

文章编号: 0258-7025(2010)02-0460-05

脉冲位置宽度调制技术的功率谱性能及改进技术

白 勃¹ 樊养余¹ 原勰捷¹ 谭庆贵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 通过分析 L 级脉冲位置宽度调制 (PPWM) 技术的功率谱特性, 发现 PPWM 信号的功率在一些特定频率上具有较大分量, 不利于信号的传播。对 PPWM 技术做出改进, 提出 L 级脉冲宽度位置调制 (PWPM) 技术, 在削弱功率峰值和遣散功率谱的同时, 具有和 PPWM 技术完全相同的功率利用率、误码率和频带利用率。

关键词 光通信; 脉冲位置宽度调制; 脉冲宽度位置调制; 功率谱; 功率效率; 带宽效率

中图分类号 TN76 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0460

A Research of PPWM Modulation Scheme's Power Spectrum and Its Modified Scheme

Bai Bo¹ Fan Yangyu¹ Yuan Mengjie¹ Tan Qinggui²

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

Abstract After analysis of the L -level pulse-position-width modulation (PPWM) scheme's power spectrum, strong spectral lines in the PPWM sequence are found, which are not good for the propagation of the sequences. In this paper, the PPWM modulation scheme is modified, and a new modulation scheme, L -level pulse-width-position modulation scheme (PWPM) is proposed. This scheme lowers the peak value power, scatters the power spectrum, and at the same time has the same power efficiency, bandwidth efficiency and packet error rate as PPWM modulation scheme.

Key words optical communications; pulse-position-width modulation; pulse-width-position modulation; power spectrum; power efficiency; bandwidth efficiency

1 引言

无线光通信系统作为一种较为新型的通信技术, 相对于普通无线通信系统具有成本低、抗电磁干扰能力强、保密性好等优点^[1~3]。无线光通信系统中的 L 级脉冲位置宽度调制 (PPWM) 技术具有功率利用率高、误码率低、频带利用率高^[4] 等优点, 但 PPWM 信号的功率在一些特定频率上具有较大分量, 不利于信号的传播。本文对 PPWM 技术做出改进, 提出 L 级脉冲宽度位置调制 (PWPM) 技术, 在不降低 PPWM 技术较高的功率利用率、误码率和频带利用率的同时, 削弱了调制信号的功率峰值,

遣散了功率谱, 形成了更加连续和均匀的功率谱, 便于调制信号的传播。

2 PWPM 技术简介

无线光通信系统的模型^[5] 如图 1 所示, 其中 $x(t)$ 是信源信号, $h(t)$ 是信道的单位冲击响应, $n(t)$ 是信道叠加的加性噪声信号, $y(t)$ 是接收到的信号, 则有

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau + n(t). \quad (1)$$

L 级 PWPM 先根据 M 比特数据的前 r 个比特

收稿日期: 2008-12-18; 收到修改稿日期: 2009-04-28

基金项目: 空间微波技术国家级重点实验室基金(9140C5301010701)和陕西省自然科学基金(2007F10)资助课题。

作者简介: 白 勃 (1985—), 男, 博士研究生, 主要从事无线光通信系统方面的研究。E-mail: catlikee@gmail.com

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

E-mail: fan_yangyu@sina.com

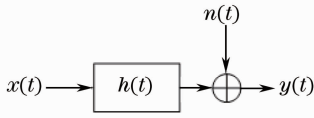


图 1 无线光通信系统模型

Fig. 1 Model of wireless optical communication system

进行 L_w ($L_w = 2^r$) 级脉冲宽度调制 (PWM), 即将 M 比特的数据映射为 L_w 个时隙组成的时间段上从零开始宽度为 l_w 个时隙的脉冲信号, L_w 个时隙组成的时间段长度与上述 M 比特数据相等。然后根据 M 比特数据中的后 $M-r$ 个比特对上述 L_w 级 PWM 已调信号进行二次 L_p ($L_p = 2^{M-r}$) 级脉冲位置调制 (PPM), 即将这个信号映射为 L_p 个时隙组成的时间段上的某一个时隙处的单个脉冲信号, L_p 个时隙的时间段长度与上述 L_w 级 PWM 信号脉冲长度相等。

其中 l_w 的取值范围为: $1, 2, \dots, L_w$; r 的取值范围为: $0, 1, 2, \dots, M$, 当 $r = 0$ 时, $L_w = 2^0 = 1$, $L_p = 2^{M-0} = L$, 即为 L 级 PPM; 当 $r = M$ 时, $L_w = 2^M = L$, $L_p = 2^{M-M} = 1$, 即为 L 级 PWM。因此可以将 PPM, PWM 看作 PWPM 的两种特例。

