

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0842-05

基于光纤布拉格光栅编解码器的 直接序列扩频跳频光码分多址系统*

丁美玲 章献民 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 提出了一种混合直扩跳频光码分多址(DS/FH-OCDMA)系统的实现方法。该系统采用跳频素数码作为扩频码, 运用了光纤布拉格光栅序列作为编解码器, 并在解码器两端安置了双硬限幅器以提高系统的性能。理论分析和仿真结果表明, 该系统具有大用户容量、高功率效率和低误码率等方面的优点。

关键词: 光通信; 光码分多址; 混合直扩跳频; 光纤布拉格光栅; 双硬限幅器

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

1 引 言

光码分多址系统不仅能够为局域网用户提供宽带的异步接入服务, 还具有安全性好、软性容量、抗干扰能力强等方面的优点, 在未来的通信系统中将起到重要的作用^[1]。按照不同的扩频特征, 光码分多址系统可以划分为直接序列扩频(DS)、谱域编码(FE)、跳频(FH)和混合直扩跳频(DS/FH)等多种类型。前三类系统的实现方法和性能已被广泛地研究, 主要包括: 利用光纤延迟线编解码器实现的直接序列扩频光码分多址系统^[1]、利用衍射光栅编解码器实现的谱域编码光码分多址系统^[2]和利用光纤布拉格光栅(FBG)编解码器实现的跳频光码分多址系统^[3,4]等。

混合直扩跳频光码分多址系统中的传输信号在时间上具有伪随机特征, 同时信号的中心频率按照伪随机方式进行跳变^[5], 因此具有更强的安全性和更大的用户容量, 引起了研究工作者的密切关注, 其优越性能已于近期被大量的相关研究所证实^[6-8]。该系统的关键在于如何实现对特定扩频码的编解码, 以及如何降低系统的多用户干扰(MUI)。如今, 采用声光滤波器^[6]、阵列波导^[7]和波长选择器^[8]等设计的混合直扩跳频光码分多址系统编解码器均有报道, 光纤布拉格光栅编解码器则以其设计的灵活性和优良性价比性能而在直接序

列扩频^[9]、谱域编码^[10-12]和跳频^[3,4]等光码分多址系统中广为运用, 我们设计了混合直扩跳频光码分多址系统的光纤布拉格光栅编解码器, 探讨了编解码器的工作原理, 并对相应混合直扩跳频光码分多址系统的性能进行仿真和分析, 与运用阵列波导^[7]和波长选择器^[8]等编解码器的混合直扩跳频光码分多址系统相比, 该系统具有设计简单、性价比比较优等方面的优点。为了降低系统的多用户干扰, 我们还在系统中引入了双硬限幅器(HL)^[13-15], 并利用了一种新的方法计算出系统因多用户干扰而引入的误码率(BER)。

2 系统设计与原理

2.1 扩频码的选型

非相干光码分多址系统采用了基于强度调制-直接检测(IM-DD)的调制解调技术, 其扩频码必须由单极性的{0, 1}序列构成。一、二维扩频码的特征可以用下列表达式来描述^[1,16]:

$$M(L, P, W, \lambda_a, \lambda_c), \quad (1)$$

其中 M 为本组扩频码的个数, L 代表一个码字所涉及的时间片数, P 表示可运用的频率片数, W 为自相关峰值(即码重), λ_a 、 λ_c 则分别为自相关和互相关常数。

本文所采用的跳频素数码^[5]满足 $L = P^2 = W^2$ 、 $\lambda_a = 0$ 以及 $\lambda_c = 1$ 的条件。 $P = 4$ 时的跳频素数码如表 1 所示, 其中跳频模式中的 1、2、3、4 表示在相应时隙的码元波长分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 。

* 浙江省自然科学基金(698016)资助课题。

E-mail: zhangxm@zju.edu.cn

收稿日期: 2001-03-19; 收到修改稿日期: 2001-07-12

Table 1. Code examples for DS/FH-OCDMA system

No.	code			
1	1000	2000	3000	4000
2	1000	0200	0030	0004
3	1000	0020	0003	0400
4	1000	0002	0300	0040
5	1000	3000	4000	2000
6	1000	0300	0040	0002
7	1000	0030	0004	0200
8	1000	0003	0400	0020

