

基于修正素数码的红外 PPM 码分多址通信系统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: 分析基于修正素数码的红外脉冲位置调制 (PPM) 码分多址同步通信系统和引入光硬限幅器的同步通信系统误码性能。考虑多用户干扰、背景光散粒噪声和接收机热噪声情况下, 推导有、无光硬限幅器的红外 PPM-CDMA 同步系统误比特率上限。分析结果表明, 基于修正素数码的光硬限幅器同步系统的误码性能优于无光硬限幅器系统的误码性能。

关键词: 码分多址, 修正素数码, PPM, 光硬限幅器

中图分类号: TN914.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0525-06

Performance of Indoor Infrared PPM-CDMA Systems Using Modified Prime Sequence Codes

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

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

Abstract The performance of infrared wireless synchronous Code Division Multiple Access(CDMA) with Pulse Position Modulation(PPM) signaling systems without optical hard limiter and with optical hard limiter using modified prime sequence codes as signature codes is analyzed. The upper bound on the bit error probability of systems without optical hard limiter and with optical hard limiter are derived taking into account the effect of multiple-user interference, the photodetector shot noise and thermal noise. Numerical results show that the performance of systems with optical hard limiter is superior to that without optical hard limiter.

Key words CDMA, Modified Prime Code(MPC), Pulse Position Modulation(PPM), Optical hard limiter

1 引言

近年来, 无线红外数字通信技术已经取得快速发展, 而光码分多址技术以其充分利用光链路带宽、无须时钟同步和频率限制、防止偷听、简化通信协议等特点, 越来越引起人们对光通信网络设计和理论分析产生浓厚的兴趣。红外通信以其特有的性能逐渐被人们接受。红外通信常用的调制方式有关键控 (OOK)、脉冲位置调制 (PPM)、差分脉冲位置调制 (DPPM)、重叠脉冲位置调制 (OPPM)、脉冲间隔调制 (PIM) 等。自从 Elmirghani 等人^[1] 提出了集成脉冲位置调制 (PPM) 和码分多址 (CDMA) 接入的室内红外通信网络模式并进行简单的分析和比较以来, 室内红外无线多址技术通信系统主要集中在基于光正交码 (OOC) 的红外 OOK、PPM-CDMA 通信系统性能分析^[2]。另外引入光硬限幅器和双光硬限幅器可以减少系统多用户干扰^[3,4], 提高系统性能。高速红外在传输过程中存在码间干扰 (ISI), Kahn 等人已经提出解决红外信道 ISI 的方法, 比如基于 chip 级和 slot 的判决反馈器 (DFE)^[5], 该方法可以有效地减少 ISI。以上分析都是基于 OOC 的, 而基于修正素数码 (MPC) 的光硬限幅器 PPM-CDMA

¹ 2002-11-17 收到, 2003-01-28 改回
国家自然科学基金资助项目 (编号: 69982004)

同步通信系统性能还没有分析过。与异步系统相比,同步系统能增加系统的同时接入用户数和系统传输容量,所以在多用户、高容量的红外局域网中往往使用同步系统,但系统必须保持同步。在直接扩频中,在给定码长、码重的条件下,保证互相关限为1时,可同时接入的用户数最多,收发双方易于同步,但是它的构造方法复杂,码字数少,那么允许接入的用户数就少。而素数码(PC)构造方法简单,编解码相对容易,码字数多,但它的自相关限为 $p-1$,收发双方很难获得同步。文献[6]构造的MPC很好地满足了码字间良好的自相关特性和互相关特性,下面在不考虑ISI的情况下,分析基于MPC的PPM-CDMA同步通信系统性能。

2 基于修正素数码的码分多址红外通信系统

2.1 修正素数码(Modified Prime Code, MPC)

