

文章编号: 0258-7025(2008)12-1883-05

无线光通信中的脉冲位置宽度调制技术

樊养余¹ 白勃¹ 黄爱萍¹ 田骅¹ 李龙¹ 李小军²

(¹ 西北工业大学信号处理与无线光通信研究所, 陕西 西安 710072; ² 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710001)

摘要 针对无线光通信系统中 L 级脉冲位置调制 (PPM) 技术带宽效率较低的问题, 结合 L 级脉冲位置调制技术和 L 级脉冲宽度调制 (PWM) 技术, 提出了 L 级脉冲位置宽度调制 (PPWM) 技术。该调制技术通过适当降低功率效率提高了带宽效率, 分析了 PPWM 技术的功率效率和带宽效率, 在弱湍流信道模型下分析了 PPWM 调制技术的误包率, 并与其他调制技术进行了比较。结果表明 L 级脉冲位置宽度调制技术具有低误码率、高功率效率、高带宽效率和较低误包率等优点。

关键词 光通信; 调制技术; 脉冲位置宽度调制; 功率效率; 带宽效率; 湍流; 误包率

中图分类号 TN792.9. **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1883

Pulse-Position-width Modulation Scheme in Wireless Optical Communication System

Fan Yangyu¹ Bai Bo¹ Huang Aiping¹ Tian Hua¹ Li Long¹ Li Xiaojun²

¹ Institute of Signal Processing & Wireless Optical Communication, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China;
² Xian Institute of Space Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710001, China

Abstract In order to improve the bandwidth efficiency of the L -level pulse-position modulation (PPM) scheme used in wireless optical communication, a new modulation scheme, L -level pulse-position-width modulation (PPWM) scheme was proposed based on L -level PPM scheme and L -level pulse-width modulation (PWM) scheme. It increases the bandwidth efficiency through reducing the power efficiency properly. The PPWM signal's power efficiency and bandwidth efficiency are analyzed and the packet error rate in the weak turbulence channel model is also derived and compared with that in other modulation schemes. The result shows that the L -level PPMPWM scheme has low bit error rate, high power efficiency, better bandwidth efficiency, and low packet error rate.

Key words optical communication; modulation scheme; pulse-position-pulse-width modulation; power efficiency; bandwidth efficiency; turbulence; packet error rate

1 引言

无线光通信也称作自由空间光通信 (Free-Space-Optics Communication, FSO) 或大气激光通信, 是光通信和无线通信结合的产物。无线光通信系统中的 L 级脉冲位置调制 (PPM) 技术由于具有误码率低、功率效率高、调制算法简单等众多优点得到了较广泛的应用^[1,2]。但由于它的带宽效率较

低, 脉冲宽度相对较窄, 不利于收发端光电器件的工作^[3]。本文结合 L 级 PPM 技术和 L 级脉冲宽度调制 (PWM) 技术, 提出的 L 级脉冲位置宽度调制 (PPWM) 技术, 具有 L 级 PPM 技术误码率低、功率效率高的优点, 同时使脉冲宽度在统计意义上有所加宽, 克服了 PPM 在这方面的不足。

收稿日期: 2008-03-10; 收到修改稿日期: 2008-06-05

基金项目: 重点实验室基金 (9140C5301010701) 及陕西省自然科学基金 (2007F10) 资助项目。

作者简介: 樊养余 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事数字信号处理、数字图像处理方面的研究。