2.2 系统描述

基于光纤布拉格光栅编解码器的混合直扩跳频光纤码分多址系统如图 1 所示。系统的工作原理是这样的：发送端原始信息通过开关键控(OOK)的调

制方式对经掺铒光纤放大器(EDFA)放大的光信号进行调制,再通过光纤布拉格光栅构造的编码器进行扩频,并由环形器输出,此时原始信息的载体就变成了带有特定扩频码特征的已扩频信号,该已扩频信号经色散位移光纤(DSF)和星型耦合器而传送到接收端。由于光纤码分多址网络采用了类似于以太网中的广播传送机制,接收端将同时收到多个编码器发送而来的信号,这些信号在解码器内与预置的扩频码完成相关运算,只有匹配的已扩频信号才能被正确地解码,其余信号均被视为多用户干扰。为了提升系统的信噪比性能,在系统设计时要求输入编码器信号的谱宽完全覆盖切趾光纤布拉格光栅序列的反射谱。

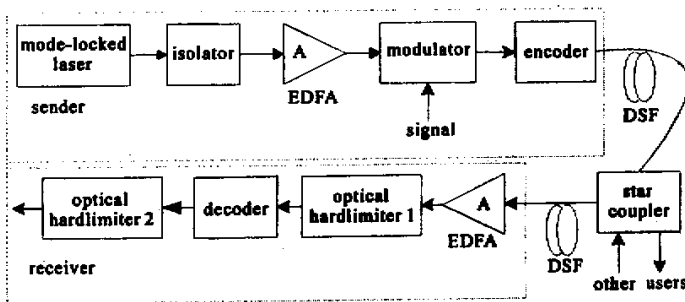


Fig.1 Schematic diagram of DS/FH-OCDMA system

双硬限幅器已被广泛地运用于降低直接序列扩频光纤码分多址系统的误码率^[14,15]。在本系统中,1号双硬限幅器用于将输入解码器的脉冲强度限制在单一码元的水平。令单一码元的强度为1,则1号双硬限幅器的输出函数定义为^[14]:

$$E_{1out} = \begin{cases} 1 & E_{1in} \geq 1, \\ 0 & E_{1in} < 1. \end{cases} \quad (2)$$

而2号双硬限幅器将用于脉冲整形,若定 N_{th} 为判决门限值,则它的输出函数可表示为:

$$E_{2out} = \begin{cases} W & E_{2in} \geq N_{th}, \\ 0 & E_{2in} < N_{th}. \end{cases} \quad (3)$$

2.3 光纤布拉格光栅编解码器

光纤布拉格光栅的基本特征是以布拉格波长为中心的窄带光学反射器^[17],因而,按照特定要求排列的光纤布拉格光栅序列就有可能实现对信号的编解码。目前,光纤布拉格光栅编解码器在直接序列扩频、谱域编码、跳频等光纤码分多址系统中的应用已被广泛研究^[9-12],依据类似的原理,我们也可以设计出混合直扩跳频光纤码分多址系统的光纤布拉

格光栅编解码器。图2所示的装置是为使用扩频码为1000 0003 0400 0020的用户而设计的,其中 L_c 为光纤布拉格光栅中心间距的最小公约数,与系统数据传输速率和光纤布拉格光栅的制造工艺有关。为了降低光纤布拉格光栅间的串扰,编解码器必须运用切趾光纤布拉格光栅^[4]。

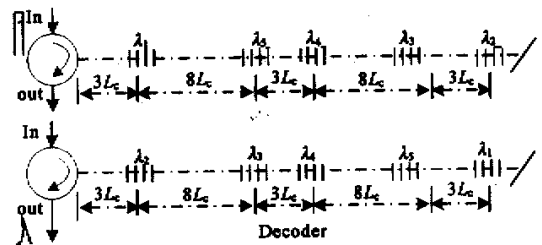


Fig.2 Schematic diagram of encoder and decoder for DS/FH-OCDMA based on FBGs

一般地,假定各光纤布拉格光栅的反射谱不发生交叠,并定义光纤布拉格光栅的反射率函数为 $\gamma_n(\lambda)$ ($1 \leq n \leq W$)。光纤布拉格光栅反射信号到达环形器输出端的时间与信号输入环形器的时间之差为 τ_n ,当编解码器输入光脉冲均为 $i = \delta(t)$ 时,编

码器的输出信号和传输函数分别为

$$\left. \begin{aligned} i_E &= \sum_{n=1}^W \gamma_n(\lambda) \delta(t - \tau_n), \\ H_E(\omega) &= \int i_E \exp(-j\omega t) dt. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

如果解码器中存在着与编码器中相同的光纤布拉格光栅,并且同一波长的信号经两个环行器输出的时间延迟之和为 T ,则解码器的输出信号和传输函数可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} i_D &= \sum_{n=1}^W \gamma_n(\lambda) \delta(t - T + \tau_n), \\ H_D(\omega) &= \int i_D \exp(-j\omega t) dt = \\ &H_E^* \exp(-j\omega T). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

