

文章编号: 1001-3806(2015)04-0576-05

OCDMA 系统中新型正交码的设计及性能研究

杨梦婕, 李传起*, 陆叶, 罗德俊, 张东闯, 孔一卜

(广西师范大学 电子工程学院, 桂林 541004)

摘要: 为了得到性能较为良好的正交码, 采用没有重复数字的全间隔集, 进行了地址码的设计和系统仿真验证, 设计出的正交码具有理想的相关性和灵活的码字容量。分析整个系统, 在考虑各种噪声和多址干扰的影响下, 推导出正交码的误比特率公式。自行设计并搭建了采用光纤延时线作为编解码器的异步光码分址系统。结果表明, 该正交码能够适应更多用户的需求, 通过误比特率公式计算和系统仿真得到的结果都较为理想, 此研究对需要大容量的光码分址系统的进一步发展具有一定的帮助。

关键词: 光通信; 光码分多址; 光正交码; 光纤延时线

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.033

Design and performance study on novel optical orthogonal codes in OCDMA systems

YANG Mengjie, LI Chuanqi, LU Ye, LUO Dejun, ZHANG Dongchuan, KONG Yipu

(Electronic Engineering College, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to get the optical orthogonal codes (OOC) with good performance, all-interval-set with no duplicate number was used. After design and system simulation, OOC had ideal correlation and flexible code capacity. The formula of bit error rate (BER) was derived considering all kinds of noise and multi-user interference. Asynchronous optical code division multiple access (OCDMA) system was designed and constructed with fiber optic delay lines as encoders and decoders. The result shows that the OOC can adapt to the demands of more number of users. The consequence is satisfactory both from the calculation of BER formula and from system simulation. The research is helpful for further development of OCDMA systems with high capacity.

Key words: optical communication; optical code division multiple access (OCDMA); optical orthogonal code (OOC); fiber optic delay line

引言

光正交码(optical orthogonal code, OOC)是一组自相关及互相关性都很好的“0,1”序列^[1]。在光码分多址(optical code division multiple access, OCDMA)系统中,光地址码序列的最佳选择是光正交码,因此光正交码是目前地址码研究领域的重点^[2-4]。构造 OOC 的算法有直接构造法、有限几何法以及区组设计法等^[5-7],每种方法都很复杂。本文中利用设计出不重复的全间隔集得到互相关和自相关都为 1 的正交码。

该正交码能够根据实际用户数和码重而得出对应

基金项目: 广西省自然科学基金资助项目(20101MS018); 桂林市科学技术发展基金资助项目(20120104-18)

作者简介: 杨梦婕(1989-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光码分多址系统地址码的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lcq@mailbox.gxnu.edu.cn

收稿日期: 2014-06-18; 收到修改稿日期: 2014-08-18

的码长, 对于其它方法构造的正交码, 在特定码重下只有固定容量的地址码, 比如码重为 3 的正交码只有 3 个, 而本文中构造的正交码, 无论码重为多少的正交码个数都可以根据实际用户数而定, 不局限特定的容量。虽然在固定的码重下, 所设计出的地址码码长也会随着所需用户数的增大而增大, 但可以弥补普通正交码特定码重情况下的码字容量过小的缺陷。

1 正交码的设计

一个地址码族可以表示为 $(L, w, \lambda_a, \lambda_c)$, 其中 L 表示地址码长度, w 表示码重, λ_a 表示自相关限, λ_c 表示互相关限。对于正交码, $\lambda_a = \lambda_c = 1$ ^[1]。一个地址码可以用 (x_1, x_2, \dots, x_w) 表示, 其中 x_i 表示第 i ($i = 1, 2, \dots, w$) 个“1”在地址码中的位置。一个地址码有邻 1 间隔集、邻 2 间隔集……邻 $w - 1$ 间隔集, 邻 j 间隔集表示地址码“0,1”序列中隔着 j 个“1”的两个“1”之间的距离, 所有 $w - 1$ 个间隔集构成了这个地址码的全

间隔集。一个地址码的全间隔集中没有相同的数字,则这个地址码的自相关为 1;一个地址码的全间隔集中没有数字与另一个地址码的全间隔集中的数字相等,则这两个地址码的互相关为 1;一个地址码族中所有地址码的全间隔集中都没有重复的数字,则这个地址码族的自相关限和互相关限为 1;利用地址码间隔集的这个特点,构造出没有重复数字的间隔集,而得出整个地址码族。

