文章编号 :1001-5078(2004) 03-0238-04

光盘存储中调制技术的研究进展

杨　欣 ,巩马理 ,黄　磊 ,张海涛 ,闫　平
(清华大学精密仪器系数字光电与激光技术实验室 ,北京 100084)

摘　要 :调制技术是高密度光盘存储中的关键技术 ,是提高光盘存储密度并保证数据正确读取的重要途径。文中综述了光盘存储中调制技术的研究进展 ,着重介绍了其原理和性能 ,并探讨了今后的发展趋势。

关键词 :光盘存储 ;调制技术 ;EFM ;EFMPlus
中图分类号 :TQ591　　**文献标识码** :A

Progress in Study on Modulation for Optical Disc Storage

YANG Xin , GONG Ma-li , HUANG Lei , ZHANG Hai-tao , YAN Ping
(Digital Photonics Lab , Dept. of Precision Instruments , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

Abstract :Modulation is a key technology in high-density optical disc storage. It can improve the density of optical disc and realize stable data reading. In the paper , the latest researches progress of modulation for optical disc storage was reviewed. The principle and performance of modulation were given in detail. An overview on the future of modulation for optical disc storage was discussed.

Key words :optical disc storage ; modulation technology ; EFM ; EFMPlus

1　引　言

光盘存储是和磁存储并存的重要存储方式。光盘存储系统由 CD 发展到目前的 DVD ,并即将发展为下一代的蓝光 DVD 系统。光盘系统的发展伴随着存储密度的提高 ,这是由日益膨胀的信息量所要求的。调制技术作为提高光盘存储密度的重要手段也在不断的发展[1-2]。

在光盘系统中 ,数据是以信息坑的方式存储在盘片上的 ,信息坑的"岸"和"坑"分别代表数据"1"和"0"。读取数据时聚焦光斑照射在信息坑上 ,通过"岸"和"坑"的反射率不同 ,探测器接收到不同的光强 ,从而恢复数字信号"1"和"0"。聚焦光斑的直径取决于光学拾取头的物理参数 ,对于确定的激光器波长和物镜数据孔径 ,为一定值。为了提高存储密度 ,实际系统中读取信息的聚焦光斑的直径大于最短信息坑的长度 ,但这同时使读出系统成为带宽受限系统 ,造成读出波形失真 ,产生码间串扰 ,增加了误码率。采用适当的调制技术 ,可以降低原始数据码流的频带宽度 ,减小带限系统的影响 ,因此在相同系统误码率的情况下 ,可以提高光盘存储密度。数据读出并判决时需要稳定的同步时钟信号 ,未调制的信号中不包含任何时钟信息 ,需要通过调制解决。另外 ,光盘的伺服系统和数据恢复系统要求读出的数据码流具有低的低频成分 ,而未调制的数据具有很高的低频成分 ,会影响伺服系统和数据恢复系统正常工作。通过调制可以降低低频成分 ,这是调制的另一个重要作用。本文综述了近二十年来光盘存储中调制技术的原理和发展。

作者简介 :杨　欣(1977 -) ,男 ,清华大学精密仪器与机械学系博士研究生 ,主要从事高密度光盘存储、无线光通信的研究。
E-mail :yangxin00 @mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期 :2003-08-14 ;**修订日期** :2003-10-21

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2　光盘存储中调制技术的研究进展

为了提高光盘存储容量并保证时钟信号的正确提取,光盘存储中采用有限游程长度(RLL)调制技术。有限游程长度码是由两个参数定义的二进制序列,$T_{min} = (d+1)$和 $T_{max} = (k+1)$,分别代表最小游程长度和最大游程长度。游程长度是指码流中两个相邻的'1'之间连续的'0'的个数。参数 d 控制码流的最高调制频率,参数 k 确保同步读时钟信号的正确提取[2]。

根据参数 d 和 k 的不同,可以实现不同的 RLL 调制技术,即使 d 和 k 相同,也存在多种调制方式。因此,需要采用一些重要指标来评价各种 RLL 调制技术的优劣。调制率 $R = m/n$,其中 m 是调制前码字的位数,n 为调制后码字的位数。编码器把 m 位源信息码字转变为满足(d,k)限制的 n 位特殊码字。对于给定的(d,k),调制率 $R = m/n$ 能达到的最大值是多少呢?通过香农定理可以知道,调制率 R 的最大值被称为产生最小和最大游程长度的编码器的容量。有限游程长度码 RLL(d,k)的容量 $C(d,k)$可以由下面公式得到[3]:

