

光同步 CDMA 多址干扰消除技术及其性能分析*

李晓坪** 郑露 吴诗其

(电子科技大学通信学院信息所 成都 610054)

【摘要】 提出了一种简便易行的光同步 CDMA 多址干扰抑制方案。该方案采用修正的素数码, 在每个用户的接收端设置一组相关器和一个排队网络。由于所采用的码的相关特性, 这种算法利用了其他用户所包含的信息, 对于发“0”时, 能完全消除多用户干扰; 对于发“1”时, 除消除一部分干扰以外, 可以大大减小误码概率。数值结果充分说明了这一点。

关键词 光同步 CDMA; 多址干扰; 修正的素数码; 相关器

中图分类号 TN929.5

光通信拥有较普通无线通信更宽的带宽, 能提供更高的传输速率。而 CDMA 技术具有容量大、抗干扰能力强、容易支持多媒体业务的优点, 但其需要较大的扩频带宽。因此, 采用光 CDMA (OCDMA) 能很好的满足下一代全球移动通信系统的要求。

在 CDMA 移动通信系统中, 多用户干扰一直是限制系统性能的一个关键因素^[1], 对此本文提出了一种简便易行的光同步 CDMA 多址干扰抑制或消除方案。系统采用修正的素数码, 在每个用户的接收端设置一组相关器, 对每一个相关器的输出功率通过一个排队网络进行排队。由于所采用的码的相关特性, 通过减法器减去该用户的排队序号来达到抑制或消除多用户干扰的目的。它不仅简便易行, 而且通过严格的数学分析表明该方案有较好的性能。

1 MPC 码的构造及其特点

光直接探测 CDMA 采用强度功率检测的非相干光通信方式, 通过在一个比特时间内用发送一个激光脉冲来代表信号 1, 用不发脉冲来代表 0。接收端通过判定每一比特时间内接收脉冲光场出现与否来实现解码。光信号功率是非负的, 因此它可看成是一取值于(0, 1)二值域的序列。而传统 CDMA 当中采用的是双极性的正负电平, 可看成取值于(-1, +1)二值域上的序列。大量的研究表明, 在传统 CDMA 中, 能够满足相关特性要求的伪码序列对光 CDMA 而言, 并不一定具有良好的相关性。

素数码 (Prime Code)及修正的素数码(Modified Prime Code)能较好地满足系统对扩频序列码的要求, 其特性为: 1) 较大的自相关峰值; 2) 较小的偏相关峰值 (即自相关的旁瓣小); 3) 较小的互相关值。

1.1 素数码的构造

选一素数 p 的构造域 $GF(p)=\{0,1,\dots,p-1\}$, 从 $GF(p)$ 中任选一元素 x , 令其和 $GF(p)$ 中的所有元素逐个相乘, 然后将乘积对 p 取模, 这样可得到一序列 S_x , 由不同的 x 可获得不同的序列, 所有的 p 个序列构成一个序列集 S 。例如取 $p=5$

	0	1	2	3	4	S
0	0	0	0	0	0	S_0
1	0	1	2	3	4	S_1
2	0	2	4	1	3	S_2
3	0	3	1	4	2	S_3
4	0	4	3	2	1	S_4

1998年12月27日收稿

* 电子部“九五”预研基金资助项目

** 男 27岁 硕士

由 s_x 可构造一长为 p^2 的码字序列 c_x ，其中 c_x 的第 i 个元素 c_{xi} 取值如下

$$c_{xi} = \begin{cases} 1 & i = s_{xj} + jp, j = 0, 1, \dots, p-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

不同的码序列 c_x 构成一码序列集合 c 。 S_{xj} 表示 S_x 中第 j 个元素。

1.2 修正的素数码的构造及其特点

对于码长为 p^2 的素数码，其码字个数为 p ，作为扩频地址码只能容纳较少的同时通信的用户数。为了增加码地址的数目，文献[2]提出了一种新的修正的素数码，可用的码地址数可达到 p^2 个，其代价是需要用户在用户间建立同步。

素数码序列集 s 中每一个非零序列 $s_x, x \in (1, 2, \dots, p-1)$ ，每循环左移位一位便得到一个不同的序列，每一个不同的序列会映射为一个码长为 p^2 的码字，记 s_x 左移 r 位后的序列为 s_{xr} ，其中 $r \in (1, 2, \dots, p-1)$ ，其对应的码字为 d_{xr} ， d_{xr} 的第 i 位元素 d_{xri} 为

$$d_{xri} = \begin{cases} 1 & i = s_{xrj} + jp, j = 0, 1, \dots, p-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