一个地址码的邻 j 间隔集可以表示为 $(y_{1,j}, y_{2,j}, \dots, y_{w,j})$, 邻 j 间隔集中的数字满足以下关系:

$$y_{i,j} = y_{i,1} + y_{i \oplus_w 1,1} + \dots + y_{i \oplus_w j \oplus_w (-1),1} \quad (1)$$

式中, \oplus_w 表示计算结果对 w 取余; $i = 1, 2, \dots, w$ 。 $y_{i,1}$ 为邻 1 间隔集中的第 i 个元素, 与地址码序列的关系为:

$$\begin{cases} y_{i,1} = x_{i+1} - x_i, (i = 1, 2, \dots, w-1) \\ y_{w,1} = L - x_w \\ x_1 = 0 \\ x_i = \sum_{k=1}^{i-1} y_{k,1}, (i = 2, \dots, w) \end{cases} \quad (2)$$

根据以上关系将正交码族中所有地址码的全间隔集分为邻 1 间隔集 A 以及除 A 以外的部分 B , B 由 $w-2$ 个矩阵 $B_n (n = 1, 2, \dots, w-2)$ 构成, A 和 B_n 可以用公式表示为:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1w} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2w} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{Nw} \end{bmatrix} \\ B_n = \begin{bmatrix} b_{11,n} & b_{12,n} & \dots & b_{1n,n} \\ b_{21,n} & b_{22,n} & \dots & b_{2n,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N1,n} & b_{N2,n} & \dots & b_{Nn,n} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中, 矩阵 A 和 B_n 中的值具有如下关系:

$$a_{ij} = \begin{cases} i, (j = 1) \\ a_{N(j-1)} + 1, (i = 1, j \neq 1) \\ a_{(i-1)j} + 1, (i \neq 1, j \neq 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{i'j',n} = a_{i'(n-j'+1)} + a_{i'(n-j'+2)} + \dots + a_{i'(n+1)} \quad (5)$$

A 中的 1 行表示一个地址码的邻 1 间隔集, N 表示该地址码族的容量, a_{ij} 表示 A 中第 i 行 j 列的数字 ($i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, w$), $b_{i'j',n}$ 表示矩阵 B_n 中第 i' 行 j' 列的数字 ($i' = 1, 2, \dots, N; j' = 1, 2, \dots, n$), 其中 $i = i', n = j - 1$ 。矩阵 A 中的数字 a_{ij} 和矩阵 B_n 中的数字 $b_{i'j',n}$ 同时利用 (4) 式、(5) 式可求得, 并同时满足如下条件: 在 B 中没有值与 a_{ij} 相同, 且 B 中没有重复的数字 (以下简称条件 a)。当 j 从 1 到 $w-1$ 时的具体计

算方法如下: (1) $j = 1$: 由 (4) 式可得 $a_{i1} = i$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$; (2) $j = 2$: $i = 1$ 时, $a_{12} = a_{N1} + 1, b_{11,1} = a_{11} + a_{12}$; $i = 2, 3, \dots, N$ 时, $a_{i2} = a_{(i-1)2} + 1, b_{i1,1} = a_{i1} + a_{i2}$, 判断是否满足条件 a, 将 $a_{i2} + 1$ 直到满足为止; (3) $j = 3$: $i = 1$ 时, $a_{13} = a_{N2} + 1, b_{11,2} = a_{12} + a_{13}$, 将 $a_{13} + 1$ 直到满足条件 a; $i = 2, 3, \dots, N$ 时, $a_{i3} = a_{(i-1)3} + 1, b_{i1,2} = a_{i1} + a_{i2}, b_{i2,2} = a_{i1} + a_{i2} + a_{i3}$, 判断是否满足条件 a, 将 $a_{i3} + 1$ 直到满足条件; (4) $j = k (k = 4, 5, \dots, w-1)$: $i = 1$ 时, $a_{1k} = a_{N(k-1)} + 1, b_{11,k-1} = a_{1(k-1)} + a_{1k}$, 将 $a_{1k} + 1$ 直到满足条件 a; $i = 2, 3, \dots, N$ 时, $a_{ik} = a_{(i-1)k} + 1, b_{i1,k-1} = a_{i(k-1)} + a_{ik}, b_{i2,k-1} = a_{i(k-2)} + a_{i(k-1)} + a_{ik}, \dots, b_{i(k-1),k-1} = a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{i(k-1)}$ 。判断是否满足条件 a, 将 $a_{ik} + 1$ 直到满足条件。

