

# 一种基于光纤布拉格光栅的新型多址干扰消除方案

谭庆贵 胡渝 林佩  
(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**摘要:** 在强度调制、直接探测的光码分多址(CDMA)通信系统中, 为了有效克服并发用户数之间的多址干扰, 提高系统的通信性能, 根据组信息, 针对由光正交码(OOC)和修正素数码(MPC)构成的扩时/跳频地址码 MPC/OOC, 提出一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的多址干扰消除方案, 并详细分析了采用这种多址干扰消除方案的光 CDMA 通信系统的性能。结果表明, 这种基于光纤布拉格光栅的多址干扰消除方案, 可以很好地消除光 CDMA 通信系统中的多址干扰, 提高系统的用户数和误码率性能。

**关键词:** 光 CDMA; 多址干扰; 组信息; 光纤布拉格光栅

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0696-03

## A Novel Kind of Multi-access Interference Cancellation Scheme Based on Fiber Bragg Gratings

Tan Qing-gui Hu Yu Lin Pei

(Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to effectively reduce the effects of multi-access interference on the performance of optical code division multiple access (CDMA) communication systems with intensity modulation and direct detection, according to group information, a novel kind of multi-access interference cancellation scheme based on fiber Bragg grating(FBG)used with two dimensional address code MPC/OOC is presented. Considering the effects of multi-access interference, avalanche photodiode (APD) noise, and thermal noise, the performance of proposed optical CDMA communication systems is analyzed in detail. The result shows that this kind of multi-access interference cancellation scheme based on FBG can effectively reduce the influence of multi-access interference. And when received optical power is larger enough, the multi-access interference in two dimensional optical CDMA communication systems with MPC/OOC can be reduced completely.

**Key words:** Optical CDMA; Multi-access interference; Group information; Fiber Bragg Grating

### 1 引言

在采用强度调制/直接探测(IM/DD)的光CDMA(Code Division Multiplex Access)通信系统中, 由于单极性地址码不具有完全正交性, 其非零互相关系数会引起各个用户间的相互干扰, 即为多址干扰(Multiple Access Interference, MAI)。多址干扰一方面可以限制系统的容量, 另一方面还会引起远近效应, 严重影响通信系统的性能。如何有效克服多址干扰对光CDMA通信系统性能的影响, 是光CDMA通信系统中急需解决的一个的关键技术<sup>[1-4]</sup>。传统的MAI消除技术完全按照经典直接序列扩频理论对每个用户的信号分别进行扩频码匹配处理, 因此抗MAI能力比较差。对于采用修正素数码MPC(Modified Prime Code)的同步光CDMA系统<sup>[4]</sup>, 文献[5]提出一种引入组信息的多址干扰消除方法。与传统的多址干扰消除方法相比, 该方法的相关解扩和多址干扰的估计都是在光域实现, 因而不存在电信号处理速率的

瓶颈。本文针对由光正交码(Optical Orthogonal Code, OOC)和修正素数码构成的地址码MPC/OOC, 提出了一种基于光纤布拉格光栅FBG的多址干扰消除方案, 并分析该干扰消除方案的性能。

### 2 组信息的添加方法

所谓组信息, 是指在原有的地址码头部添加表征其在组的信息。在文献[6]中, 我们以光正交码 OOC 作为时域扩时模式, 修正素数码 MPC 作为频域跳频模式, 构造了时域扩时/频域跳频的二维地址码 MPC/OOC。这种二维码具有分组特性, 如果将具有不同跳频模式的地址码分成  $F$  个大组, 将每个大组中具有相同跳频模式和相同扩时模式的地址码分为  $P$  个小组, 那么同一小组中地址码是正交的, 不同小组中地址码的互相关值为 1(其中假定构造 MPC 码的素数为  $P$ , 光正交码 OOC 的码长  $F$ )。表 1 给出了  $P = 3$ ,  $F = 7$  的地址码中具有相同跳频模式的一个分组。