MPC是基于PC构造的基础上用于同步通信系统的地址码^[6]。PC的构造方法如下:设素数 P ,构成有限域 $GF(p)$ 。首先生成素数序列 $s_i = (s_{i,0}, s_{i,1}, \dots, s_{i,j}, \dots, s_{i,p-1})$,其中 $s_{i,j} = i \cdot j \pmod{p}$, $0 \leq i, j \leq (p-1)$,然后将每个构造素数序列构成二进制PC: $C_i = (c_{i,0}, c_{i,1}, \dots, c_{i,k}, \dots, c_{i,p-1})$,当 $k = s_{i,j} + jp$, $0 \leq j \leq (p-1)$ 时, $c_{i,k} = 1$;其它情况 $c_{i,k} = 0$ 。这样构造的PC的码长为 p^2 ,码重为 p ,自相关限为 $p-1$,互相关限为2的 p 个码字。与OOC相比,PC的构造方法简单,而且编解码相对容易实现,但它的自相关限为 $p-1$,收发双方很难获得同步。MPC的互相关限减小为1,但仅限于同步通信系统^[7]。它的构造方法:首先利用前面PC构造方法构造 p 个素数序列,并把每一个素数序列作为基准,然后将每一个基准序列循环移一位总共得到 $p-1$ 个新素数序列;这样构造的新素数序列有 p 组,每组有 p 个素数序列。根据上面的构造方法分析,MPC的码长为 p^2 ,码重为 p ,自相关限为 $p-1$,互相关限为1的 p^2 个码字。且这 p^2 个码字分为 p 组。MPC的自相关峰值为 p ,同组的 x 和 y 互相关为0,而不同组的 x 和 y 互相关限为1。在后面的通信系统中使用码长为 p^2 ,码重为 p ,自相关限为 $p-1$,互相关限为1的 p^2 个MPC作为接入系统用户的地址码。

2.2 红外 PPM-CDMA 通信系统及系统误比特率分析

红外 PPM-CDMA 通信系统模型如图1所示:设系统有 N 个用户同时接入,每个用户发送二进制数据流, $\log_2 M$ 位数据经过 PPM 调制器生成 M 时隙(时隙脉冲宽度为 τ)PPM信号,信号通过 CDMA 编码器与用户地址码 $c_j(t)$ 相乘,每个时隙扩展成宽度为 T_c 的 p 个脉冲信号,然后通过发光二极管发送出去。在接收端,接收的光信号经过光电检测器变为电信号,经过匹配滤波器,再与发送端相同的地址码 $c_j(t)$ 相乘,然后积分、取样,该取样值送到 PPM 解码器, PPM 解码器通过比较 M 个时隙的取样值,选择取样值最大的时隙作为发送符号,并将时隙恢复成数据符号。

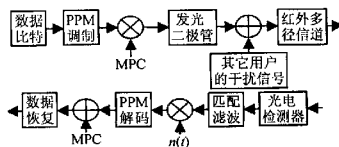


图1 红外 PPM-CDMA 单用户检测系统

设用户 j 的发送信号 $b_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_{j,k} p(t - kT)$, $b_{j,k} \in \{0, 1\}$; PPM信号 $d_j(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} P_{\tau}(t - d_{ppm,j}^i \tau - iT)$, $d_{ppm,j}^i$ 表示 PPM信号脉冲位置, $d_{ppm,j}^i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$; 地址码信号 $c_j(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_{j,i} p_{T_c}(t - iT_c)$, 式中 $\tau = p^2 T_c$, $c_{j,i} \in \{0, 1\}$ 且 $c_{j,i} =$