$$C(d,k) = \log_2 \lambda \tag{1}$$

其中 λ 为以下方程的最大实根:

$$x^{k+2} - x^{k+1} - x^{k+1-d} + 1 = 0 \tag{2}$$

密度率 $DR = (1+d)R$,是评价 RLL 调制的最关键指标,它表现了调制在不改变光盘记录物理参数的前提下对存储容量的改善,DR 越大,存储容量越大,未调制时 $DR = 1$。也就是说,通过选择有效率的调制码,可以增加数据存储的线性位密度。除了密度率 DR,另一个主要参数是检测窗 W,它等于一个通道位的时间间隔。检测窗 W 越宽,系统在固定的位错误率要求下对允许数据峰漂移的容限越大[1]。

为了表示调制后低频成分的大小,采用 RDS 作为衡量标准。RDS 指调制后码流中'1'和'0'的个数差。假设在码流开始时 RDS 为 0,此后码流中出现'1'则 RDS 加 1,出现'0'则 RDS 减 1,由此可得到 RDS 曲线。通过控制 RDS,采用使 RDS 绝对值最小的策略,有多种方法可以控制码流的低频成分,使其符合系统的要求。

通过采用 RLL 调制技术进行编码后的数据在刻录到光盘盘片上之前需要进行 NRZI 变换,才能得到具有最小信息坑和最大信息坑长度的数据。NRZI 变换是指:当输入二进制数据为'1'时产生沿(上升沿或下降沿)的跳变,当输入二进制数据为'0'时不产生跳变[4]。在下文中分别描述了目前几种最重要的调制技术,并对它们进行了比较。

2.1　CD 采用的调制技术

CD 已经成为一种重要的存储媒介,它的存储容量为 650M 字节。在 CD 中采用的调制技术为 8 - 14 调制(EFM),EFM 是 RLL(2,10)调制的一种,调制时每 8 位组成一个码字,根据调制编码表,产生新的 14 位的码字,此码字符合最小游程长度和最大游程长度的编码规则要求。编码之后每两个 14 位的码字之间插入三个拼合位,通过拼合位可使新的连续码流继续满足游程长度的要求,同时减小 RDS 的绝对值,从而降低码流的低频成分,使之符合光盘系统的要求。拼合并不包含实际的信息,在解码时先把它们从码流中去除,然后再进行解码变换[2]。

2.2　DVD 采用的调制技术

DVD 光盘具有比 CD 更大的存储容量,为 4.7G 字节。与此同时,DVD 中采用的调制技术也进一步发展为 EFMPlus 调制。EFMPlus 也是 RLL(2,10)调制的一种,为 8 - 16 调制,由 Immink 于 1995 年提出[2]。EFMPlus 是对 EFM 的改进,它不需要额外的拼合位,可以提高 6 %的存储容量。

EFMPlus 的编码原理可用具有 8 输入、16 输出和 4 状态的离散有限状态机来描述,4 种状态中的每一个码字由进入、离开及给定字的类型决定[5]。离开状态的码字的选择应使得进入和离开状态的连续两个字满足$(d=2, k=10)$的限制条件。EFMPlus 编码表中有三个集合:源字、码字和状态字,并有两个函数:输出函数和下一个状态函数。设时刻 t 编码码字为 b_t,输出码字为 x_t,前一个字输出后的状态为 s_t,则有输出函数 $h(t)$和下一个状态函数 $g(t)$为

$$x_t = h(b_t, s_t) \tag{3}$$

$$s_{t+1} = g(b_t, s_t) \tag{4}$$

由编码过程可知,每一个源字至少由两个码字表示,因此在接收时需要知道码字和编码器的状态才可解码。即

$$b_t = h^{-1}(x_t, s_t) \tag{5}$$

EFMPlus 抑制低频成分也采用控制 RDS 的方式来实现。编码时有 344 个码字可用,由于 8 位源字只需 256 个码字,因此剩余 88 个码字可用于进行直

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

流控制。88个多余码字用于源字0～87的替换码字,因此整个编码表由主表和替换表组成[5]。主表的0.·87码字的RDS为负,而替换表中的RDS主要为正,通过选择主表和替换表,可降低编码后码流的RDS的绝对值,从而抑制抵频成分。

2.3 蓝光DVD研究中重要的调制技术

2002年2月19日,索尼、飞利浦和先锋等九大公司联盟提出下一代大容量光盘纪录格式的基本规格,称为"Blu-ray Disc"。Blu-ray Disc使用波长405nm的蓝紫光激光器作为光源,能够在12cm的单层单面光盘上实现直到27G字节的容量。Blu-ray Disc采用的调制编码技术是一种改良的RLL(1,7)调制,称为17PP[6]。17PP除了具有RLL(1,7)码的基本特性外还具有两个额外特征:Parity Preserve(奇偶保留)和Prohibit RMTR(禁止重复最小运行长度转换)。