基于二维码 MPC/OOC 的分组特性, 根据文献[5]提出的多址干扰消除方法, 可以为 MPC/OOC 码序列添加表征

其所在组的组信息，在接收端根据检测组信息来确定期望用户受到的多址干扰。

表 1 MPC/OOC 码及其组信息

Hopping mode	MPC	Address codes	
		Group information	MPC/OOC
$\lambda_0\lambda_1\lambda_2$	0 0 0	$\lambda_7 00$	$\lambda_0 00 \lambda_1 00 \lambda_3 00$
	1 1 1	$\lambda_7 00$	$0\lambda_0 0 \ 0\lambda_1 0 \ 00\lambda_3$
	2 2 2	$\lambda_7 00$	$00\lambda_0 \ 00\lambda_1 \ 00\lambda_3$
	0 1 2	$0\lambda_7 0$	$\lambda_0 00 \ 0\lambda_1 0 \ 00\lambda_3$
	1 2 0	$0\lambda_7 0$	$0\lambda_0 0 \ 00\lambda_1 \ \lambda_3 00$
	2 0 1	$0\lambda_7 0$	$00\lambda_0 \ \lambda_1 00 \ 0\lambda_3 0$
	0 2 1	$00\lambda_7$	$\lambda_0 00 \ 00\lambda_1 \ 0\lambda_3 0$
	1 0 2	$00\lambda_7$	$0\lambda_0 0 \ \lambda_1 00 \ 00\lambda_3$
	2 1 0	$00\lambda_7$	$00\lambda_0 \ 0\lambda_1 0 \ \lambda_3 00$

### 3 基于 FBG 的多址干扰消除方案

由于具有不同波长的组信息是在光域添加的，这要求在接收端采用的解码器不仅在光域实现，而且可以灵活实现对不同的波长的解扩功能。FBG是由在一根光纤上用紫外光照射的方法得到周期不同的光栅阵列组成(如图 1 所示)，其可以对输入光信号的相位产生影响，在空间上按一定规律排列的FBG阵列能够实现输入光信号多个频率的抽取；FBG还可以使获得的不同频谱成分得到不同的时延，从而使反射的光脉冲中不同的波长在时间上或空间上分开，达到编码目的。基于FBG的光CDMA编解码器具有很好的性能，得到了广泛的应用<sup>[7,8]</sup>。本文根据组信息，设计一种基于FBG的多址干扰消除方案。

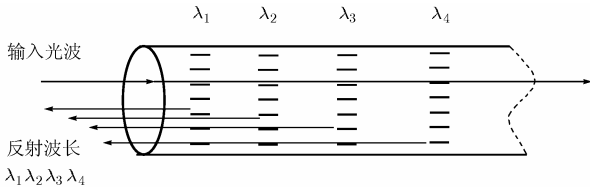


图 1 FBG 的选频特性示意图

根据组信息的添加方法，FBG 多址干扰消除方案由  $P$  个 FBG 组成，其中一个与添加了组信息的期望用户地址码相匹配，用于解出包含用户信息和多址干扰组成的光脉冲。其它  $P-1$  个光栅依次与其它不同的组信息相匹配，解出组信息中的光脉冲。根据表 1 中的地址码和组信息，设计了如图 2 所示的多址干扰消除方案(其中  $P=3$ )。假定期望用户采用地址码( $\lambda_7 00 \ \lambda_0 00 \ \lambda_1 00 \ \lambda_3 00$ )，两个干扰用户的地址码为( $0\lambda_7 0 \ \lambda_0 00 \ 0\lambda_1 0 \ 00\lambda_3$ )和( $00\lambda_7 \ \lambda_0 00 \ 00\lambda_1 \ 0\lambda_3 0$ )。当 3 个用户均发送数据“1”时，接收光信号先经过 1:3 (即 1:P) 的分束器均分为 3 路，第 1 个 FBG 与码序列( $000 \ \lambda_0 00 \ \lambda_1 00 \ \lambda_3 00$ )进行相关运算，在最后一个码片位置上得到的包含用户数据和多用户干扰之和的光脉冲，经探测器探测后可以得到电流值  $z_1$ ；第 2 个 FBG 与码序列( $0\lambda_7 0 \ 000 \ 000 \ 000$ )进行匹配运算，得到来自第 2 小组用户的多址干扰，第 3 个

