

文章编号: 0258-7025(2008)12-1914-05

一种新型的无线光通信调制方法

程 刚 王红星 孙晓明 张铁英

(海军航空工程学院电子工程系, 山东 烟台 264001)

摘要 针对脉冲位置调制(PPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM)等方法存在的问题,提出了一种新的双宽脉冲位置调制(DD-PPM)方式。在给出其符号结构的基础上,分析了带宽需求、传输容量和平均功率,推导出弱湍流信道下的误包率模型,并将其与开关键控调制(OOK),PPM 和 DPIM 等典型调制方式进行了比较。理论分析和仿真结果表明,DD-PPM 不仅比 OOK 具有更高的功率利用率和更好的差错性能,比 PPM 具有更高的带宽效率和传输容量,比 DPIM 具有相近甚至略好的差错性能,而且因符号长度固定,解调时不存在等待或缓存器溢出等问题,较 DPIM 更易工程实现。因而作为一种折中的调制方式,DD-PPM 在无线光通信中有一定的应用场合。

关键词 光通信;无线光通信;调制方式;双宽脉冲位置调制;定长符号

中图分类号 TN 929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1914

A New Modulation Scheme of Optical Wireless Communications

Cheng Gang Wang Hongxing Sun Xiaoming Zhang Tieying

(Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract A new modulation scheme called dual duration pulse position modulation (DD-PPM) is proposed for optical wireless communication system to overcome the short comings of pulse position modulation (PPM) and digital pulse interval modulation (DPIM). After introducing symbol structure, we study the bandwidth requirement, average transmission power and capacity. Meanwhile, the packet error rate in weak turbulence channel model is derived, and compared with on-off keying (OOK), PPM and DPIM. Theoretical and simulation results show that DD-PPM requires less average optical power and gives better bit error performance compared with OOK, and offers high bandwidth efficiency and transmission capacity compared with PPM for the given parameters. Because the symbol length is fixed in DD-PPM, there is no problems such as buffer overflow or waiting in modem, and it is more realizable than DPIM. Hence, DD-PPM is superior in optical wireless communication system.

Key words optical communication; optical wireless communications; modulation scheme; dual duration pulse position modulation; fixed symbol length

1 引 言

无线光通信不仅同时具有光纤通信和移动通信的优势,而且无需频率申请、保密性好、功耗小和组网便捷,尤其是能够满足当前大数据量传输的要求,因而近年来受到了广泛关注^[1~10]。由于目前使用的光源所发出的光载波单色性和相干性都无法和电载波相媲美,因此,目前商用无线光通信系统广泛采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统。典型的调制方式也有开关键控调制(OOK)、脉冲位置调制

(PPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM)等。在此基础上,还有 N. M. Aldibbiat 等^[11]提出的双头脉冲间隔调制(DH-PIM),张凯^[12]提出的双幅度脉冲位置调制(DAPIM),Ubolthip Sethakaset 等^[13]提出的差分幅度脉冲位置调制(DAPPM)等。OOK 方式实现简单,但功率利用率太低^[3,4];PPM 大大提高了功率利用率,但同时增加了带宽需求^[3,4]且需要符号同步;DPIM 在接收端不需要符号同步,而且比 PPM 的带宽利用率高,比 OOK 的功率利用率高,

收稿日期:2008-01-07; **收到修改稿日期**:2008-04-30

作者简介:程 刚(1962—),男,山东人,博士研究生,高级工程师,主要从事无线光通信调制编码技术方面的研究。

E-mail:cnchengg@sina.com.cn, cnchengg@yahoo.com.cn

导师简介:王红星(1962—),男,河南人,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail:emailofzty@126.com

