第 30 卷 第 5 期
2003 年 5 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 30, No. 5
May, 2003

文章编号: 0258-7025(2003)05-0417-04

最佳 $(F,K,1)$ 光正交码的构造算法研究

李晓滨[1,2]，宋建中[1]

([1] 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所图像室，吉林 长春 130022；[2] 吉林大学通信工程学院，吉林 长春 130012)

摘要 $(F,K,1)$ 光正交码(OOC's)是适合于光码分多址(OCDMA)通信的最佳地址码，但成功构造 最佳$(F,K,1)$光正交码十分困难。针对该问题，研究了一种构造算法，给出了构造该光正交码的具体算法及相应的计算机辅助设计方法。通过该方法可以容易地构造出最佳$(F,K,1)$ 光正交码。

关键词 光纤通信技术；码分多址(CDMA)；光正交码

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Discussion on An Algorithm of Construction of Optimal $(F, K, 1)$ Optical Orthogonal Codes

LI Xiao-bin[1,2], SONG Jian-zhong[1]

[1] *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130022, *China*

[2] *Institute of Telecommunication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin* 130012, *China*

Abstract $(F,K,1)$ optical orthogonal codes (OOC's) are the best address codes applied to optical code division multiple access (OCDMA) communication systems. But the construction of the maximal number of the codes, that is the construction of an optimal $(F,K,1)$ OOC's, is very difficult. An algorithm of construction of the OOC's and a method of computer-aided design are presented, by which desired optimal $(F,K,1)$ OOC's can be easily constructed.

Key words optical fiber communication technique; CDMA; optical orthogonal codes (OOC's)

1 引 言

作为一种正在兴起的光通信技术，光码分多址(OCDMA)技术结合了码分多址(CDMA)技术和光纤通信各自的优点，是一种全新的通信方式，已成为光通信技术领域一个新的研究热点。它所具有的处理速度快、保密性好、抗干扰性强、可任意选址及可多址复用等特点，使它在宽带多媒体通信和高速计算机局域网中具有广泛的应用前景。

光码分多址通信实用化的一个重要问题是地址码的选择。它一方面影响系统的可靠性，另一方面也影响系统的容量及有效性。一般来说，一个好的地址码不仅应满足自相关峰值较大、旁瓣较小、互相关峰值较小的要求，还应满足在一个地址码族中，具有上述特点的地址码数量大的要求。同电领域的码分多址地址码序列不同，光信号只能在非负的值域取值，这与电信号可取“+1”或“−1”是有本质的区别，因此电领域的 CDMA 的地址码序列不适合光 CDMA 通信。

目前，人们已研究出的光码分多址地址码主要源于光正交码和素数码[1,2]。与光正交码相比，素数码的自相关峰值和旁瓣都很大，互相关峰值也较大，只适合信息负荷量较小的场合。而光正交码，尤其是码长为 F，码重为 K，自相关旁瓣和互相关峰值都为 1 的$(F,K,1)$ 光正交码，非常适合光码分多址通信对地址码的要求，$(F,K,1)$ 光正交码是目前光

收稿日期:2002-03-15；收到修改稿日期:2002-05-09

作者简介:李晓滨(1966.7—)，女，山东青岛人，吉林大学副教授，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士生，主要从事移动通信、光纤通信、扩频通信理论及技术等方面的研究。E-mail:bing489@sohu.com

码分多址通信地址码的最佳选择。已研究出的光正交码的构造方法主要有直接构造法、代数构造法、递归构造法及射影几何法等。这些方法中,射影几何法实现起来比较难,其他方法只能构造特定的光正交码,无法构造最佳$(F,K,1)$光正交码。针对这一问题,本文提出一种最佳$(F,K,1)$光正交码的构造算法,并给出设计流程,根据该算法可以很容易地构造出所需的光正交码,这对光码分多址通信系统的实现具有重要意义。

2 最佳$(F,K,1)$光正交码

$(F,K,\lambda_a,\lambda_c)$光正交码$C$是一族长为$F$,码重为$K$的(0,1)序列,满足下列两个特性[3]:

1) 自相关特性

$$Z_{x,x}(\tau)=\sum_{n=0}^{F-1}x_n x_{n+\tau}=\begin{cases}K & \text{当 }\tau=0\\ \leqslant\lambda_a & \text{当 }0<\tau<F\end{cases}\tag{1}$$

