

·信号与信息处理·

紫外光通信调制方式的对比研究

马宁, 李晓毅, 陆鸢, 杨刚

(重庆通信学院, 重庆 400035)

摘要: 紫外光非视距通信是一种新型的无线光通讯形式, 近年来受到越来越广泛的关注。详细分析了启闭键控调制(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM)的编码结构, 然后从带宽需求、平均发射功率、传输容量和差错性能等方面对各种调制方式进行了仿真对比。结果表明, DPIM调制比PPM具有更高的传输容量和更少的带宽需求, 并且解调对同步要求较低, 实现更简易, 并结合紫外LED阵列将作为今后实用化紫外光源的发展趋势, DPIM调制在未来紫外光通信系统的应用中将具有更大的优势。

关键词: 紫外光通信; 调制方式; PPM; DPPM; DPIM

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-03-0021-06

Research on Modulation Mode Contrast of Ultraviolet Communication

MA Ning, LI Xiao-yi, LU Yuan, YANG gang

(Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: The encoding structures of on-off keying (OOK), pulse position modulation (PPM), differential pulse position modulation (DPPM) and digital pulse interval modulation (DPIM) are analyzed in detail. And modulation modes are simulated and compared from bandwidth requirements, average transmission power, transmission capacity and error performance. The results show that DPIM has higher transmission capacity, less bandwidth requirements, lower synchronous requirements at the condition of demodulating and easier to be realized comparing with PPM. And with UV LED array, it will be the development trends of applicable UV light source. DPIM has more advantages in the application of UV communication system in the future.

Key words: UV communication; modulation mode; pulse position modulation (PPM); differential pulse position modulation (DPPM); digital pulse interval modulation (DPIM)

紫外光通信近年来得到了国内外的广泛关注, 这种新兴的无线光通信模式利用大气对日盲紫外光的强吸收和强散射作用实现通信^[1]。工作机理决定了紫外光通信具有较强的抗干扰能力和较高的保密性能, 并且具有跨越障碍实现非视距通讯的能力, 在环境复杂和保密性要求较高的通信领域具有重大的应用价值^[2]。

光源是紫外光通信的重要组成器件, 其工作特性决定着整个系统的传输速率、误码性能和通信距

离等。紫外气体灯和激光器是早期紫外光通信广泛采用的光源, 但这几种光源都具有不可忽略的缺陷, 限制了紫外光通信速率, 一般低于 10 Kbit/s, 无法满足数据传输的要求^[3]。近年来, 随着半导体技术的飞速发展, 紫外 LED 开始进入研究人员的视野, 这种新型紫外光源能克服传统光源的不足, 为便携、高速率的实用型紫外光通信提供必要条件^[4]。但由于紫外半导体材料工艺的限制, 现阶段单颗紫外 LED 的辐射峰值功率仅能达到毫瓦

收稿日期: 2013-12-29

基金项目: 重庆市自然科学基金计划项目; 复杂地域(山区)环境下应急通信综合组网关键技术研究(cstc2012jjA40033)

作者简介: 马宁(1990-), 男, 回族, 宁夏固原人, 重庆通信学院在读硕士研究生, 主要研究方向为紫外光通信。

级,尚不能满足高速率紫外光通信的需求^[5],采用LED阵列光源能实现紫外光空间能量的累加,有效提高光源的辐射功率,并且阵列形式的光源更容易控制,可以根据通信距离和速率的要求进行调整,今后实用型的紫外光通信系统将更多地采用阵列形式的LED光源。光源的选择决定了采用何种调制方式,针对LED光源,可采用无线光通信中普遍应用的启闭键控调制(OOK)、单脉冲位置调制(L-PPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)及脉冲间隔调制方式(DPIM)等调制方式^[6]。文中将从几个方面对这几种调制方式进行对比分析,并选择一种可作为紫外光通信中采用的调制方式。

1 调制结构分析

1.1 启闭键控调制

OOK即二进制启闭键控调制,是一种最基本的调制形式,利用光信号的通断对二进制信息比特进行逐比特的调制。当信源比特率为 R_b 时,在间隔 $T=1/R_b$ 内,数字比特“1”用发送光脉冲表示,“0”则用不发送光脉冲表示。

