

应,在时间 t 内探测到的光子数量存在一个上限 k_{\max} 。当 k_{\max} 和平均到达率 λ 为常数时,输出为

$$P_k(k | k_{\max}, \lambda) = \begin{cases} e^{-\lambda t}, & k = 0 \\ \sum_{i=0}^k \psi(i, \lambda_k) - \sum_{i=0}^{k-1} \psi(i, \lambda_{k-1}), & 0 < k < k_{\max} \\ 1 - \sum_{i=0}^{k_{\max}-1} \psi(i, \lambda_{k_{\max}-1}), & k = k_{\max} \\ 0, & k > k_{\max} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\lambda_k = \lambda(t - k\tau), \lambda_{k-1} = \lambda[t - (k-1)\tau], \tau$ 为 SPAD 的死时间。因此, λt 为在 t 持续时间内到达 SPAD 接收机的平均光子数。但是,由于饱和效应,在 t 时间内 SPAD 探测到的光子数不会超过 $k_{\max} = \lfloor \frac{t}{\tau} \rfloor$, 其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示比 x 大的最小整数。

根据该模型,不同光子强度(λ)和不同最大光子数(k_{\max})下光子数的均值和方差如图 6 所示。经过大量的实验测试,发现死时间大约为 20 ns。

由于死时间 τ 远远小于 t_i ,可以近似认为 t_i 可以被 τ 整除,即 $k_{i, \max} = \frac{t_i}{\tau} \in \mathbb{N}^*, \mathbb{N}^*$ 表示正整数集,由此得到

$$P(k_{i, \max}; \mu_i, \sigma_i, a) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i} \varphi\left(\frac{k_{i, \max} \times \tau - \mu_i}{\sigma_i}\right) & k_{i, \max} > a/\tau \\ 1 - \Phi\left(\frac{a - \mu_i}{\sigma_i}\right) & k_{i, \max} \leq a/\tau \\ 0, & k_{i, \max} \leq a/\tau \end{cases}. \quad (3)$$

假设每个符号的起始时间和结束时间都可以被精确地检测到,并且采用了逐符号的检测方法。当 $\lambda = \lambda_0$ 时,指示灯不发光,对应 t_2 和 t_4 , 当 $\lambda = \lambda_1$ 时,

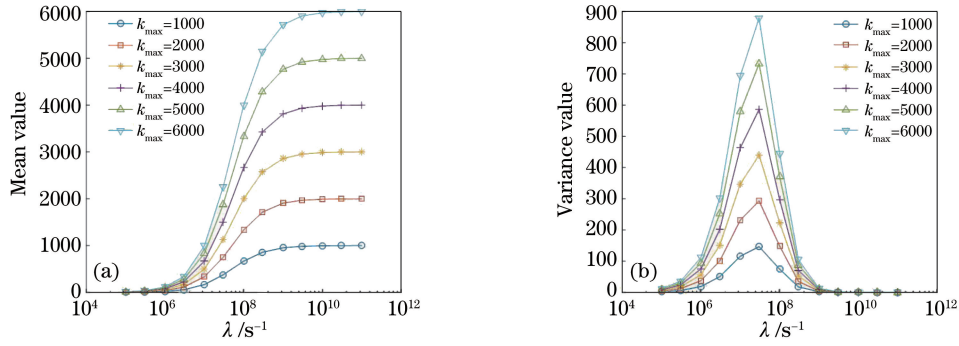


图 6 光子的均值和方差。(a)均值;(b)方差

Fig. 6 Mean value and variance value of photons. (a) Mean value; (b) variance value

指示灯发光,对应 t_1 和 t_3 。因此根据全概率公式,可以分别得到发送“0”和“1”时的平均雪崩次数 $P_0(k)$ 和 $P_1(k)$:

$$P_0(k) = \sum_{k_{3,\max}} P(k_{3,\max}) \times P_k(k | k_{3,\max}, \lambda_1) \otimes \sum_{k_{4,\max}} P(k_{4,\max}) \times P_k(k | k_{4,\max}, \lambda_0), \quad (4)$$

$$P_1(k) = \sum_{k_{1,\max}} P(k_{1,\max}) \times P_k(k | k_{1,\max}, \lambda_1) \otimes \sum_{k_{2,\max}} P(k_{2,\max}) \times P_k(k | k_{2,\max}, \lambda_0), \quad (5)$$

