

红外双幅度脉冲间隔调制通信系统性能分析

张 凯 张海涛 巩马理 闫 平 杨 欣 姜 丰 金 伟

(清华大学精密仪器系数字光电实验室, 北京, 100084)

摘要 提出一种新的调制方法——双幅度脉冲间隔调制(DAPIM). 研究了采用该调制方法的红外通信系统在加性高斯白噪声情况下的性能, 对 DAPIM 的符号结构、带宽、功率谱和误码率特性等方面进行了分析, 并与开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)和脉冲间隔调制(PIM)等调制方式做了比较. DAPIM 具有较好的带宽和功率综合特性. 对于 DAPIM, 符号位数 $M=5$ 或 6 是较好的选择.

关键词 无线红外通信, 调制, DAPIM, 功率谱密度.

PERFORMANCE OF DUAL-AMPLITUDE PULSE INTERVAL MODULATION FOR WIRELESS INFRARED COMMUNICATIONS

ZHANG Kai ZHANG Hai-Tao GONG Ma-Li YAN Ping YANG Xin JIANG Feng JIN Wei

(Tsinghua University, Digital Photonics Laboratory, Department of Precision Instruments, Beijing 100084, China)

Abstract A novel dual-amplitude pulse interval modulation (DAPIM) for optical wireless communications is discussed. The symbol structure, the spectral properties, the bandwidth requirement and error performance of DAPIM in a nondispersive channel are presented. DAPIM shows a better compromise between bandwidth and power requirements compared with OOK, PPM, and PIM. DAPIM with 5 bits and 6 bits persymbol is attractive in terms of optical power and bandwidth requirements.

Key words wireless infrared communications, modulation, DAPIM, power spectral.

引言

红外激光具有频率高、频带宽、带宽使用不需申请、抗电磁干扰和保密性好等优点, 因此, 作为无线电的替代选择, 红外激光在无线通信系统中的应用日益受到重视^[1].

人眼安全及便携要求限制了激光平均发射功率. 这些都对调制方式提出了较高要求. 红外激光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统, 其调制方式有开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)和脉冲间隔调制(PIM)等. OOK 是最简单的调制方式, 但是功率效率比较低. PPM 降低了平均功率, 却增加了带宽要求, 而且需要符号和时隙同步. PIM 不需要符号同步, 带宽效率高, 比 OOK 功率效率高^[2].

本文提出一种新的调制方案, 双幅度脉冲间

隔调制(DAPIM), 此调制方案不需要同步, 并可获得较高的带宽效率. 本文研究了采用 DAPIM 调制方式的红外通信系统在加性高斯白噪声干扰下的性能, 分析了 DAPIM 的符号结构、带宽需求、功率谱和误码率特性, 并与 PPM、PIM 等调制方式进行了比较.

1 符号结构

DAPIM 调制方式采用两种起始脉冲, 其幅度分别为 A 和 $\beta A (0 < \beta < 1)$. 符号 $S_k (2^M > k \geq 0)$ 由一个起始脉冲时隙、一个保护时隙和后续的 m 个空时隙组成, 其中 m 为

$$m = \begin{cases} k & k < 2^{M-1} \\ k - 2^{M-1} & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (1)$$

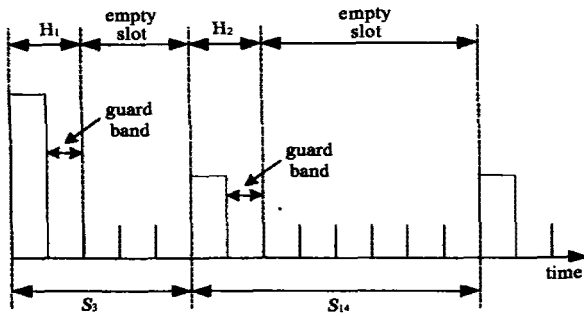


图1 DAPIM 符号结构(M=4)
Fig.1 DAPIM symbol structure for M=4

表1 信息比特和 PPM、PIM 和 DAPIM 等调制方式的时隙序列对照

Table 1 Mapping between source bits(OOK) and transmitted slots for PPM, PIM, and DAPIM with M=2