L 级 PWPM 信号可以表示为

$$x(t) = L'P \sum_{k=0}^K p_{wpk} \left(t - l_w \cdot \frac{l_p - 1}{L} T - kT \right), \quad (2)$$

式中

$$p_{wp}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, l_w T/L) \\ 0, & \text{other} \end{cases},$$

$l_p \in \{1, 2, 3, \dots, L_p\}$, $l_w \in \{1, 2, 3, \dots, L_w\}$, T 为 M 个比特的总时宽, $L' = 2L/(L_w + 1)$ [3,5] 是为了保证 PPWM 信号的平均功率与开关键控 (OOK) 相等。本文将研究图 2 所示的 OOK, PPWM 和 PWPM 技术 [6~7]。

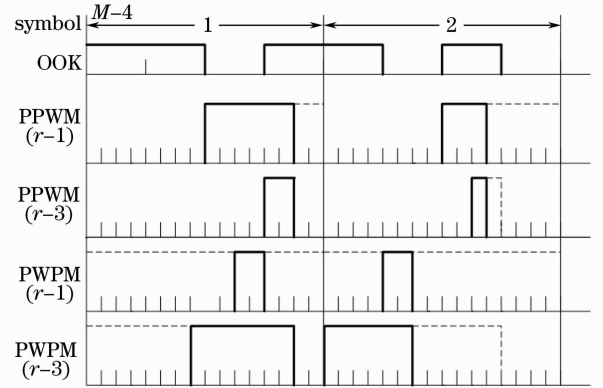


图 2 OOK, PPWM 和 PWPM 信号结构

Fig. 2 Schemes with OOK, PPWM and PWPM

3 功率谱特性

3.1 PPWM 信号功率谱分析

L 级 PPWM 信号 $x(t)$ 的傅里叶变换可以表示为

$$\begin{aligned} X(f) &= \frac{L'P}{KT} \int_0^{KT} \sum_K \left[p_{wpk} \left(t - \frac{l_p - 1}{L_p} T - kT \right) \cdot \exp(-j2\pi ft) \right] dt = \\ &= \frac{L'P}{KT} \sum_{k=0}^K \left\{ \frac{l_w T}{L} \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp \left[-j2\pi fT \left(k + \frac{l_p - 1}{L_p} + \frac{l_w}{2L} \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{L'P}{KL} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp \left(-j\pi fT \frac{l_w}{L} \right) \cdot \sum_{K_{l_w}} \exp \left[-j2\pi fT \left(k + \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \right] \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

式中 l_w 是 L_w 个可能的脉冲宽度调制信号中的第 l_w 个信号, K_{l_w} 是第 l_w 个脉冲信号出现的次数。假设 L_w 个可能的脉冲宽度调制信号出现的概率是相等的, 那么 PPWM 信号的傅里叶变换可以表示为 [8]

$$\begin{aligned} X(f) &= \frac{L'P}{KL} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp \left(-j\pi fT \frac{l_w}{L} \right) \cdot \frac{1}{L_w} \sum_K \exp \left[-j2\pi fT \left(k + \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{L'P}{KL} \cdot \frac{1}{L_w} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp \left(-j\pi fT \frac{l_w}{L} \right) \cdot \sum_K \exp \left[-j2\pi fT \left(k + \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \right] \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_K \exp \left[-j2\pi fT \left(k + \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \right] &= \sum_{l_p=1}^{L_p} \left[\exp \left(-j2\pi fT \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \cdot \sum_{K_{l_p}} \exp(-j2\pi fTk) \right] = \\ &= \sum_{l_p=1}^{L_p} \left[\exp \left(-j2\pi fT \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \cdot \frac{1}{L_p} \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right] = \\ &= \frac{1}{L_p} \sum_{l_p=1}^{L_p} \left[\exp \left(-j2\pi fT \frac{l_p - 1}{L_p} \right) \cdot \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right], \quad (5) \end{aligned}$$