$c_{j,l} + p^2$, 则用户 j 的发送信号 $s_j(t) = \beta P_{av} b_j(t) c_j(t)$ 。以比特率 T_b 为基准, 所以 $T_s = M\tau = T_b \log_2 M = Mp^2 T_c$ 。假定信号 $p_r(t)$, $p_{T_c}(t)$ 是单位矩形信号, 而且满足平均发射功率是 $P_{av} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s_j(t) dt$, 所以 $\beta = Mp$ 。为了方便系统性能分析假定系统信道模型等效脉冲响应函数: $h(t) = G_0 \delta(t - \tau)$, 这里 G_0 是红外信道增益, 所以用户 j 的接收信号 $r_j(t) = G_0 R \sum_{k=1}^N s_k(t - \tau) + n(t)$, 其中 R 是光电检测器响应度, $n(t)$ 服从加性白高斯分布 $(0, N_0)$ 。接收信号经过解扩、积分、取样, 得到 M 个离散取样信号值 $r_{j,l} = (1/T_c) \int_{T_c}^{(l+1)T_c} r(t) c_j(t) dt = A p d_{j,l} + I_{j,l} + n_{j,l}$, 式中 $I_{j,l}$ 是多用户干扰信号; $n_{j,l} = (1/T_c) \int_{T_c}^{(l+1)T_c} n(t) c_j(t) dt$ 是期望用户噪声, 它服从加性白高斯分布 $(0, pN_0)$; $A = G_0 R P_{av} M p$; $d_{j,l}$ 表示期望用户发送数据所在时隙 $d_{ppm,j}^i$ 取 1, 其它时隙取 0。另外假定在接收端, 用户 1 是期望用户, 它的接收信号矢量 $\mathbf{R}_1 = [r_{1,0}, \dots, r_{1,M-1}]$; 根据译码规定, 若任意 $j \in \{0, \dots, i-1, i+1, M-1\}$ 都满足 $r_{1,i} > r_{1,j}$, 则符号 i 是正确接收的数据符号。

不失一般性, 假设期望用户 1 在第一组, 那么用变量 W 表示与期望用户在同一组中的干扰用户数 w , 其概率为 $\Pr(W = w) = C_{p^2-p}^{N-w} C_{p-1}^{w-1} / C_{p^2-1}^{N-1}$, $w \in \{w_{\min}, \dots, w_{\max}\}$, $w_{\min} = \max\{1, N - p(p-1)\}$, $w_{\max} = \min\{N, p\}^{[7]}$; 变量 k_i 表示与期望用户不在同一组的干扰用户对期望用户 i 时隙的脉冲标志位置的干扰数 l_i , 令干扰矢量 $\mathbf{K} = [k_0, \dots, k_{M-1}]$, 由于不同组的修正素数码互相关为 1, 所以 k_i 服从二项式分布 $(p_1, N - w)$, 其中 $p_1 = 1/M$, 即 $\Pr(k_i = l_i | W = w) = C_{N-w}^{l_i} (1/M)^{l_i} (1 - 1/M)^{N-w-l_i}$ 。因此, 若期望用户发送数据符号 $d_{ppm,j}^i = i$, 则系统的误符号率

$$\begin{aligned} p_e^u &= \sum_{i=0}^{M-1} \Pr(r_{1,i} \geq r_{1,j}, j \neq i | d_{ppm,j}^i = i) \Pr(d_{ppm,j}^i = i) \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \Pr(r_{1,i} \geq r_{1,j}, j \neq i | d_{ppm,j}^i = i) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\Pr(d_{ppm,j}^i = i) = 1/M$ 。由于信道的对称性, 上式的概率独立于 i , 所以

$$\begin{aligned} p_e^u &= \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (M-i) \Pr(r_{1,i} \geq r_{1,0} | d_{ppm,j}^i = 0) \leq (M-1) \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{ppm,j}^i = 0) \\ &= (M-1) \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \sum_{l_0=0}^{N-1} \sum_{l_1=0}^{N-1-l_0} \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{ppm,j}^i = 0, k_0 = l_0, k_1 = l_1, W = w) \\ &\quad \times \Pr(k_0 = l_0, k_1 = l_1 | W = w) \Pr(W = w) \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \Pr(k_0 = l_0, k_1 = l_1 | W = w) &= C_{N-w}^{l_0} C_{N-w-l_0}^{l_1} \left(\frac{1}{M}\right)^{l_0} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-w-l_0} \\ &\quad \times \left(\frac{1}{M-1}\right)^{l_1} \left(1 - \frac{1}{M-1}\right)^{N-w-l_0-l_1} \end{aligned} \quad (3)$$