可见,解码器的传输函数与相应编码器传输函数的复共轭成线性关系,解码器能够对相应编码器的输出信号进行信号重构,实现解码功能。也就是说,如果光纤布拉格光栅的排列间距和布拉格波长分别依据系统扩频码的时域和频域特征,并参照系统的要求进行设计,则上述装置就可以实现混合直扩跳频光纤码分多址系统的编解码,运用可调谐光纤布拉格光栅还可以实现具有可编址能力的编解码器。

3 波形仿真

针对图 2,可以进行如下设计: $\lambda_1 = 1544 \text{ nm}$, 光纤布拉格光栅的布拉格波长间隔为 2 nm , 光纤布拉格光栅的反射谱宽为 0.5 nm 。由于切趾光纤布拉格光栅的反射率函数遵循高斯分布,并且光纤布拉格光栅的布拉格波长间隔是反射谱宽的 4 倍,因而就可以忽略光纤布拉格光栅之间的串扰。若编码器的输入信号是幅度为 1、周期为 25 的方波脉冲,而编码器的输出信号则被直接输入到解码器,通过(4)式、(5)式建立的数学模型就可得出编码器和解码器的输出脉冲序列波形,并分别由图 3 和图 4 表示。

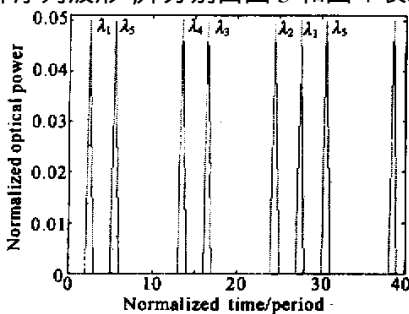


Fig. 3 Reflected series of pulses from encoder

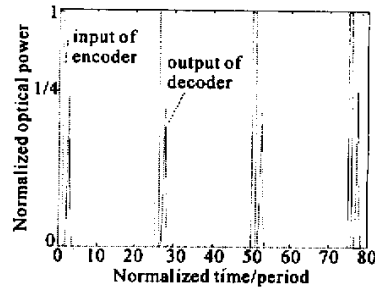


Fig. 4 Reflected series of pulses from decoder

4 性能分析

4.1 用户容量

系统的用户容量与系统可运用的频率片数 P 直接相关,对于采用跳频素数码的系统,其最大用户容量为 $2P \ln[(P-1)/2]$,在采用码同步技术之后,其用户容量 Y 更可高达 $2P^3 \ln[(P-1)/2]$,因此,在频率片数相等的情况下,该系统的用户容量均远远高于 $L = P - 1$ 的跳频光纤码分多址系统^[3,4](如图 5 所示),这对于受到频率片数和用户容量双重制约的光纤码分多址系统具有重大意义;另一方面,在时间片数相等的情况下,混合直扩跳频光纤码分多址系统和跳频光纤码分多址系统也具有相当的用户容量。

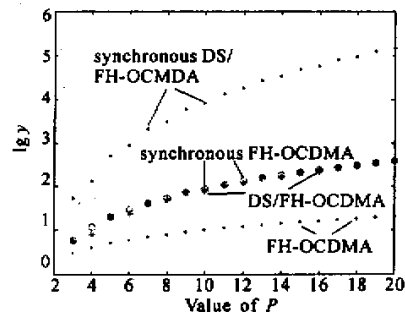


Fig. 5 Schematic diagram of the number of users Y versus the value of P

4.2 最大数据传输速率

系统的最大数据传输速率 v_{\max} 与光源的光谱特征、光纤布拉格光栅的反射特征、扩频码的长度等多种因素有关^[11]。若仅考虑扩频码长度的影响,当已扩频信号的码片在时域不发生重叠时,光纤布拉格光栅的最小间距 L_c 与 v_{\max} 满足^[11]:

$$v_{\max} \leq v(2L_c L), \quad (6)$$

其中 v 为光纤中光波的传输群速率,并认为光纤中只有 HE_{11} 模传输; L_c 则受限于对光纤布拉格光栅

特征的要求,并受到制造工艺的影响,目前可达 1.20 mm 左右。当 $L = 16$ 时, v_{\max} 约为 5 Gb/s 左右,足以满足局域网通信的要求。