式中 l_p 是 L_p 个可能的脉冲位置调制信号中的第 l_p 个信号, K_{l_p} 是第 l_p 个脉冲信号出现的次数。假设 L_p 个可能的脉冲位置调制信号出现的概率是相等的, 那么 PPWM 信号的傅里叶变换可以表示为

$$\begin{aligned} X(f) &= \frac{L'P}{KL} \cdot \frac{1}{L_w} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left(-j\pi fT \frac{l_w}{L}\right) \right\} \cdot \frac{1}{L_p} \sum_{l_p=1}^{L_p} \exp\left(-j2\pi fT \frac{l_p-1}{L_p}\right) \cdot \\ &\sum_K \exp(-j2\pi fTk) = \frac{L'P}{KL^2} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left(-j\pi fT \frac{l_w}{L}\right) \right\} \cdot \\ &\sum_{l_p=1}^{L_p} \exp\left(-j2\pi fT \frac{l_p-1}{L_p}\right) \cdot \sum_K \exp(-j2\pi fTk), \end{aligned} \quad (6)$$

则 L 级 PPWM 信号 $x(t)$ 的功率谱密度可以表示为^[9]

$$\begin{aligned} S(f) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X(f)|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \frac{L'P}{KL^2} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left(-j\pi fT \frac{l_w}{L}\right) \right\} \cdot \right. \\ &\left. \sum_{l_p=1}^{L_p} \exp\left(-j2\pi fT \frac{l_p-1}{L_p}\right) \cdot \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left(\frac{L'P}{KL^2} \right)^2 \cdot \end{aligned}$$

$$\left| \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left(-j\pi fT \frac{l_w}{L}\right) \right\} \right|^2 \cdot \left| \sum_{l_p=1}^{L_p} \exp\left(-j2\pi fT \frac{l_p-1}{L_p}\right) \right|^2 \cdot \left| \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right|^2, \quad (7)$$

而

$$E\left[\left| \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right|^2 \right] = \begin{cases} 1, & f = n \frac{1}{T} = n \frac{1}{\text{lb}L \cdot T_b} \\ \approx 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

$$\left| \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left(-j\pi fT \frac{l_w}{L}\right) \right\} \right|^2 = \begin{cases} 0, & f = nL \frac{1}{T} = nL \frac{1}{\text{lb}L \cdot T_b} \\ \neq 0, & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

$$\left| \sum_{l_p=1}^{L_p} \exp\left(-j2\pi fT \frac{l_p-1}{L_p}\right) \right|^2 = \begin{cases} L_p^2, & f = nL_p \frac{1}{T} = nL_p \frac{1}{\text{lb}L \cdot T_b} \\ \approx 0, & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

其中 m, n 均为正整数。所以 L 级 PPWM 信号 $x(t)$ 的功率谱密度为

$$S(f) = \begin{cases} \neq 0, & f = nL_p \frac{1}{T} = nL_p \frac{1}{\text{lb}L \cdot T_b} \text{ and } n \neq m \frac{L}{L_p} \\ \approx 0, & \text{other} \end{cases} \quad (11)$$

3.2 PWPM 信号功率谱分析

L 级 PWPM 信号 $x(t)$ 的傅里叶变换可以表示为

$$\begin{aligned} X(f) &= \frac{L'P}{KT} \int_0^{KT} \sum_K p_{wpk} \left(t - l_w \frac{l_p-1}{L} T - kT \right) \cdot \exp(-j2\pi ft) dt = \\ &\frac{L'P}{KT} \sum_{k=0}^K \left\{ \frac{l_w}{L} T \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j2\pi fT \left(k + l_w \frac{l_p-1}{L} + \frac{l_w}{2L} \right) \right] \right\} = \\ &\frac{L'P}{KT} \sum_{k=0}^K \left\{ \frac{l_w}{L} T \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L} (2l_w l_p - l_w) - j2\pi fTk \right] \right\} = \\ &\frac{L'P}{KL} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L} (2l_w l_p - l_w) \right] \cdot \sum_{K_{l_w}} \exp(-j2\pi fTk) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 l_w 是 L_w 个可能的脉冲宽度调制信号中的第 l_w 个信号, K_{l_w} 是第 l_w 个脉冲信号出现的次数。假设 L_w 个可能的脉冲宽度调制信号出现的概率是相等的, 那么 PWPM 信号的傅里叶变换可以表示为^[8]

$$X(f) = \frac{L'P}{KL} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L}(2l_w l_p - l_w)\right] \cdot \frac{1}{L_w} \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right\} =$$

$$\frac{L'P}{KL} \sum_{l_w=1}^{L_w} l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L}(2l_w l_p - l_w)\right] \cdot \frac{1}{L_w} \sum_K \exp(-j2\pi fTk), \quad (13)$$

则 L 级 PWPM 信号 $x(t)$ 的功率谱密度可以表示为^[9]

