

基于 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ OOC 的红外 OPPM-CDMA 系统分析¹

晋良念 王应生 邹传云

(桂林电子工业学院通信与信息工程系 桂林 541004)

摘要: 考虑系统存在多用户干扰、背景光干扰、接收机散粒噪声、暗电流和热噪声的情况下,使用概率的并集界以及有两个判决量度相等也发生判决错误的悲观估计法,推导任意 λ_a, λ_c 下红外 OPPM-CDMA 系统的相关接收机、单光硬限幅器相关接收机和双光硬限幅器相关接收机的误比特率上限。最后通过计算机仿真对该 3 种接收机的误码特性进行分析和比较。

关键词: 光正交码 (OOC), OPPM-CDMA, 自干扰, 多用户干扰 (MUI), 光硬限幅器

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1088-06

Performance of Infrared OPPM-CDMA Systems Using Optical Orthogonal Codes $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$

Jin Liang-nian Wang Ying-sheng Zou Chuan-yun

(Dept. of Commun. and Info. Eng., Guilin Inst. of Electron. Tech., Guilin 541004, China)

Abstract The effect of the multiple-user interference, the receiver shot noise, ambient light interference, the receiver dark current and the thermal noise are taken into account. A probability union bound and the pessimistic estimation method are used that decision errors may occur on condition that two decision measurements are equal. The upper bounds of the bit error (BER) of infrared Overlapping Pulse-Position Modulation (OPPM)/Code Division Multiple Access (CDMA) correlation receiver without optical hard-limiters, with single optical hard-limiters and with double optical hard-limiters for arbitrary λ_a and λ_c are derived. Moreover, the performance analysis and comparisons for aforementioned three receivers are presented by computer simulation.

Key words Optical Orthogonal Codes (OOC), Overlapping PPM-CDMA, Self interference, Multiple-user interference, Optical hard limiter

1 引言

与脉冲位置调制 (PPM) 相比,重叠脉冲位置调制 (OPPM) 不需要减少发送脉冲宽度就能增加数据传输速率(即每时隙的传信量),同时 OPPM 最大似然接收机和次优接收机结构也与 PPM 相同,所以分析 OPPM-CDMA 系统的误码特性非常重要^[1]。目前研究光 OPPM-CDMA 系统的文献比较少,主要是分析基于 $(n, \omega, 1, 1)$ OOC 的相关接收机、码片级 (chip-level) 接收机、单光硬限幅器相关接收机和双光硬限幅器相关接收机的误码特性^[1-4]。尽管 $(n, \omega, 1, 1)$ OOC 有最小的自相关限 λ_a 和互相关限 λ_c , 干扰用户引起的干扰能达到最小,但最大可能的码字数较少,不能满足红外无线局域网接入用户数较多的要求,因此考虑 λ_a 或 λ_c 大于 1 的 OOC。尽管干扰用户引起的干扰比较大,但可用码字数却增加很多。减少多用户干扰 (MUI) 对系统影响的一个方法是在相关器前或相关器后放置光硬限幅器 (Hard-limiter)。另外,如果使用组合概率法^[2-4]求解 $\lambda_a > 1$ 或 $\lambda_c > 1$ 时单光硬限幅器相关接收机和双光硬限幅器相关接收机的

¹ 2003-02-23 收到, 2003-09-16 改回
国家自然科学基金资助项目 (编号: 69982004)

期望用户在第 m 时隙有 t_m 个标志脉冲位置被碰撞的概率很难, 但使用马尔可夫链模型求解就很容易, 它适合求解任意 λ_a 、 λ_c 下的光硬限幅器相关接收机的期望用户在第 m 时隙有 t_m 个标志脉冲位置被碰撞的概率 [5]。