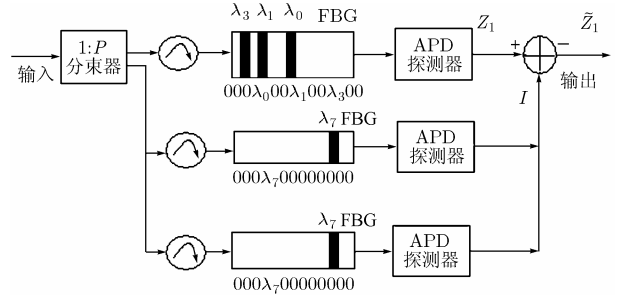


图 2 基于 FBG 的并行干扰消除器

FBG 与( $00\lambda_7 \ 000 \ 000 \ 000$ )进行匹配运算，得到来自第 3 小组用户的多用户干扰，二者之和为期望用户受到的总的多用户干扰，经探测器探测后可得到电流值  $I$ 。用于干扰消除后的变量  $\tilde{z}_1 = z_1 - I$  代替  $z_1$  进行判决显然能够极大地改善系统的误码率性能。

本文设计的这种基于 FBG 的多址干扰消除方案在光域实现了对期望用户信号的匹配解码以及多用户干扰的估计，避免了电信号处理的速率瓶颈，无需额外复杂的光学器件，能够较好地消除多址干扰，且具有很好地抗远近效应能力。

### 4 系统性能分析

设光 CDMA 通信系统中的并发用户数为  $N$ ，第 1 大组第 1 小组中的第 1 个地址码为期望用户地址码；同时假设各用户达到接收端的光功率相等。用  $T_1$  表示地址码为第 1 大组的用户数， $P_{r1}(T_1 = t_1)$  表示  $N$  个用户中有  $t_1$  个用户的地址码来自第 1 大组的概率，则有：

$$P_{r1}(T_1 = t_1) = \frac{\binom{P^2(F-1)}{N-t_1} \binom{P^2-1}{t_1-1}}{\binom{P^2F-1}{N-1}}, \quad t_1 \in (t_{1\min}, \dots, t_{1\max}) \quad (1)$$

其中  $t_{1\min} = \max\{1, N - P^2(F-1)\}$ ， $t_{1\max} = \min\{P^2, N\}$ 。

用  $T_2$  表示第 1 大组第 1 小组中的用户数，用  $P_{r2}(T_2 = t_2 | T_1 = t_1)$  表示有  $t_1$  个用户的地址码来自第 1 大组的条件下，有  $t_2$  个用户的地址码来自第 1 大组的第 1 小组的概率，则有：

$$P_{r2}(T_2 = t_2 | T_1 = t_1) = \frac{\binom{P^2-P}{t_1-t_2} \binom{P-1}{t_2-1}}{\binom{P^2-1}{t_1-1}}, \quad t_2 \in (t_{2\min}, \dots, t_{2\max}) \quad (2)$$

其中  $t_{2\min} = \max\{1, t_1 - (P^2 - P)\}$ ， $t_{2\max} = \min\{P, t_1\}$ 。

$N-1$  个其它用户中，对期望用户的光子计数产生影响的是处于第 1 大组中第 2, ...,  $P$  小组中发送“1”的用户。设所有用户发送“0”和“1”的概率相等，在给定  $T_1 = t_1$ ， $T_2 = t_2$

的条件下, 干扰用户数  $\kappa$  的概率分布函数为:

$$P_{r3}(\kappa = l | T_2 = t_2, T_1 = t_1) = \binom{t_1 - t_2}{l} \frac{1}{2^{t_1 - t_2}}, \quad l \in \{0, 1, \dots, t_1 - t_2\} \quad (3)$$

对于 APD 探测器, 其探测输出可以作高斯近似, 考虑系统中存在的多址干扰、背景光噪声以及 APD 的接收机噪声(包括暗电流、热噪声), 系统误码率表示为:

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{t_1=t_{1\min}}^{t_{1\max}} \sum_{t_2=t_{2\min}}^{t_{2\max}} \sum_{l=0}^{t_1-t_2} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \operatorname{erfc} \left( \frac{Th - \tilde{\mu}_{b0}}{\sqrt{2\tilde{\sigma}_{b0}^2}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{Th - \tilde{\mu}_{b1}}{\sqrt{2\tilde{\sigma}_{b1}^2}} \right) \right) \right] \cdot P_{r3}(\kappa = l | T_2 = t_2, T_1 = t_1) \cdot P_{r2}(T_2 = t_2 | T_1 = t_1) \cdot P_{r1}(T_1 = t_1) \quad (4)$$