1.2 单脉冲位置调制

单脉冲位置调制(L-PPM)是利用脉冲在每个符号间隔内不同的时隙位置来表示不同的信息比特。对于位长 M 二进制数组,L-PPM将其映射为 2^M 个时隙构成的时间间隔,其中只有一个时隙处存在脉冲信号,其余时隙不发送光脉冲。L-PPM信号的每个符号间隔包括 L 个时隙,能够传送 $\lg L$ 信息比特,当信源比特率为 R_b 时,则每个L-PPM信号的符号间隔为 $T=\lg L/R_b$,时隙宽度为 T/L ^[7]。假定 M 位数据组用 $(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M)$ 表示,将脉冲所在时隙位置记为 k ,则L-PPM调制对应的编码关系如下

$$S_k = m_1 + 2m_2 + \dots + 2^{M-1}m_M \in \{0, 1, 2, \dots, 2^M - 1\} \quad (1)$$

1.3 差分脉冲位置调制

差分脉冲位置调制(DPPM)是在PPM调制的基础上发展而来的一种调制方式^[8]。L-PPM调制每个符号间隔包括固定不变的 L 个时隙,其中有一个高电平时隙和 $L-1$ 个低电平时隙。在DPPM调制中,时隙个数是变化不定的,它包括一组连续的低电

平,并以一位高电平作为结束,去掉L-PPM信号每个符号间隔中高电平后的低电平,便可得到相应的L-DPPM调制信号。

1.4 数字脉冲间隔调制

同DPPM类似,数字脉冲间隔调制(DPIM)也是由变化的符号长度组成,DPIM调制利用两个相邻光脉冲之间的低电平时隙数量来传递信息,包括无保护时隙和有保护时隙两种。为有效降低码间串扰产生的影响,DPIM通常包括一个保护空时隙,即带有保护时隙的DPIM调制方式,文中主要讨论有保护时隙的DPIM^[9]。每个DPIM调制符号以高脉冲作为起始时隙,后跟一个空保护时隙,再用 k 个空时隙表示信息,一个调制符号包括 $k+2$ 个时隙(k 为符号代表的十进制数)。在接收端解调时,首先判断光脉冲的位置,然后开始对空时隙个数进行计数,将计数结果再减1就完成了解调,因此DPIM不需要PPM解调时所必须保证的严格符号同步,只需时钟同步就能完成解调,简化了系统设计。

假设二进制的信息比特“00111001”,PPM、DPPM、DPIM的调制阶数 $M=4$,即每个符号包含4 bit信息,则各种调制方式对应的编码结构如图1所示。

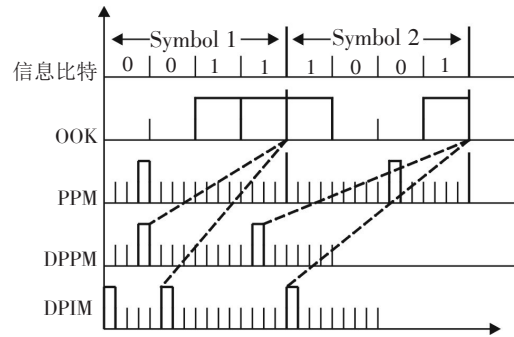


图1 OOK、PPM、DPPM、DPIM的编码结构($M=4$)

为了更直接地观察各种调制方式的调制结构,表1列出了 $M=2$ 时信息比特和各种调制方式的时隙序列。

表1 信息比特和各种调制方式的时隙序列

信息比特	OOK	4-PPM	4-DPPM	4-DPIM
00	00	1 000	1	10
01	01	0 100	01	100
10	10	0 010	001	1 000
11	11	0 001	0 001	10 000

2 调制性能的分析及仿真

2.1 带宽需求比较

在紫外光通信接收端,需要采用面积较大的光电探测器来提高信噪比,而与其相连的大容量电容限制了接收机的带宽,所以紫外光通信系统的带宽需求应当尽可能小^[10]。取同一比特率和占空比为1时,分析比较各种调制方式的带宽需求,设PPM、DPPM和DPIM有相同的调制阶数 M 。

因为光脉冲信号的脉宽非常窄,可以用光脉冲宽度的倒数来近似表示信号的带宽^[11]。设 R_b 为数字基带信号的比特率,则OOK调制带宽为 $B_{OOK} = 1/T_b = R_b$, T_b 表示OOK的时隙宽度;PPM调制每个时隙的宽度 T_s 满足 $2^M T_s = MT_b$,则 $T_s = MT_b/2^M$,可得PPM所占带宽为

$$B_{PPM} = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{MT_b/2^M} = \frac{2^M R_b}{M} = \frac{2^M}{M} B_{OOK} \quad (2)$$

