

TCM 码在光 PPM 通信系统中的误码性能分析

刘朋壶,敖发良,杨志程

(桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004)

摘要:文章把网格编码调制(TCM)引入到光脉冲位置调制(PPM)中,研究其对光 PPM 系统误码性能的改善。通过理论推导及对 8T-PPM、16PPM 和 16T-PPM、32PPM 分别进行 MATLAB 仿真,得到以下结论:在保持带宽不变的前提下,8T-PPM 与 16PPM 信息速率相同,但前者误码性能优于后者,且最大达到 4.8 dB;虽然 16T-PPM 的信息速率是 32PPM 的 1.2 倍,但前者误码性能优于后者,且最大可达到 3.4 dB。TCM 确实能有效地改善系统的误码性能。

关键词:脉冲位置调制;网格编码调制;MATLAB;误码率

中图分类号:TN911.1.3

文献标识码:A

文章编号:1005-8788(2008)02-0014-04

Error performance analysis of TCM code in PPM-based optical communication systems

Liu Penghu, Ao Faliang, Yang Zhicheng

(Information & Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Trellis Coded Modulation(TCM)is introduced into PPM to investigate the error performance improvement in optical Pulse Position Modulation (PPM) systems. Theoretical deduction and MATLAB simulation and comparisons of 8T-PPM with 16 PPM and 16T-PPM with 32 PPM respectively, produce the following results. When the bandwidth is kept constant, 8T-PPM and 16 PPM have the same information rate, but the error performance of the former is better than the latter, up to 4.8 dB at the maximum. On the other hand, the information rate of 16T-PPM is 1.2 times that of 32PPM, but it has better error performance, up to 3.4 dB at the most. These results prove that the introduction of TCM into PPM does effectively improve the error performance of the system.

Key words: PPM; TCM; MATLAB; error rate

无线光通信具有通信容量大、传输速率高等诸多优点,有着广阔的应用前景。脉冲位置调制(PPM)是无线光通信中的关键技术之一,它可以降低激光器的平均发射功率,使无线光通信的安全应用成为可能。但在自由空间光通信中,PPM 受到大气、云层、雨水和湍流等的干扰,会产生很大的衰减,且 PPM 的频带利用率低。而网格编码调制(TCM)在不扩展带宽、不降低频带利用率、也不降低功率的情况下,能改善误码性能,因此对自由空间光通信来说,TCM-PPM(以下简称 T-PPM)不失为理想的编码调制方式。本文将 TCM 引入到光 PPM 系统中,设计出了 T-PPM 通信框图,分析并推导出了 T-PPM 误码率公式,给出了编码和译码算法,并对 8T-PPM、16PPM 和 16T-PPM、32PPM 分别进行了 MATLAB 仿真,仿真结果表明:把 TCM 引入光 PPM 系统中,确实能有效地改善系统的误码性能。

1 系统模型

仿真所采用的系统模型如图 1 所示。信息源产生均匀分布的数字信息序列,接着把信道编码和调

制结合起来形成 PPM 脉冲,使 PPM 脉冲位置的最小欧式距离尽可能大。经光学发射系统把 PPM 信号调制为光信号发射出去。接收端采用雪崩光电二极管(APD)把接收到的光脉冲转化为电脉冲,同时加上热噪声。T-PPM 译码解调部分先把 PPM 脉冲转化为 TCM 码,然后再采用维特比译码,恢复比特信号。

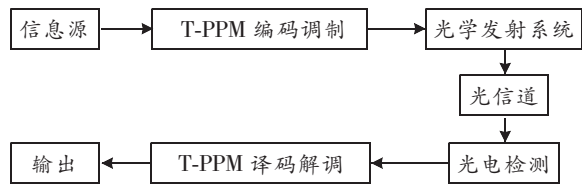


图 1 系统框图

2 分析和推导^[1~4]

对于一个 MPPM(第 1 个 M 表示时隙数)系统,其传输的光功率表达式为

$$P(t) = P_s \sum_{i=-\infty}^{+\infty} h(t - d_i T_{\text{slot}} - NiT_{\text{sym}}), \quad (1)$$