但是 DPIM 方式因为符号长度是变化的,会出现以下两种情况:1) 当输入调制器的信息速率大于调制速率时,将按一定概率引起调制器缓存溢出;2) 当输入调制器的信息速率小于调制速率时,调制器会出现等待,相当于加入了空时隙,使得解调器不能正确解调,所以实现起来也不容易。基于以上分析,本文提出了一种新的调制方式,双宽脉冲位置调制(DD-PPM)。DD-PPM 不仅和 PPM 方式一样具有固定的符号长度,而且由于采用两种时宽的脉冲表示信源比特,相对于 PPM 的平均符号长度减少约一半,进一步改善了带宽效率,提高了传输容量,因而在无线光通信系统应用中具备一定的优势。

2 DD-PPM 方式的符号结构与性能分析

2.1 符号结构

$M = 4$ 时,OOK,PPM 和 DD-PPM 三种调制方式的符号波形如图 1 所示。DD-PPM 方式是在 PPM 基础上提出的一种新的调制方式。PPM 方式分为单脉冲位置调制(L-PPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)和多脉冲位置调制(MPPM)等很多种^[9]。因其他脉冲位置调制方式是由 L-PPM 方式发展变化而来的,故以 L-PPM 为对比讨论 DD-PPM 的性能。以下若无标注,PPM 则均指 L-PPM。PPM 是将 OOK 中 M 位二进制数组映射成为 $L = 2^M$ 个时隙组成的时间段上某一个时隙处的单脉冲信号,而 DD-PPM 是将该数组映射成为 $(2^{M-1} + \alpha - 1)$ 个时隙组成的时间段上某一个时隙处的单脉冲信号。其中 α 为正整数, M 为每个符号所包含的比特数,称作调制阶数或比特分辨率。如果设 M 比特二进制所对应的十进制值为 k ,DD-PPM 中脉冲的位置为 n ,

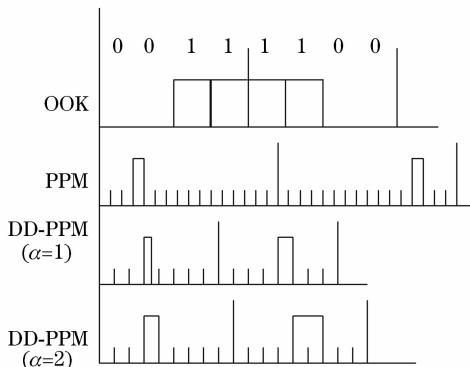


图 1 $M = 4$ 时 OOK,PPM,DD-PPM 的符号结构

Fig. 1 Symbol structures for OOK, PPM and DD-PPM when $M = 4$

脉冲的宽度为 D_p ,那么具体映射方法如下:如果 $k < 2^{M-1}$,则 DD-PPM 映射中脉冲的位置为第 $k+1$ 个时隙处,脉冲宽度为 $\frac{\alpha}{2}$ 个时隙,同时去掉了相对于 PPM 映射后面的 2^{M-1} 个空时隙;如果 $k \geq 2^{M-1}$ 时,则取脉冲的位置为第 $(k+1-2^{M-1})$ 个时隙处,宽度为 α 个时隙,去掉相对于 PPM 映射前面的 2^{M-1} 个空时隙,表示为

$$\begin{cases} n = k + 1, & D_p = \alpha/2; k < 2^{M-1} \\ n = k + 1 - 2^{M-1} & D_p = \alpha; k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 带宽需求

带宽通常用功率谱密度的主瓣宽度来估计,是 sinc 函数。由于光信号脉冲时隙的宽度较窄,因此可以用脉冲时隙宽度取倒数来近似求信号带宽。在传递信息比特率相同的条件下,比较 OOK,PPM 和 DD-PPM 三种调制方式的带宽需求。令 PPM 和 DD-PPM 的调制阶数相同均为 M ,OOK 时隙宽度为 τ_{OOK} ,则 PPM 时隙宽度为 $\frac{M}{2^M} \tau_{\text{OOK}}$,DD-PPM 时隙宽度为 $\frac{M}{2^{M-1} + \alpha - 1} \tau_{\text{OOK}}$ 。假设 OOK 所需带宽为 $B_{\text{OOK}} = \frac{1}{\tau_{\text{OOK}}}$,则 PPM 所需带宽为 $\frac{2^M}{M} B_{\text{OOK}}$,对于 DD-PPM 来说,脉冲有两种宽度,一个为 $\frac{\alpha}{2}$,另一个为 α ,显然带宽需求应由 $\frac{\alpha}{2}$ 脉冲决定,即 DD-PPM 所需带宽为 $\frac{2(2^{M-1} + \alpha - 1)}{\alpha M} B_{\text{OOK}}$ 。图 2 给出了在传递信息比特率相同的条件下,它们分别对 OOK 归一化的带宽需求。比较看出,当 $\alpha = 1$ 时,DD-PPM 所占带宽与 PPM 相同,高于 OOK。 $\alpha = 2$ 时 DD-PPM 带宽需求虽然仍高于 OOK,但要远低于 PPM 和 $\alpha = 1$ 时的 DD-PPM,即介于 OOK 和 PPM 之间。另外,随着

