

多阶光存储的调制原理分析与编码设计研究^{*}

胡 华 熊剑平 徐端颐 齐国生 肖家曦 胡 恒

(清华大学精密仪器与机械学系, 光盘国家工程研究中心, 北京 100084)

(2005 年 3 月 25 日收到, 2006 年 6 月 19 日收到修改稿)

根据编码理论的状态切分算法, 提出一种新型的 8 阶 (1, 3) 游程长度受限码, 在最小记录符上能够存储 3.0 比特的用户数据, 并且编码与译码逻辑简明, 可用于未来高密度多阶游程长度调制光盘系统。

关键词: 多阶光存储, 调制编码, 多阶游程长度受限码, 状态切分算法

PACC: 4230N, 4280T

1. 引 言

信息技术的发展对光盘系统的存储容量和数据传输率提出了越来越高的要求. 如果改变记录符的形貌大小使得读出信号呈现多阶特性, 或者采用新型的多阶记录介质并利用信号幅值和记录符长度同时记录信息, 则可以实现与传统二值存储完全不同的多阶光存储. 在不改变光学参数的情况下显著提高信息记录密度. 多阶光存储的实质是利用了光与记录介质之间的相互作用: 光对记录介质产生作用, 同时介质对光的某些特性进行调制, 这些特性的改变多于两个状态从而实现多阶记录^[1, 2]. 目前主要有多阶幅值调制与多阶游程长度调制两种方式, 它们具有不同的实现原理和性能表现. 多阶调制编码是多阶光存储的核心技术, 本文根据状态切分算法, 设计了一种新型的 8 阶 (1, 3) 游程长度受限码, 该编码具有高的码率和密度系数, 并且编码和译码逻辑简明, 可用于未来高密度多阶游程长度调制光存储系统。

2. 多阶光存储的调制原理

传统光盘系统只能记录二值的信号波形, 数据序列在写入到光盘之前, 需要经过调制编码转换以符合特定的信道限制. 当前的光盘系统普遍采用了游程长度受限 (run-length limited, RLL) 的调制编码, 也称为 (d, k) 码. 这种将二值信号与 RLL 编码相结

合的方式, 其实质是利用记录符的长度来编码记录信息. 在传统光盘系统的读出过程中, 误码的主要来源是抖晃, 即记录波形的脉冲宽度的偏差. 如果要在不改变系统光学参数的前提下提高二值记录的存储密度, 则必须在一定的脉冲宽度范围内存储更多的信息. 显然, 由于受到系统本身所固有的抖晃的限制, 这种技术方案存在相当的难度。

由于光盘读出信号幅值的偏差并不是随机噪声的主要来源, 因此有可能在信号幅值中编码记录信息以提高记录密度. 将记录符的长度固定, 通过改变记录符的形貌大小从而获得具有多阶幅值特性的读出信号, 可以在传统记录介质上实现多阶光存储. 这种思路体现在迄今为止的大部分多阶光存储方案之中, 例如采用不同坑点深度的多阶只读光盘^[3], Calimetrics 公司提出的基于相变材料的多阶技术^[4, 5], 以及 Ricoh 公司的多阶记录方案^[6, 7]. 由于在信号读出时, 多阶记录符对入射光的物理特性进行调制, 使得反射光的信号幅值呈现多阶特性, 因此将这类方案统称为多阶幅值调制。

如果将多阶信号与 RLL 调制结合起来, 则能够在读出信号幅值和记录符长度两方面同时存储信息. 这种方案称为多阶游程长度调制, 其主要优点在于采用较低的阶次就能够大大提高记录密度. 多阶 RLL 调制要求记录介质本身具有较好的分阶特性, 即记录介质存在多个不同的物理状态. Shi 等人对某些相变材料的部分结晶特性进行了研究^[8], 发现通过调整退火时间和温度, 可以得到该种材料晶态与非晶态之间的部分结晶状态. 最近, Howe 等人利用

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60577035) 资助的课题.

部分结晶特性在可重写类型(rewritable, RW)的 CD(compact disc)和 DVD(digital versatile disc)盘片上进行多阶 RLL 调制的实验研究,通过控制写入激光的功率和脉冲宽度,将信息同时记录在相变光盘的信号幅值和记录符长度中,成功实现了 3 阶 RLL 调制^[9,10]。

如图 1 所示,我们对多阶 RLL 调制与传统 CD-RW 和多阶幅值调制的记录符进行比较,可以看出,多阶 RLL 调制的记录符具有不同的长度和“灰度”,这种灰度表示记录介质的多个不同的物理状态。由于多阶 RLL 调制将信息同时记录在信号幅值和记录符长度之中,读出时的信噪比将发生较严重的损失,因此需要采用更先进的编码与信号处理技术。