2 红外异步 OPPM-CDMA 系统

红外 OPPM-CDMA 单用户检测系统如图 1。为了便于分析和比较, 在不考虑码间干扰 (ISI) 的情况下, 我们假设红外异步 OPPM-CDMA 系统由 N 个用户组成, 且每个用户的平均发射功率 p_{av} 和信道增益 G_0 相同, 发送脉冲信号波形 $p_T(t)$, $p_{T_c}(t)$ 都是单位矩形信号 (T , T_c 都表示脉冲的宽度), 信道脉冲响应函数 $h(t) = G_0\delta(t - \tau)$, 期望用户接收机实现良好的功率控制。系统选用光正交码 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 作为系统的地址码, 为保证平均发射功率, 用户 j 的发射脉冲峰值功率 $p_{oppm} = (M - 1 + \gamma)n \cdot p_{av} / (\omega\gamma)$, 其中 M 是 OPPM 时隙数, γ 是重叠因子。经过光电转换器后, 假设相关接收机噪声服从高斯分布, 则第 j 用户的第 l 时隙的接收信号值为高斯随机变量 $r_{j,l} = Z_{j,l} + I_{j,l} + n_{j,l}$, $j \in \{0, 1, \dots, M - 1\}$ 。其中 $Z_{j,l}$, $I_{j,l}$ 分别为第 j 用户的第 l 时隙的期望信号和多用户干扰信号; $n_{j,l}$ 是加性白高斯噪声 $(0, \omega N_0 T_c)$, N_0 是噪声功率, T_c 是码片间隔。译码时将 M 个离散值进行比较, 选择最大值作为期望用户接收数据时隙。为得到 $r_{j,l}$ 的均值, 可先求出 $Z_{j,l}$, $I_{j,l}$ 的条件均值。设用户 1 为期望用户, d_j^k 为第 j 用户发送的第 k 个数据符号, 则期望用户第 k 个数据符号的第 i 时隙的期望信号和多用户干扰均值分别为

$$E[Z_{1,i}|d_1^k] = \begin{cases} G_0 R (M - 1 + \gamma) n \cdot p_{av} T_c / \gamma = A_{oppm} \omega T_c, & d_1^k = i \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$E[I_{1,i}|\{d_1^k\}_{j=1}^N] = \frac{G_0 R (M - 1 + \gamma) n T_c \cdot p_{av}}{\omega \gamma} \sum_{j=2}^N C_{1,j} \delta_{d_j^k, i} = A_{oppm} T_c \sum_{j=2}^N C_{1,j} \delta_{d_j^k, i}$$

这里 $A_{oppm} = G_0 R (M - 1 + \gamma) n \cdot p_{av} / \gamma \omega$, R 是光电检测器响应度, $C_{1,j}$ 是 OOC 互相关值。

为了尽可能减少 MUI 对红外相关接收机的影响, 在相关器前 (前级) 或相关器后 (后级) 分别放置光硬限幅器。前级和后级光硬限幅器的判决门限与接收信号功率有关 (与信道特性和发射功率有关), 而且门限值的大小还会影响系统性能, 所以理论上假设接收机的门限是最佳门限值且是动态变化的。