式中, P_s 为光功率的峰值(单位:W); $h(t)$ 表示

PPM 的脉冲形状； T_{sym} 为一个 PPM 帧的持续时间； T_{slot} 为 PPM 的时隙持续时间； $d_i = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 表示脉冲在 PPM 帧中的位置；考虑到激光传输过程中各种干扰的影响， $h(t)$ 的持续时间可能超过 T_{sym} ，所以引入参数 N ，并且 $N \geq 1$ 。设接收到的光信号密度为 $\lambda_r(t)$ ，且

$$\lambda_r(t) = \lambda_b + \lambda_s \sum_{-\infty}^{+\infty} h(t - d_i T_{\text{slot}} - NiT_{\text{sym}} + e_i T_{\text{slot}}), \quad (2)$$

式中， $\lambda_s = P_r \eta / h\nu$ 为光密度的峰值（单位：光子数/s）， η 、 P_r 、 h 和 ν 分别表示光检测器的量子效率、接收机捕获的光能量、普朗克常量和激光频率； λ_b 表示背景噪声的光密度（单位：光子数/s）； e_i 表示由于接收机时间跟踪不准确而导致的时间误差，其取值范围为 $[-1/2, 1/2]$ 。

接收端光检测器采用 APD，根据 APD 中负载电阻的电流值，可得出模拟 APD 响应的公式：

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} G_j R(t - t_j) + n(t), \quad (3)$$

式中， t_j 为产生第 j 个初始电子的时刻； G_j 表示第 j $P_r[K_2(l, m) = k_2 \mid K_1(l, m) = k_1] =$

$$\frac{k_1 \Gamma\left(\frac{k_2}{1-k} + 1\right)}{k_2(k_2 - k_1)! \Gamma\left(\frac{kk_2}{1-k} + 1 + k_1\right)} \times \left[\frac{1 + k(\bar{g} - 1)}{\bar{g}}\right]^{k_1 + kk_2/(1-k)} \times \left[\frac{(1+k)(\bar{g} - 1)}{\bar{g}}\right]^{k_2 - k_1}. \quad (6)$$

假定初级电子数服从泊松分布，韦伯给出式(6)

$$P_r[K_2(l, m) = k_2 \mid \bar{K}_1(l, m) = \bar{k}_1] = \frac{1}{(2\pi C_1^2)^{1/2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{k_2 - \bar{k}_1 \bar{g}}{C_1 C_2}} \right]^{3/2} \times \exp \left[\frac{-(k_2 - \bar{k}_1 \bar{g})^2}{2C_1^2 \left(1 + \frac{k_2 - \bar{k}_1 \bar{g}}{C_1 C_2}\right)} \right], \quad (7)$$

式中， $C_1^2 = \bar{g}^2 \bar{k}_1 F$ ； $C_2^2 = \bar{k}_1 F / (F - 1)^2$ ； $\bar{K}_1(l, m)$ 表示在区间 $I_{l, m}$ 上检测到的初级电子数的均值，且

$$\bar{K}_1(l, m) = \int_{lT_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}}^{(l+1)T_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}} \lambda_r(\tau) d\tau = \bar{n}_b + \bar{n}_s Y_{l, m}, \quad (8)$$

式中， $Y_{l, m} = \frac{1}{T_{\text{slot}}} \int_{lT_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}}^{(l+1)T_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} h(\tau - d_i T_{\text{slot}} - NiT_{\text{sym}} + e_i T_{\text{slot}}) d\tau$ ； $\bar{n}_b = \lambda_b T_{\text{slot}}$ 表示在一个 PPM 时隙间隔里检测到的由背景噪声引起的初级电子数目的均值；而 $\bar{n}_s = \lambda_s T_{\text{slot}}$ 表示整个 PPM 帧检测到的信号光子数的均值。从上面的公式可以看出，第 m 个 PPM 帧的第 l 个时隙检测到的初级电子数（也就是式(8)中的 $\bar{n}_s Y_{l, m}$ ）会因为脉冲的拖尾而减少，但整帧的初级电子数（也就是式(8)中的 $\bar{n}_s$ ）的均值应是常数。