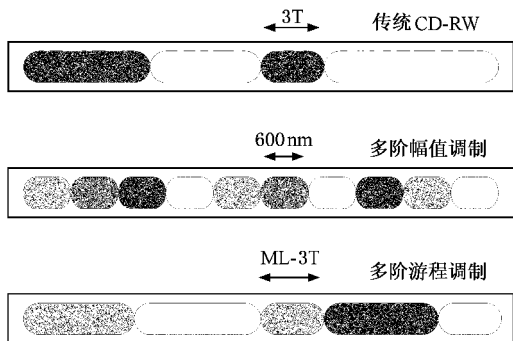


图 1 多阶幅值调制与多阶 RLL 调制的比较

由于多阶 RLL 调制在提高记录密度方面的巨大潜力,更高阶次的 RLL 调制是研究的主要方向,这将有赖于多阶记录介质、多阶调制编码与信号检测技术的发展。迄今为止,基于相变材料的多阶 RLL 调制只获得了 3 阶的实验结果。但是 Hu 等人研究了基于新型光致变色材料的多阶光存储技术^[11-13],实验表明该种光子型的记录材料具有很好的分阶特性,因此有望实现高阶次的 RLL 调制光存储。多阶调制编码在实现多阶 RLL 调制、提高记录密度方面具有非常关键性的作用。为此,我们研究了多阶游程长度受限编码理论,并设计了一种新的 8 阶(1,3)编码方案。

3. 多阶游程长度受限编码

3.1. M -ary(d, k)码

多阶游程长度受限编码将任意的用户数据转换为符合特定信道限制的多阶码元序列,是传统 RLL

(d, k)码在多进制情况下的扩充,又称为 M -ary(d, k)码^[14-16]。在 M -ary(d, k)受限序列中,任意两个非零字符之间至少要有 d 个‘0’,最多有 k 个‘0’,字符集定义为 $\{0, 1, \dots, M-1\}$,其中 $2 < M < \infty$ 。平均来说,编码器将 m 比特的二进制用户数据转换为 n 个多阶信道码元,因此定义编码的码率为 $R = m/n$ 。码率的理论最大值称为调制编码的容量,其计算公式如下:

$$C(M, d, k) = \log_2 \lambda, \quad (1)$$

其中 λ 是下面特征方程的最大实数根:

$$z^{k+2} - z^{k+1} - (M-1)z^{k-d+1} + M-1 = 0. \quad (2)$$

通常用编码效率 $\eta = R/C$ 来表示码率接近编码容量的程度。将 $(d+1) \times C$ 定义为密度系数,单位为“比特/最小记录符”,表示利用 M -ary(d, k)编码所能得到的记录密度。在表 1 中,列举了几种不同参数情况下的密度系数,包括 $M=2$ 即传统(d, k)码的情况。在同样的(d, k)参数下,阶次 M 越高则密度系数越大,但是这提高了对记录介质分阶特性的要求;对于相同的阶次 M ,增大参数 d 或 k 也可以提高密度系数,同时加大了信号检测的复杂度。因此在设计和选择编码参数时必须权衡各方面的制约因素。根据光致变色材料的多阶存储实验结果,在此考虑 8 阶(d, k)编码。分析表 1 中 $M=8$ 的列,在密度系数上(1,3)码比(1,2)码提高约 2.80%,而(1,7)码比(1,3)码提高很少;在参数 $d=2$ 的情况下,虽然密度系数提高约 10%,但编码器的复杂度将提高不少。通过上述比较,我们选定设计一种新的 8 阶(1,3)码。

表 1 M -ary(d, k)编码的密度系数

(d, k)	$M=2$	$M=4$	$M=6$	$M=8$	$M=10$
(1,2)	0.81	2.15	2.79	3.22	3.54
(1,3)	1.10	2.31	2.91	3.31	3.62
(1,7)	1.36	2.40	2.96	3.35	3.65
(2,7)	1.55	2.67	3.23	3.62	3.91
(2,10)	1.63	2.69	3.24	3.62	3.92

3.2. 8 阶(1,3)码的构造

如图 2 所示,用有限状态转移图(finite-state transition diagram, FSTD)来描述 8 阶(1,3)码,其中‘(7)’表示 $\{1, 2, \dots, 7\}$ 中的某一字符。带标记的圆圈表示 FSTD 的不同状态,连接各状态的箭头(路径)表示状态的跳转;路径上的数字表示该跳转对应的输出字符。在图 2 中,状态‘0’只能输出‘0’字符进入