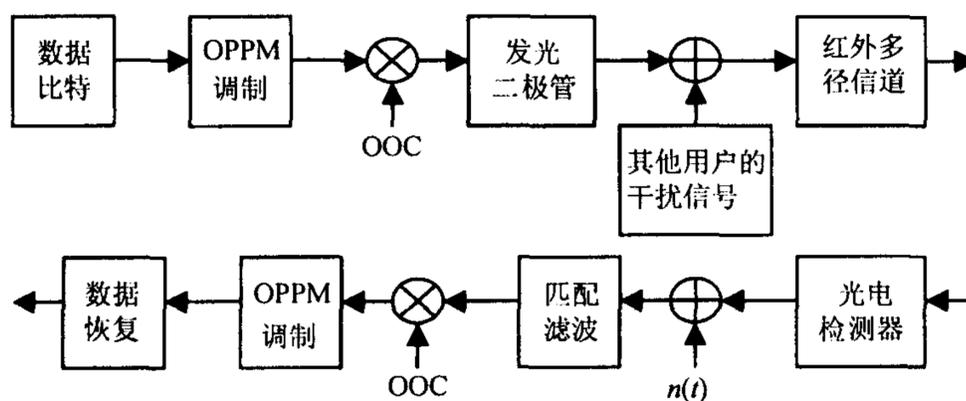


图 1 红外 OPPM-CDMA 单用户检测系统

3 误比特率分析

假设系统由 N 个用户组成, 不失一般性, 设用户 1 为期望用户, 并且每个用户发送数据在

M 个时隙等概取值, 即 $\Pr(d_j^m = i) = 1/M$. 设期望用户的接收信号矢量 $\mathbf{R}_1 = \{r_{1,0}, \dots, r_{1,M-1}\}$. 如果 $j \in \{0, \dots, i-1, i+1, \dots, M-1\}$ 都满足 $r_{1,i} > r_{1,j}$, 那么期望用户接收数据判决为第 i 时隙.

根据上面的假设, 计算基于 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 的 OPPM-CDMA 系统的干扰用户对期望用户某时隙发生 t 次碰撞的概率时, 不仅要考虑干扰用户发送数据时隙引发的碰撞 (互干扰), 还要考虑期望用户本身发送数据时隙对相邻时隙引发的碰撞 (自干扰). 用变量 T 表示某个干扰用户对期望用户某时隙发生碰撞的次数, T 取值为 $\{0, \dots, \lambda_c\}$, 用 p_t 表示变量 T 发生的概率, 根据文献 [3] 和文献 [6] 的方法得到变量 T 的数学期望

$$E\{T\} = \sum_{t=1}^{\lambda_c} t \cdot p_t = \frac{\gamma \omega^2}{(M-1+\gamma)n} \quad (1)$$

用变量 $k_{i,t}$, $i \in \{0, \dots, M-1\}$, $t \in \{1, \dots, \lambda_c\}$ 表示对期望用户第 i 时隙发生 t 次碰撞的所有干扰用户数, 变量 $k_{i,1}, k_{i,2}, \dots, k_{i,\lambda_c}$ 服从多项式分布.

$$\begin{aligned} \Pr(k_{i,1} = l_{i,1}, \dots, k_{i,\lambda_c} = l_{i,\lambda_c}) \\ = \frac{(N-1)!}{l_{i,1}! \cdots l_{i,\lambda_c}! \left[N-1 - \sum_{t=1}^{\lambda_c} l_{i,t} \right]!} p_1^{l_{i,1}} \cdots p_{\lambda_c}^{l_{i,\lambda_c}} \left[1 - \sum_{t=1}^{\lambda_c} p_t \right]^{N-1 - \sum_{t=1}^{\lambda_c} l_{i,t}} \end{aligned} \quad (2)$$

根据 OPPM 信号格式, 我们知道不仅干扰用户对期望用户时隙可能发生 1 次或多次干扰 (由互相关限决定, 即多用户干扰), 而且期望用户本身发送数据时隙也可能对相邻时隙发生 1 次或多次干扰 (由自相关限决定, 即自干扰)^[1-4], 所以在设计实际系统时应考虑使用自相关限和互相关限比较小的 OOC.

3.1 无光硬限幅器相关接收机

由于 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ OOC 的自相关侧峰值是 λ_a , 所以期望用户某发送数据时隙的标志脉冲位置与其重叠的其它时隙 k 的标志脉冲位置发生碰撞的次数 $v_k \in \{0, 1, \dots, \lambda_a\}$ (自干扰). 根据 OPPM 信号格式, 期望用户时隙可能对相邻且重叠的 $\xi-1$ 个时隙引起自干扰, 对余下的 $M-\xi$ 个时隙没有自干扰, 这里 $\xi = \min\{M, \gamma\}$. 假设地址码的标志脉冲位置服从均匀分布, 则变量 v_k 的概率:

$$p_{v_k,j} = \Pr(v_k = j) \leq \frac{\omega(\omega-1) \cdots (\omega-j)}{(n-1) \cdots (n-j)} \quad (3)$$