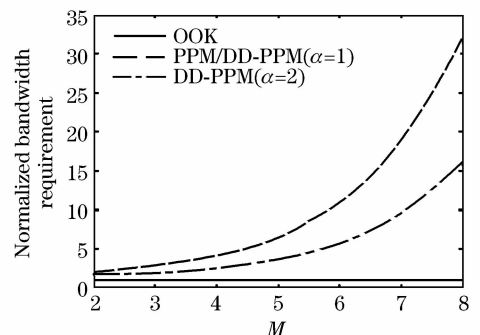


图 2 OOK,PPM 和 DD-PPM 的带宽需求比较

Fig. 2 Bandwidth requirement comparison of OOK, PPM and DD-PPM

M 的增加, DD-PPM 和 PPM 的带宽需求逐渐增大。

2.3 传输容量

在时隙宽度相同的条件下, 比较 OOK, PPM 和 DD-PPM 三种调制方式的传输容量。此处用比特率来衡量系统的传输容量。假设时隙宽度为 τ , 则 OOK 的传输容量为 $\frac{1}{\tau}$ 。如果设 PPM 和 DD-PPM 的调制阶数均为 M , 则 PPM 的符号长度为 $2^M\tau$, DD-PPM 的符号长度为 $(2^{M-1} + \alpha - 1)\tau$, 每个符号对应 M 个二进制信息比特, 则 PPM 和 DD-PPM 的传输容量分别为 $\frac{M}{2^M\tau}$ 和 $\frac{M}{(2^{M-1} + \alpha - 1)\tau}$ 。图 3 分别给出了时隙宽度相同条件下, 对 OOK 归一化的传输容量比较。可以看出, PPM 的传输容量最低, DD-PPM 的传输容量低于 OOK, 但远高于 PPM, 并且 DD-PPM 在 $\alpha = 1$ 时的传输容量要高于 $\alpha = 2$ 时的传输容量。另外, 随着 M 的增加, DD-PPM 和 PPM 的传输容量越来越小, 而且 $\alpha = 1$ 与 $\alpha = 2$ 时的 DD-PPM 传输容量趋于一致。

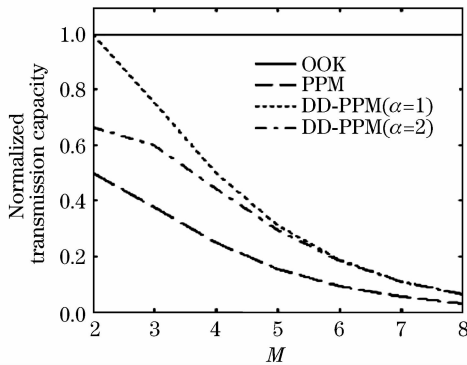


图 3 OOK, PPM 和 DD-PPM 的传输容量比较

Fig. 3 Bit rate comparison of OOK, PPM and DD-PPM

2.4 平均发射功率

由于人眼安全性和移动通信装置的便携性要求, 大气无线光通信的发射功率受到很大限制, 这就要求尽可能地提高功率利用率或功率效率。本文的功率效率是指给定误码率下所需的平均功率或达到的信噪比, 带宽效率是指传递信息速率比带宽。