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X(f)|^2 =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \frac{L'P}{KL} \frac{1}{L_w} \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L}(2l_w l_p - l_w)\right] \right\} \cdot \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right|^2 =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left(\frac{L'P}{KL} \cdot \frac{1}{L_w} \right)^2 \left| \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L}(2l_w l_p - l_w)\right] \right\} \right|^2 \cdot \left| \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right|^2. \quad (14)$$

而

$$E\left[\left| \sum_K \exp(-j2\pi fTk) \right|^2 \right] = \begin{cases} 1, & f = n \frac{1}{T} = n \frac{1}{lbL \cdot T_b} \\ \approx 0, & \text{other} \end{cases} \quad (15)$$

$$\left| \sum_{l_w=1}^{L_w} \left\{ l_w \cdot \frac{\sin[\pi f(l_w/L)T]}{\pi f(l_w/L)T} \exp\left[-j\pi f \frac{T}{L}(2l_w l_p - l_w)\right] \right\} \right|^2 = \begin{cases} 0, & f = nL \frac{1}{T} = nL \frac{1}{lbL \cdot T_b} \\ \neq 0, & \text{other} \end{cases} \quad (16)$$

式中 m, n 均为正整数。所以 L 级 PWPM 信号 $x(t)$ 的功率谱密度为

$$S(f) = \begin{cases} \neq 0, & f = n \frac{1}{T} = n \frac{1}{lbL \cdot T_b} \text{ and } n \neq mL \\ \approx 0, & \text{other} \end{cases} \quad (17)$$

3.3 功率谱仿真

假设信源信号的速率为 $R_b = 100$ bit/s, 传输比特的数目为 1024, 调制的级数 $L = 16$, 采样速率为 $F_s = 1600$ bit/s, 对信号进行 PPWM 和 PWPM ($L_p = 2, L_w = 8$ 和 $L_p = 4, L_w = 4$)。

图 3 为 $L_p = 2, L_w = 8$ 的两种调制信号的功率谱, PPWM 信号在 $50n$ Hz 频率处出现较大的功率分量, 根据(11)式, 当 $f = nL_p(R_b/lbL) = 50n$ Hz, 且 $n \neq mL$ 时, 会出现较大分量; 图 4 为 $L_p = 4, L_w = 4$ 的两种调制信号的功率谱, PPWM 信号在 $100n$ Hz 频率处出现较大的功率分量, 根据(11)式, 当 $f = nL_p(R_b/lbL) =$

$100n$ Hz, 且 $n \neq mL$ 时, 会出现较大分量。这与理论值相符, 但这不利于调制信号的传播。

图 3 中的 PWPM 信号在 $25n$ Hz 频率处出现较明显的功率分量, 根据(17)式, 当 $f = n \frac{R_b}{lbL} = 25n$ Hz, 且 $n \neq mL$ 时, 会出现较大分量, 但相对于 PPWM 信号功率峰值已经大大降低; 图 4 中的 PWPM 信号在 $f = 25n$ Hz 处并没有出现明显的功率分量。可以看出 PWPM 技术具有较好的削减峰值和遣散功率谱的效果, 形成更加连续和均匀的功率谱, 便于发射机的发射和调制信号的传播。

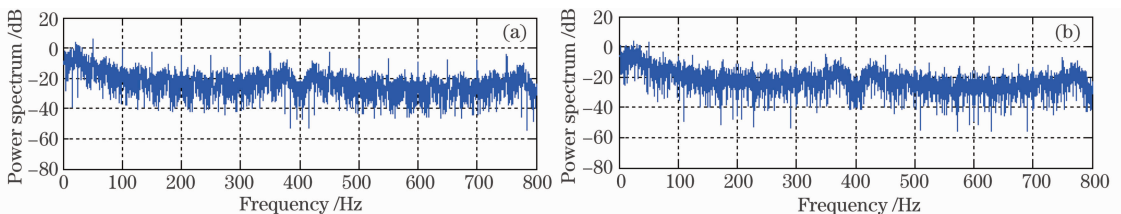


图 3 PPWM 和 PWPM 信号的功率谱

Fig. 3 Power spectrum of PPWM and PWPM signals. (a) 16 level PPWM with $L_p = 2, L_w = 8$;