DPPM的时隙个数不固定,脉冲宽度也是变化的,故用平均时隙数来表示。可计算DPPM的平均时隙数 $\bar{n}_{DPPM} = (1 + 2 + \dots + 2^M)/2^M = (2^M + 1)/2$,则DPPM所需平均带宽为

$$B_{DPPM} = \frac{\bar{n}_{DPPM}}{M} R_b = \frac{2^M + 1}{2M} B_{OOK} \quad (3)$$

同理,DPIM调制的平均时隙数 $\bar{n}_{DPIM} = [2 + 3 + \dots + (2^M + 1)]/2^M = (2^M + 3)/2$,则DPIM的平均带宽为

$$B_{DPIM} = \frac{\bar{n}_{DPIM}}{M} R_b = \frac{2^M + 3}{2M} B_{OOK} \quad (4)$$

图2为各类调制形式相对OOK的归一化带宽。能够看出,PPM拥有最高的带宽效率,OOK最低并保持不变,DPIM和DPPM的带宽需求相近,当调制阶数的不断增大时,PPM、DPPM和DPIM的带

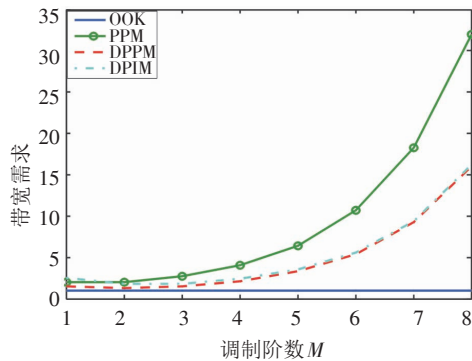


图2 各种调制方式的带宽需求

宽需求将迅速上升,其中PPM的上升速度最快,其带宽的劣势会越来越明显。

2.2 平均发射功率比较

考虑到人眼安全和通信系统便携性的要求,紫外光通信的发射功率受到很大限制,这就要求尽可能提高功率利用率^[12]。发射相同符号并取相同峰值功率,以下分析各种调制方式所需的平均功率。

符号“0”和“1”假设为等概率出现, P_s 为峰值功率,则发送光脉冲“1”时需要的功率为峰值功率 P_s ,发送“0”时不需要发射功率,则:OOK的平均发射功率为 $P_{OOK} = P_s/2$;PPM在发送的一个有 2^M 个时隙组成的符号时,其中只存在一个时隙是发送光脉冲的,其余均不发送,所以PPM的平均发射功率可表示为

$$P_{PPM} = \frac{P_s}{2^M} = \frac{2}{2^M} P_{OOK} \quad (5)$$

由2.1节分析可知,DPPM和DPIM两种调制样式每个符号平均包含 $(2^M + 1)/2$ 和 $(2^M + 3)/2$ 个时隙,并且都只有在在一个发送光脉冲的时隙,则类似的可以得到DPPM和DPIM所需的平均发射功率为

$$P_{DPPM} = \frac{P_s}{(2^M + 1)/2} = \frac{4}{2^M + 1} P_{OOK} \quad (6)$$

$$P_{DPIM} = \frac{P_s}{(2^M + 3)/2} = \frac{4}{2^M + 3} P_{OOK} \quad (7)$$

相同比特速率时每种调制方式相对OOK的归一化平均发射功率如图3所示。可以发现,调制阶数 M 取定时,所需平均功率最低的是PPM,DPIM和DPPM相当,略高于PPM,OOK的平均功率最大并且保持不变,相对于OOK,其他三种调制方式的优势明显。当调制阶数增大时,DPIM和DPPM的曲线接近重合,并且优于OOK的趋势也越来越明显。

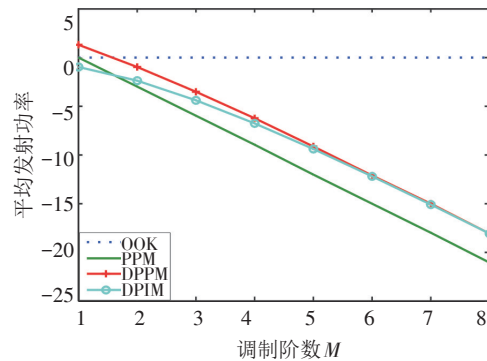


图3 各种调制方式的平均发射功率

2.3 传输容量比较

传输容量是紫外光通信系统的重要性能指标,反映了系统单位时间内传输信息能力的强弱,一般采用比特率的大小来衡量系统传输容量的大小^[13]。文中取相同的时隙宽度,分析比较几种调制方式的传输容量。