4.3 功率效率

混合直扩跳频光纤码分多址系统的功率效率除受限于星型耦合器的耦合效率之外,还与编解码器反射频谱和光源光谱的互相关特性有关。假定光纤布拉格光栅具有理想的反射性能,编解码器中环行器引起的功率损耗为 0,并假定系统中星型耦合器的分光比为 $K:1$,由(4)式、(5)式可知,系统的最大功率效率 η 满足(不计入掺铒光纤放大器放大的影响)

$$\eta = \frac{1}{KW} \sum_{n=1}^W \gamma_n^2, \quad (7)$$

其中 γ_n 可接近于 1,因而 η 的上限为 $1/K$ 。在实际的运用当中,由于光纤布拉格光栅反射特征的不理想,光纤布拉格光栅的反射谱宽必然要比光纤布拉格光栅的布拉格波长间隔小得多,因而就不可能达到这一极限。但在所有运用光纤布拉格光栅编解码器的光纤码分多址系统中,唯有混合直扩跳频光纤码分多址系统的 η 仅取决于光纤布拉格光栅的性能,因而该系统可以获得最高的功率效率。

4.4 误码率

考察一个多用户干扰受限的混合直扩跳频光纤码分多址系统,并认为,当发送端送出“0”信号而接收端判决为“1”信号时,系统才发生解码错误,而光纤布拉格光栅具有良好的反射性能。假定该系统的并发用户数为 N ,接收端的判决门限为 N_{th} ,且有 $N_{th} \leq P$ 。为了计算上的方便,定义 D 为大于或等于 N_{th} 的最小整数。当解码器两端不安装双硬限幅器时,某个用户对特定用户产生干扰的概率满足

$$\alpha = 1/(2P). \quad (8)$$

若这些干扰之和大于或等于 D ,解码器就会发生解码错误,系统的误码率为

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=D}^{N-1} \binom{N-1}{i} \alpha^i (1-\alpha)^{N-i-1}. \quad (9)$$

当解码器两端安装双硬限幅器之后,对于某个特定的频率片,其它用户的干扰之和将被弱化到单一码元干扰的水平。而在特定频率片上某个用户对特定用户产生干扰的概率满足

$$\beta = 1/(2P^2). \quad (10)$$

只有当其它用户在大于或等于 D 个(小于或等于 P)的频率片上对特定用户产生干扰之后,解码器才会发生解码错误,此时系统的误码率可表示为

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=D}^{N-1} \left\{ \binom{N-1}{i} \beta^i (1-\beta)^{N-i-1} \times \sum_{k=D}^P \binom{P}{k} F(i, k) \right\}, \quad (11)$$

其中 $F(i, k)$ 可理解为 i 个被编号的球放入 k 个被编号篮子,并且每个篮子都有球的方法数。显而易见,当 $i < k$ 时, $F(i, k) = 0$ 。而在 $i \geq k$ 的情况下, $F(i, k)$ 可由下列递推公式给出:

$$F(i, k) = k^i - \sum_{j=1}^{k-1} \binom{k}{j} F(i, j). \quad (12)$$

假定系统满足 $D = P$ 的条件,下面采用误码率和并发用户数的关系图(参见图 6)来反映双双硬限幅器对系统误码率性能的影响。可见,运用双双硬限幅器装置,可以在不降低通信质量的前提下,提高系统的并发用户数,或者在并发用户数相同的情况下,提高系统的通信质量。从图示还可以发现,随着 P 的增大,系统将支持更多的并发用户数,而当并发用户数相等时,系统的误码率就可以维持在更低的水平。

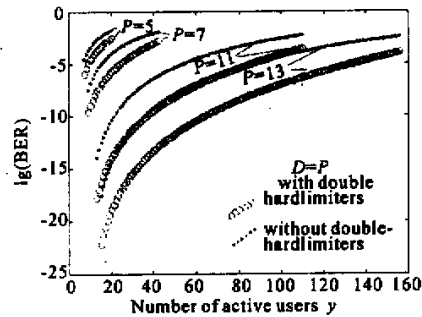


Fig. 6 BER comparisons of systems with and without double hardlimiters

讨论 混合直扩跳频光纤码分多址系统具有信息安全性好、用户容量大和系统功率效率高等方面的优点,对于该系统的研究已成为光纤码分多址技术的热点之一。采用跳频数数码、光纤布拉格光栅编解码器和双双硬限幅器的混合直扩跳频光纤码分多址系统还具有良好的性能价格比和优异的误码率性能,而且设计简单,并能够满足网络通信特别是局域网通信的要求。但系统的真正运用还需要解决光源稳定性和网络拓扑结构等方面的问题。

另一方面,由于系统的用户容量与最大数据传输速率及误码率之间存在着一定的矛盾,必将大大限制该系统潜力的发挥。因此,对于新的混合直扩跳频光纤码分多址系统扩频码的研究将是下一步研究的重点^[16]。