通过以上的计算方法, 可以得到所有地址码的邻 1 间隔集 A , 再利用 (2) 式可以得到该正交码族。为了便于得到较多的地址码, 利用 MATLAB 编程, 输入所需的码重和地址码容量后, 可以得到该正交码族, 如在 MATLAB 中给定码重 5, 容量 10 后得到的码长为 264 的正交码族, 如表 1 所示。

Table 1 The OOCs with code length 264, code weight 5 and capacity 10

OOC
(0, 1, 12, 39, 86)
(0, 2, 15, 44, 93)
(0, 3, 17, 48, 100)
(0, 4, 20, 54, 109)
(0, 5, 23, 58, 115)
(0, 6, 25, 62, 126)
(0, 7, 28, 68, 134)
(0, 9, 33, 76, 149)
(0, 10, 36, 82, 157)

2 误比特率性能的分析

在实际的系统中, 不仅仅只存在多用户干扰, 还存在如暗电流噪声、激光器消光比影响、背景光噪声、热噪声、散粒噪声等这些因素^[8-10], 使得实际情况下的误比特率 (bit error rate, BER) 比只考虑多址干扰情况下的误比特率大, 因此从理论上分析存在这些噪声时, 系统的误比特率。

在雪崩光电检测器 (avalanche photo detector, APD) 中, 由信号、背景光、APD 体漏电流引起的总光子吸收率^[11] 根据用户发送的比特 b 分为两种情况:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_s + \lambda_b + \frac{I_b}{e}, (b = 1) \\ \frac{\lambda_s}{M_e} + \lambda_b + \frac{I_b}{e}, (b = 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ_s 为用户发送脉冲所对应的光子吸收率, $\lambda_b =$

$\eta P_r / (hf)$ (P_r 为接收的光功率, η 为 APD 的量子效率, h 为普朗克常量, f 为光频率), λ_b 为实际中背景光所引起的光子吸收率, e 为电子电荷, I_b 为体漏电流, $I_{b,1}$ 是 $b=1$ 时 I_b 的值, $I_{b,1}/e$ 表示 APD 体漏电流在输出端的值, M_e 为消光比。

对于码重为 w 的正交码携带的光信号在经过相关器进行运算时, 仅在信号的 w 个片时隙有光子通过, 余下的 $L-w$ 个片时隙没有光子通过。对于同步用户总数为 K 时, K 个用户输出的“0”或“1”的总数为 Kw 。当用户发送比特 $b=1$ 时, 有 $w+I$ 个信号以 λ_s 到达, I 表示其他用户对该用户的干扰, 有 $Kw-(w+I)$ 个空信号以 λ_s/M_e 到达。而背景光、APD 体漏电流、表面漏电流、热噪声在每个片时隙都存在。因此接收端的累加输出 y 的条件概率密度函数为:

$$p(y|I, b=1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left[-\frac{(y-u_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (7)$$

$$u_1 = G\left\{(w+I)\lambda_s + [Kw-(w+I)]\frac{\lambda_s}{M_e}\right\} + GTL\left(\lambda_b + \frac{I_{b,1}}{e}\right) + TL\frac{I_{APD}}{M_e} \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = G^2 F_e T \left\{(w+I)\lambda_s + [Kw-(w+I)]\frac{\lambda_s}{M_e} + L\left(\lambda_b + \frac{I_{b,1}}{e}\right)\right\} + L\left(T\frac{I_{APD}}{e} + \sigma_{th}^2\right) \quad (9)$$

式中, G 为 APD 的平均雪崩增益, I_{APD} 为 APD 的表面漏电流, F_n 为过剩噪声系数, $F_n = k_{eff}G + (2-G^{-1}) \times (1-k_{eff})$, k_{eff} 为 APD 的有效电离率, σ_{th}^2 为热噪声方差, $\sigma_{th}^2 = 22k_B T_r T e^{-2} R^{-1}$, k_B 为玻尔兹曼常数, T_r 为接收机的噪声温度, R 为接收机的负载电阻。

