

文章编号: 0258-7025(2005)06-0820-05

# 光码分多址系统中双极性码的应用研究

张崇富, 邱 昆

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 基带双极性光码分多址(OCDMA)系统,采用码的极性转换思想,实现在考虑信道非理想下的单极性信道中传输双极性码。研究了 Gold 序列,  $m$  序列在系统中的应用和传输信道对光码分多址系统性能的影响,仿真得到了双极性码在光码分多址系统的自相关和互相关特性,基于不同码字的光码分多址系统用户数与误码率的关系和基于非理想传输信道的系统性能影响曲线。结果表明,Gold 序列和  $m$  序列适合双极性光码分多址系统,但 Gold 序列较  $m$  序列更适合应用到双极性光码分多址系统,当系统激活用户数为 20,系统误码率分别达到了  $10^{-9}$ ,  $10^{-7}$ ,非理想传输信道对系统性能有较大的影响(恶化近 20 dB),在系统研究中不可忽略。

**关键词** 光通信; 光码分多址; 双极性码; 单极性信道; 码序列转换; 相关性; 误码率

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## Investigation on Application of Optical Code Division Multiple Access System with Bipolar Codes

ZHANG Chong-fu, QIU Kun

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** The base-band bipolar optical code division multiple access (OCDMA) system is introduced, with transform of unipolar-bipolar and bipolar-unipolar, transmission of signal with bipolar codes is realized through unipolar medium. Gold sequence and  $m$  sequence in OCDMA system, and channel effect on the performance of OCDMA system are studied here. The simulation results demonstrate that Gold sequence and  $m$  sequence are adapted to bipolar OCDMA system according to the performance of the auto/cross-correlation, but Gold sequence in bipolar OCDMA system is better than  $m$  sequence. When the number of users is 20, the bit error rate (BER) is  $10^{-9}$  for Gold sequence, and about  $10^{-7}$  for  $m$  sequence. Channel model significantly influences the performance of the OCDMA system ( $\sim 20$  dB).

**Key words** optical communication; optical code division multiple access (OCDMA); bipolar codes; unipolar medium; codes transform; correlation performance; bit error rate (BER)

### 1 引 言

光码分多址(OCDMA)技术是未来高速、宽带、异步和可靠的通信备选方案之一。光码分多址技术采用光域处理传输信号,所以传输物理量只能是非负,系统不能直接采用双极性码,不能充分发挥光码分多址技术优势。1985年 Tamura 等<sup>[1]</sup>提出了在单极性光码分多址信道中采用双极性码的试验系

统,近几年双极性光码分多址系统成为研究热点之一。目前双极性光码分多址系统研究主要集中在双、单极性码的转换<sup>[2]</sup>;编解码器在信息处理方式<sup>[3,4]</sup>;发射端,双极性电信号转换为单极性光信号传输,接收端,单极性光信号转换为双极性电信号进行数据处理<sup>[5]</sup>。码字转换方面有新的突破与进展<sup>[2,5~7]</sup>,但 Gold, Walsh 和  $m$  序列等双极性码在光码分多址中应用的优选目前尚少见报道。

收稿日期: 2004-03-18; 收到修改稿日期: 2004-10-11

基金项目: 国家 863 计划(2001AA122071)资助项目。

作者简介: 张崇富(1976—),男,四川绵阳人,电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术重点实验室硕士研究生,主要从事光纤通信、宽带通信网及光码分多址技术等方面的研究。E-mail: chfzhang517@163.com

文献[5]中研究了采用单极性传输信道传输双极性码序列,研究表明在电光/光电(EOE)系统能得到较好的光谱利用率。本文基于 T. W. F. Chang 等<sup>[5]</sup>提出的双极性光码分多址系统模型,在研究中考虑了传输信道特性对系统影响,研究了 Gold 和 m 序列在系统中的应用,比较了双极性码型和传输信道对系统性能的影响。