下面使用概率的并集界 (union bound) 以及有两个判决量度相等也发生判决错误的悲观估计法推导期望用户在发送数据符号 $d_1^m = i$ 时接收机的误符号率上限:

$$\begin{aligned} p_u^{\text{ooc}2} \leq \sum_{l_{1,1}=0}^{N-1} \cdot \sum_{l_{1,\lambda_c}=0}^{N-1-s_{1,\lambda_c}} \left\{ \left[M-1 - \sum_{j=1}^{\lambda_a} p_{v_{1,j}} \cdot (\xi-1) \right] Q \left[\frac{A_{\text{oppm}} \omega - A_{\text{oppm}} \sum_{t=1}^{\lambda_c} t \cdot l_{1,t}}{\sqrt{2\omega N_0}} \right] \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{\lambda_a} p_{v_{1,j}} \cdot (\xi-1) Q \left[\frac{A_{\text{oppm}} \omega - A_{\text{oppm}} \sum_{t=1}^{\lambda_c} t \cdot l_{1,t} - j}{\sqrt{2\omega N_0}} \right] \right\} \\ \times \Pr(k_{0,1} = \dots = k_{0,\lambda_c} = 0, k_{1,1} = l_{1,1}, \dots, k_{1,\lambda_c} = l_{1,\lambda_c}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $s_{1,\lambda_c} = \sum_{i=1}^{\lambda_c-1} l_{1,i}$, 函数 $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$. 把式 (1), (2), (3), (4) 代入 $p_b^{\text{ooc}2} = \frac{M}{2(M-1)} p_u^{\text{ooc}2}$, 得到无光硬限幅器接收机的误比特率上限. 当 $\lambda_a = \lambda_c = 1$ 时, 该误比特率上限与文献 [3] 类似.

3.2 单光硬限幅器相关接收机

根据 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ OOC 的特性, 码字的自相关限为 λ_a , 所以期望用户发送数据时隙 0 对其相重叠的时隙 j 发生的自干扰 $v_j \in \{0, 1, \dots, \lambda_a\}$. 引入单光硬限幅器后, 如果期望用户数据时隙 j 存在自干扰, 则除去自干扰标志脉冲位置 v_j 之外, 干扰用户对该时隙余下的 $\omega - v_j$ 个标志脉冲位置发生碰撞. 首先采用马尔可夫过程^[5]推导期望用户第 m 时隙的 ω 个标志脉冲位置有 t_m 个被碰撞的概率 (这里用变量 T_m 表示, t_m 为现实值):

$$\Pr(T_m = t_m) = C_\omega^{t_m} \sum_{i=0}^{t_m} (-1)^{t_m-i} C_{t_m}^i \left[p_0 + p_1 \frac{i}{\omega} + p_2 \frac{C_i^2}{C_\omega^2} + \dots + p_{\lambda_c} \frac{C_i^{\lambda_c}}{C_\omega^{\lambda_c}} \right]^{N-1} \quad (5)$$

所以期望用户第 m 个时隙除去自干扰脉冲位置 v_m 之外, 余下的 $\omega - v_m$ 标志脉冲位置有 t_m 个被碰撞的概率:

$$\Pr(T_m = t_m | v_m = j) = C_{\omega-j}^{t_m} \sum_{i=0}^{t_m} (-1)^{t_m-i} C_{t_m}^i \times \left[p_0 + p_1 \frac{i}{\omega-j} + p_2 \frac{C_i^2}{C_{\omega-j}^2} + \dots + p_{\lambda_c} \frac{C_i^{\lambda_c}}{C_{\omega-j}^{\lambda_c}} \right]^{N-1} \quad (6)$$