对于任何$x\in C$及任何整数τ,τ为序列间的时间延迟。

2) 互相关特性

$$Z_{x,y}(\tau)=\sum_{n=0}^{F-1}x_n y_{n+\tau}\leqslant\lambda_c\tag{2}$$

对于任何$x\neq y\in C$及任何整数τ。

当λ_a,λ_c相等为λ时,该正交码被称为等重对称光正交码,用(F,K,λ)表示,λ等于1的光正交码用$(F,K,1)$表示。

一个光正交码族C中,码字的个数称为码的容量,其容量的最大值用$\Phi(F,K,\lambda)$表示

$$\Phi(F,K,\lambda)\leqslant\left[\frac{(F-1)(F-2)\cdots(F-\lambda)}{K(K-1)(K-2)\cdots(K-\lambda)}\right]\tag{3}$$

其中$[x]$表示取整,若光正交码的码字数量能达到$\Phi(F,K,\lambda)$的最大值,则该正交码为最佳光正交码。

3 最佳$(F,K,1)$光正交码的构造算法原理

3.1 基本概念

3.1.1 区组设计定义

设$S=\{1,2,\cdots,F\}$为包括F个不同元素的基集,$B=\{B_1,B_2,\cdots,B_b\}$为S的K-子集集合,r为含有某任意一元素的K-子集数,则(S,B)构成区组设计[4],且:

1) 对任意一对元素$i,j(i,j=1,2,\cdots,F,i\neq j)$,有$\lambda_e$个区组同时包括它们,对任意一对区组$i$,$j(i,j=1,2,\cdots,b,i\neq j)$,有$\lambda_b$个元素相同,且$\lambda_b=\lambda_e=\lambda$,则称为对称均衡不完全区组设计,简记为SBIBD$(F,b,r,K,\lambda)$。

2) 若在SBIBD(F,b,r,K,λ)中,某区组B_i的元素为$\{a_{i1},a_{i2},\cdots\}$,则B_{i+1}中的元素必为$\{a_{i1}+1,a_{i2}+1,\cdots\}$(模$F$),称具有这种循环性质的SBIBD$(F,b,r,K,\lambda)$为循环对称均衡不完全区组设计,记为CSBIBD$(F,b,r,K,\lambda)$。根据区组设计存在的条件[4],SBIBD$(F,b,r,K,\lambda)$中恒有$r=K$,$F=b$,故SBIBD$(F,b,r,K,\lambda)$记为SBIBD$(F,K,\lambda)$,CSBIBD$(F,b,r,K,\lambda)$可记为CSBIBD$(F,K,\lambda)$。

3.1.2 循环差集

以正整数F为模的K个互不同余的整数所组成的集合由下式表示

$$D\equiv\{a_1,a_2,\cdots,a_K\}(\text{模 }F)\tag{4}$$

如果对每个$d\neq0$(模F),恰好在D中有λ个有序对(a_i,a_j)使得$d\equiv(a_i-a_j)$(模F)成立,则称它为一个(F,K,λ)循环差集,记作$D(F,K,\lambda)$。

循环差集和循环对称均衡不完全区组设计有一一对应的关系[4]。已知循环差集的K个基本元素后,就可以将CSBIBD的各区组依次写出。

3.1.3 完备距离循环排列

完备距离循环排列(CPPD)是构造循环差集的一种方法[4],CPPD(F,K,λ)定义为:和为F的K个正整数($K<F$)作圆周上的排列,如能通过邻加恰好生成$1,2,\cdots,F-1$诸数各λ次,则称它为一个完备距离循环排列CPPD。

3.2 构造算法的原理

3.2.1 区组设计与光正交码的关系

比较(F,K,λ)OOC's和CSBIBD(F,K,λ)可见,其中表示光正交码码长的模F对应于区组设计中表示基集元素个数的F,而码重K对应于每个区组中元素个数K,并且对于区组设计中的λ_e和λ_b,这两个参数与(F,K,λ)光正交码中的相关约束λ相对应,可见,光正交码与区组设计有着一定的对应关系。如果不同的SBIBD$(F,K,1)$不仅能满足自相关条件,而且能满足互相关条件,则它们就是一个光正交码。因此,构造光正交码的关键是能构造出满足自相关条件、互相关条件的区组设计。

3.2.2 构造满足自相关条件的区组设计

从循环差集与循环对称不完全区组设计CSBIBD$(F,K,1)$可见,二者一一对应,若能生成循环差集就能生成CSBIBD$(F,K,1)$,因此问题转化为如何生成循环差集。因为循环差集将光正交码中