设 τ 为时隙宽度,在占空比为 1 的前提下,OOK 的传输容量为 $C_{OOK} = R_{OOK} = 1/\tau$,其中 R_{OOK} 为 OOK 调制的比特速率;PPM 的符号长度为 $2^M\tau$,比特速率为 R_{PPM} ,则 PPM 调制的传输容量为

$$C_{PPM} = R_{PPM} = \frac{M}{2^M\tau} = \frac{M}{2^M}C_{OOK} \quad (8)$$

DPPM 和 DPIM 的平均符号长度分别为 $(2^M + 1)\tau/2$ 和 $(2^M + 3)\tau/2$,比特速率分别为 R_{DPPM} 和 R_{DPIM} ,可得 DPPM 和 DPIM 的传输容量为

$$C_{DPPM} = R_{DPPM} = \frac{M}{(2^M + 1)\tau/2} = \frac{2M}{(2^M + 1)}C_{OOK} \quad (9)$$

$$C_{DPIM} = R_{DPIM} = \frac{M}{(2^M + 3)\tau/2} = \frac{2M}{(2^M + 3)}C_{OOK} \quad (10)$$

图 4 为各种调制方式相对 OOK 的归一化传输容量。可以得出,在同一调制阶数时,传输容量最高的是 OOK,最小的是 PPM,DPIM 和 DPPM 的传输容量相当,随着调制阶数的增加,PPM、DPPM 和 DPIM 的传输容量逐渐减小,并且趋于一致。

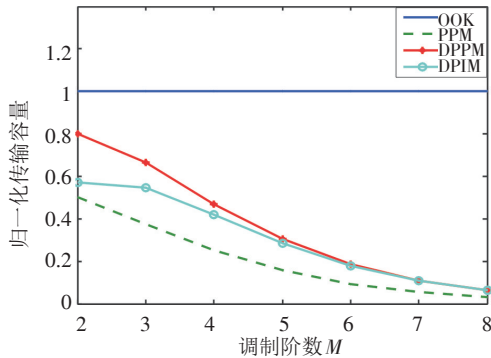


图 4 各种调制方式的传输容量

2.4 差错性能分析

差错性能是衡量一个通信系统可靠性的指标,文中利用误时隙率来分析几种调制方式的差错性能。目前紫外光通信系统多采用强度调制/直接检测(IM/DD)的方式,为了方便讨论,这里采用无线光通信系统的等价基带信道模型,并假设只存在均值

为 0、方差为 σ_n^2 在高斯白噪声 (AGWN) $n(t)$ ^[14]。假设接收机具有较宽的带宽,设抽样判决器输入信号的峰值功率为 P_r ,则在发送光脉冲“1”时,抽样判决器输入 $\sqrt{P_r} + n(t)$,发送“0”时输入 $n(t)$ ^[15]。令 b 为判决门限, P_0 和 P_1 分别表示发“0”和发“1”的概率,且 $P_0 + P_1 = 1$,发“1”判“0”和发“0”判“1”的错误概率分别用 $P_{0/1}$ 和 $P_{1/0}$ 表示,则总的误时隙率为 $P_e = P_1P_{0/1} + P_0P_{1/0}$,其中

$$P_{0/1} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{P_r})/\sqrt{2\sigma_n^2}]}{2} \quad (11)$$

$$P_{1/0} = \frac{1 + \operatorname{erf}(b/\sqrt{2\sigma_n^2})}{2} \quad (12)$$

式中, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du = 1 - \operatorname{erfc}(x)$ 表示误差函数。

设“1”和“0”出现概率相等,即 $P_0 = P_1 = 1/2$,则 OOK 判决的最佳门限为 $b_{OOK} = \sqrt{P_r}/2$,则 OOK 的误时隙率为

$$P_{e-OOK} = \frac{1}{2}P_{0/1} + \frac{1}{2}P_{1/0} = \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{P_r/2\sigma_n^2}/2)}{2} \quad (13)$$

同理,可以得到 PPM、DPPM 和 DPIM 的误时隙率为

$$P_{e-PPM} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{P_r})/\sqrt{2\sigma_n^2}] + (2^M - 1)\operatorname{erfc}(b/\sqrt{2\sigma_n^2})}{2^{M+1}} \quad (14)$$

$$P_{e-DPPM} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{P_r})/\sqrt{2\sigma_n^2}] + 2^{M-1}\operatorname{erfc}(b/\sqrt{2\sigma_n^2})}{2^M + 1} \quad (15)$$

$$P_{e-DPIM} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{P_r})/\sqrt{2\sigma_n^2}] + (2^M + 1)\operatorname{erfc}(b/\sqrt{2\sigma_n^2})}{2^M + 3} \quad (16)$$