E-mail: fan_yangyu@sina.com

2 PPWM 技术简介

$L(L = 2^M)$ 级脉冲位置宽度调制技术是先将一组二进制 M 比特的数据映射为 $L_P(L_P = 2^r, r$ 为 M 比特的数据的前 r 个比特) 个时隙组成的时间段(该时间段长度与 M 比特数据的时间段长度相等)上的某一个时隙处的单个脉冲信号(即根据 M 比特数据的前 r 个比特进行 L_P 级 PPM), 该时隙宽度为 $T_P = T/L_P$ 秒, T 为 M 个比特所持续的时间, 然后继续将这个单脉冲信号映射为 $L_W(L_W = 2^{M-r})$ 个时隙(时隙宽度为 $T_W = T_P/L_W$ 秒)组成的时间段(该时间段长度与上面单脉冲信号时间段长度相等)上的起始位置与上面单脉冲信号相同, 宽度为某几个时隙的连续脉冲信号(即根据 M 比特的数据中的后 $M-r$ 个比特对上述 L_P 级 PPM 信号进行二次 L_W 级 PWM), 该连续脉冲信号所含的可能时隙数为 $1, 2, 3, \dots, L_W$ 。其中 r 的取值范围为 $0, 1, 2, \dots, M$, 当 $r = 0$ 时, $L_P = 2^0 = 1, L_W = 2^{M-0} = L$, 即为 PWM; 当 $r = M$ 时, $L_P = 2^M = L, L_W = 2^{M-M} = 1$, 即为 PPM。因此可以将 PPM, PWM 看作 PPWM 的两种特例。

PPWM 调制信号可以表示为:

$$x(t) = L'P \sum_{k=0}^K p_{pwk} \left(t - \frac{l_p - 1}{L_P} T - kT \right), \quad (1)$$

式中 $p_{pw}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, l_w T/L] \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad l_p \in \{1, 2, 3, \dots, L_P\}, l_w \in \{1, 2, 3, \dots, L_w\}, L' = \frac{2L}{L_w + 1}$

[4] 是为了保证调制信号的平均功率与开关键控(OOK)调制相等。图 1 所示 [5,6] OOK, PPM, PWM 和 PPWM 技术的信号结构。

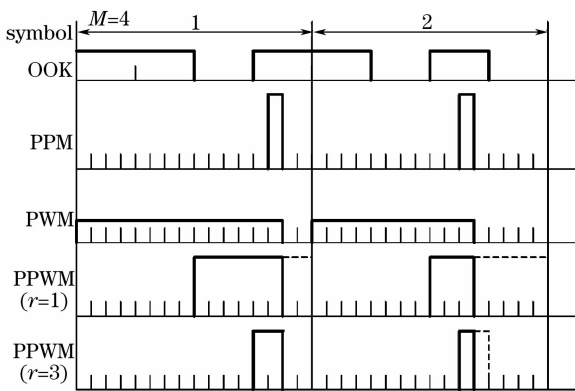


图 1 OOK, PPM, PWM 和 PPWM 信号结构

Fig. 1 Modulation signal schemes with OOK, PPM, PWM & PPWM

3 调制技术性能分析

3.1 功率效率分析

在各种调制方式下发射一个相同符号时, 即信息传输速率相同的条件下, L 级 PPWM 技术的平均发射功率为 $P_{PPWM} = P_0(1 + L_W)/(2L)$ 。同理, OOK 调制技术的平均发射功率为 $P_{OOK} = P_0/2$, L 级 PPM 技术为 $P_{PPM} = P_0/L$; L 级 PWM 技术为 $P_{PWM} = P_0(1 + L)/(2L)$, P_0 为发送码元 1 时的光脉冲功率。

图 2 给出了 OOK, PPM, PWM 和 PPWM 信号的平均发射功率曲线。为便于分析, 对 PPWM 分别取 $r = 1$ (即 $L_P = 2, L_W = 2^{M-1}$) 和 $r = M-1$ (即 $L_P = 2^{M-1}, L_W = 2$), 在实际应用中应根据具体的功率要求取值。

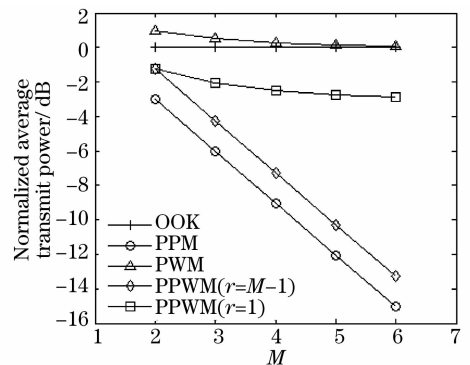


图 2 各种调制技术的平均发射功率

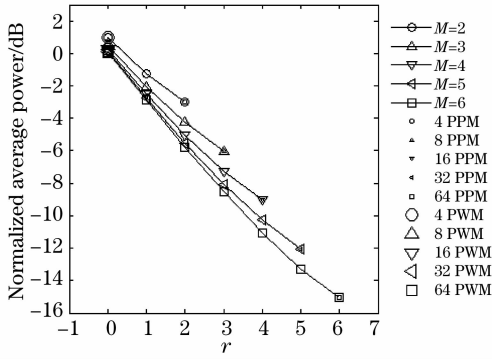
Fig. 2 Average transmit power of all the modulation schemes