记 s_{x0} 为 s_x 左移 0 位，即不移位，加上其他 $p-1$ 种移位情况，可得 p 个码字。另外由序列 S_0 按照式(1)产生的码字序列 C_0 及其循环移位 $p-1$ 次共可获得 p 个码字。故对码长为 p^2 的素数码总共可获得 p^2 个码字，构成集合码字集 d 。

由 s_x 及其另外 $p-1$ 个移位形成的序列映射的码字 d_{xr} 为一组 d_x 。

修正的素数码序列的相关函数 R_{d_x, d_y} 具有如下性质

$$R_{d_x, d_y} = \begin{cases} p & d_x = d_y \\ 0 & d_x \text{ 和 } d_y \text{ 属于同一组, 且不相等} \\ 1 & d_x \text{ 和 } d_y \text{ 不属于同一组} \end{cases} \tag{3}$$

以上的相关性是在同步状态下获得的。

2 系统模型及其性能分析

2.1 系统模型

图 1 为具有多用户干扰抑制或消除功能的光同步 CDMA 直接探测接收机的方框图。

假定用户 1 为所考虑的接收对象， $r_{(t)}$ 为接收端接收到的带有干扰的信号，其中包括背景噪声，多用户干扰噪声等。由于我们的目的是为了考察多用户干扰对系统性能的影响，故只考虑多用户干扰噪声。这里假设各用户间是同步的，且各用户采用 MPC 码作为其地址码。

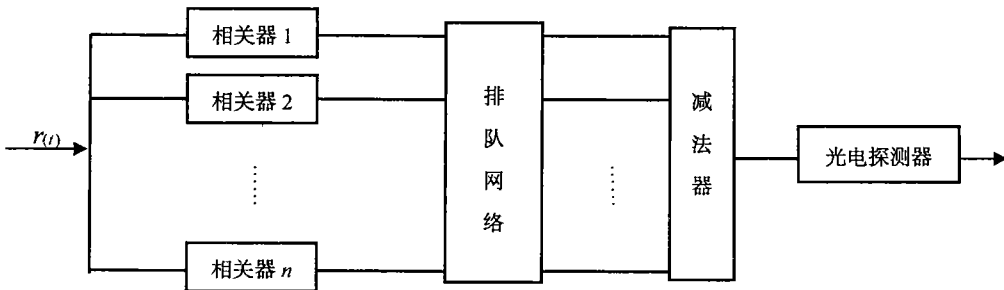


图 1 光同步 CDMA 直接探测接收机

在接收机的前端设置了 n 个相关器， n 为系统中能容纳的最大的同时通信的用户数，每个相关器分别用不同的 MPC 码和接收到的信号 $r_{(t)}$ 进行相关运算。相关运算后得到的值送入排队网络按其值的大小进行排序。相关器输出值的大小反映了不同用户经一次相关运算后的功率值的大小。由于

MPC 码间的相关特性，即如果码重为 p ，在同步条件下，其自相关峰值为 p ，如不同用户所采用的码不属于同一组，其互相关值为 1，否则为 0。

排队的目的是为了抑制或消除多用户干扰，而同组用户（即用户所选择的扩频地址码属于同一组）间的相互干扰为零，因此与所考虑用户同组的这些相关器输出的功率值不参与排队。

当同时通信的用户数为 p 到 $p-1$ 个时，有可能出现发“0”和发“1”时在收端相关器输出的功率值大小完全一样的情况。比如， $p=5$ 、系统中有 5 个用户同时传数据“1”，并且这 5 个用户所选用的地址码都处于同一组，则接收端每个相关器输出的功率值皆为 5。为了避免这种情况，规定：对每组的 p 个码，只选用其中的 $p-1$ 个，而留下一个不用。这样就保证了发“1”时收端相关器输出的功率值比发“0”时收端相关器输出的功率值大。

当有多个用户同时发“1”时，这些用户在接收端相关器输出的功率值有可能相等。这时这些用户间的排队顺序是随机的。但要注意与所考虑的那一个用户同组的用户不参与排队。若所考虑的用户发“1”，而另外有 y 个不同组用户发“1”，这时假定所考虑的用户排序位置 x 服从均匀分布。