当用户发送信号比特 0 时, I 个脉冲以 λ_s 入射光子到达率到达, $Kw-I$ 个空脉冲以 λ_s/M_e 入射光子到达率到达, 其它噪声对于每个片时隙都存在。因此, 接收端累加输出 y 的条件概率密度为:

$$p(y|m, b=0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left[-\frac{(y-u_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (10)$$

$$u_0 = GT\left[m\lambda_s + (Kw-m)\frac{\lambda_s}{M_e} + L\left(\lambda_b + \frac{I_{b,1}}{e}\right)\right] + LT\frac{I_{APD}}{M_e} \quad (11)$$

$$\sigma_0^2 = G^2 F_e T \left\{m\lambda_s + (Kw-m)\frac{\lambda_s}{M_e} + L\left(\lambda_b + \frac{I_{b,1}}{e}\right)\right\} + L\left(T\frac{I_{APD}}{e} + \sigma_{th}^2\right) \quad (12)$$

码重为 w 、干扰的用户数为 m 的概率密度为

$C_{K-1}^m \left(\frac{w^2}{2L}\right)^m \left(1-\frac{w^2}{2L}\right)^{K-1-m}$, 因此干扰用户数为 m 的概率为:

$$q(m) = mC_{K-1}^m \left(\frac{w^2}{2L}\right)^m \left(1-\frac{w^2}{2L}\right)^{K-1-m} \quad (13)$$

当用户发送比特 $b=0$ 时, 累计输出 y 大于判决门限, 使得输出 1 而产生误码。当用户发送比特 $b=1$ 时, 累计输出 y 小于判决门限, 使得输出 0 而产生误码。因此, 系统误比特率定义为:

$$E_{BER} = P(y \geq t | b=0) \cdot P(b=0) + P(y \leq t | b=1) \cdot P(b=1) \quad (14)$$

设实际用户发送的比特 0 和 1 的概率相同, 得到 $P(b=0) = P(b=1) = \frac{1}{2}$, 由(7)式和(10)式, (14)式可具体表示为:

$$E_{BER} = \frac{1}{2} \sum_{m=w}^{K-1} q(m) \left[1 - Q\left(\frac{t-u_0(m)}{\sigma_0(m)}\right) + Q\left(\frac{t-u_1(m)}{\sigma_1(m)}\right)\right] \quad (15)$$

式中, $Q(x)$ 为高斯积分函数, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2/2} du$, t 为判决门限。

将表 1 中的系统参量值带入误比特率公式中, 绘制出误比特率随着同步用户数变化曲线, 如图 1 所示。

Table 2 System parameters

name	symbol	value
light wavelength	λ	1550nm
APD quantum efficiency	η	0.6
APD gain	G	100
APD effective ionization ratio	k_{eff}	0.02
received signal power	P_r	-45dBm
the photon arrival rate cause by background light	λ_b	$10^9/s$
body leakage current	$I_{b,1}$	0.1 nA
the extinction ratio	M_e	100
APD surface leakage current	I_{APD}	10nA
receiver noise temperature	T_r	1100K
receiver load resistor	R	1030 Ω
chip duration	T	0.1ns

图 1 为误比特率随着同步用户数变化曲线, 由图中可以看出, 误比特率随着同步用户数的增大而增大, 随着码重的增大而降低。由于本文中设计的正交码的码长是根据实际情况中的用户数和用户对误比特率需求而定的码重二者共同决定的, 因此绘制出码长与码重和码字容量的关系图, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 码长随着码重成二次函数递增, 随着码字容量成一次函数递增。因此对于本文中构造的正交码, 码重