其中  $\tilde{\mu}_{b1} = \mu_{b1} - \mu_I$ ,  $\tilde{\mu}_{b0} = \mu_{b0} - \mu_I$ ,  $\tilde{\sigma}_{b1}^2 = \sigma_{b1}^2 + \sigma_I^2$ ,  $\tilde{\sigma}_{b0}^2 = \sigma_{b0}^2 + \sigma_I^2$ ,  $\mu_{b1}$ 、 $\mu_{b0}$  和  $\sigma_{b1}^2$ 、 $\sigma_{b0}^2$  分别为发“1”和“0”时的均值和方差, 可以根据文献[5]得到相应的计算表达式。

假定码速率为 1.28Gbps, 负载波的中心波长为 1550nm, 接收光功率  $P_s = -24\text{dBm}$ , 采用  $P = 3$  和  $F = 7$  的二维地址码 MPC/OOC, 其它参数由文献[5]给出, 图 3 和图 4 分别为直接采用 FBG 解码器和基于 FBG 的干扰消除方案的光 CDMA 通信系统中误码率随用户数的变化曲线。从图中看出, 若要求误码率小于  $10^{-9}$ , 对于直接采用 FBG 解码器的通信系统, 系统容纳的并发用户数仅为 3 个; 而对于采用基于 FBG 的干扰消除方案的通信系统, 在相同的条件下, 系统可容纳的并发用户数为 63 个, 即所有的码字数。由此可以看出, 本文针对采用二维地址码 MPC/OOC 的光 CDMA 通信系统提出的基于 FBG 的干扰消除方案, 可以很好地消除该系统中的多址干扰, 提高该系统的码容量和误码率性能。

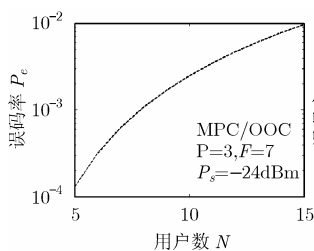


图 3 采用常规检测时系统误码率随用户数的变化关系

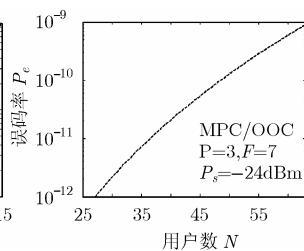


图 4 采用基于组信息的多址干扰消除技术的系统误码率和在线用户数的关系曲线

## 5 结束语

在采用二维码 MPC/OOC 作为地址码的光 CDMA 通信系统中, 根据组信息, 设计了一种基于 FBG 的新型多址

干扰消除方案, 并分析了采用该方案的光 CDMA 系统的性能。结果表明, 这种多址干扰消除方案可以很好地消除多址干扰对系统性能的影响, 有效提高系统的系统容量和误码率性能。

## 参考文献

- [1] Nelson L B and Poor H V. Performance of multiuser detection for optical CDMA. I. Error probabilities, *IEEE Trans. on Communications*, 1995, 43(11): 2803-2811.
- [2] Li Ping. Interleave-division multiple access and chip-by-chip iterative multi-user detection[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(6): S19-S23.
- [3] Motahar A S and Nasiri-Kenari M. Multiuser detections for optical CDMA networks based on expectation maximization algorithm[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2004, 52(4): 652-660.
- [4] Ohtsuki T, Sato K, and Sasase I, *et al.* Direct-detection optical synchronous CDMA systems with double optical hard-limiters using modified prime sequence codes[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(9): 1879-1887.
- [5] Sawagashira H, Kamakura K, and Ohtsuki T, *et al.* Direct-detection optical synchronous CDMA systems with interference canceller using group information codes[C], IEEE, Global Telecommunications Conference, 2000, 2: 1216-1220.
- [6] 周秀丽, 胡渝, 谭庆贵. MPC/OOC 二维地址码的构造及性能分析[J]. *光通信研究*, 2005(1): 36-39.
- [7] Huang Jen-Fa and Hsu Dar-Zu. Fiber-grating-based optical CDMA spectral coding with nearly orthogonal M-sequence codes[J]. *IEEE, Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1252-1254.
- [8] Ayotte S, Rochette M, and Magne J, *et al.* Experimental Verification and Capacity Prediction of FE-OCDMA Using Superimposed FBG[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(2): 724-731.

谭庆贵: 男, 1975 年生, 博士生, 从事无线光通信和光 CDMA 技术方面的研究工作。

胡渝: 女, 1939 年生, 教授, 主要从事光信息传输、获取和处理等方面的研究工作。

林佩: 女, 1980 年生, 硕士, 主要从事光 CDMA 技术方面的研究工作。