在峰值功率相同的条件下, 比较三种调制方式的平均发射功率。假设峰值功率为 P_s 以及二进制信息比特“0”和“1”等概率出现, OOK 的平均发射功率为 P_{OOK} 。若把平均功率简单定义为发射 1 的概率乘以发射功率, 则 $P_{\text{OOK}} = 0.5P_s$; 由于 1 个 PPM 符号所包含的 2^M 个时隙中, 只有一个时隙发送光脉冲, 因此 PPM 的平均发射功率为 $\frac{P_s}{2^M} = \frac{2}{2^M}P_{\text{OOK}}$;

DD-PPM 符号中所包含的时隙个数为 $(2^{M-1} + \alpha - 1)$, 一个符号只有一个时隙发射光脉冲, 但存在两种宽度的脉冲, 一个为 $\frac{\alpha}{2}$, 另一个为 α 。假设两种脉冲等概率出现, 则 DD-PPM 的平均发射功率为 $\frac{\frac{3}{4}\alpha P_s}{2^{M-1} + \alpha - 1} = \frac{\frac{3}{2}\alpha}{2^{M-1} + \alpha - 1}P_{\text{OOK}}$ 。图 4 给出了在峰值功率相同的条件下对 OOK 归一化的平均功率比较。可以看出 DD-PPM 的平均功率高于 PPM 但远远低于 OOK, 且 $\alpha = 1$ 时比 $\alpha = 2$ 时要低。而且随着 M 的增加, DD-PPM 和 PPM 对 OOK 归一化的平均功率逐渐减小。

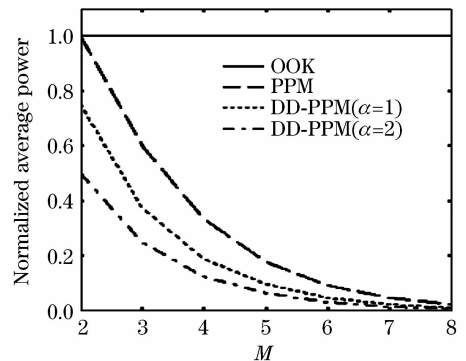


图 4 OOK, PPM 和 DD-PPM 平均发射功率比较

Fig. 4 Normalized average optical power comparison of OOK, PPM and DD-PPM

3 DD-PPM 方式的差错性能

3.1 信道模型

当信道条件比较恶劣时, 比如在强湍流情况下, 采用无线光通信系统很难实现可靠的通信, 所以在这里主要考虑弱湍流的情况。大气闪烁是影响无线光通信系统性能的主要因素, 常用闪烁指数来描述大气闪烁的强弱, 一般说来, 闪烁指数是关于光参数、传输距离以及折射指数波动的复杂函数。在弱湍流情况下, 闪烁指数小于 0.75, 信号强度服从对数正态分布, 用 I 表示接收光场的强度, 则 I 的概率密度函数 $f(I)$ 为^[10]

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) - m]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad i \geq 0 \quad (2)$$

式中 m 和 σ 分别为 $\ln(I)$ 的均值和标准差。闪烁指数定义为

$$\sigma_{\text{sc}}^2 = \frac{E(I^2)}{E^2(I)} - 1, \quad (3)$$

范围为 $[0, 0.75]$ 。

3.2 理论推导

考虑系统工作在弱湍流下,信道特征可以用对数正态分布来描述,接收端采用雪崩光电二极管(APD)检测,通过一个光学前端对光脉冲进行接收,然后聚焦到检测器上。系统的误比特率 P_b 可表示为^[14]

$$P_b = \int_{\sqrt{\Gamma(i_s)}}^{\infty} \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = Q[\sqrt{\Gamma(i_s)}], \quad (4)$$