可以看出当 $r = 1$ 时, PPWM 信号所需的功率随着 M 的增大缓慢减小, 当 $r = M-1$ 时, PPWM 信号所需的功率随着 M 的增大迅速减小; 当 $M = 4$ 时, PPWM($r = 1$) 信号比 OOK 调制和 PWM 信号节省约 2.5 dB, PPWM($r = M-1$) 信号节省约 7.3 dB, 两种 PPWM 信号所需的功率均大于 PPM 信号, 小于 PWM 信号。

图 3 给出了 PPWM 信号随 r 变化的平均发射功率曲线。可以看出 PPWM 信号相对于 OOK 调制所需的功率随 r 的增大而减小, 即功率效率随 r 的增大而提高; 而且当 $r = 0$ 时, PPWM 信号的功率效率与 PWM 信号相同, 当 $r = M$ 时, PPWM 信号的功率效率与 PPM 信号相同。

3.2 带宽效率分析

信源的传输速率为 R_b bit/s, 则每个比特的宽度为 $T_b = 1/R_b$ 。OOK 调制信号所需的带宽 [3] 为 $B_{OOK} = R_b$, 正好是脉冲宽度的倒数; PPM 信号所需的带宽 [7~9] 约等于单个脉冲时隙的倒数, 即

图3 PPWM 信号随 r 变化的平均发射功率Fig. 3 Average transmit power of PPWM signals changing with r

$$B_{\text{PPM}} = \frac{L}{T} = \frac{L}{\text{lb}LT_b} = \frac{L}{\text{lb}L}B_{\text{OOK}}. \quad (2)$$

PWM 信号的脉冲宽度是一个随机变化的序列,所以计算调制信号的带宽时应取平均脉冲宽度,假设每一种脉冲宽度信号出现的概率是相等的,平均脉冲宽度为

$$T_{\text{PWM}} = \frac{1}{L}(1+2+\dots+L) \frac{MT_b}{L} = \frac{1+L}{2} \cdot \frac{\text{lb}L}{L}T_b, \quad (3)$$

则所需的带宽为

$$B_{\text{PWM}} = \frac{1}{T_{\text{PWM}}} = \frac{2}{1+L} \cdot \frac{L}{\text{lb}L}B_{\text{OOK}}. \quad (4)$$

同理,PPWM 信号的脉冲宽度是一个从 1 到 L_w 随机变化的序列,假设每一种脉冲宽度信号出现的概率是相等的,则平均脉冲宽度为

$$T_{\text{PPWM}} = \frac{1}{L_w}(1+2+\dots+L_w) \frac{MT_b}{L} = \frac{1+L_w}{2} \cdot \frac{\text{lb}L}{L}T_b. \quad (5)$$

所以 PPMPWM 调制信号所需的带宽是:

$$B_{\text{PPMPWM}} = \frac{1}{T_{\text{PPMPWM}}} = \frac{2}{1+L_w} \cdot \frac{L}{\text{lb}L}B_{\text{OOK}}. \quad (6)$$

图 4 给出了 OOK, PPM, PWM 和 PPWM 信号的带宽效率曲线。为便于分析,对 PPWM 分别取 $r=1$ (即 $L_p=2, L_w=2^{M-1}$) 和 $r=M-1$ (即 $L_p=2^{M-1}, L_w=2$),在实际应用中应根据具体的带宽要求取值。

可以看出当 $r=1$ 时,PPWM 信号所需的带宽随着 M 的增大而缓慢减小,当 $r=M-1$ 时,PPWM 信号所需的带宽随着 M 的增大迅速增大;当 $M=4$ 时,PPWM($r=1$)信号所需带宽为 OOK 调制信号的 2.7 倍,PPWM($r=M-1$)信号为 OOK 调制信