(b) 16 level PWPM with $L_p = 2, L_w = 8$

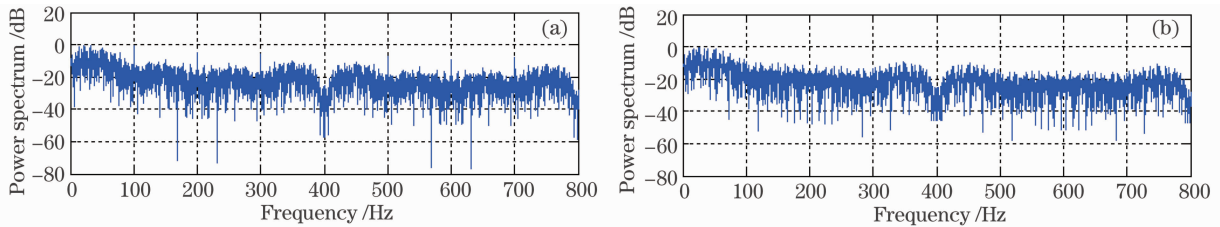


图 4 PPWM 和 PWPM 信号的功率谱

Fig. 4 Power spectrum of PPWM and PWPM signals. (a) 16 level PPWM with $L_p=4$, $L_w=4$;

(b) 16 level PWPM with $L_p=4$, $L_w=4$

4 功率效率和带宽效率分析

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^[4] $P_{\text{PPWM}} = P_0(1 + L_w)/(2L)$ 。同理, L 级 PWPM 技术的平均发射功率为 $P_{\text{PWPM}} = P_0(1 + L_w)/(2L)$, P_0 为发送码元 1 时的光脉冲功率。

PPWM 信号所需的带宽为^[4]

$$B_{\text{PPWM}} = \frac{1}{T_{\text{PPWM}}} = \frac{2}{1 + L_w} \cdot \frac{L}{\text{lb}L} B_{\text{OOK}} \quad (18)$$

PWPM 信号的脉冲宽度是一个从 1 到 L_w 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,为 $1/L_w$,则平均脉冲宽度为

$$T_{\text{PWPM}} = \frac{1}{L_w}(1 + 2 + \dots + L_w) \frac{MT_b}{L} = \frac{1 + L_w}{2} \cdot \frac{\text{lb}L}{L} T_b \quad (19)$$

所以 PWPM 信号所需的带宽为^[10]

$$B_{\text{PWPM}} = \frac{1}{T_{\text{PWPM}}} = \frac{2}{1 + L_w} \cdot \frac{L}{\text{lb}L} B_{\text{OOK}} \quad (20)$$

可以看出,PWPM 信号的功率效率和带宽效率与 PPWM 信号完全相同。

5 结 论

分析了无线光通信系统中 L 级 PPWM 的功率谱特性,并针对 PPWM 信号的功率在一些特定频率上具有较大分量,不利于信号的传播的缺点,提出 L 级 PWPM。在无线光通信系统的模型下分析了 PWPM 技术的功率谱、功率效率和带宽效率特性,结果表明 PWPM 技术削弱了调制信号的功率峰值,遣散功率谱,使调制信号功率谱更加连续和均匀,便于信号的传播;同时具有和 PPWM 技术完全相同的功率利用率、误码率和频带利用率。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongxing, Ma Jie, Zhang Tieying. Research on the optimum detection threshold of pulse interval modulation in wireless optical communication[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, **28**(8): 63~66
王红星, 马杰, 张铁英. 无线光通信脉冲间隔调制最优检测阈值研究[J]. *舰船电子工程*, 2008, **28**(8): 63~66
- 2 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
- 3 Zhu Yinbing, Wang Hongxing, 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调制差错性能分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1245~1249
- 4 Fan Yangyu, Bai Bo, Huang Aiping *et al.*. Pulse-position-width modulation scheme in wireless optical communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1883~1887
樊养余, 白勃, 黄爱萍等. 无线光通信中的脉冲位置宽度调制技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1883~1887
- 5 Zhang Jinlong. Modulation analysis for outdoor applications of optical wireless communications [C]. *Communication Technology Proceedings*, 2000, **2**: 1483~1487
- 6 Hu Zongmin, Tang Junxiang. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications[J]. *J. 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
- 7 Cheng Gang, Wang Hongxing, Sun Xiaoming *et al.*. Structure study of modulation waveforms in optical wireless communications[J]. *J. 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
- 8 Fan Yangyu, Roger J. Green. Comparison of pulse position modulation and pulse width modulation for application in optical communications[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(6): 065001
- 9 Bernard Sklar. Digital Communications: Fundamentals and Applications(2nd Edition) [M]. Xu Pingping, Song Tiecheng, Ye Zhihui *et al.*. Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
伯纳德斯卡. 数字通信: 基础与应用(第二版)[M]. 徐平平, 宋铁成, 叶芝慧等译, 北京: 电子工业出版社, 2002
- 10 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