RLL(1,7)调制由Jacoby于1984年首先提出,它采用look-ahead(前向查找)结构,具有有限的错误传播特性[1]。RLL(1,7)码的调制率为2/3,密度率为1.33。(1,7)码的编码过程通过基本编码表和补充编码表实现,在基本编码表中,两位输入码字变换为三位输出码字。然而,仅仅使用基本编码表,连续的输出码字会存在违背 $d=1$ 运行长度限制的情况,此时需要使用补充编码表,对两个相邻的输入码字统一进行变换,使两个输出码字符合 $d=1$ 的要求。通过特殊码字'000'可以标识使用的是补充编码表,从而保证正确译码。Parity Preserve特性是指:编码前码字中'1'的个数和编码后码字中'1'的个数或者都是奇数的,或者都是偶数的。使用这个特性能够有效的得到和保证具有低的低频成分的记录信号,因此在回放过程中可以使用高通滤波器,使得位信号检测对信号电平变化不敏感。由于具有Parity Preserve特性,对低频成分控制时可以采用在编码前插入直流控制位的方法来取代传统的编码后添加拼合位的方法,从而降低额外开销。在具有同样直流控制块长度的情况下,采用编码前直流控制位的方法额外开销为2.2%,而采用编码后拼合位的方法额外开销为5.8%。Prohibit RMTR特性是指:限制连续的最小运行长度(2T)的个数为6。此特性增加了系统容许偏差,尤其是切向倾斜容限,因此增加了系统的鲁棒性。通过在调制编码体系中仔细选择码字并使用补充规则可以阻止长的连续最小运行长度序列的出现,从而实现RMTR[6]。

此外,东芝和NEC也提出发展自己的下一代蓝光DVD光盘标准"Advanced Optical Disk",简称AOD。AOD的盘片容量为每层15-20G字节,信号处理方式为PR(1,2,2,1)ML,记录编码方式为RLL(1,9)调制。

2.4 游程长度受限码RLL(4,13)

为了进一步提高调制码的密度率DR,杨欣等在2003年提出一种新的游程长度受限码RLL(4,13)[7],此码的调制率 $R=1/3$,密度率DR=5/3。RLL(4,13)码的构造由基本编码表和两个补充编码表来实现,在基本编码表中,16个4位输入数据分别变为12位的输出数据,或称为输出码字。16个输出码字具备如下特征:每一码字中最多有两个'1';若码字中有两个'1',则两个'1'之间至少有4个'0';码字的最后三位全为'0';不包括全'0'码字。然而可以发现,仅仅使用基本编码表,当两个不同输出码字相连时依然会存在违背 $d=4$ 和 $k=13$ 限制的情况,此时就需要使用补充编码表。

为了描述方便,把当前12位码字称为P,把下一个12位码字称为S。首先解决违背 $k=13$ 的情况。当码字P以多个'0'结尾,码字S以多个'0'开头时,若两部分'0'的总个数大于13就会违背 $k=13$ 的限制,此时需要采用针对 $k=13$ 的补充规则:对码字P进行变换,把某位'0'变为'1',码字S保持不变,从而使连续'0'的个数不大于13。针对 $k=13$ 限制的补充编码表分别给出了变换前和变换后的码字P和S。然后需解决违背 $d=4$ 的情况。经过上述变换后,当P和S相连时在连续码流中仍会出现'10001'的图案,此时违背了 $d=4$ 限制的要求,需通过针对 $d=4$ 限制的补充编码表再一次对P和S进行变换,此变换可消除'10001'的图案,使输出码流满足 $d=4$ 的要求。

通过基本编码表和两个补充编码表,对输入数据进行变换可以得到满足RLL(4,13)要求的输出码字。译码时使用同样的对应规则和编码表,可由12位的码字唯一得到4位的数据,完成译码过程。RLL(4,13)码的编译码方法十分简单,实现时硬件复杂性低,可节省器件资源。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.5　其他调制技术