根据前面的分析, 得到期望用户在发送数据符号 $d_1^m = i$ 时单光硬限幅器相关接收机的误符号率上限为

$$p_{u,HL}^{\text{occ}2} \leq \sum_{\alpha_1=0}^{\min(N-1,\omega)} \left[M - 1 - \sum_{j=1}^{\lambda_a} p_{v_1,j} \cdot (\xi - 1) \right] Q \left[\frac{A_{\text{oppm}}\omega - A_{\text{oppm}}\alpha_1}{\sqrt{2\omega N_0}} \right] \Pr(T_1 = \alpha_1 | v_1 = 0) + \sum_{j=1}^{\lambda_a} \sum_{\beta_1=0}^{\min(N-1,\omega-j)} p_{v_1,j} \cdot (\xi - 1) Q \left[\frac{A_{\text{oppm}}\omega - A_{\text{oppm}}\beta_1 - A_{\text{oppm}}j}{\sqrt{2\omega N_0}} \right] \Pr(T_1 = \beta_1 | v_1 = j) \quad (7)$$

把式 (3), (6), (7) 代入 $p_{b,HL}^{\text{occ}2} = \frac{M}{2(M-1)} p_{u,HL}^{\text{occ}2}$, 得到单光硬限幅器相关接收机的误比特率上限.

3.3 双光硬限幅器相关接收机

根据 3.2 节的方法, 我们分 3 种情况讨论引入双光硬限幅器 OPPM-CDMA 系统的误比特率上限.

(1) 当 $N \geq \omega + 1$ 时, 引入双光硬限幅器还能减少前级光硬限幅器没能消除的多用户干扰. 如果期望用户非发送数据第 m 时隙的 ω 个标志脉冲位置都被碰撞 ($T_m = \omega$), 那么接收机性能仍然受到多用户的干扰. 由于自干扰的原因, 同时也要满足上述条件, 所以自干扰等于 j , 则变量 T_m 取 $\omega - j$. 所以 OPPM-CDMA 系统的期望用户在发送数据符号 $d_1^m = i$ 时双光硬限幅器相关接收机的误符号率上限为

$$p_{u,DHL}^{\text{occ}2} \leq \frac{1}{2} \left[M - 1 - \sum_{j=1}^{\lambda_a} p_{v_1,j} \cdot (\xi - 1) \right] \Pr(T_1 = \omega | v_1 = 0) + \sum_{j=1}^{\lambda_a} p_{v_1,j} \cdot (\xi - 1) \cdot \Pr(T_1 = \omega - j | v_1 = j) \quad (8)$$

(2) 当 $N = \omega - m + 1, m \in \{1, \dots, \lambda_a\}$ 时, 如果期望用户时隙 1 在有自干扰 $v_i \geq m$ 的情况下余下的 $\omega - v_1$ 个标志脉冲位置都被碰撞, 那么接收机仍然受到多用户干扰的影响。所以

$$p_{u,DHL}^{oc2} \leq \left[M - 1 - \sum_{j=m}^{\lambda_a} p_{v_1,j} \cdot (\xi - 1) \right] Q \left[\frac{A_{oppm}\omega}{\sqrt{2\omega N_0}} \right] + \frac{1}{2}(\xi - 1) \sum_{j=m}^{\lambda_a} p_{v_1,j} \Pr(T_1 = \omega - j | v_1 = j) \quad (9)$$

(3) 当 $N \leq \omega - \lambda_a$ 时, 期望用户非发送数据时隙被碰撞的标志脉冲位置个数必定小于 $\omega - 1$, 所以双光硬限幅器能够完全消除该时隙的多用户干扰。

$$p_{u,DHL}^{oc2} \leq (M - 1)Q \left[\frac{A_{oppm}\omega}{\sqrt{2\omega N_0}} \right] \quad (10)$$

把式 (8), (9), (10) 代入 $p_{b,DHL}^{oc2} = \{M/[2(M - 1)]\}p_{u,DHL}^{oc2}$, 得到双光硬限幅器相关接收机的误比特率上限。