状态“1”、状态“1”和“2”既可以输出“0”字符进入下一个状态,也可以输出一个多阶字符“1”~“7”回到状态“0”;而状态“3”只能输出一个多阶字符“1”~“7”进入状态“0”。可以验证,从某一状态出发依次读取 FSTD 的路径标识,能够得到满足 8 阶(1,3)限制的所有字符序列。

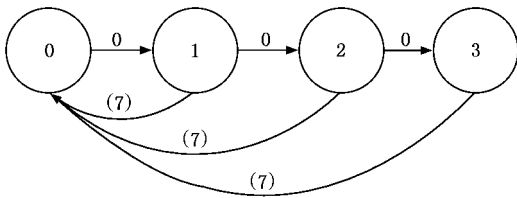


图 2 8-ary(1,3)码的 FSTD

通常用 $(k+1) \times (k+1)$ 的连接矩阵 $T = t_{ij}$ 来表示状态之间的关系,其中 t_{ij} 等于从状态 i 出发跳转到状态 j 的路径数目。因此,8 阶(1,3)码的 FSTD 的连接矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 1 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 1 \\ 7 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

理论分析表明,连接矩阵 T 的最大特征值就是(1)式中的 λ ,由此计算 8 阶(1,3)码的容量为 $C = 1.66$ 。对于任意的 $R < C$,都可以构造基于 FSTD 的有限状态编码器。为了得到效率较高而复杂度较低的编码,我们选择码率为 $R = m/n = 3/2 < C$ 。根据“编码理论”的状态切分算法^[17],需要在 8 阶(1,3)码的 $n = 2$ 步 FSTD 的基础上寻找一组状态,为了满足输入数据的要求(共有 $2^m = 2^3 = 8$ 种输入数据),这些状态的输出路径数不少于 8,从而可以用来设计符合 RLL 限制的编码器。从图 2 中的 FSTD 的每个状态出发,连续跳转两步,得到对应的两步 FSTD,如图 3 所示。

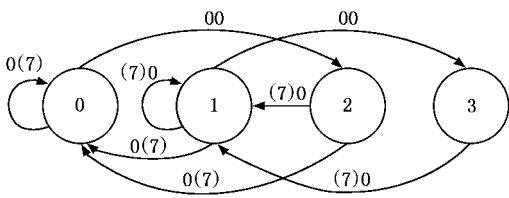


图 3 8-ary(1,3)码的两步 FSTD

如果两步 FSTD 中各状态的输出路径数均不小于 8,则可以直接根据该 FSTD 设计 8 阶(1,3)码的

编码器。通过观察分析可知,状态“3”的输出路径数小于 8。考虑直接删除状态“3”,则得到新的 FSTD 如图 4 所示。仔细分析图 4 中剩下的 3 个状态,发现这 3 个状态的输出路径数均不小于 8,因此将这 3 个状态作为编码状态。

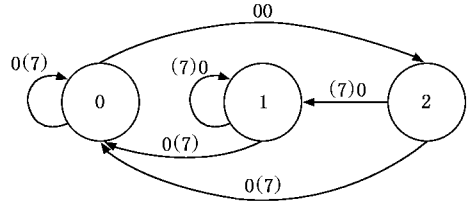


图 4 删除状态“3”后的 FSTD

仔细检查图中的状态“1”和状态“2”,发现这两个状态带有相同标记的输出路径均指向同一个状态,输出“(7)0”指向状态“1”,输出“(0)7”则指向状态“0”。根据状态切分算法,可以将这两个状态合并,得到一个更简单的 FSTD,如图 5 所示。在合并后的 FSTD 中,两个状态的输出路径数均不小于 8,且进一步的简化已经不可能,因此可以按照图 5 的 FSTD 设计编码器。显然,将源数据对应为输出码字的方案有很多种,一种很方便的编码方案是对于状态“0”,将 8 种输入分配给相应的输出路径;对于状态“1,2”取输入“000”分配给输出“X0”, X 为{1,2,...,7}中的某一字符,将其他输入分配给相应的输出路径。

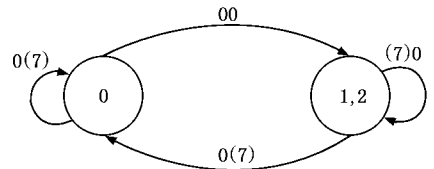


图 5 状态“1”与“2”合并后的 FSTD

上述方案确定了源数据与输出码字的转换规则,从而得到两状态的码率为 $R = 3/2$ 的 8 阶(1,3)编码器。表 2 为该编码器的编码表,其中状态“ A ”、“ B ”分别对应图 5 中的状态“0”和“1,2”。当源数据中出现多个连续的“000”序列时,编码器输出码字“X0”以满足最大游程长度限制。由于非零字符 X 可以从{1,2,...,7}中取任意值,这种灵活性可以用来降低 RLL 记录波形的直流分量。

从表 2 可以看出,该 8 阶(1,3)编码器具有可分组译码的特性,可以根据当前码字直接得到对应的输入源数据,从而有效的将错误传播控制在 1 个码字内。一个巧妙的译码规则是,去除码字的第一

位,将剩下的字符转换为二进制,即得到源数据.简单的编码与译码规则使得该 8 阶(1,3)编码器很容易在硬件上实现,具有较好的应用前景.