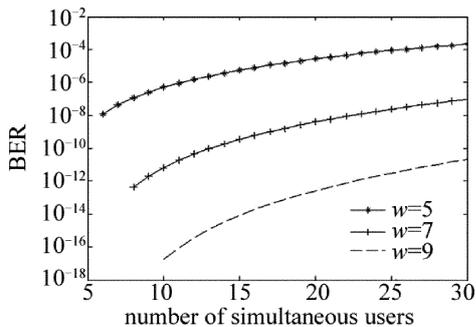


Fig. 1 BER versus the number of simultaneous users with code weight 5, 7, 9

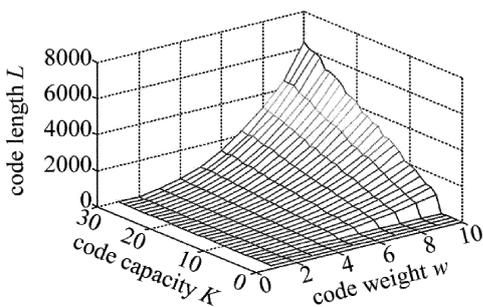


Fig. 2 Code length L versus the code weight and code capacity

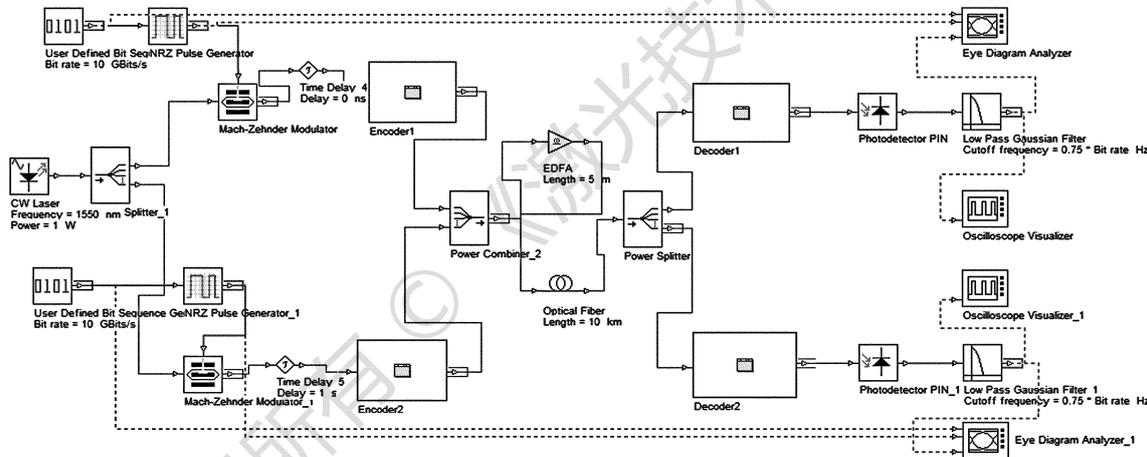


Fig. 3 Simulation of the asynchronous OCDMA system

两个用户分配到码长 $L = 27$ 、码重 $w = 4$ ，分别为 $(0, 1, 4, 10)$ 和 $(0, 2, 7, 15)$ 的地址码。用户速率为 10Gbit/s ，根据用户速率采用的单位延时为 0.15ns ，每个用户用 4 个光纤延时作为编解码器。则地址码为 $(0, 1, 4, 10)$ 的用户 1 的 4 个延时线分别延时 0.15ns ，

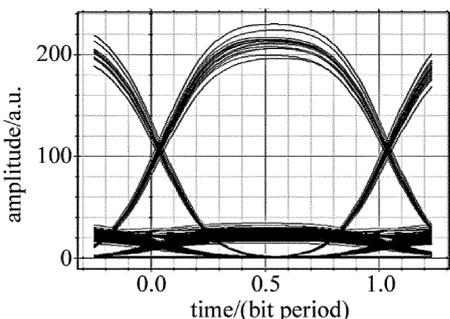


Fig. 4 Eye diagram of user 1

对码长的影响较大。由(13)式可以看出,误比特率的主要来源多址干扰随着码长的变长而变小,因此相对于码字容量而言,作者设计的正交码的误比特率与码重的关系更为密切。

3 系统仿真

对于 1 维 OCDMA 系统的编解码,分为时域上的编解码和谱域上的编解码。时域编解码通常采用光纤延时线,谱域编解码通常采用光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG)^[12-14]。因光纤延时线能够更好地表现出地址码的优良性能,因此将采用光纤延时线对用户进行编解码。

通过 OptiSys 软件,采用本文中设计的正交码的二用户异步 OCDMA 系统的仿真如图 3 所示。采用波长为 1550nm 的脉冲激光作为光源。光纤延时线作为编解码器,在编解码器前加入延时来控制两用户的异步。并采用掺铒光纤放大器 (erbium doped fibre amplifier, EDFA) 对传输信号进行放大。