式中: \otimes 为卷积符号。令指示灯一次发光周期内的雪崩次数为判决统计量,如果发送“0”与“1”比特的先验概率相等,则最佳检测门限为 $P_0(k)$ 与 $P_1(k)$ 的交点:

$$k^* \in \{k | P_0(k) = P_1(k)\}. \quad (6)$$

因此可以得到 BER 为

$$P_e = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=k^*}^{\infty} P_0(k) + \sum_{k=0}^{k^*-1} P_1(k) \right], \quad (7)$$

式中: k^* 为最佳检测门限值。还可以计算出平均数据率为

$$R_b = \frac{1}{p_1(t_1+t_2) + p_0(t_3+t_4)} = \frac{2}{\sum_{i=1}^4 \bar{t}_i}, \quad (8)$$

式中: \bar{t}_i 为读取每个数据块的平均时间; $p_1(\cdot)$ 为指示灯发光时 SPAD 接收机的雪崩概率; $p_0(\cdot)$ 为指示灯不发光时 SPAD 的雪崩概率。

3.3 PWLSK 的参数优化

在实验系统中,参数 λ 表示每秒进入 SPAD 接收机的平均光子数,SPAD 接收的有效面积约为 $2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。实验中使用红光,波长为 700 nm。当环境光强为 20 lx 时,根据普朗克公式可以计算出 $\lambda = 1.76 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。换句话说,当指示灯不发光时,平均每秒有 1.76×10^7 光子进入 SPAD 接收机的表面。同样地,当指示灯发光时,可以推算出进入

到 SPAD 接收机表面的光子数约为 10^9 s^{-1} 。因此,在以下的仿真中,均假定 $\lambda_0 = 1.76 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\lambda_1 = 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。因此,所提方案只需要优化数据块的参数,可以从两个方面来评价数据块的性能,即较快的平均数据速率和较低的 BER。通过仿真,从 1 Kbit 到 512 Kbit 遍历数据块,总共得到 45 个选择。

由于实际的 BER 性能受到许多不可预测因素的影响,假设 BER 不小于 10^{-9} 。在此基础上,建立二维坐标平面, y 轴为 BER, x 轴为平均数据速率,如图 7 所示。可以看出:对于 PWLSK 方案,选择的数据块之间的差异越大,BER 性能越好;而对于平均数据速率,数据块越小越好,当数据块大小为 1 Kbit 时,在相同的 BER 性能条件下,它总是具有最高数据速率和在相同数据速率下的最低 BER。将这些点连接起来,就得到 PWLSK 数据块大小的优化选择方案。在非协作通信的应用场景下,受操作系统的影响,系统的可靠性较难保证。为承载不同类型的业务,以 BER 为限定条件来选取最优方案。由图 7 可知:如果将 BER 限制为不大于 10^{-4} ,则选择 1 Kbit 和 16 Kbit 的数据块是最优方案,该方案可以用于对音质要求不是很高的语音传输业

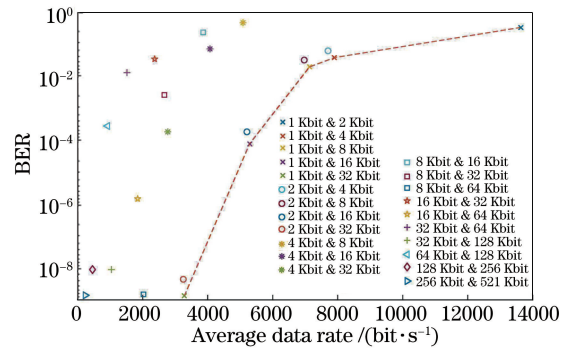


图 7 每种数据块选择方案对应的平均数据速率和 BER
Fig. 7 Average data rate and BER of each data block selection scheme

务;如果将 BER 限制为不大于 10^{-8} , 则选择 1 Kbit 和 32 Kbit 的数据块是最优方案, 该方案可以用于对 BER 要求较高的文档传输业务。

图 8 为 OOK 和 PWLSK 方案性能的对比。当平均数据速率大于 7 Kbit/s 时, 虽然 OOK 调制方案的 BER 较低, 但 BER 始终无法降至 10^{-4} 以下, 难以满足通信需求。