号的 0.9 倍,两种 PPWM 信号所需的带宽均小于 PPM 信号,大于 PWM 信号。

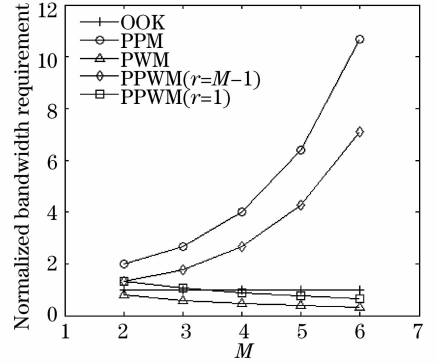
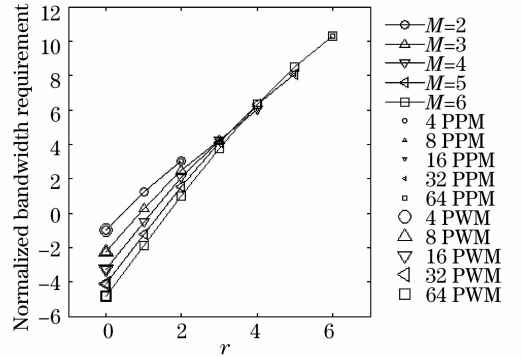


图4 各种调制技术的带宽效率

Fig. 4 Bandwidth efficiency of all the modulation schemes

图 5 给出了 PPWM 信号随 r 变化的带宽效率曲线图。可以看出 PPWM 信号相对于 OOK 调制所需的带宽随 r 的增大而增大,即带宽效率随 r 的增大而降低;而且当 $r=0$ 时,PPWM 信号的带宽效率与 PWM 信号相同,当 $r=M$ 时,PPWM 信号的带宽效率与 PPM 信号相同。

图5 PPWM 信号随 r 变化的带宽效率Fig. 5 Bandwidth efficiency of PPWM signals changing with the changing of r

3.3 差错性能分析

无线光通信系统的激光信号在空气中传播时会受到大气湍流效应、路径衰减、多径效应、带宽限制、背景光引起的散弹噪声等多方面的影响^[10],这里假设大气信道为弱湍流信道,只具有背景光引起的加性高斯白噪声 $n_o(t)$ 和路径衰减 g ,不考虑多径效应和带宽限制等其他影响,那么系统的平均误码率 (BER) 应为^[11,12]:

$$\text{BER} = \int_0^{+\infty} P_e(P) \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\delta_x P} \times \exp\left\{-\frac{[\ln(P/P_0) + 2\delta_x^2]}{8\delta_x^2}\right\} dP, \quad (7)$$

式中 P 表示调制信号的峰值功率, $P_e(P)$ 表示 P 为

定值时的误码率, δ_x 表示光强闪烁指数, P_0 表示功率均值。

系统接收端匹配滤波器的输入在有脉冲时为 $\sqrt{gP_t} + n_0(t)$, 无脉冲时为 $n_0(t)$, 其中 P_t 为发射脉冲峰值功率, $n_0(t)$ 为均值为 0, 方差为 δ_n^2 的高斯白噪声, 则匹配滤波器在 $T = T_s$ 时的输出分别为 $gP_t T_s + n(T_s)$ 和 $n(T_s)$, $n(T_s)$ 是均值为 0, 方差为 $\delta^2 = gP_t T_s^2 \delta_n^2$ 的高斯白噪声。设判决门限为 $\beta gP_t T_s$, 则有脉冲时隙和无脉冲时隙的判决出错概率为

$$p_{e1} = Q\left[(1-\beta)\sqrt{\frac{gP_t}{\delta_n^2}}\right], p_{e0} = Q\left[\beta\sqrt{\frac{gP_t}{\delta_n^2}}\right], \quad (8)$$

式中 $Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{z^2}{2}) dz$, 设有脉冲时隙和无脉冲时隙时出现的概率为 P_1 和 P_0 , 调制信号的平均时隙出错概率为

$$p_e = p_1 p_{e1} + p_0 p_{e0} = p_1 Q\left[(1-\beta)\sqrt{\frac{gP_t}{\delta_n^2}}\right] + p_0 Q\left[\beta\sqrt{\frac{gP_t}{\delta_n^2}}\right]. \quad (9)$$