4 数据结果

由于红外局域网的用户数较多, 同时也考虑到 OOC 的自相关限和互相关限应该相对较小, 所以选用 $(n, \omega, 2, 2)$ OOC, 即 $\lambda_a = \lambda_c = 2$ 。根据 IRDA1.4 物理层链路协议, 光电检测器的响应度 $R = 0.53\mu A/\mu W$, 光电检测器表面面积 $A_d = 0.1\text{cm}^2$, 单位面积的背景光功率 $P_b = 490\mu W/\text{cm}^2$, 热噪声功率 $p_{th} = 4\mu W$, 其它噪声功率 $p_{other} = 7\mu W$, 噪声功率总和等于 $N_0 = 60\mu W$ 。红外链路增益 $G_0 = -40\text{dB}$, 平均发送功率取值范围 $p_{av} = 100 - 500\text{mW}$ 。根据这些初始条件, 考虑不同码长 n , 码重 ω 的情况下, 分析和研究红外下行链路期望用户接收机的误码性能与平均发送功率和最大同时接入系统用户数的关系。另外使用 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 地址码时要求同时接入系统的用户数 (即 N 值) 必须小于地址码的最大可能码字数。令 $\lambda = \min\{\lambda_a, \lambda_c\}$, 则

$$N \leq (n - 1) \cdot (n - \lambda) / [\omega(\omega - 1)(\omega - \lambda)]$$

图 2, 图 3 中 “NOHL” 表示无光硬限幅器相关接收机; “SHL” 表示单光硬限幅器相关接收机; “DHL” 表示双光硬限幅器相关接收机; 参数 $c = p_1(M - 1 + \gamma)n/(\omega^2\gamma)$ 。由图 2 可知, 引入光硬限幅器的相关接收机的误比特率与无光硬限幅器相关接收机相比, 接收机误码性能都有不同程度的改善。接收机的误比特率随 M 和信噪比的增加而减少, 但随 γ 增加而接收机误码特性下降。

由于局域网主要关心的是在一定误比特率要求下系统的通信容量和网络容纳的最大用户数。图 3 为 $M=16, P_{av} = 450\text{mW}$ 时误比特率与同时接入网络用户数 N 的关系。从图 3 可以看出, 在误比特率一定的情况下, 双光硬限幅器相关接收机的用户数多于单光硬限幅器相关接收机和无光硬限幅器相关接收机的用户数。当 $\gamma = 4$ 时 DHL 曲线不连续, 原因是当 $N \leq 3$ 时, 双光硬限幅器完全消除了帧上所有时隙的多用户干扰和自干扰, 但是当 $N \geq 4$ 时, 双光硬限幅器只消除了前级光硬限幅器遗留的大部分多用户干扰和自干扰。另外, 在接收信号功率较小的情况下, (随 γ 增加, 接收信号功率降低), 尽管 $N \leq 3$ 时双光硬限幅器消除了帧上所有时隙的多用户干扰和自干扰, 但是 $N \geq 4$ 时由于自干扰的存在, 前级光硬限幅器已经大大降低了多用户干扰, 所以 $N \leq 3$ 时接收机的误比特率高于 $N \geq 4$ 时的误比特率。