所以

$$P_e^u \leq (M-1) \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{C_p^{N-w} C_{p-1}^{w-1}}{C_{p^2-1}^{N-1}} \sum_{l_0=0}^{N-w} \sum_{l_1=0}^{N-w-l_0} C_{N-w-l_0}^{l_0} C_{N-w-l_0}^{l_1} \left(\frac{1}{M}\right)^{l_0} \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N-w-l_0} \times \left(\frac{1}{M-1}\right)^{l_1} \left(1 - \frac{1}{M-1}\right)^{N-w-l_0-l_1} Q\left(\frac{A(p+l_0-l_1)}{\sqrt{2pN_0}}\right) \quad (4)$$

式中 $w_{\min} = \max\{1, N-p(p-1)\}$, $w_{\max} = \min\{N, p\}$; 最后可以求出误比特率

$$P_e^b = \frac{M}{2(M-1)} P_e^u \quad (5)$$

为了减少多用户干扰, 可以在接收端的解扩器前引入一个光硬件限幅, 接收到的光信号先经过光电转换成电信号, 再经过光硬限幅器在每个 T_c 时间内限幅, 限幅后的信号与发送端同样的地址码相乘、积分、取样、译码。

光硬限幅器的定义: 当 $x \geq A$ 时, $g(x) = A$; 而 $x < A$ 时 $g(x) = 0$ 。

令变量 $T_{i,j}$, $i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$, $j \in \{1, 2, \dots, p\}$ 表示期望用户的时隙内的标志脉冲位置 j 被碰撞的次数, $T_i^j = [T_{i,1}, \dots, T_{i,j}]$ 表示第 i 时隙内 j 个标志脉冲位置干扰矢量, 并且 $|T_i^j|$ 是 T_i^j 中干扰脉冲数不为 0 的标志脉冲位置个数, 矢量 T_i^j 服从多项式分布, 它的参数满足 $(1/(Mp), N-w)$, 即

$$\Pr(T_i^j = T_i^j | W = w) = \frac{(N-w)!}{t_{i,1}! t_{i,2}! \dots t_{i,j}! s_{i,j}!} \left(\frac{1}{Mp}\right)^{N-w-s_{i,j}} \left(1 - j \frac{1}{Mp}\right)^{s_{i,j}} \quad (6)$$

其中 $T_i^j = [t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,j}]$, $s_{i,j} = N-w - \sum_{m=1}^j t_{i,m} \geq 0$ 。

引入光硬限幅器后, 当是发送数据符号时隙, 期望用户接收信号均值等于 Ap ; 当不是发送数据符号时隙, 接收信号均值与 i 时隙中干扰脉冲数不为 0 的标志脉冲位置个数 α_i 有关, 即 $A\alpha_i$ 。令变量 T_i 表示第 i 时隙的 p 个标志脉冲位置上干扰脉冲数不为 0 的个数, 根据前面的判决规则, 得到引入单光硬限幅器的红外 PPM-CDMA 系统的误符号率为

$$\begin{aligned} P_{e,\text{HL}}^u &\leq (M-1) \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{\text{ppm},j}^i = 0) \\ &\leq (M-1) \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \sum_{\alpha_0} \sum_{\alpha_1} \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{\text{ppm},j}^i = 0, T_0 = \alpha_0, T_1 = \alpha_1, W = w) \\ &\quad \times \Pr(T_0 = \alpha_0, T_1 = \alpha_1 | W = w) \Pr(W = w) \\ &\leq (M-1) \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \sum_{\alpha_1=0}^{\min(N-w,p)} \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{\text{ppm},j}^i = 0, T_0 = 0, T_1 = \alpha_1, W = w) \\ &\quad \times \Pr(T_1 = \alpha_1 | W = w) \Pr(W = w) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{\text{ppm},j}^i = 0, T_0 = 0, T_1 = \alpha_1, W = w) = Q\left(\frac{A(p-\alpha_1)}{\sqrt{2pN_0}}\right)$