式中 i_s 表示信号电流,近似为 $ge \frac{\eta S \nu}{h} P$, 其中 g 为 APD 平均增益, e 为电子电量, η 为接收机的量子效率, S 为探测器有效面积, h 为普朗克常数, ν 为光波长, P 为瞬时接收光功率, $\Gamma(i_s)$ 表示光检测等价信噪比(SNR)^[15], 即

$$\Gamma(i_s) = \frac{g^2 i_s^2 R_L}{g^{2+x} 2e(i_s + i_d) R_L B + 4kTB}, \quad (5)$$

式中 i_d 为暗电流, T 为接收机绝对温度, R_L 为 APD 负载电阻, k 为玻耳兹曼常数, x 为倍增噪声系数, B 为接收机带宽。

由于 i_s 与瞬时接收光功率成正比,所以 i_s 也服从对数正态分布,其概率密度函数表示为

$$f(i_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2} i_s} \exp\left[-\frac{(\ln i_s - m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (6)$$

式中 m_i 和 σ_i^2 分别为 $\ln(i_s)$ 的均值和方差,则 i_s 的均值和二阶矩分别为

$$E\{i_s\} = \exp\left\{\frac{\sigma_i^2}{2} + m_i\right\}, \quad (7)$$

$$E\{i_s^2\} = \exp\{2\sigma_i^2 + 2m_i\}, \quad (8)$$

则闪烁指数为

$$\sigma_{sc}^2 = \frac{E\{I^2\}}{E^2\{I\}} - 1 = \frac{E\{i_s^2\}}{E^2\{i_s\}} - 1 = e^{\sigma_i^2} - 1. \quad (9)$$

根据(4)和(6)式,弱湍流下,无线光通信系统的平均误比特率公式可表示为

$$\bar{P}_b = \int_0^{\infty} Q[\sqrt{\Gamma(i_s)}] f(i_s) di_s, \quad (10)$$

因此,系统的误包率可表示为

$$P_p = 1 - (1 - \bar{P}_b)^{NY} = 1 - \{1 - \int_0^{\infty} Q[\sqrt{\Gamma(i_s)}] f(i_s) di_s\}^{NY}, \quad (11)$$

式中 N 和 Y 分别为一个符号所包含的时隙个数和一个数据包所包含的符号个数,则 NY 表示一个数据包所包含的时隙个数。

3.3 仿真分析

在仿真系统中,信道模型采用对数正态分布模型,闪烁指数取0.25。图5给出了在平均接收光功率相同的条件下,OOK,PPM和DD-PPM的误包率

(PER)曲线,为了加强比较,图5中增加了 DPIM 的误包率曲线。参数设置为:比特率2.4 Gbit/s,APD 平均增益150,探测器量子效率80%,探测器有效面积0.2 mm²,光波长1550 nm,暗电流20 nA,接收机绝对温度300 K,APD 负载电阻50 Ω,倍增噪声系数0.5,接收机带宽800 MHz。由图5可知,无线光通信系统的误包率随平均接收光功率的下降而升高,其中,PPM的误包率最小,OOK最大。 $\alpha = 1$ 时 DD-PPM的误包率稍大于PPM,但比DPIM要小,而且远小于OOK。这一点很重要。一般来讲,要保证无线光通信系统的可靠性,误包率不能大于 10^{-6} ,所以,只有当平均接收光功率分别大于 -52.6 dBm/cm² 和 -50.2 dBm/cm² 时,才能保证 DD-PPM 在 $\alpha = 1$ 与 $\alpha = 2$ 时可靠地传输信息,同理,OOK方式和PPM方式所需的最小平均接收光功率分别为 -45.82 dBm/cm² 和 -54.15 dBm/cm²。

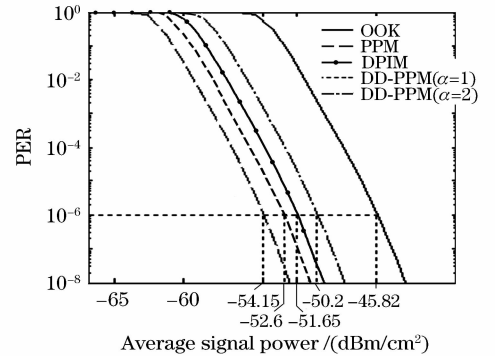


图5 $M = 4$ 时 OOK, PPM 和 DD-PPM 的误包率-平均接收光功率曲线

Fig. 5 Packet error ratio (PER) versus average signal power for OOK, PPM, DPIM and DD-PPM when $M = 4$