对上面三个公式右边 b 求导,令等于 0,可得到 PPM、DPPM 和 DPIM 的最佳判决门限值为

$$b_{PPM} = \frac{2\sigma_n^2 \ln(2^M - 1) + P_r}{2\sqrt{P_r}} \quad (17)$$

$$b_{DPPM} = \frac{2\sigma_n^2 \ln(2^{M-1}) + P_r}{2\sqrt{P_r}} \quad (18)$$

$$b_{DPIM} = \frac{2\sigma_n^2 \ln(2^{M-1} + 1/2) + P_r}{2\sqrt{P_r}} \quad (19)$$

取最佳门限值时,定义 $P_r/2\sigma_n^2$ 为信噪比,图 5 表示了各种调制方式的误时隙率曲线。可以看出,

几种调制方式的误时隙率随信噪比的增加都逐渐减小;取一定的信噪比时,除OOK外,其他三种调制方式随调制阶数的增大,误时隙率逐渐减小,实际应用中可通过适当地增加调制阶数来提高信噪比,

进而减小误时隙率。在同一调制阶数时,误时隙率最小的为PPM,而OOK最大,DPIIM优于DPPM,当调制阶数增大时,PPM、DPPM和DPIIM的误时隙率趋于相同。

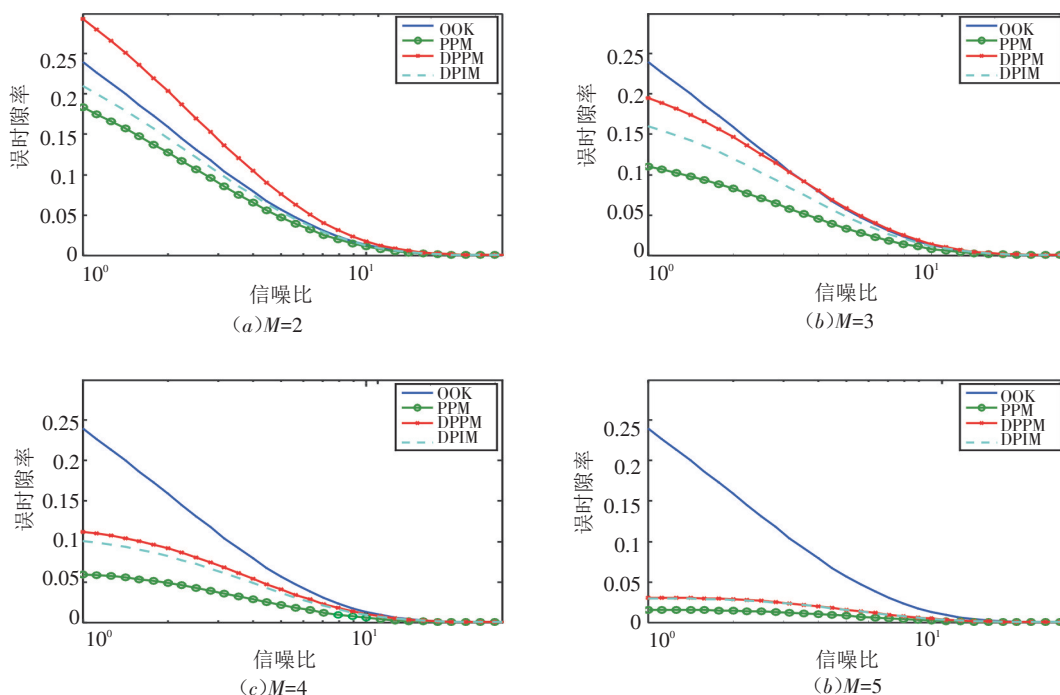


图5 各种调制方式的误时隙率

3 调制方式的选择

紫外LED体积小、易于驱动,具备其他光源无法相比的优势,可作为今后实用化紫外光通信系统的理想光源。为了弥补单颗紫外LED辐射功率较低的不足,同时为更好的适于灵活、便携、方便调控的紫外光通信系统,阵列形式的LED紫外光源是不二选择,当前国内外越来越多的研究团队开始采用紫外LED阵列作为系统光源,并基于此展开研究。在选用LED光源的紫外光通信系统中,PPM是当前主要研究和采用的调制方式。PPM调制具有优异的整体性能,但其解调时需要严格的时钟同步和符号同步,给系统设计带来极大不便,并且随着半导体材料工艺的进步和LED阵列光源的广泛采用,紫外LED光源的辐射功率将进一步提高,PPM的优势将不再明显。作为PPM的一种改进,DPIIM保持了较好差错性能,同时在信息容量和带宽效率方面更具优势,并且当调制阶数增加时,这种优势将更加明显,并且在解调时,DPIIM不需要严格的符号同步