在调制信号的判决中一个时隙不仅影响所在的符号, 也会影响其他后续符号, 所以常用误包率来比较各种调制方式的性能, 即只要数据包中的一个时隙出错就认为这个数据包有错误。假设一个数据包中有 N 个比特, 经过调制后的时隙个数为 K , 那么相应的误包率可以表示为

$$p_{pe} = 1 - (1 - p_e)^K \approx K p_e. \quad (10)$$

将(10)式代入(7)式即可得到弱湍流信道模型下的平均误包率为

$$P_p = K \int_0^{+\infty} P_{pe}(P_t) \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\delta_x P_t} \times \exp\left\{-\frac{[\ln(P_t/P_{t0}) + 2\delta_x^2]^2}{8\delta_x^2}\right\} dP_t. \quad (11)$$

对于 PPWM 技术, $P_1 = (1 + L_w)/2L$, $P_0 = 1 - P_1$, $K = NL/M$, 代入(11)式得 PPWM 技术在弱湍流信道模型下的误包率为

$$P_p = \frac{NL}{M} \int_0^{+\infty} P_{pe}(P_t) \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\delta_x P_t} \times \exp\left\{-\frac{[\ln(P_t/P_{t0}) + 2\delta_x^2]^2}{8\delta_x^2}\right\} dP_t. \quad (12)$$

可用同样的方法求出 OOK, PPM, PWM 技术在弱湍流信道模型下的误包率。设几种调制技术的平均功率相等, 则它们具有不同的峰值功率, $P_{tOOK} = 2P_{avg}$, $P_{tPPM} = LP_{avg}$, $P_{tPWM} = \frac{2L}{1+L}P_{avg}$ 和 P_{tPPWM}

$= \frac{2L}{1+L}P_{avg}$, 其中 P_{avg} 为一个符号的平均功率。

图 6 给出了各种调制信号随接收功率变化的误包率曲线, 参数如表 1 所示。可以看出 PPWM 信号的误包率均大于 PPM 信号, 小于 OOK 和 PWM 信号, 而且随 r 的增大而减小, 减小而增大。当误包率为 10^{-5} 时, PPWM($r=1$) 信号的接受功率比 OOK 调制信号小 2 dBm, 比 PWM 信号小 2.5 dBm, 比 PPM 信号大 6 dBm, PPWM($r=M-1$) 信号的接受功率比 OOK 调制信号小 7 dBm, 比 PWM 信号小 7.5 dBm, 比 PPM 信号大 2 dBm。

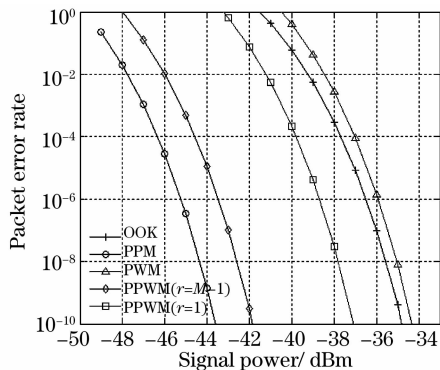


图 6 各种调制技术的误包率

Fig. 6 Packet error rate of all the modulation schemes

表 1 绘图参数表

Table 1 List of parameters for Fig. 6

| Parameter | Value |
|--------------|--------------------|
| δ_x | 0.25 |
| β | 0.5 |
| g | 5×10^{-6} |
| δ_n^2 | 1×10^{-8} |
| N | 1024 |

4 结论

结合无线光通信系统中的 L 级脉冲位置调制技术和 L 级脉冲宽度调制技术, 研究了一种新的调制方法—— L 级脉冲位置宽度调制技术。分析了 PPWM 技术的功率效率、带宽效率和弱湍流信道模型下的误包率。结果表明 L 级脉冲位置宽度调制技术拥有 L 级 PPM 技术低误码率、高功率效率的优点, 改善了带宽效率, 从统计意义上加宽了信号脉冲宽度, 易于实现, 而且性能随 r 的取值而变化, 实际应用中可以根据具体的要求取值。