## 2 双极性光码分多址系统模型

跟踪光载波的相位非常困难而且价格昂贵,因此光通信系统通常采用强度调制/直接探测(IM/DD)技术。单极性 IM/DD 信道不能传输负脉冲,因

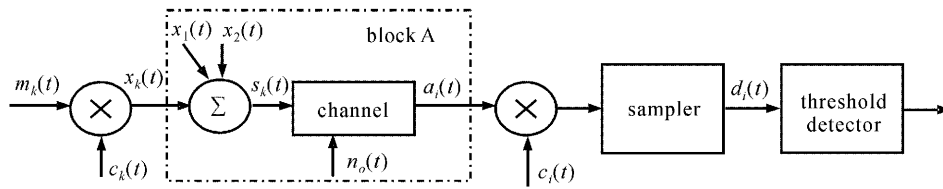


图 1 双极性光码分多址系统框图

Fig. 1 Diagram of the bipolar OCDMA system

实现双极性码与单极性码的转变,在单极性信道中传输双极性码时,信道块 B 将替换图 1 中信道块 A,如图 2 所示。发射端,输入电双极性信号转换为光单极性信号再进行传输;接收端,信号做反处理,实现单极性信道中传输双极性信号<sup>[5]</sup>。图 2 所示,  $x_k(t)$  为电双极性数据信号,  $y_k(t)$  为光单极性数据信号,  $z_i(t)$  为光单极性接收信号,  $N_{su}$  为发送信号的用户数,  $a_i(t)$  为电双极性接收信号,  $n_o(t)$  为系统噪声。

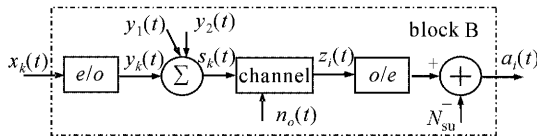


图 2 单极性信道中传输双极性码的原理框图

Fig. 2 Diagram of the transmitting bipolar codes over the unipolar channel

## 3 系统性能分析

由光纤非线性薛定谔方程可以得到光脉冲经光纤传输后的变化情况,其光脉冲经光纤信道传输发生的展宽系数为<sup>[8]</sup>

$$\zeta = \left[ \left( 1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + \left( \frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2g}, \quad (1)$$

此双极性光码分多址系统不能直接采用 IM/DD。由 T. W. F. Chang 等<sup>[5]</sup>提出的基于基带二进制相移控键(BPSK)调制的光码分多址系统如图 1 所示。数据信息  $m_k(t)$  是双极性信号  $\{+1, -1\}$ ,  $c_k(t)$  是用户  $k$  的序列码。将  $m_k(t)$  与  $c_k(t)$  相乘,得到由  $\{+1, -1\}$  组合的  $x_k(t)$  序列,每个用户收到的信号是叠加了所有用户发出的信号。其中用户  $k$  发送的数据  $m_k(t)$  在传输到信道之前,被本地码序列  $c_k(t)$  扩频。在一个多址系统中,每个用户接收到的信号  $a_i(t)$  是重叠了所有传输信号的复合量,再通过用户自己的码序列进行相关运算得到解调,接收器通过阈值判决器确认接收信号。

其中  $\beta_n = (d^n\beta/d\omega^n)_{\omega=\omega_0}$  为对应不同阶的色散指数,  $z$  为光脉冲传播距离,  $C$  为脉冲频率线性啁啾大小,  $T_0$  为在  $1/e$  处光脉冲的半宽度,  $g$  为超高斯脉冲的陡度。

光脉冲经编解码器后的传输函数为

$$H_T(\omega) = \sum_{m=1}^F \sum_{n=1}^F 2\pi T^2 c_t(m) c_t(n) \times \exp\{-T^2/2[(\omega - \omega_n)^2 + (\omega - \omega_m)^2]\} \times \exp\{-i[2m\beta(\omega_m)\delta_e] + 2n\beta(\omega_n)\delta_d\}, \quad (2)$$

其中  $T$  为光脉冲周期,  $c_t(m)$ ,  $c_t(n)$  为序列码,  $F$  为序列码码长,  $\beta(\omega)$  为传播常数,

$$\beta(\omega) = \sum_{n=0}^3 \frac{1}{n!} \frac{d^n\beta}{d\omega^n}_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)^n,$$