任意两个脉冲位置的距离全部包括，所以它只能生成码字为 1 的光正交码。要生成具有多个码字的光正交码，就需要构造差集合而不是循环差集。

3.2.3 构造差集合

完备距离循环排列(CPPD)法要求圆周上的数通过邻加必须产生 $1,2,\cdots,F-1$ 各一次，如果所选的这些数通过邻加只能产生 $1,2,\cdots,F-1$ 这些数中的某几个数一次，而不是全部，这样就可以构成差集合。因此，对 CPPD 法加以改进，形成非完备距离循环排列法(CPID)。CPID 算法如下：

1) 在圆周上设定 λ 个“1”位置，在各个“1”之间加入 $K-\lambda$ 个彼此不同大于 1 的正整数，使圆周上的数字之和为 F；

2) 依次检查圆周上各数通过邻加所生成的数是否只能出现 λ 次。如满足，则结束算法，记此 K 个数为 $l_i(i=1,2,\cdots,K)$，否则回到步骤 2)；

3) 利用 $b_i=1+\sum_{t=1}^{i-1} l_t$ 生成 $D(F,K,1)$ 及 $D=\{b_1,b_2,\cdots,b_K\}$。

由于步骤 2) 生成的 K 个数，通过邻加所能生成的数的个数为 $K(K-1)$[3]，循环差集所能生成的不同的数为 $F-1$ 个，因此若能生成步骤 2) 的 K 个数，则由该 K 个数生成差集合，由差集合生成的光正交码的码字数量一定可以达到公式(3) 的 $\Phi(F,K,\lambda)$，故一定是最佳光正交码。

4 最佳 $(F,K,1)$ 光正交码的构造步骤

用非完备距离循环排列法构造最佳 $(F,K,1)$ 光正交码的算法如下：

第一步　构造差集合；

1) 给定 $F,K,1$；

2) 在圆周上设定 K 个不同的数，使圆周上的数字之和为 F；

3) 依次检查圆周上各数通过邻加后生成的数中是否含有与原 K 个数相同的数，如果存在，则将该 K 个数删除；否则，记这 K 个数为 $l_i(i=1,2,\cdots,K)$；

4) 将选定的 K- 元数集存入集合中。

第二步　由差集合生成 $(F,K,1)$ 光正交码；

由选定的 K 元集合(其中 K 元集合中的元素代表光正交码中两个相邻“1”的相隔位数)，利用公式 $b_i=1+\sum_{t=1}^{i-1} l_t$ 生成新的数集，把它们作为 $(F,K,1)$ 光正交码的码字，这样便得到了一个 $(F,K,1)$ 光正交码。

第三步　检查 $(F,K,1)$ 光正交码的自相关性，互相关性；

由于在设计差集合时已考虑了 $(F,K,1)$ 光正交码的自相关性，其自相关函数旁瓣为“1”，但是由每个差集合所生成的 $(F,K,1)$ 光正交码的码字，并不能直接说明任意两个码字的交集很小，因此需检验其互相关性。首先任意选定一个码字，若另一个码字与它的交集为“1”，则它可被选为第二个码字，依此下去。检验方法可用差矩阵的方法。差矩阵定义为

$$A_{x,y}=\{C_{y,j}-C_{x,i}\}(\text{模 } F),$$
$$0\leqslant i\leqslant F-1,0\leqslant j\leqslant F-1 \tag{5}$$

若 $A_{x,y}$ 中的元素有两个或两个以上相同，则不满足互相关条件，否则满足。

第四步　判断是否为最佳的 $(F,K,1)$ 光正交码；

检查所生成的光正交码的码字数量是否与(3)式中取等号时所计算的整数值相等。若相等，则可得到最佳 $(F,K,1)$ 光正交码，结束算法；否则，回到第一步。

5 计算机设计流程及仿真结果

以上过程可用计算机编程来实现，设计流程如图 1 所示。

仿真结果：

1) 请输入 F,K：这里输入 40,3，即 $F=40,K=3$，生成的光正交码组为：

1 2 4；1 5 10；1 7 15；1 8 24；1 11 22；1 13 26；

共 6 个码字。上述每个码组中的数字表示光正交码中非零比特所在的位置，其余位置都为零，码字长为 40。

验证是否为最佳光正交码，将 $F=40,K=3$ 代入公式(3)，即 $\Phi(40,3,1)\leqslant\left[\frac{(40-1)}{3(3-1)}\right]$ 得，$\Phi(40,3,1)\leqslant 6$，$\Phi(40,3,1)$ 最大为 6，而仿真所生成的码字数量也为 6，因此生成的是最佳光正交码。