Source bits	PPM slots	PIM slots	DAPIM slots	DAPIM slots (reverse mapping)
00	1000	10	10	$\beta 0$
01	0100	100	100	$\beta 00$
10	0010	1000	$\beta 0$	10
11	0001	10000	$\beta 00$	100

DAPIM 调制方式的 2 个符号 S_3 和 S_{14} 的波形如图 1 所示,其中 M 为每个符号所包含的比特数。

信息比特(OOK)和 PPM、PIM 和 DAPIM 等调制方式的时隙序列如表 1 所列。同时也给出了相反方式对应的 DAPIM 时隙序列。

2 功率谱密度

DAPIM 脉冲序列可以表示为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n p(t - nT_s), \quad (2)$$

其中 b_n 表示第 n 个时隙是否有脉冲, $b_n \in \{0, 1, \beta\}$, $p(t)$ 表示矩形脉冲; T_s 表示时隙长度。

$x(t)$ 是周期性平稳随机过程,其功率谱密度为^[3]

$$S(f) = \frac{1}{T_s} |P(f)|^2 S_a(f), \quad (3)$$

其中 $P(f)$ 为矩形脉冲 $p(t)$ 的傅里叶变换,

$$P(f) = T_s \text{sinc}(fT_s). \quad (4)$$

$S_a(f)$ 是时隙序列的功率谱密度,即其自相关函数 R_k 的离散傅里叶变换。

$$S_a(f) \cong \frac{2E(b)^2}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{k}{T_s}) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} (R_k - E(b)^2) \exp(-j2\pi k f T_s). \quad (5)$$

其中, $E(b)$ 表示均值。 $S_a(f)$ 中的第一项为 $f = k/$

T_s 的离散谱线。当 $f = k/T_s$ ($k \neq 0$) 时, $P(f)$ 等于 0,所以 DAPIM 功率谱密度仅在直流分量处存在离散线谱。

对于 DAPIM,时隙自相关函数如下:

$$R_k = \begin{cases} \frac{1}{2L_{avg}}(1 + \beta^2), & k = 0 \\ 0 & k = 1 \\ \frac{1}{2LL_{avg}}(1 + \beta)^2, & k = 2 \\ \frac{L^{-1}L_{avg}^{-1}(1 + \beta)^2}{2\sqrt{1 + 8L^{-1}}} \left\{ \left(\frac{1 + \sqrt{1 + 8L^{-1}}}{2} - 2L^{-1} \right) \left(\frac{1 - \sqrt{1 + 8L^{-1}}}{2} \right)^{k-3} - \left(\frac{1 - \sqrt{1 + 8L^{-1}}}{2} - 2L^{-1} \right) \left(\frac{1 + \sqrt{1 + 8L^{-1}}}{2} \right)^{k-3} \right\}, & 3 \leq k \leq \frac{L}{2} + 1 \\ \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{L/2} R_{k-i-1}, & k > \frac{L}{2} + 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $L = 2^M$ 。随着 k 增大, R_k 趋向于 $E(b)^2$ 。当 $k > 5L$ 时,可以认为 R_k 等于 $E(b)^2$ 。 $S_a(f)$ 中的连续谱部分简化为^[4]

$$S_c(f) \cong \sum_{k=-5L}^{5L} (R_k - E(b)^2) \exp(-j2\pi k f T_s). \quad (7)$$

对于 $M = 3, 4, 5$, DAPIM 的功率谱密度如图 2 所示。可以看出, DAPIM 的低频部分不为 0。系统通常使用高通滤波器去除日光灯的噪声,同时也会引起 DAPIM 调制信号的畸变。