$\omega_m, \omega_n$  分别为码片  $m$  和  $n$  的中心频率;  $\delta_e, \delta_d$  分别为编、解码器透射中心距离参数。

系统发射端,数据信号经过乘法器后得到输入信号为

$$x_k(t) = m_k(t - \tau_k) c_k(t - \tau_k), \quad (3)$$

输入信道的数据信号为

$$s_k(t) = m_1(t) c_1(t) + \sum_{k=2}^{N_{su}} m_k(t - \tau_k) c_k(t - \tau_k), \quad (4)$$

$\tau_k$  是目标码  $c_i(t)$  和用户  $k$  码之间的时延。经信道传输后接收信号为

$$a_i = s_k(t) * h(t, \tau) + n_0(t), \quad (5)$$

其中  $n_0(t)$  为系统噪声信号, 表示为

$$n_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k(t) * h(t, \tau) * H_T(\omega)|^2 \zeta d\omega, \quad (6)$$

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^{k_{\text{ch}}} G_i(t) \exp[-2j\pi f_c \tau_i(t)] \delta[\tau - \tau_i(t)], \quad (7)$$

其中  $h(t, \tau)$  为传输信道的响应函数,  $k_{\text{ch}}$  为信道总数,  $G_i(t)$  为第  $i$  信道在时间  $t$  时刻的信号增益,  $\tau_i(t)$  为第  $i$  信道在时刻  $t$  的延迟,  $f_c$  为输入光信号的频率。

图 2 中通过电光转变, 双极性码的“+1”和“-1”被转换为单极性码的“1”和“0”。双-单极性转换公式为<sup>[5]</sup>

$$y_k(t) = \frac{1}{2}[1 + x_k(t)], \quad (8)$$

携带了单极性码的用户信号被耦合到光纤信道中。在接收端, 信号转换前的单极性信号可表示为

$$z_i(t) = s'_k(t) * h(t, \tau) + n_0(t), \quad (9)$$

$$\text{其中 } s'_k(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{su}}} y_k(t) = \frac{1}{2}[1 + m_1(t)c_1(t)] + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{N_{\text{su}}} [1 + m_k(t - \tau_k)c_k(t - \tau_k)], \quad (10)$$

单-双极性转换公式为<sup>[5]</sup>

$$a_1(t) = 2z_1(t) - N_{\text{su}}, \quad (11)$$

接收端转换后的双极性信号表示为

$$a_i(t) = [m_1(t)c_1(t) + \sum_{k=2}^{N_{\text{su}}} m_k(t - \tau_k)c_k(t - \tau_k)] * h(t, \tau) + n_0(t), \quad (12)$$

(12)式中的双极性信号与(5)式中的基带双极性光码分多址系统信号相同, 所以图 1 中的相干接收器可以用来处理双极性信号。图 1 中的信道块 A 替换为图 2 中的信道块 B, 可以实现双极性码在单极性系统中的传输。

系统的信噪比(SNR)可表示为

$$\text{SNR} = \frac{1}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} |s_k(t) * h(t, \tau)|^2 dt / n_0(t), \quad (13)$$

在采用双极性码的光码分多址系统中, 如考虑用户数比较大时, 则系统的误码率(BER)为

$$\text{BER} = Q(\sqrt{\text{SNR}}),$$

其中

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-x} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right) d\omega, \quad (14)$$

输出信号的自、互相关函数为

$$\theta_a = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T a_i(t + \tau) a_i(t) dt, \quad \theta_c = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T a_i(t + \tau) a_{i\text{else}}(t) dt, \quad (15)$$