个初级电子与晶格原子相碰撞产生的次级电子数，它服从泊松分布； $R(t)$ 是 APD 的响应电流； $n(t)$ 是接收端的热噪声， $n(t)$ 被认为是均值为 0 的加性白高斯噪声，其双边带功率谱为 $N_0/2 = 2kT_0/R_L$ （单位：W/Hz）； k 表示玻耳兹曼常数； T_0 表示接收端的实际温度（单位：K）； R_L 表示 APD 的负载阻抗（单位： Ω ）。定义 $X_{l, m}$ 为对区间 $I_{l, m} = [lT_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}, (l+1)T_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}]$ 求积分的结果， $I_{l, m}$ 表示接收到的第 m 个 PPM 帧的第 l 个时隙，则

$$X_{l, m} = \int_{lT_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}}^{(l+1)T_{\text{slot}} + NmT_{\text{sym}}} x(\tau) d\tau, \quad l = 0, 1, 2, \dots, M-1. \quad (4)$$

用德尔塔公式近似得：

$$X_{l, m} = qK_2(l, m) + \nu, \quad (5)$$

式中， ν 是均值为 0、方差为 $(2kT_0/R_L)T_{\text{slot}}$ 的高斯随机变量； q 为一个电子的电量（单位：C）； $K_2(l, m)$ 为区间 $I_{l, m}$ 上检测到的次级电子数。 $K_2(l, m)$ 根据 $K_1(l, m)$ （区间 $I_{l, m}$ 上检测到的初级电子数）的条件概率，由 McIntyre 推导得出，并由 Conradi 实验证实：

的近似式如下：

$$h(t) = \frac{T_{\text{slot}}}{\sqrt{2\pi\sigma_h^2}} \exp \left[-\frac{(t - T_{\text{slot}}/2)^2}{2\sigma_h^2} \right], \quad (9)$$

脉冲中心在时隙中点， σ_h 为脉冲的标准偏差。考虑到 $h(t)$ 扩展了好几个时隙间隔，这里默认为 $(N-1)M$ 个，取 $d_n = j$ ，则有

$$Z_{l, j} = Y_{l, m} \mid_{d_n = j} = \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \times \int_{lT_{\text{slot}}}^{(l+1)T_{\text{slot}}} \exp \left\{ -\frac{\left[\tau - \frac{(2j+1)T_{\text{slot}}}{2} \right]^2}{2\sigma_h^2} \right\} d\tau, \quad (10)$$

注意：等式的右边是一个仅关于 j 和 l 的函数。根据文献[4]的仿真研究有

$$P_{\text{PPM}}^{(u)} \leq \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{l=0, l \neq j}^{M-1} P_r(E_{l,j}), \quad (11)$$

式中, $P_r(E_{l,j})$ 为 l 和 j 的成对错误概率, 具体含义是: 在传输第 j 个码元的 PPM 帧时, 把第 j 个码元判为第 l 个码元的错误概率, 当该 PPM 帧的第 l 个时

$$m_{l,j} = E\{X_{l,m} \mid d_n = j\} = q\overline{g}(\overline{n_b} + \overline{n_s}Z_{l,j}) + I_{dc}T_{\text{slot}}, \quad (12)$$

$$\sigma_{l,j}^2 = \text{Var}\{X_{l,m} \mid d_n = j\} = (q\overline{g})^2 F(\overline{n_b} + \overline{n_s}Z_{l,j}) + \sigma_v^2 + qI_{dc}T_{\text{slot}}, \quad (13)$$

这里 I_{dc} 表示 APD 的表面暗电流(单位: A), 则有

$$P_r(E_{l,j}) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left[\frac{m_{j,j} - m_{l,j}}{\sqrt{2(\sigma_{l,j}^2 + \sigma_{j,j}^2)}}\right], l \neq j, \quad (14)$$

$$\sigma_{l,j}^2 + \sigma_{j,j}^2 = (q\overline{g})^2 F[2\overline{n_b} + \overline{n_s}(Z_{l,j} + Z_{j,j})] + 2(\sigma_v^2 + qI_{dc}T_{\text{slot}}).$$
 (16)