2) 请输入 F,K：46,4，生成的光正交码码组为：

1 2 4 7；1 5 13 22；1 8 19 32；

共 3 个码字。同样验证是否为最佳光正交码，将 $F=46,K=4$ 代入公式(3) 得，$\Phi(46,4,1)\leqslant 3$，$\Phi(46,4,1)$ 最大为 3，而仿真所生成的码字数量也为 3，因此生成的是最佳光正交码。

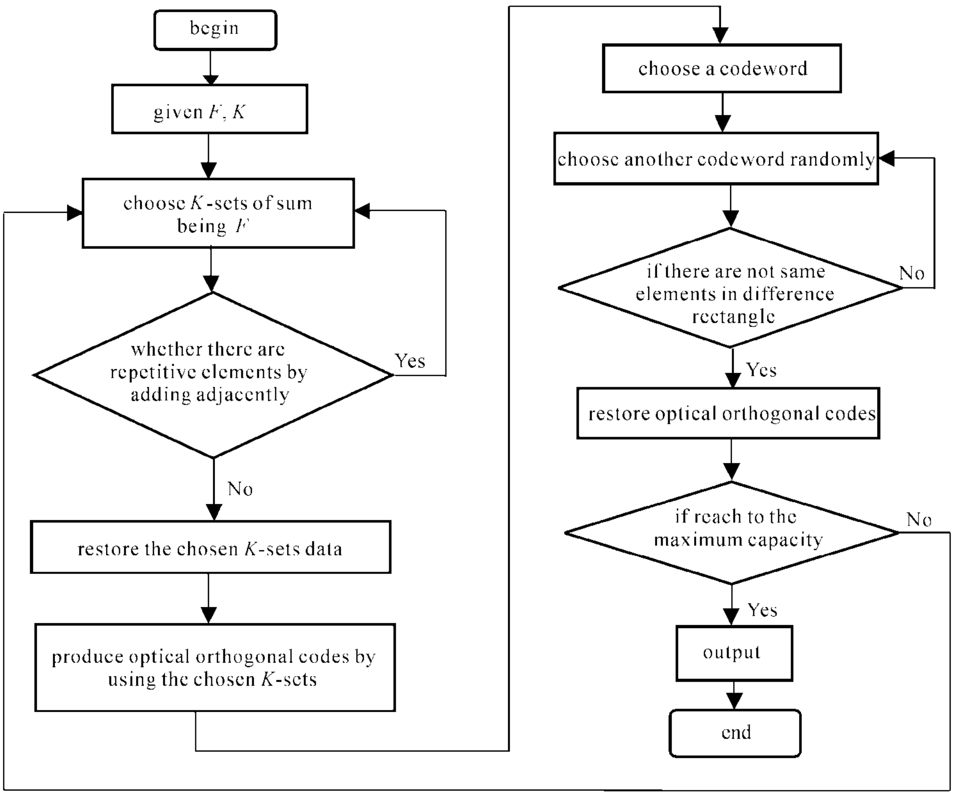

图 1 最佳 (F,K,1) 光正交码的构造算法流程图

Fig. 1 Diagram block of construction optimal (F,K,1) OOC's

6 结 论

针对目前较难构造最佳 (F,K,1) 光正交码的状况,通过对最佳光正交码、区组设计、差集合、完备距离循环排列以及它们之间相互联系的研究,提出了一种构造最佳(F,K,1)OOC's 的算法。该算法先利用所提出的 CPID 法构造差集合,再用差集合生成光正交码,然后分别检查其互相关性、码字数量是否满足最佳正交码所要求的码字数量来实现。该算法实现方法简单,可以构造出任意码长、码重的最佳 (F,K,1) 光正交码。采用最佳 (F,K,1) 光正交码的光 CDMA 通信系统一方面可以具有多用户干扰小,可靠性高的特点,另一方面可以使系统的容量增大,因此该算法对光 CDMA 系统的实用化具有重要意义。

参 考 文 献

1 J.-G. Zheng, W. C. Kwong. Effective design of optical code-division multiple access networks by using the modified prime code [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(3): 229～230

2 F. R. K. Chung, J. A. Salehi, V. K. Wei. Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications [J]. *IEEE Transaction Theory*, 1989, **35**(3):595～604

3 J. A. Salehi. Code division multiple access techniques in optical fiber network—part Ⅰ: fundamental principles [J]. *IEEE Transaction on Comm.*, 1989, **37**(8):824～830

4 Jin Fan, Chen Zhi. Combinatorial Coding Theory and Applications [M]. Shanghai: Shanghai Technology Publishing Company, 1995