其中  $a_{i\text{else}}(t)$  为不同于  $a_i$  的接收端双极性信号。

## 4 仿真结果与讨论

根据系统性能分析, 在系统仿真中, 随机选取同一码族内的两个码长为 31 的  $m$  序列和 Gold 序列, 如:

$$m_1 = [1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1],$$

$$m_2 = [1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1],$$

$$G_1 = [1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1],$$

$$G_2 = [-1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1],$$

经过信道块 B,  $m$  序列和 Gold 序列按式(8)转换为单极性码, 在接收端按(11)式转换回双极性码。在系统中采用上述序列仿真得到自相关和互相关特性曲线如图 3, 图 4 所示。

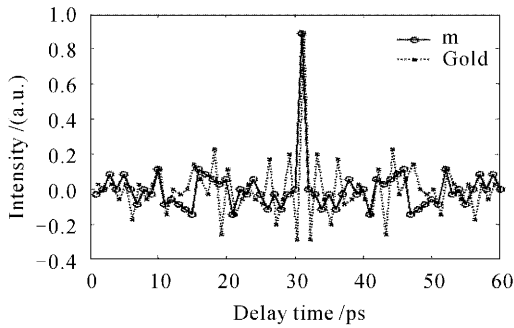


图 3 m 序列与 Gold 序列的自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation curves of m and Gold sequence

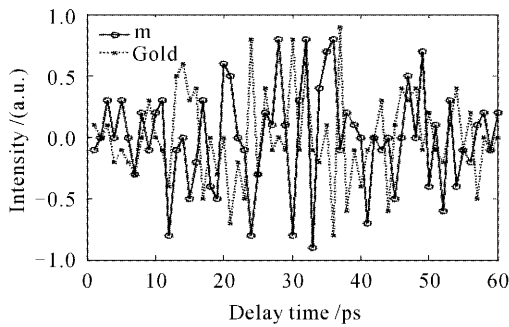


图 4 m 序列与 Gold 序列的互相关曲线

Fig. 4 Crosscorrelation curves of m and Gold sequence

从图 3 可以看出,将 Gold 序列转换为单极性码后,序列的自相关旁瓣峰值增大,旁瓣值与自相关峰值间的差值较小,编码后信号的自相关旁瓣干扰增大,但系统的误码率增益减小。m 序列的自相关旁瓣峰值较小,由图中可以得到 Gold 序列在光码分多址系统中的自相关性较 m 序列差些,但相关性明显优于单极性码在光码分多址系统<sup>[8]</sup>中的应用。从图 4 可以看到 m 序列和 Gold 序列的互相关性相差很小,互相关性在零值附近跳动,表现出很好的互相关

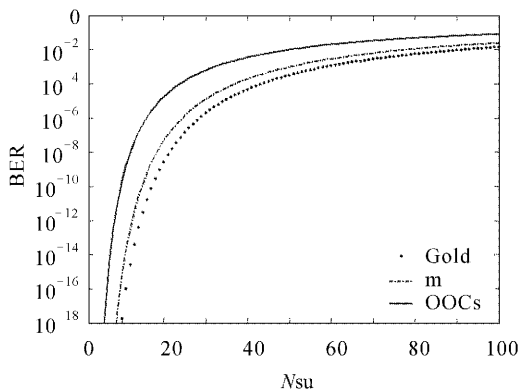


图 5 不同码系统的误码率与用户数的关系

Fig. 5 Relation of BER and the number of users with the different codes

特性。从图 3,图 4 的结果可以分析得出 m 序列和 Gold 序列适合应用到光码分多址系统的结论。

图 5 是在不同码型下系统误码率与激活用户数的关系曲线,从图中可以看出采用 Gold 序列的光码分多址系统的信号误码率在相同条件下明显优于 m 序列和单极性码光码分多址系统,如当激活用户数为 20,Gold 序列,m 序列和光正交码(OOCs)序列对应的误码率分别为  $10^{-9}$ ,  $10^{-7}$  和  $10^{-4}$ ,在光纤通信系统中一般要求误码率低于  $10^{-9}$ ,如在本系统中当用户数大于 20,则只能采用 Gold 序列。由此可以看到 Gold 序列更能适合光码分多址系统。