设第一个用户为参考用户，由所选用的 MPC 码的性质可知：相关器 1 所输出的信号含有其他用户的干扰，干扰值的大小取决于同时有多少用户在发送“1”信号，并且其所采用的 MPC 码是否属于同一组。

若第一个用户发“1”码，且它在排队网络里排队序位为 x ，由于发“1”码用户在接收端相关器输出的功率值比发“0”码的用户在接收端相关器输出的功率值大，且排队网络是按照各相关器的输出功率值大小进行排序，功率值大的排在前面，小的排在后面，则排在其前面的 $x-1$ 个用户必定发“1”码，由第二部分所叙述的 MPC 码的相关性可知，用户 1 受到的多址干扰至少为 $x-1$ ，在减法器里从第一个相关器输出的功率值中减去 $x-1$ ，这样能大大抑制多址干扰的影响。若第一个用户发“0”码，由于多用户干扰等噪声的影响，其功率值大小排在第 x 位，因发“1”码用户的功率值大小皆排在第一用户的前面，因此减去 $x-1$ 能完全消除多用户干扰的影响。注意由于功率值不能为负，最小为零。

2.2 性能分析

设系统中同时通信的用户数为 k 个，总的可供选用的 MPC 码的个数为 p^2 个，共分为 p 组，每组有 $p-1$ 个 MPC 码。若有 $h-1$ 个用户选用的地址码与第一个用户所选用的地址码属于同一组，则 h 的概率分布为

$$P_r\{H=h\} = \frac{\binom{p^2 - p - p + 1}{k-h} \binom{p-1-1}{h-1}}{\binom{p^2 - p - 1}{k-1}} \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \quad (4)$$

$$\begin{cases} h_{\min} = \max\{1, k - (p-1)(p-1)\} \\ h_{\max} = \min\{k, p-1\} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\max\{\alpha, \beta\}$ 是 α 与 β 间的较大值， $\min\{\alpha, \beta\}$ 是 α 与 β 间的较小值。调制方式采用开关键控 (OOK)，即传“1”码时，发送端根据所选用的光扩频码发送一系列的脉冲，若传的是“0”码，就不发送脉冲。设同时通信的 k 个用户中，除去与第一个用户选择同一组 MPC 码的用户外，另有 y 个传“1”码，若发端传“1”传“0”的概率相等，即为 1/2，则 y 服从的概率分布为

$$P_r(y) = \binom{k-h}{y} \left(\frac{1}{2}\right)^y \left(\frac{1}{2}\right)^{k-y} = \binom{k-h}{y} \left(\frac{1}{2}\right)^k \quad (6)$$

$y \in (0, k-h)$

假定第一个用户传“1”码时其光功率值在 $y+1$ 个传“1”码的用户中的大小位置服从均匀分布。用 x 表示第一个用户功率经排队网络排队后所处的位置。

第一个相关器输入排队网络的值为 s_1

$$s_1 = \begin{cases} p + y + I & b_1 = 1 \\ y + I & b_1 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 b_1 为第一个用户所传的数据信号值， y 代表所受到的其他用户的多址干扰， I 代表受到的热噪声及暗电流等噪声的干扰， p 代表数据信号为“1”时的光功率值。

若第一个用户传“1”码，且所处的位置为 x ，则其前面 $x-1$ 个用户皆传“1”码；根据上述可知，第一个用户所受多址干扰至少为 $x-1$ 。因此可以减去 $x-1$ 以抑制多址干扰。经过减法器后设第一个用户的功率值为 s_2

$$s_2 = \begin{cases} p + y - x + 1 & b_1 = 1 \\ y - x + 1 & b_1 = 0 \end{cases} \quad (8a)$$

当 $b_1=0$ 时， s_2 有可能为负值，但实际上光功率不可能取负值，因此式 (8a) 应修正为

$$s_2 = \begin{cases} p + y - x + 1 & b_1 = 1 \\ y - x + 1 & b_1 = 0 \text{ 且 } y - x + 1 > 0 \\ 0 & b_1 = 0 \text{ 且 } y - x + 1 \leq 0 \end{cases} \quad (8b)$$