除了上述已经和即将得到实际应用的调制技术外,众多学者还研究了其他一些调制方式。Kim 等在 1995 年提出 RLL (4 ,20) 调制,此方法具有很高的密度率 DR,硬件复杂度低,由于采用前向查找编码方法,译码时错误传播被限制在两个码字之内[8]。Lee 在 2000 年研究了 RLL (3 ,11) 调制,也具有密度率较高的优点,同时 d 和 k 相对 RLL (4 ,20) 调制要小[9]。Hayami 等于 2000 年提出编码率为 8/15 的 RLL (2 ,10) 码 D8 - 15,此码具有比 EFMPlus 更高的密度率,并具有较好的直流分量抑制能力[10]。Wilson 等研究了具有奇偶保留特性的 RLL (1 ,8) 码,此方案在直流分量抑制方面与传统的 RLL (1 ,7) 码相比更加有效[11]。此外,kato 等提出了非对称的 8/14 调制率的游程长度受限码 ARL[12]。

2.6　调制技术的比较

衡量调制技术有几个重要指标,如密度率 DR、调制率 R、检测窗宽度 W、d 和 k 等,评价调制技术的好坏不能单纯看哪一个指标,而要对多个指标综合考虑。在实际系统中,往往要根据光盘系统的其他参数来选择合适的调制方法,使光盘容量尽可能的大,同时系统满足纠错前的原始误码率在 $1e^{-4}$ 以下的要求。表 1 对几种重要的调制技术的各项主要指标进行了比较。

表 1　几种调制技术的主要技术指标

	d	k	调制率 R	密度率 DR	检测窗宽度 W
EFM	2	10	8/17	24/17	8T/17
EFMPlus	2	10	1/2	3/2	T/2
RLL (1 ,7)	1	7	2/3	4/3	2T/3
RLL (4 ,13)	4	13	1/3	5/3	1T/3
RLL (3 ,11)	3	11	2/5	8/5	2T/5
RLL (4 ,20)	4	20	4/11	20/11	4T/11

在表 1 中 T 为编码前实际数据每位持续的时间若对于不同的调制方式 T 为定值,可见检测窗宽度 $W = RT$。

3　调制技术的发展趋势

近二十年来调制技术处于不断发展当中,EFM 和 EFMPlus 成为广泛使用的 CD 和 DVD 采用的调制方式,RLL (1 ,7) 码也将在下一代的蓝光 DVD 当中得到应用。随着光盘容量和存储密度的进一步提高,光盘系统的道间距、最小光斑尺寸和系统倾斜容限越来越小,而通道时钟速率越来越高,对信号质量的要求也越来越高。因此,调制码具有大的检测窗宽度和好的低频抑制特性将成为选择的重要依据,此类调制码将会得到更为广泛的应用。

参考文献:

[1] G V Jacoby, R Kost. Binary two-thirds rate code with full word look-ahead [J]. IEEE Trans. Mag., 1984, MAG-20 (5) :709 - 714.

[2] K A S Immink. EFMPlus: The coding format of the multimedia compact disc [J]. IEEE Trans. Cons. Electron., 1995, 41 (3) :491 - 497.

[3] K A S Immink. A survey of codes for optical disk recording [J]. IEEE Journal on Selected Area in Communications, 2001, 19 (4) :756 - 764.

[4] P H Siegel, J K Wolf. Modulation and coding for information storage [J]. IEEE Communications Magazine, 1991, 68 - 86.

[5] 徐端颐. 光盘存储系统设计原理 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000:46 - 52.

[6] T Narahara, S Kobayashi, M Hattori, et al. Optical Disc system for digital video recording [J]. Jpn. J. Appl. Phys. 2000, Pt. 1, 39 (2B) :912 - 919.

[7] 杨欣,巩马理,黄磊,等. 游程长度受限码 RLL (4 ,13) 的研究 [J]. 激光与红外, 2004, 34 (1) :56 - 58.

[8] M G Kim, J. H. Lee. (4 ,20) runlength limited modulation code for high density storage system [J]. Electron. Lett., 1995, 31 (7) :539 - 541.

[9] J H Lee. Run-length limited (3 ,11) code for high density optical storage systems [J]. Electron. Lett., 2000, 36 (9) :810 - 811.

[10] A Hayami, J Tonami, M Mochizuki, et al. New 8 - 15 modulation code and reproducing techniques for high-density optical recording [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, Pt. 1, 39 (2B) :871 - 872.

[11] W Y H Wilson, K A S Immink, X B Xi, et al. A comparison of two coding schemes for generating DC-free runlength-limited sequences [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, Pt. 1, 39 (2B) :815 - 818.

[12] T Kato, Y Katayama, H. Yamakawa, et al. Performance-evaluation of asymmetrical run-length-limited code for optical disks [A]. ODS topical meeting, 2001, 79 - 81.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net