考虑传输信道为非理想与理想两种情况,如图 6 所示,图中虚线为理想传输信道对系统性能的影响,实线是考虑传输信道为非理想下对系统性能的影响,从图中可以看出当考虑传输信道为非理想情况时,系统的性能有较大的恶化(约 20 dB),产生码间干扰(MAI)。由此可以看出对系统性能进行研究时,假定信道理想是不够合理的,对非理想传输信道的研究还有待进一步的深入。

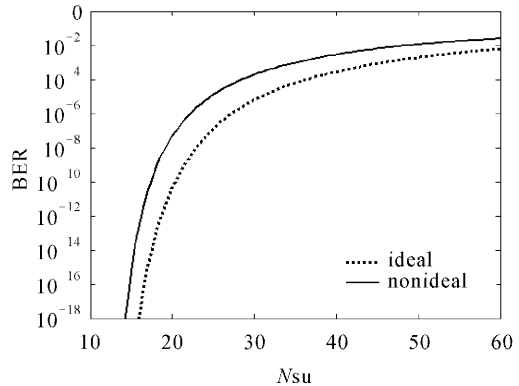


图 6 传输信道对系统误码率与用户数的关系

Fig. 6 Relation of BER and the number of users with the different channel model system

### 5 结 论

基于双极性基带光码分多址系统方案,在电光/光电系统采用了单-双极性、双-单极性转换对,双极性码则可以在非相干光码分多址系统中得到应用,此双极性系统不需要更换硬件就能实现通信。研究了 Gold 序列和 m 序列在系统中的应用,分析了光纤色散和非线性效应,光编解码器对光脉冲传输的影响,给出了考虑传输信道和编解码器对系统影响的传递函数表达式。仿真得到了系统的相关特性,采用不同码字的光码分多址系统用户数与误码率关系和信道模型对系统影响的曲线,研究结果表明

Gold 序列较 m 序列更适合光码分多址系统, 传输信道对系统性能有较大的影响, 得到了在理论和实践上具有一定参考价值的结论。光码分多址系统中对于码字优选和不同传输信道对双极性码的应用现在很不完善, 有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 S. Tamura, S. Nakano, K. Okaazaki. Optical code multiplex transmission by Gold sequences [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(1): 121~127
- 2 L. Nguyen, T. Dennis, B. Aazhang *et al.*. Experimental demonstration of bipolar codes for optical spectral amplitude CDMA communication [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(9): 1647~1653
- 3 Li Xiaobin, Sun Yuyong, Song Jianzhong. Tunable serial encoder/decoder for optical code division multiple access communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 353~356  
李晓滨, 孙玉勇, 宋建中. 可调串行光码分多址编码器/解码器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 353~356
- 4 Yuan Xiangyan, Tao Chunkan, Yu Dayong *et al.*. Phase-encoded joint transform correlator by use of amplitude-modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 149~153  
袁祥岩, 陶纯堪, 于大勇 等. 位相编码振幅调制联合变换相关器的设计 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 149~153
- 5 T. W. F. Chang, E. H. Sargent. Spectral efficiency limit of bipolar signaling in incoherent optical CDMA system [C]. *Global Telecommunication Conferent, Globecom'01 IEEE*, 2001, **11**(3): 1484~1486
- 6 C. C. Yang, J. F. Huang, S. P. Tseng. Optical CDMA networks codecs structured with M-sequence codes over waveguide-grating routers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 641~643
- 7 Yang Shuwen, Pu Tao, Xu Ming *et al.*. Research of algebraic congruent codes used in two-dimensional code division multiaddress system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 225~229  
杨淑雯, 蒲涛, 徐铭 等. 用于二维光址分多址系统的代数同余码研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 225~229
- 8 Zhang Chongfu, Qiu Kun, An Xiaoqiang *et al.*. Investigation on dispersion and nonlinearly effect on the performance of FFH-OCDMA system [J]. *High Technology Letters*, 2003, **13**(9): 5~9  
张崇富, 邱昆, 安晓强 等. 色散和非线性效应对快跳频光码分多址性能影响的研究 [J]. *高技术通讯*, 2003, **13**(9): 5~9