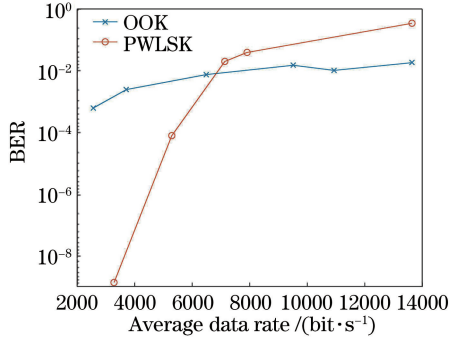


图 8 OOK 和 PWLSK 方案性能对比

Fig. 8 Performance comparison between OOK scheme and PWLSK scheme

此外, 为了研究环境光强对 BER 的影响, 将 λ_0 从 10^1 s^{-1} 逐渐变化到 10^8 s^{-1} , 并将 λ_1 固定为 10^9 s^{-1} 。仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, OOK 方案的 BER 对环境光更敏感。两方案的 BER 均随环境光强的下降而下降, 但 OOK 方案的 BER 下降较快。其原因是, 在 OOK 调制方案中, T_{off} 也携带了比特信息。当环境光强降低时, 在 T_{off} 期间的雪崩次数急剧减少, 即使存在时钟漂移问题, 在同步精度较高时也不会积累

表 3 PWLSK 方案的仿真 BER 与实验 BER

Table 3 Simulated BER and experimental BER of PWLSK scheme

Size of data block	Average data rate / (bit · s ⁻¹)	Simulated BER	Experimental BER
1 Kbit & 2 Kbit	13635	3.48×10^{-1}	3.89×10^{-1}
1 Kbit & 4 Kbit	7902	3.93×10^{-2}	4.36×10^{-2}
1 Kbit & 8 Kbit	7133	2.01×10^{-2}	3.84×10^{-2}
1 Kbit & 16 Kbit	5290	7.85×10^{-5}	4.97×10^{-4}
1 Kbit & 32 Kbit	3286	1.36×10^{-9}	6.62×10^{-7}

最后, 还设计了发送端和接收端编程接口, 如图 10 所示, 可以实现实时的消息、文件和语音信号服务。选择大小为 1 Kbit 和 16 Kbit 的数据块来分别传输“0”、“1”比特信息。由于信道和操作系统的复杂性和不稳定性, 需要额外的编码和同步开销。实验平均数据速率为 1.8 Kbit/s, 低于仿真数据速率。

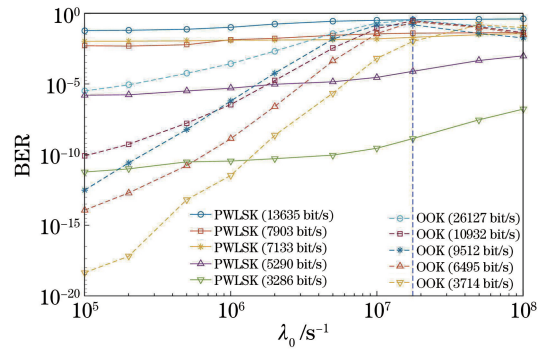


图 9 PWLSK 和 OOK 方案在不同 λ_0 下的误码率

Fig. 9 BER of PWLSK scheme and OOK scheme under different λ_0

太多的雪崩次数而影响其 BER 性能。换言之, 当去掉理想同步的假设条件, OOK 方案的 BER 也会显著增加。BER 调制方案本身是不能携带定时信息的, 相比之下, PWLSK 方案则具有丰富的定时信息, 这也可以在定时不准时辅助提高定时精度, 避免由此产生的符号间干扰, 从而提升 BER 性能。因此, 虽然仿真结果显示的 OOK 方案在数据块大小相同的情况下具有比 PWLSK 方案更快的数据速率, 但其较差的 BER 性能限制了它在环境光强度小于 1 lx 的绝对黑暗环境下的使用。

4 实验验证

利用 PWLSK 方案对 VLC 信号进行调制。其实验测得的 BER 如表 3 所示。虽然它们都略低于仿真结果, 但同样可以从实验结果中得出相似的结论。

5 结 论

以独立控制的 LED 灯嵌入式操作系统为例, 讨论所有潜在的基于 LED 灯嵌入式操作系统的 VLC 系统。为克服弱光条件下的信号检测问题, 在接收端采用高灵敏度的 SPAD 接收机。而为了解决信号源由于无法直接受控而产生的时钟漂移问题, 给