由于热噪声等干扰不是很大，故在下面只考虑 $y - x + 1 \leq 0$ 的情况而忽略 $y - x + 1 > 0$ 的情况。

从减法器出来的信号送到光电检测器，其相应的光电流输出服从泊松分布，当 $b_1 = 1$ 时，其输出均值为 m_1 ，当 $b_1 = 0$ 时，其输出均值为 m_0

$$\begin{aligned} m_1 &= (p + y - x + 1)\lambda_s T_c + p\lambda_o T_c \\ m_0 &= p\lambda_o T_c \end{aligned} \quad (9)$$

用 Y_i 代表光电检测器的输出值，设判决门限电平为 θ ，因此系统误码率 p_b 为

$$p_b = p(b_1 = 1)p_{b1} + p(b_1 = 0)p_{b0} \quad (10)$$

$$p_{b1} = \sum_h \sum_{y=0}^{k-h} \sum_{x=1}^{y+1} \sum_{a=0}^{\lfloor \theta \rfloor} \text{pos}_{(a,m_1)} P_{r(x)} P_{r(y)} P_{r(h)} \quad (11)$$

$$p_{b0} = \sum_{k=\theta}^{\infty} \text{pos}_{(k,m_0)} \quad (12)$$

$$\text{pos}_{(a,m)} = \frac{e^{-m} m^a}{a!} \quad (13)$$

式中 $\lfloor x \rfloor$ 代表小于 x 的最大整数， $\lceil x \rceil$ 表示大于 x 的最小整数。 p_{b1} 、 p_{b0} 分别表示传“1”、传“0”的误码率。

2.3 仅用相关器时的误码率性能分析

仅用相关器时的系统框图如图 2 所示。

接收信号是包含有用信号、多址干扰信号、热噪声干扰等的混合信号。不同的接收终端对所需接收的信号进行相关接收。相关器输出的值送到光电检测器转变成电信号输出，再在判决器进行“0”、“1”判决。根据上节的分析过程，可以类似地求得其误码率公式

$$\begin{aligned} m_1 &= (p + y)\lambda_s T_c + p\lambda_o T_c \\ m_0 &= p\lambda_o T_c + y\lambda_s T_c \end{aligned} \quad (14)$$

$$p_{b1} = \sum_h \sum_{y=0}^{k-h} \sum_{x=1}^{y+1} \sum_{a=0}^{\lfloor \theta \rfloor} \text{pos}_{(a,m_1)} P_{r(x)} P_{r(y)} P_{r(h)} \quad (15)$$

$$p_{b0} = \sum_h \sum_{y=0}^{k-h} \sum_{x=1}^{y+1} \sum_{a=0}^{\alpha_1} \text{pos}_{(a,m_0)} P_{r(x)} P_{r(y)} P_{r(h)} \tag{16}$$

其中 h 的取值范围与上节的相同。总的误码率为

$$p_b = p(b_1 = 1)p_{b1} + p(b_1 = 0)p_{b0} \tag{17}$$

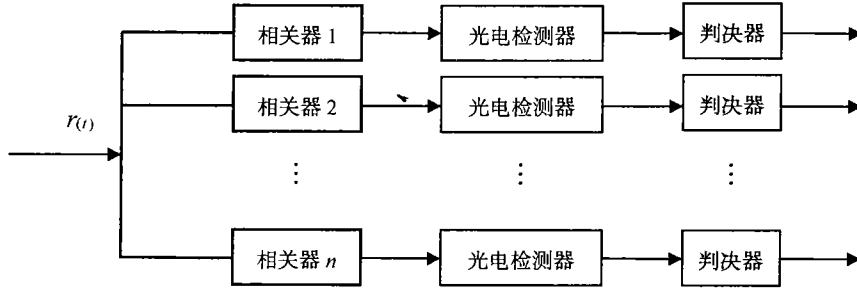


图 2 仅用相关器时的系统框图

3 数值结果及结论

图 3 为在 $p = 5$ 、 $\lambda_s T_c = 6$ 、 $\lambda_0 T_c = \lg 2$ 的情况下的误码率曲线，其中判决门限 θ 取最佳值。曲线 A 表示在消除多址干扰的情况下的曲线，曲线 B 表示在未进行多址干扰抑制或消除时直接接收的误码率曲线。从图中可以看出，在同时通信的用户数较小时，多址干扰消除方案能改善误码性能两个量级左右，但随着同时通信的用户数 k 的增加，多址干扰消除方案较直接相关接收显示出越来越良好的性能。其原因是我们所采用的多址干扰减弱或消除方案对传数据信号“0”时能完全消除其他用户的多址干扰；而对于传“1”时，除了按照算法消除一部分干扰外，剩下的一部分干扰起到了增强信号功率的作用，从而能使得误判概率大大减小。