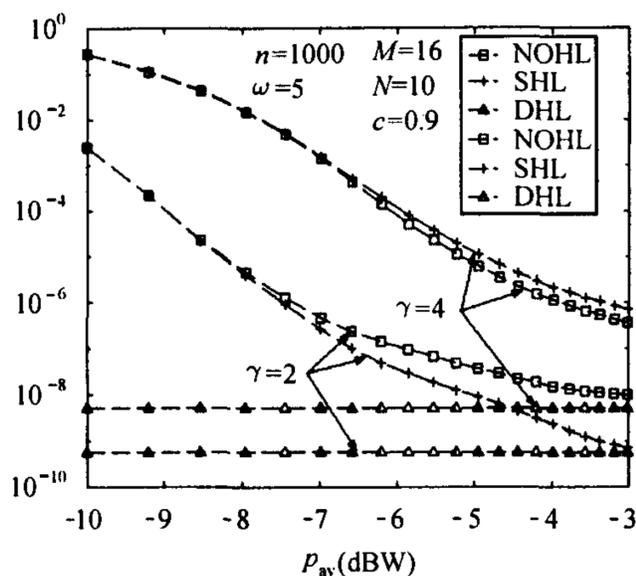


图 2 误比特率随 p_{av} 的变化

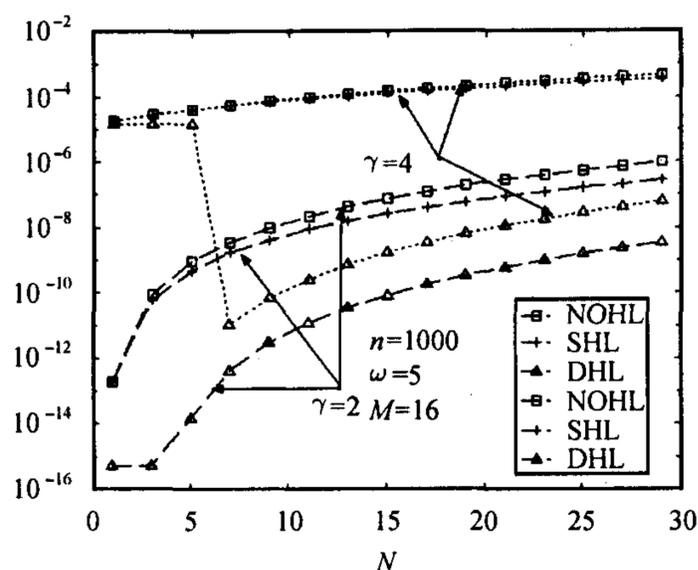


图 3 误比特率随 N 的变化 ($p_{av} = 450\text{mW}$)

5 结束语

在接收机存在多用户干扰、接收机噪声 (散粒噪声、背景光干扰和热噪声) 的情况下, 双光硬限幅器相关接收机的误码特性优于单光硬限幅器相关接收机和无光硬限幅器相关接收机的误码特性。另外在用户数较多的情况下, 单光硬限幅器相关接收机的误码特性也优于无光硬限幅器相关接收机的误码特性。但是在用户数较少以及接收信号功率较小的情况下, 单光硬限幅器相关接收机的误码特性可能比无光硬限幅器相关接收机的误码特性差, 原因是在这种情况下, 接收机性能主要受到接收机噪声的影响 (多用户干扰相对较小), 而且单光硬限幅器还消除了接收机接收的部分光功率, 所以接收机的信噪比减小, 误码性能降低。因此在设计红外散射链路 with 有线骨干网接入的红外无线局域网或利用红外散射链路直接在各个移动终端以及固定终端间通信的红外无线局域网时, 引入双光硬限幅器在较大程度上减少了 MUI, 从而改进了接收机的误码特性。

参 考 文 献

- [1] Shalaby H M H. Optical OPPM-CDMA receivers with chip-level detectors. *IEE Proc. Commun.*, 2001, 148(1): 31-37.
- [2] Shalaby H M H. A performance analysis of optical overlapping PPM-CDMA communication systems. *Journal of Lightwave Tech.*, 1999, 17(3): 426-433.
- [3] Shalaby H M H. Direct detection optical overlapping PPM-CDMA communication systems with double optical hard limiter. *Journal of Lightwave Tech.*, 1999, 17(7): 1158-1164.
- [4] Shalaby H M H. Effect of thermal noise and APD noise on the performance of OPPM-CDMA receivers. *Journal of Lightwave Tech.*, 2000, 18(7): 905-914.
- [5] Chen J J, Yang C C. CDMA fiber-optical systems with optical hard limiters. *Journal of Lightwave Tech.*, 2001, 19(7): 950-958.
- [6] Shalaby H M H. Maximum achievable number of users in optical PPM-CDMA local area networks. *Journal of Lightwave Tech.*, 2000, 18(9): 1187-1195.

晋良念: 男, 1974 年生, 讲师, 目前从事计算机通信、无线红外光通信。
 王应生: 男, 1939 年生, 教授, 主要研究信号与通信理论、电流模滤波器、高速无线局域网的红外 PPM 信道研究等。
 邹传云: 男, 1960 年生, 教授, 目前主要承担高速无线局域网的红外 PPM 信道研究、计算机无线红外光 MODEM 的研制、无线 UWB 通信研究以及 Turbo 码的实时快速算法研究等科研项目。