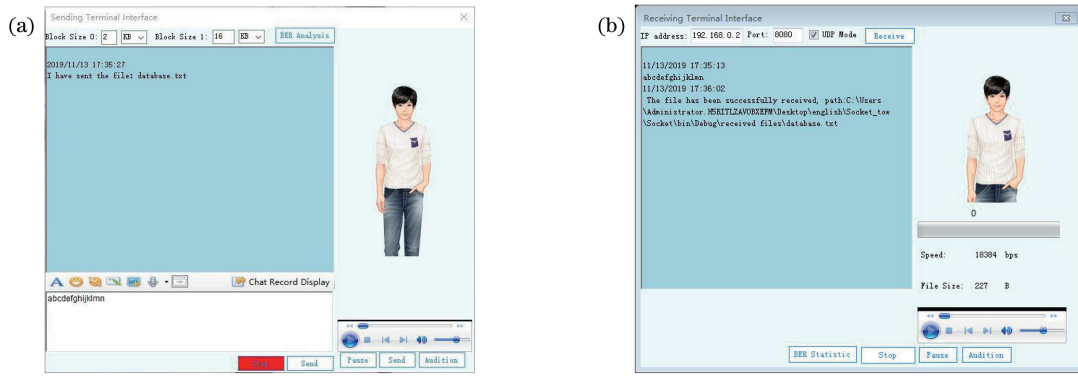


图 10 终端界面成果展示。(a)发送端;(b)接收端

Fig. 10 Achievement exhibiting of terminal interface. (a) Sending terminal; (b) receiving terminal

出了一种 PWLSK 调制方案,并通过理论推导、仿真及实验验证,证明了在环境光的影响下,该方案优于传统的 OOK 调制方案。在此基础上,进一步分析了调制中传输“0”、“1”比特的数据块选取原则。实验表明,两个数据块大小的差异越大越好,同时发送“0”的数据块也不应太小,否则将被淹没在环境光中。

然而仍然存在一些其他问题。例如,如何提取时间信息来精确选择起始时刻和结束时刻。另外,在实际发送数据的过程中,由于操作系统调度算法,操作系统可能会随时将当前正在执行的进程切换到另一个进程,使得暂时失去对 LED 灯的控制,造成随机突发干扰的问题,这些问题都需要进行后续的深入讨论与研究。

参 考 文 献

- [1] Jovicic A, Li J Y, Richardson T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(12): 26-32.
- [2] Chen Q R, Zhang T. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0406003.
陈泉润, 张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0406003.
- [3] Wu M L, Guo J, Liu W K, et al. Scheme and implementation of bi-directional visible light communication system with LED as both optical transmitter and receiver elements [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0406003.
武梦龙, 郭佳, 刘文楷, 等. LED 作为收发元件的双向可见光通信系统方案及实现[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0406003.
- [4] Surve H. Visible light communication [J]. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2019, 7(4): 1820-1822.
- [5] Luo J H, Fan L Y, Li H S. Indoor positioning systems based on visible light communication: state of the art [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2871-2893.
- [6] Căilean A M, Mihai D M. Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2681-2703.
- [7] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, et al. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 637-640.
- [8] Ferreira R X G, Xie E Y, McKendry J J D, et al. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19): 2023-2026.
- [9] Guri M. Optical air-gap exfiltration attack via invisible images [J]. Journal of Information Security and Applications, 2019, 46: 222-230.
- [10] Guri M, Zadov B, Bykhovsky D, et al. CTRL-ALT-LED: leaking data from air-gapped computers via keyboard LEDs [C] // 2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), July 15-19, 2019, Milwaukee, WI, USA. New York: IEEE, 2019: 801-810.
- [11] Guri M, Zadov B, Elovici Y. LED-it-GO: leaking (a lot of) data from air-gapped computers via the (small) hard drive LED [M] // Polychronakis M, Meier M. Detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2017, 10327: 161-184.
- [12] Sepetnitsky V, Guri M, Elovici Y. Exfiltration of information from air-gapped machines using monitor's LED indicator [C] // 2014 IEEE Joint Intelligence and Security Informatics Conference, September 24-26,

- 2014, The Hague, Netherlands. New York: IEEE, 2014: 264-267.
- [13] Zhou Z, Zhang W M, Yang Z C, et al. Exfiltration of data from air-gapped networks via unmodulated LED status indicators[EB/OL]. (2017-11-09)[2020-03-23]. <https://arxiv.org/abs/1711.03235>.
- [14] Guri M, Zadov B, Daidakulov A, et al. xLED: covert data exfiltration from air-gapped networks via switch and router LEDs [C] // 2018 16th Annual Conference on Privacy, August 28-30, 2018, Belfast, UK. New York: IEEE, 2018.
- [15] Sarbazi E, Safari M, Haas H. Statistical modeling of single-photon avalanche diode receivers for optical wireless communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 4043-4058.
- [16] Ji Y W, Wu G F, Wang C, et al. Experimental study of SPAD-based long distance outdoor VLC systems [J]. Optics Communications, 2018, 424: 7-12.
- [17] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J, et al. Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28783-28793.