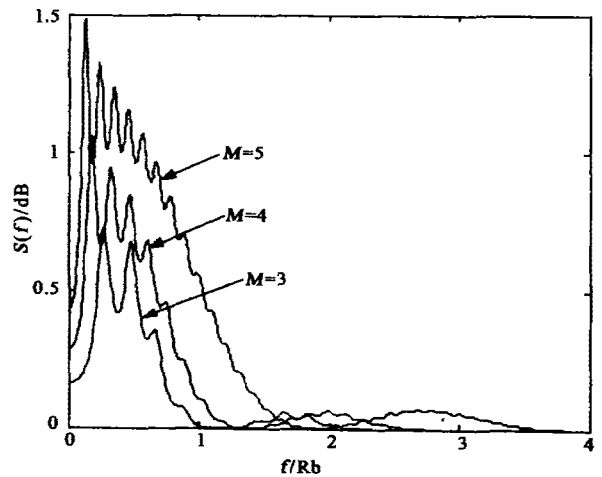


图2 DAPIM(M=3,4,5)功率谱密度。各曲线平均发射功率相同,且发射信号脉冲为方波
Fig.2 Power spectral density of DAPIM for M=3,4,5. All curves represent the same average transmitted optical power and the transmitter pulse shape is rectangular

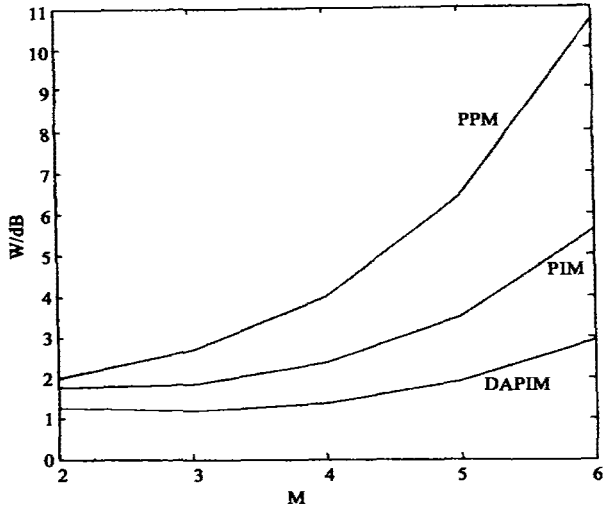


图3 PPM、PIM 和 DAPIM 等调制方式的带宽(按照 OOK 做归一化处理)
Fig.3 Bandwidth requirements of DAPIM, PIM, and PPM normalized to that of OOK

3 带宽需求

DAPIM 调制方式的 M 位符号平均时隙数为 $L_{avg} = 2^{M-2} + 3/2$. (8)

令 DAPIM 的平均位速率 R_b 与 OOK 相同, 则其带宽为

$$W = \frac{(2^{M-1} + 3)R_b}{2M}. \quad (9)$$

PPM^[1]、PIM^[1] 和 DAPIM 等调制方式的带宽(按照 OOK 做归一化处理)如图 3 所示.

DAPIM 除去了 PPM 中冗余的时隙, 而且平均长度比 PIM 短, 获得了较好的带宽效率.

4 系统模型

离散系统框图如图 4 所示. 信息序列 $a_k \in \{0, 1\}$ 通过编码器, b_k 为已调制的序列, 以 $1/T_s$ 的速率通过发射滤波器, 其脉冲响应函数为 $Ab(t)$. 这里, $A = 2RL_{avg}P_{avg}/(1 + \beta)$, 其中 R 是探测器响应率 (A/W). P_{avg} 为平均光功率信号通过脉冲响应函数为

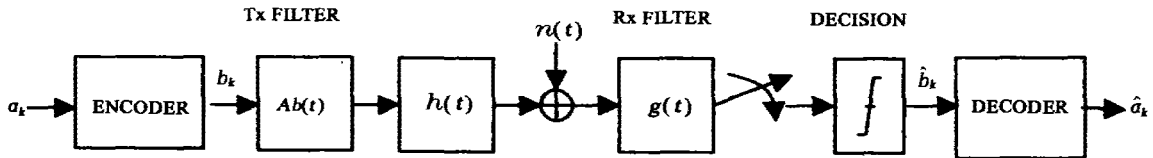


图4 采用阈值检测器的等效信道模型
Fig.4 The equivalent channel model employing threshold detector

$h(t)$ 的信道, 加上双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声, 再通过脉冲响应为 $g(t)$ 的接收滤波器. 然后对此信号进行取样, 得到估计值 \hat{b}_k , 经过解码器得到 \hat{a}_k .

本文假设信道为理想信道, 即不存在多径效应, 脉冲响应函数 $h(t)$ 为 $\delta(t)$.