参 考 文 献

- Pang Zhiyong, Piao Dazhi, Zou Chuanyun. Performance comparisons of several modulation schemes for optical wireless communication[J]. *Journal of Guilin Institute of Electronic Technology*, 2002, **22**(5): 1~4
庞志勇, 朴大志, 邹传云. 光通信中几种调制方式的性能比较[J]. 桂林电子工业学院院报, 2002, **22**(5): 1~4
- Zhang Jiangxin, Hu Hongfei. Soft demodulation & performance of PPM in free-space optical communications[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, **18**(4): 42~46.
张江鑫, 胡宏飞. 空间光通信 PPM 信号的软解调及其性能[J]. 光电子技术与信息, 2005, **18**(4): 42~46
- Z. Ghassemlooy, A. R. Haye, N. L. Seed *et al.*. Digital pulse interval modulation for optical communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, **36**(12): 95~99
- Fan Yangyu, R. J. Green. Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(6): 1~8
- 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
- Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. Structure study of modulation waveforms in optical wireless communications[J]. *Journal of Yantai University(Natural Science and Engineering Edition)*, 2007, **20**(1): 31~34
程 刚, 王红星, 孙晓明等. FSO 数字脉冲调制方法的符号结构分析[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2007, **20**(1): 31~34
- Zhang Jinlong. Modulation analysis for outdoor applications of optical wireless communications [C]. *Communication Technology Proceedings*, 2000, **2**: 1483~1487
- Z. Ghassemlooy, N. M. Aldibbiat. Multilevel digital pulse interval modulation scheme for optical wireless communications [C]. *Transparent Optical Networks*, 2006, **3**: 149~153
- Wang Jingyuan, Zhang Zhengxian. PPM in wireless infrared communication[J]. *Telecommunication Technology*, 2000, **5**: 81~84.
汪井源, 张正线. 无线光通信中的 PPM 调制[J]. 电讯技术, 2000, **5**: 81~84
- Shu Shouheng, Yan Juanjuan, Zheng Zheng *et al.*. Beam propagation simulation of the turbulence channels in free-space laser communication[J]. *Journal of Light Scattering*, 2007, **19**(1): 79~85
舒首衡, 闫娟娟, 郑 铮等. 空间激光通信中湍流信道光束传输仿真[J]. 光散射学报, 2007, **19**(1): 79~85
- Zhang Tieyin, Wang Hongxin, 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
- Zhu Yinbin, Wang Hongxin, Zhang Lei *et al.*. Analysis of error performance for turbo coded digital pulse interval modulation under weak turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1245~1249
朱银兵, 王红星, 张 磊等. 弱湍流下 Turbo 码编码数字脉冲间隔差错性能分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1245~1249.

2008 年度“大珩杯”《光学学报》优秀论文名单

| 论 文 题 名 | 作 者 | 发表时间 |
|-------------------------------------------------|-----------------|------|
| 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器 | 周 军; 楼祺洪; 朱健强 等 | 2006 |
| 光纤型光学相干层析成像系统的研制 | 俞晓峰; 丁志华; 陈宇恒等 | 2006 |
| 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术 | 尉迟亮; 顾济华; 刘 薇等 | 2006 |
| 基于二代 curvelet 变换的图像融合研究 | 李晖晖; 郭 雷; 刘 航 | 2006 |
| 部分抽运的板条激光器的热效应分析 | 程小劲; 牛金富; 徐剑秋 | 2006 |
| 激光二极管端面抽运 Nd:YVO ₄ 实现 1386nm 连续波激光输出 | 李海峰; 周 睿; 赵 璞等 | 2006 |
| 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪 | 陈全胜; 赵杰文; 张海东等 | 2006 |
| 两根大芯双包层光纤激光器获得 60W 相干输出 | 何 兵; 楼祺洪; 周 军等 | 2006 |
| 基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法 | 王泽锋; 罗洪; 熊水东等 | 2007 |
| 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究 | 杨 勇; 王琰蕾; 李 明等 | 2006 |