参 考 文 献

- [1] Iversen K , Mückenheim J , Hampicke D . A basic theory of fiber-optic CDMA. Mainz , Germany . 1996 *IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings* , Mainz , Germany , 1996 , 1 : 431 ~ 437
- [2] Zaccarin D , Kavehrad M . An optical CDMA system based on spectral encoding of LED. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 1993 , **4** (4) : 479 ~ 482
- [3] Fathallah H , Rusch L A . Robust optical FFH-CDMA communications : Coding in place of frequency and temperature controls. *J. Lightwave Technol.* , 1999 , **17** (8) : 1284 ~ 1293
- [4] Fathallah H , Rusch L A , LaRochelle S . Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system. *J. Lightwave Technol.* , 1999 , **17** (3) : 397 ~ 405
- [5] Tančevski L , Andonovic I . Hybrid wavelength hopping/time spreading schemes for use in massive optical networks with increased security. *J. Lightwave Technol.* , 1996 , **14** (12) : 2636 ~ 2647
- [6] Pu Tao , Li Yuquan , Zhang Baofu . Discussion on frequency hop and time hop hybrid system of optical CDMA. *J. China Institute of Communications (通信学报)* , 2000 , **21** (5) : 18 ~ 22 (in Chinese)
- [7] Yegnanarayanan S , Bhushan A S , Jalali B . Fast wavelength-hopping time-spreading encoding/decoding for optical CDMA. *IEEE photon. Technol. Lett.* , 2000 , **12** (5) : 573 ~ 575
- [8] Yu K , Shin J , Park N . Wavelength-time spreading optical CDMA system using wavelength multiplexers and mirrored fiber delay lines. *IEEE photon. Technol. Lett.* , 2000 , **12** (9) : 1278 ~ 1280
- [9] Jepsen A G , Johnson A E , Maniloff E S *et al.* . Demonstration of all-fiber sparse lightwave CDMA based on temporal phase encoding. *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 1999 , **11** (10) : 1283 ~ 1285
- [10] Jepsen A G , Johnson A E , Maniloff E S *et al.* . Fiber Bragg grating based spectral encoder/decoder for lightwave CDMA. *Electron. Lett.* , 1999 , **35** (13) : 1096 ~ 1097
- [11] Huang J F , Hsu D Z . Fiber-grating-based optical CDMA spectral coding with nearly orthogonal *M*-sequence codes. *IEEE photon. Technol. Lett.* , 2000 , **12** (9) : 1252 ~ 1254
- [12] Baghdasaryan H V , Meghavoryan D M , Uzunoglu N K . Optical CDMA system based on amplifying fiber Bragg gratings chain. *2nd International Conference on Transparent Optical Networks* , Xanthi , Greece . 27 ~ 29 June , 2000 . 169 ~ 172
- [13] Lin C L , Wu Jinshawn . A synchronous fiber-optic CDMA system using adaptive optical hardlimiter. *J. Lightwave Technol.* , 1998 , **16** (8) : 1393 ~ 1403
- [14] Argon C , Ergül E . Detection of shortened OOC codewords in optical CDMA system with double hard-limiters. *Opt. Commun.* , 2000 , **177** (1 ~ 6) : 277 ~ 281
- [15] Shalaby H M H . Direct detection optical overlapping PPM-CDMA communication systems with double optical hardlimiters. *J. Lightwave Technol.* , 1999 , **17** (7) : 1158 ~ 1165
- [16] Shivaleela E S , Sivarajan K N , Selvarajan A . Design of a new family of two-dimensional codes for fiber-optic CDMA networks. *J. Lightwave Technol.* , 1998 , **16** (4) : 501 ~ 508
- [17] Erdogan T . Fiber grating spectra. *J. Lightwave Technol.* , 1997 , **15** (8) : 1277 ~ 1294

The Hybrid Direct Sequence/Frequency Hopping Optical CDMA System with FBGs based Encoder/Decoder

Ding Meiling Zhang Xianmin Chen Kangsheng

(Department of Information Science and Electronic Engineering , Zhejiang University , Hangzhou 310027)

(Received 19 March 2001 ; revised 12 July 2001)

Abstract : A hybrid direct sequence/frequency hopping (DS/FH) scheme is proposed for optical code division multiple access (OCDMA) system. The optical encoder/decoder with prime-hop sequence is based on fiber Bragg gratings (FBGs) , and double optical hard-limiters are placed on both sides of decoder respectively. With such a design , the DS/FH-OCDMA system has large number of simultaneous user , high power efficiency and low bit error rate (BER) .

Key words : optical communication ; optical code division multiple access ; hybrid direct sequence/frequency hopping ; fiber Bragg grating ; double hard-limiters