以上两式仅是关于 $(Z_{j,j} - Z_{l,j})$ 、 $(Z_{j,j} + Z_{l,j})$ 的函数。根据式(10)和补误差函数可以推得

$$Z_{j,j} - Z_{l,j} = 1 - \text{erfc}\left(\frac{T_{\text{slot}}}{2\sqrt{2}\sigma_h}\right) - \frac{1}{2} \text{erfc}\left[-\frac{T_{\text{slot}}(l-j+1/2)}{\sqrt{2}\sigma_h}\right] + \frac{1}{2} \text{erfc}\left[-\frac{T_{\text{slot}}(l-j-1/2)}{\sqrt{2}\sigma_h}\right], \quad (17)$$

$$Z_{j,j} + Z_{l,j} = 1 - \text{erfc}\left(\frac{T_{\text{slot}}}{2\sqrt{2}\sigma_h}\right) + \frac{1}{2} \text{erfc}\left[-\frac{T_{\text{slot}}(l-j+1/2)}{\sqrt{2}\sigma_h}\right] - \frac{1}{2} \text{erfc}\left[-\frac{T_{\text{slot}}(l-j-1/2)}{\sqrt{2}\sigma_h}\right]. \quad (18)$$

把式(17)、(18)代入到式(15)、(16), 再把式(15)、(16)代入式(14), 就可以得到 $P_r(E_{l,j})$ 的表达式。而且从表达式可以看出 $P_r(E_{l,j})$ 是距离 $|l-j|$ 的减函数。这里的距离是指 PPM 帧的第 l 个时隙(代表第 l 个码元)与第 j 个时隙(代表第 j 个码元)之间的欧式距离。根据以上分析可知, 我们对 T-PPM 码的分割原则是尽可能地增加它们在 PPM 星座上的最小欧式距离。

3 T-PPM 的编译码算法^[5]

$A=\{0,1,2,3,\cdots,M-1\}$ 是未编码的 MPPM 的码元集, 来自 A 的码元 l 和码元 j 的欧式距离为 $|l-j|$, 其最小值为 1, 把这个集合分割为 $B_0=\{0,2,4,\cdots\}$ 和 $B_1=\{1,3,5,\cdots\}$, 这时来自 B_0 的码元 l 和码元 j , 或来自 B_1 的码元 l 和码元 j 的最小欧式距离为 2。还可以把集合继续向下分割, B_0 分割为 $C_0=\{0,4,8,\cdots\}$, $C_1=\{2,6,10,\cdots\}$; B_1 分割为 $C_2=\{1,5,9,\cdots\}$, $C_3=\{3,7,11,\cdots\}$; 此时来自 C_j 的码元 l 和码元 j 的最小欧式距离 $|l-j|$ 为 4; 下面依此类推。随着向下分割的不断进行, 码元 l 和码元 j 的最小欧式距离会成指数上升, 但分割次数的确定应综合考虑所花的代价和信道的实际需要。下面以 16T-PPM 为例对编译码算法作进一步推导: 把信号集 $\{0,1,2,\cdots,15\}$ 进行 3 次分割后的子集分别为 $D_0=\{0,8\}$, $D_1=\{4,12\}$, $D_2=\{2,10\}$, $D_3=\{6,14\}$, $D_4=\{1,9\}$, $D_5=\{5,13\}$, $D_6=\{3,11\}$, $D_7=\{7,15\}$; 根据以上分割设计出如图 2 所示的网格图, 然后再根据图 2 设计出如图 3 所示的编码器结构

隙的积分电流($X_{l,m}$) 超过第 j 个时隙的积分电流($X_{j,m}$) 时, 该错误将可能发生。 $P_{\text{PPM}}^{(u)}$ 是 PPM 的帧错误概率。把 $X_{l,m}$ 近似为高斯型随机变量, 其均值和方差如下:

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

这里 $\text{erfc}(x)$ 是补误差函数。由式(12)、(13)可得

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$

$$m_{j,j} - m_{l,j} = q\overline{g}n_s(Z_{j,j} - Z_{l,j}), \quad (15)$$
</

T-PPM 译码采用维特比译码,从本质上说,这种译码方法就是从卷积码的格状图中寻求最短可能路径,具体如下:

(1) 对每个 PPM 帧的 16 个时隙进行积分,将最大值的位置代表的码元作为接收码。

(2) 计算和比较支路量度,选择最小的支路量度以消除并行转移。

(3) 计算并比较累积量度,选择并存储最小累积量度的幸存路径,每状态一个。

(4) 译码输出,并更新第 i 时刻各状态对应的幸存路径。以第 i 时刻路径量度最小的状态 j 沿着分支路径量度最小路径的前一个状态 k 的幸存路径作为状态 j 暂时幸存路径,输出此幸存路径最左边的码元,它是 $(i-D)$ 时刻输入的码元, D 为延时;它在网格图上对应的信号即为译码输出,同时把从状态 k 到状态 j 对应的码元从右边顶入状态 k 的幸存路径作为状态 j 的幸存路径。用类似的方法可以求出其他状态的幸存路径。

(5) 重复步骤(1)~(4)。

接收框图如图 4 所示。

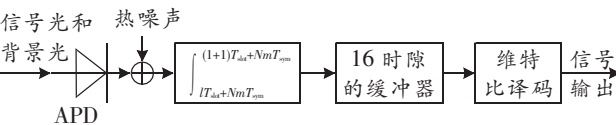


图 4 T-PPM 的接收框图

4 仿真结果分析及结论

根据前面的分析推导,为了保证加入 TCM 后带宽保持不变,令被比较的 2MPPM 和 MT-PPM 的脉冲时隙宽度相同;然后对 2MPPM 和 MT-PPM 的误码率进行比较。在 MATLAB 中,分别对未采用纠错编码的 16PPM 和采用 2/3 码率的 8T-PPM 以及未采用纠错编码的 32PPM 和采用 3/4 码率的 16T-PPM 进行了仿真,其性能曲线分别如图 5、图 6 所示。由图可知,8T-PPM 码与 16PPM 码的信息速率相同,但前者误码性能优于后者,且最大达到 4.8 dB;虽然 16T-PPM 码的信息速率是 32PPM 码的 1.2 倍,但前者误码性能优于后者,且最大达到 3.4 dB。所以在光 PPM 中引入 TCM 确实能有效地改善系统性能。

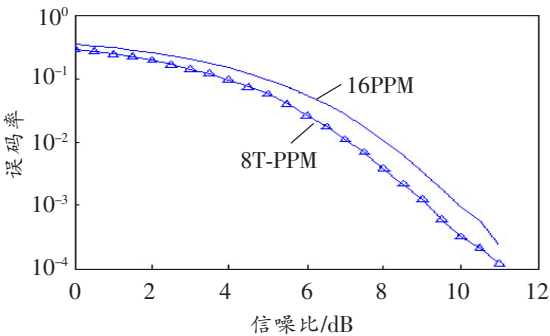


图 5 8T-PPM 与 16PPM 性能曲线

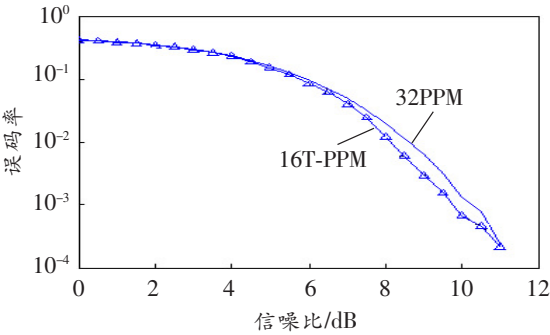


图 6 16T-PPM 与 32PPM 性能曲线

参考文献:

[1] Lee David C M, Kahn Joseph M, Audeh Malik D. Trellis-coded pulse-position modulation for indoor wireless infrared communications [J]. IEEE Trans. Commun,1997,45(9):1 080-1 086.

[2] Georghlafes Costas N. Some implication of TCM for optical direct-detection channels [J]. IEEE Trans. Commun,1989,37(5):481-487.

[3] Kiasaleh Kamran, Yan Tsun-Yee, Srinivasam Meera. Trellis-coded pulse-position modulation for optical communication systems impaired by pulsewidth inaccuracies [J]. IEEE Jour. of Light Tech., 1999,17 (8):1 336-1 346.

[4] Srinivasan M,Vilnrotter V. Symbol-error probabilities for pulse position modulation signaling with an avalanche photodiode receiver and Gaussian thermal noise [J]. JPL TDA Progr. Rep., 1998,(8):30-35.

[5] 张宗橙. 纠错编码原理和应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2003.

[6] 周海燕,敖发良. Turbo 在光 PPM 通信系统中的性能分析 [J]. 桂林电子工业学院学报,2002,22(3): 1-4.