5 误码率

令 p_0 表示接收到 0 的概率, p_1 表示接收到 βA 和 A 的概率. 时隙出错的概率为^[3]

$$P_s = p_0 Q\left(\frac{\theta_1 A}{\sqrt{N_0/(2T_s)}}\right) + p_1 Q\left(\frac{(1 - \theta_2) A}{\sqrt{N_0/(2T_s)}}\right) + p_1 Q\left(\frac{(\beta - \theta_1) A}{\sqrt{N_0/(2T_s)}}\right) + p_1 Q\left(\frac{(\theta_2 - \beta) A}{\sqrt{N_0/(2T_s)}}\right). \quad (10)$$

其中 $\theta_1 A$ 和 $\theta_2 A$ 为门限, $p_0 = (L_{avg} - 1)/L_{avg}$, $p_1 = 1/(2L_{avg})$, $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$.

定义光学信噪比为

$$SNR = \frac{P_{avg}}{P_n} = \frac{P_{avg}}{P_n} = \frac{\sqrt{2T_s} P_{avg} R}{\sqrt{N_0}}. \quad (11)$$

令 SNR_0 表示 OOK 的光学信噪比. 将式(12)代入式(11), 得

$$P_s = \frac{1}{L_{avg}} ((L_{avg} - 1) Q(C\theta_1) + 0.5(Q(C(1 - \theta_2)) + Q(C(\beta - \theta_1)) + Q(C(\theta_2 - \beta)))). \quad (12)$$

其中

$$C = 2\sqrt{ML_{avg}SNR_0}/(1 + \beta). \quad (13)$$

由于 DAPIM 中, 不同符号的时隙长度不同, 所以一个时隙错误不仅影响它所在的符号, 而且使其后的符号也发生错误. 因此我们使用包误码率进行比较. 时隙出错概率 P_{slot} 可以转换为相应的包误码率:

$$P_p = 1 - (1 - P_s)^{L_{avg}N/M} \approx L_{avg}NP_s/M. \quad (14)$$

将式(13)代入式(15), 可得

$$P_p = \frac{N}{M} \{ (L_{avg} - 1) Q(C\theta_1) + 0.5 [Q(C(1 - \theta_2))$$

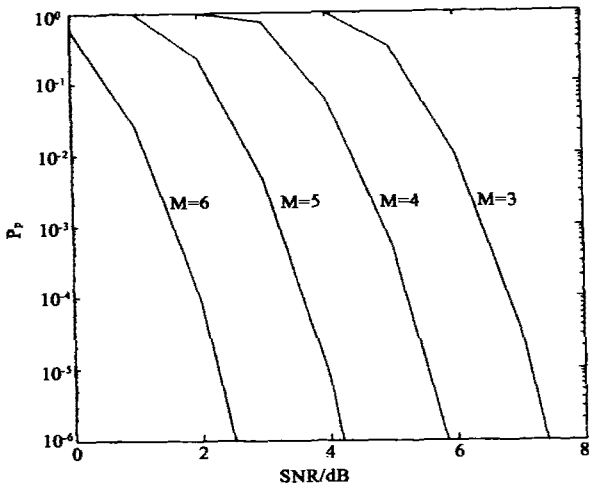


图5 DAPIM 包误码率
Fig. 5 Packet error rate against optical SNR₀ for DAPIM

$+ Q(C(\beta - \theta_1)) + Q(C(\theta_2 - \beta))]$. (15)
假设 $\beta = 0.5, \theta_1 = 0.25, \theta_2 = 0.75$, 式(16)简化为

$$P_p = \frac{N(2L_{avg} + 1)}{2M} Q\left(\frac{C}{4}\right), \quad (16)$$

由式(17)可得 DAPIM 的平均光功率需求为

$$P_{req} = \frac{3\sqrt{N_0 R_b}}{R\sqrt{2ML_{avg}}} Q^{-1}\left(\frac{2MP_p}{N(2L_{avg} + 1)}\right). \quad (17)$$

6 讨论

对于 $M \in \{3, 4, 5, 6\}$, DAPIM 系统的包误码率随光学信噪比的变化如图 5 所示. 在计算中, 取 $N = 1024$. 由图 5 可以看出, 对于误码率 10^{-6} , M 每增大 1, SNR_0 降低大约 1.6dB.