$$\begin{aligned} \Pr(T_1 = \alpha_1 | W = w) &= C_p^{\alpha_1} \Pr(t_{1,1} = \dots = t_{1,p-\alpha_1} = 0, t_{1,p-\alpha_1+1} \geq 1, \dots, t_{1,p} \geq 1) \\ &= C_p^{\alpha_1} [\Pr(t_{1,1} = \dots = t_{1,p-\alpha_1} = 0) \\ &\quad - \Pr(t_{1,1} = \dots = t_{1,p-\alpha_1} = 0, t_{1,i} = 0, i \in \{p-\alpha_1+1, \dots, p\})] \\ &= C_p^{\alpha_1} \sum_{i=0}^{\alpha_1} (-1)^i C_{\alpha_1}^i \left[1 - (p-\alpha_1+i) \frac{1}{Mp}\right]^{N-w^{[3]}} \end{aligned}$$

所以

$$P_{e,HL}^u \leq (M-1) \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{C_p^{N-w} C_{p-1}^{w-1} \min(N-w,p)}{C_{p^2-1}^{N-1}} \sum_{\alpha_1=0}^{\min(N-w,p)} Q\left(\frac{A(p-\alpha_1)}{\sqrt{2pN_0}}\right) C_p^{\alpha_1} \times \sum_{i=0}^{\alpha_1} (-1)^i C_{\alpha_1}^i [1-(p-\alpha_1+i)\frac{1}{Mp}]^{N-w} \quad (8)$$

然后根据公式 $P_{e,HL}^b = \frac{M}{2(M-1)} P_{e,HL}^u$, 推导出在相关器前放置光硬限幅器的系统误比特率。

根据文献 [4], 我们引入双光硬限幅器到该红外 PPM-CDMA 系统中, 即在相关器的前后分别放置一个光硬限幅器。前面分析表明, 信号经过相关器后, 期望用户发送数据符号时隙的接收信号均值等于 Ap ; 非发送数据符号时隙的接收信号均值与该时隙干扰脉冲数不为 0 的标志脉冲位置个数 α_i 有关, 即 $A\alpha_i$ 。接收信号经过下一级光硬限幅器后, 如果信号均值小于 Ap , 限幅器的输出值等于 0; 如果信号均值 $\geq Ap$, 输出值等于 Ap 。下面推导引入双光硬限幅器的红外 PPM-CDMA 系统的误符号率。

$$P_{e,DHL}^u \leq (M-1) \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{ppm,j}^i = 0) \leq (M-1) \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{ppm,j}^i = 0, T_0 = 0, T_1 = p, W = w) \times \Pr(T_1 = p | W = w) \Pr(W = w) \quad (9)$$

其中 $\Pr(T_1 = p | W = w) = 1 + \sum_{i=1}^p (-1)^i C_p^i [1 - i \frac{1}{Mp}]^{N-w}$,

$$\Pr(r_{1,1} \geq r_{1,0} | d_{ppm,j}^i = 0, T_0 = 0, T_1 = p, W = w) = Q\left(\frac{A(p-\alpha_1)}{\sqrt{2pN_0}}\right) = 0.5$$

所以引入双光硬限幅器的红外 PPM-CDMA 系统的误比特率

$$P_{e,DHL}^b \leq \frac{M}{4} \sum_{w=w_{\min}}^{w_{\max}} \frac{C_p^{N-w} C_{p-1}^{w-1}}{C_{p^2-1}^{N-1}} \left\{ 1 + \sum_{i=1}^p (-1)^i C_p^i \left[1 - i \frac{1}{Mp} \right]^{N-w} \right\} \quad (10)$$