4 结论

DD-PPM 方式可以看作是一种改进的 PPM 方式,获得了比 PPM 更高的带宽利用率和传输容量。理论和仿真分析结果表明,虽然 DD-PPM 方式在提高带宽利用率的同时带来了功率利用率和系统差错性能的降低,但是差错性能仍优于或接近 DPIM,而且由于 DD-PPM 和 PPM 一样具有固定的符号长度,在解调时克服了 DPIM 存在的问题,比 DPIM 方式更易于工程实现,故综合考虑在无线光通信系统应用中具有一定的优势。

参 考 文 献

- Mukhopadhyay. Designing of an all-optical time division multiplexing scheme with the help of nonlinear material based tree-net architecture [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8):483~486
- 2 Chen Yan, Hu Yu. Effect of turbulent atmosphere on quantum key distribution systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):21~25
陈彦, 胡渝. 湍流大气对量子密钥分布系统性能的影响 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):21~25
- 3 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Cheng Gang *et al.*. A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1655~1659
张铁英, 王红星, 程刚等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1655~1659
- 4 Hu Zongmin, Tang Junxiong. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications [J]. *Journal on Communications*, 2005, **26**(3):75~79
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
- 5 Hongxing Wang, Xiaoming Sun, Xiaoyan Sun *et al.*. Performance of current digital pulse modulation schemes for optical wireless communications [C]. The IET International Conference on Wireless Mobile & Multimedia Networks Proceedings, 2006. 656~659
- 6 Jinlong Zhang. Modulation analysis for outdoors applications of optical wireless communications [J]. *Communication Technology Proceedings*, 2000. WCC-ICCT 2000. International Conference on Volume 2, 21~25 Aug. 2000. 1483~1487
- 7 Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, N. L. Seed *et al.*. Digital pulse interval modulation for optical communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, (12):95~99
- 8 Z. Ghassemlooy, A. R. Hayes, B. Wilson. Reducing the effects of intersymbol interference in diffuse DPIM optical wireless communications [J]. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 2003, **150**(5):445~452
- 9 Ke Xizheng, Xi Xiaojuan. Outline for Optical Wireless Communications [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1998. 148~157
柯熙政, 席晓娟. 无线光通信概论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1998. 148~157
- 10 Kamran Kiasaleh. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2005, **53**(9):1455~1461
- 11 N. M. Aldibbiat, Z. Ghassemlooy, R. McLaughlin. Error performance of dual header pulse interval modulation (DH-PIM) in optical wireless communications [J]. *IEEE Proc. -Optoelectron.*, 2001, **148**(2):91~96
- 12 Zhang Kai. Dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications and optical ETC prototype [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 21~27
张凯. 无线光通信双幅度脉冲间隔调制研究及其在光波 ETC 中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2004. 21~47
- 13 Ubolthip Sethakaset, T. Aaron Gulliver. Differential amplitude pulse-position modulation for indoor wireless optical communications [J]. *IEEE Communications Society Globecom*, 2004, **1**:1867~1871
- 14 Daotian Zhenjin. Chrestomathy for Optical Communications [M]. Zhao Lingji, Feng Peizhen, Li Xianyuan Trans.. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 1982. 194
岛田禎晋. 光通信技术读本 [M]. 赵灵基, 冯佩珍, 李先源译. 北京: 人民邮电出版社, 1982. 194
- 15 Mucun Pangen. Optical and Wireless Communication System [M]. Yang Mingjun, Sun Xiaodong, Guo Xueqing Trans.. Beijing: Science Press, 2001. 90~91
木村磐根. 光通信与无线通信系统 [M]. 杨明君, 孙晓东, 郭雪清译. 北京: 科学出版社, 2001. 90~91