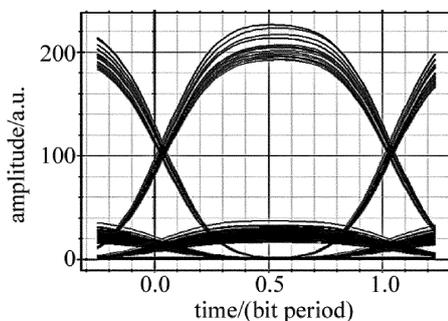


Fig. 5 Eye diagram of user 2

$0.45\text{ns}, 0.9\text{ns}, 2.55\text{ns}$ 。地址码为 $(0, 2, 7, 15)$ 的用户 2 的 4 个延时线分别延时 $0.3\text{ns}, 0.75\text{ns}, 1.2\text{ns}, 1.8\text{ns}$ 。图 4 和图 5 为用户最终的眼图。系统中的功率放大器只是起到增大信号功率的作用,弥补信号的削弱。由于光纤延时线是采用功率累加的方法对用户信号进行编解码的,因此必然存在低功率的信号干扰。从眼图

中也可以很明显地看出,在眼图下方存在较低的信号,光硬限幅器能够很好地去掉这些低功率的干扰信号,但在未采用光硬限幅器的情况下,眼图效果就已经较为良好,能够很好地识别出有用信号。

4 结 论

设计出了一种新的光正交码,该正交码的码长根据实际需要的码重和用户容量而定,且码长与码重的关系较为密切。在特定码重的情况下,可以根据实际中的用户容量来确定码长,使得该正交码能够适应各种情况。分析存在各种噪声以及多址干扰的实际情况,根据该正交码的特性推导出误比特率公式,误比特率呈现随着码重的增大而减小的趋势。设计并搭建了异步 OCDMA 系统,在不加入光硬限幅器的情况下就能得出较好的眼图。

参 考 文 献

- [1] LI Ch Q, LI X B. OCDMA system in optical communication[M]. Beijing: Science Press, 2008: 87 (in Chinese).
- [2] WANG X M, CHANG Y X, FENG T. Optimal 2-D($n \times m, 3, 2, 1$)-optical orthogonal codes[J]. Information Theory, 2013, 59(1): 710-725.
- [3] OMRANI R, GARG G, KUMAR P V, *et al.* Large families of asymptotically optimal two-dimensional optical orthogonal codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 1163-1185.
- [4] HAMZEH B, NEZAMALHOSSEINI S A, SALEHI J A. Performance analysis of equal-energy two-level OCDMA system using generalized optical orthogonal codes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1573-1584.
- [5] ANAMAN J O, PRINCE S. Correlation properties and performance evaluation of 1-Dimensional OOC's for OCDMA[C]//2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS). New York, USA: IEEE, 2012: 167-171.
- [6] CHAUHAN R C S, KUMAR R, SHUKLA M, *et al.* Proposal for one dimensional optical orthogonal codes: design, analysis & algorithm [C]//2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT). New York, USA: IEEE, 2011: 514-519.
- [7] LI X B, PENG J, HUANG H B. Discussion on method of construction of big capacity OCDMA address code: Construction of ($F, K, 1, 2$) optical orthogonal codes from block design[C]//2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP). New York, USA: IEEE, 2010: 3272-3275.
- [8] HAITAO C, RUIZHONG W. Combinatorial constructions for optimal two-dimensional optical orthogonal codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(3): 1387-1394.
- [9] SUN S, HONGXI Y, WANG Z Y, *et al.* A new family of 2-D optical orthogonal codes and analysis of its performance in optical CDMA access networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(4): 1646-1653.
- [10] LI Ch Q, LI X B. OCDMA system in optical communication[M]. Beijing: Science Press, 2008: 214 (in Chinese).
- [11] GAO X D, WEI Ch. Manufacture of interference edge filter film on the end of fiber for optical communication[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 314-316 (in Chinese).
- [12] AL-KHAFAJI H M R, ALJUNID S A, FADHIL H A. Performance enhancement of SAC-OCDMA system using modified-AND subtraction detection[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE). New York, USA: IEEE, 2011: 412-415.
- [13] YEN Ch T, CHEN W B. An optical CDMA method for in-vehicle information service[C]//2012 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). New York, USA: IEEE, 2012: 347-351.
- [14] KARIMI M, NASIRI-KENARI M. An internally coded TH/OCDMA scheme for fiber optic communication systems and its performance analysis-part II: using frame time hopping code[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(1): 50-55.