3 数据结果

根据 IRDA1.4 物理层链路协议, 光电检测器的响应度 $R = 0.53 \mu A / \mu W$, 检测器表面面积 $A_d = 0.1 \text{ cm}^2$, 背景光功率 $P_b = 490 \mu W / \text{cm}^2$, 热噪声功率 $P_{th} = 40 \mu W$, 红外信道增益 $G_0 = -40 \text{ dB}$, 平均最大发送功率 $P_{av} = 1 \text{ W}$, 信噪比 $\text{SNR} = 10 \lg(P_{av} G_0 R / \text{总噪声})$ 。我们假设同时接入用户数 $N=20$, 码重 $p=7$, 码长 $L=49$, $M=32$ 或 $M=16$ 。根据图 2 可见, 引入光硬限幅器系统的误比特率与无光硬限幅器系统相比, 都有不同程度的改善; 而且系统的误比特率随 M 和信噪比的增加而减少; 而引入双光硬限幅器系统提供误比特率的上限。在局域网中我们比较关心的是: 在一定误比特率要求下, 系统的通信容量和同时接入网络的用户数。图 3 为 $M=32$, 功率 $=50 \text{ mW}$ 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, 引入双光硬限幅器系统的用户数多于单个双光硬限幅器系统和无光硬限幅器系统的用户数。

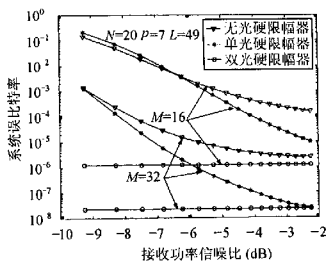


图2 误比特率-信噪比曲线图

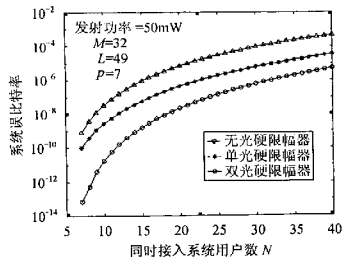


图3 误比特率-同时接入系统用户数曲线图

4 结束语

在红外无线局域网中, 由于需要接入的用户和同时接入网络的用户数比较多, 因此我们选用大码字数的 MPC 作为红外 PPM 码分多址同步系统中每个用户的地址码。分析结果表明, 引入双光硬限幅器的光 PPM-CDMA 红外通信系统优于引入单光硬限幅器和无光硬限幅器的 PPM-CDMA 红外无线通信系统, 而且系统的误比特率随 M 和信噪比的增加而减少。

参 考 文 献

- [1] Elmirghani J M H, Cryan R A. New PPM-CDMA hybrid for indoor diffuse infrared channels. *Electronics Letters*, 1994, 30(20): 1646-1647.
- [2] Matsuo R, Outsuki T, Sasase I. Performance analysis of indoor infrared wireless systems using PPM CDMA with linealizer with dead-zone and PPM CDMA with hard-limiter on diffuse channels. *IEEE International Conference on Communications*, Helsinki, Finland, 2001, 7: 2016-2020.
- [3] Shalaby M H. Chip-level detection in optical code multiple access. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(6): 1077-1087.
- [4] Shalaby M H. Direct detection optical overlapping PPM-CDMA communication systems with double optical hardlimiter. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(7): 1158-1165.
- [5] Lee D M, Kahn J M. Coding and equalization for PPM on wireless infrared channels. *IEEE Trans. on Comm.*, 1999, 47(2): 255-259.
- [6] Kowng W C, Perrier P A, Prucnal P R. Performance comparison of asynchronous and synchronous code-division multiple-access techniques for fiber-optic local area networks. *IEEE Trans. on Comm.*, 1991, 39(11): 1625-1633.
- [7] Sato K, Outsuki T, Sasase I. Performance of optical direct-detection cdma system using prime sequence codes. *IEEE International Conference on Communications*, Seattle, WA, USA, 1995, 3: 1312-1316.

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。