即能恢复原始数据,系统结构大大简化。因此,DPIIM在基于LED阵列光源的紫外光通信系统中,具有更大的优势,更适用于对系统可靠性和传输速率要求较高的未来紫外光通信系统。

4 结论

文中从带宽需求、平均发射功率、传输容量和差错性能等方面出发,对无线光通信中通常采用的几种调制方式进行了对比研究,并做了相关仿真。通过理论分析和仿真结果可以看出,DPIIM这种调制方式虽然在平均发射功率和误比特率方面稍劣于PPM,但其带宽效率和传输容量方面性能优异;在系统复杂度方面,DPIIM的解调过程并不像PPM和DPPM那样需要严格的时钟同步和符号同步,很大程度降低了系统的复杂度,更利于系统设计;并且,LED阵列光源毫无疑问将成为今后紫外光通信系统主要采用的光源,在这样的前提下,DPIIM将更具优势。综合考虑,DPIIM可作为今后基于大功率LED

阵列光源的紫外光通信系统理想的调制方式。

参考文献

- [1] CHEN Gang, XU Zheng-yuan, DING Hai-peng. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [2] XU Zheng-yuan, Brian M, Sadler. Ultraviolet Communications: potential and state-of-the-art [J]. Topics in Optical Communications, 2008, 3.
- [3] 陶立强, 梁菁, 任杰, 等. 紫外光通信系统光源技术发展研究[J]. 电子科技, 2011, 24(8): 124-127.
- [4] Tao L Q, Liang J, Ren J. Recent progress of light source on UV communication system [J]. Electronic Sci&Tech, 2011, 24(8): 124-127.
- [5] 邹宇, 肖沙里, 李冠华, 等. 紫外无线光通信系统研究[J]. 重庆工商大学学报, 2012, 29(7): 73-77.
- [6] Sunho Jang, Moo Whan Shin. Thermal analysis of LED arrays for automotive headlamp with a novel cooling system [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2008: 561-564.
- [7] 王红星, 朱银兵, 张铁英. 无线光通信调制方式性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(6): 38-41.
- [8] 谭家杰, 杨克成, 夏珉. 大功率LED脉冲位置调制解调设计[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(5): 75-78.
- [9] Ghassemlooy Z, Hayes A R. Digital pulse interval modulation for optical communications [J]. IEEE Communication Magazine, 1998, 36(12): 95-99.
- [10] 胡宗敏, 汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. 通信学报, 2005, 26(3): 75-79.
- [11] 程刚, 王红星, 吴龙刚, 等. 大气无线光通信调制方式性能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 10(5): 485-489.
- [12] ZHANG Jin-long. Modulation analysis for outdoors applications of optical wireless communication [J]. IEEE, 2000 (88): 1483-1487.
- [13] SHAW G A, SIEGEL A M, MODEL J. Recent in short-range ultraviolet communication [J]. Proceedings SPIE, 2005, 5796: 214-225.
- [14] 毛昕蓉, 李荣. 无线光通信调制技术的性能分析[J]. 通信技术, 2009, 42(3): 54-59.
- [15] Joseph M Kahn, John R Barry. Wireless infrared communications [J]. Proc IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [16] 张建昆, 杨宇, 陈弘达. 室内可见光通信调制方法分析[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 137-140.

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管, 东北电子技术研究所主办, 公开发行的学术性中文科技期刊。

《光电技术应用》期刊以光电系统技术为主要专业特色, 传播光电子技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息, 报道新型科技成果, 推动工程技术交流, 促进行业科技进步与发展。

《光电技术应用》秉承“科学严谨, 求实创新, 服务读者, 促进发展”的办刊方针, 竭诚为国内光电系统技术研究、教学、开发及其应用领域的广大科研人员、工程技术人员、科技管理人员、高等院校师生等读者服务。特色栏目包括: 综述, 光电系统技术, 光学设计技术, 红外技术, 激光技术, 光电探测技术, 光电器件与材料, 信号与信息处理, 电路与控制, 测试、试验与仿真技术等。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。