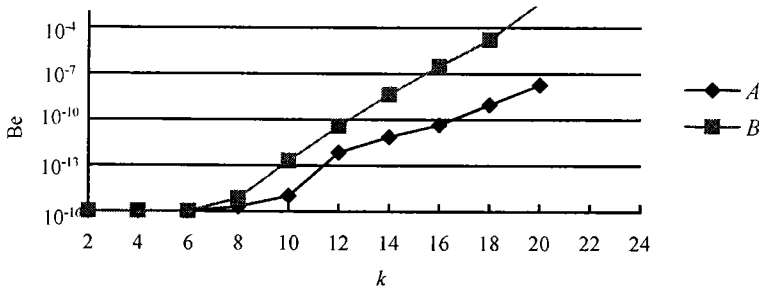


图 3 误码率曲线

参 考 文 献

- 1 李仲令, 王晓蕾. 序列相关特性与 CDMA 系统的多址干扰. 电子科技大学学报, 1997, 26(2): 132~136
- 2 Wong W C, Perrier P A, Prucnal P R. Performance comparison of asynchronous and synchronous code_division multiple access techniques for fiber_optic local area networks. IEEE Trans commun, 1991, 39:1 625~1634
- 3 Ohtsuki T, Sato K. Direct_detection optical synchronous CDMA systems with double optical hard_limiters using modified prime sequence codes. IEEE JSAC, 1996, 14:1 879~1 887
- 4 Camachi Y, Ohtsuki T. Optical synchronous PPM/CDMA systems using co_channel interference cancellation. Globecom'95, 1995:2 161~2 165

Optical Synchronous CDMA Multiple Interference Cancellation Technology and Performance Analysis

Li Xiaoping Zheng Lu Wu Shiqi

(Institute of Communication and Information Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, a simple optical synchronous CDMA multiple access interference suppress and cancellation scheme are proposed. The system uses modified prime code(MPC). Each user is set a bank of correlator and the correlator's output power is queued in a network. Because of the MPC's correlation characteristics, multiple user interference is suppressed. The algorithm can completely cancel multiple user interference when "0" signal is transmitted. A part of multiple user interference cancelled as the remainder can enhance the user's signal power when "1" signal is transmitted. The numerical results show that this method can decrease the BER greatly.

Key words optical synchronous CDMA; multiple interference; modified prime code; correlator

· 征订启事 ·

· 全国优秀科技期刊 · 信息产业部精品期刊 · 全国中文核心期刊 · IEE INSPEC 收录 · 入《中国学术期刊(光盘)》 · 中国期刊网

电子元件与材料

▲ 集学术、技术、信息于一体, 主要报道新型阻容元件、电子陶瓷等功能材料、敏感元件与传感器、HIC 及光电元件等领域的科技成果、专题综述, 介绍先进的技术、工艺、设备、材料和新优元件及其典型应用, 提供行业发展动态和国内外经济、市场信息。

▲ 开展广告业务, 在设备、原料 → 元器件 → 整机企业间架桥铺路, 沟通信息。委托中国期刊网将本刊广告向世界发布。

▲ 读者对象: 从事电子元件与材料的科研、设计、测试、生产及使用人员, 高校师生, 高层管理、决策人员, 从事自动控制、计算机应用等领域的科技人员。

▲ 本刊为大 16 开本, 72 页, 小 5 号字, 内容丰富, 信息量大。

单价: 8 元, 全年 48 元

地 址: 成都市 82 信箱 10 分箱(二环路东二段 29 号)

发行范围: 国内外公开发行

邮 码: 610058 电话/传真: 028-4325875

邮发代号: 62-36

E-mail: hmxx@mail.sc.cninfo.net

国外发行: 中国出版对外贸易总公司(北京 782 信箱)

http://www.chinainfo.gov.cn/periodical

欢迎赐稿、订阅、刊登广告