OOK、PPM、PPM、PIM 和 DAPIM 等调制方式包

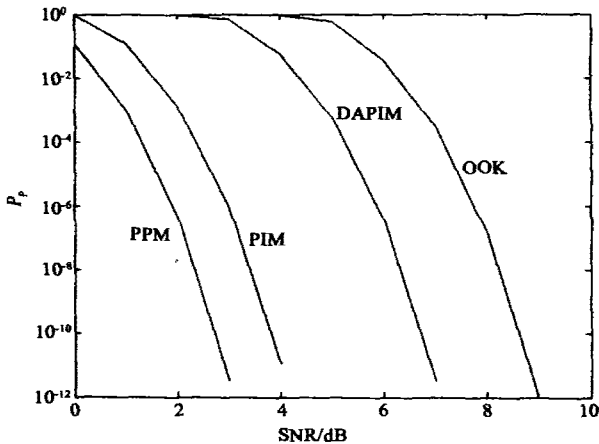


图6 OOK、PPM、PIM 和 DAPIM 包误码率
Fig. 6 Packet error rate against optical SNR₀ for OOK, PPM, PIM, and DAPIM against optical SNR₀

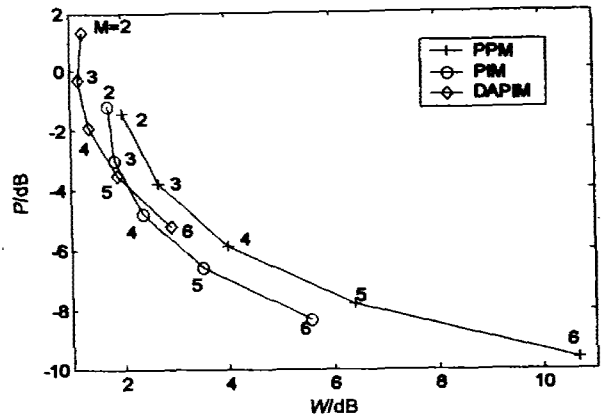


图7 PPM、PIM 和 DAPIM 光功率和带宽需求曲线. 图中数字代表 M 的值
Fig. 7 Comparison of optical power and bandwidth requirement for PPM, PIM, and DAPIM, Numbers represent the value of M

误码率随光学信噪比的变化如图 6 所示, 其中 $M = 4, N = 1024$. DAPIM 性能比 PPM 和 PIM 差, 但是获得比 OOK 低的误码率. 当包误码率为 10^{-6} 时, 对于 SNR_0 , DAPIM 比 OOK 降低了 2dB.

采用 OOK 的功率需求将各调制方案的功率需求归一化, 其中 $N = 1024$, 包误码率为 10^{-6} . 各调制方案的平均光功率和带宽需求如图 7 所示. 当 M 增大时, 功率需求降低, 带宽需求增大. 当固定带宽时, DAPIM 采用较大的 M 可以获得比 PPM 和 PIM 低的功率需求.

7 结语

提出一种新的调制方法, 即双幅度脉冲间隔调制 (DAPIM), 研究了它的带宽效率和在理想信道中的功率效率, 并与 OOK、PPM 和 PIM 等调制方式比较. 可以看出, DAPIM 获得很好的带宽效率. 在一定带宽下, 采用较高的符号位数, DAPIM 可以获得较好的功率效率. 符号位数 5 或 6 是较好的选择.

REFERENCES

[1] Kahn M J, Barry R J. Wireless infrared communications. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(2): 265—298
 [2] Ghassemlooy Z, Hayes A R. Digital pulse interval modulation for IR communications systems, a review. *Int. J. Commun. Syst.*, special issue, 2000, 13: 519—536
 [3] Proakis G J. *Digital Communications*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 201—206, 254—272
 [4] Hayes A R, Ghassemlooy Z, Hayes A R, et al. Base-line wander on the performance of digital pulse-interval modulation. *IEE Proc. - Optoelectron*, 2000, 147(4): 295—300