表 2 两状态 $R = 3/2$ 的 8 阶(1,3)编码表

源数据	状态 A		状态 B	
	码字	NS	码字	NS
000	00	B	X0	B
001	01	A	01	A
010	02	A	02	A
011	03	A	03	A
100	04	A	04	A
101	05	A	05	A
110	06	A	06	A
111	07	A	07	A

8 阶(1,3)码的编码效率高达 $\eta = R/C = 91\%$,可以在最小记录符上存储 $(1+d)R = 3.0$ 比特的用

户数据,这是传统 EFM+ 码的两倍.如果在 DVD 系统参数下实现 8 阶 RLL 调制,并采用该 8 阶(1,3)编码方案,可以将单盘存储容量提高到 9—10 GB,因此在提高记录密度方面,8 阶(1,3)码具有很好的性能.虽然可以构造更高码率的 8 阶(1,3)编码方案,例如 $R = m/n = 8/5 < C$,但是其复杂度将大大增加.

4. 结 论

多阶游程长度调制利用先进的编码和信号检测技术,将信息同时记录在读出信号幅值与记录符长度当中,在提高记录密度方面比多阶幅值调制更具有优势.针对基于光致变色材料的多阶光存储信道,本文提出了码率为 $3/2$ 的 8 阶(1,3)编码方案,编码密度高达 3.0 比特/记录符,编码效率为 91%,并且编码和译码逻辑简明,有望用于未来高密度多阶游程长度调制光盘系统.

- [1] Xiao J X, Qi G S, Hu H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 102 (in Chinese)[肖家曦、齐国生、胡 华等 2005 物理学报 **54** 102]
- [2] Xiao J X, Qi G S, She P *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 1241
- [3] Spielman S, Johnson B V, McDermott G A *et al* 1997 *SPIE* **3109** 98
- [4] Zhou T, Tan C, Leis C *et al* 2002 *SPIE* **4930** 7
- [5] Balasubramanian K, Hieslmair H, Lee D *et al* 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 1062
- [6] Shimizu A, Sakagami K, Kadokawa Y *et al* 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 1745
- [7] Kadokawa Y, Shimizu A, Sakagami K *et al* 2003 *SPIE* **5069** 369
- [8] Shi L P, Chong T C, Tan P K *et al* 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 1645
- [9] Howe D, Wu K 2004 *SPIE* **5380** 562

- [10] Feng H L, Kuo J W, Tseng N H *et al* 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 4852
- [11] Hu H, Qi G S, Xu D Y 2004 *Chinese Journal of Lasers* **31** 951 (in Chinese)[胡 华、齐国生、徐端颐 2004 中国激光 **31** 951]
- [12] Hu H, Pan L F, Qi G S *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1759 (in Chinese)[胡 恒、潘龙法、齐国生等 2006 物理学报 **55** 1759]
- [13] Hu H, Pei J, Xu D Y *et al* 2006 *Optical Materials* **28** 904
- [14] McLaughlin S W 1997 *IEEE. Trans. Magnet.* **33** 2442
- [15] Hu H, Xu D Y, Pan L F *et al* 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 8491
- [16] Hu H, Xiong J P, Xu D Y *et al* 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 1090
- [17] Immink K A S, Siegel P H, Wolf J K 1998 *IEEE Trans. Inform. Theory* **44** 2260

Modulation principles and code design for multilevel optical data storage^{*}

Hu Hua Xiong Jian-Ping Xu Duan-Yi Qi Guo-Sheng Xiao Jia-Xi Hu Heng

(*Optical Memory National Engineering Research Center , Department of Precision Instrument
and Mechanics , Tsinghua University , Beijing 100084 , China*)

(Received 25 March 2006 ; revised manuscript received 19 June 2006)

Abstract

Multilevel optical data storage is an important technology to improve the recording density of optical disc without changing the optical parameters. One approach is multilevel amplitude modulation , which uses the variance of signal amplitude of length-fixed recorded marks to record information. Another one is multilevel runlength-limited (RLL) modulation , which records information in both the signal amplitude and the length of recorded marks , thus can improve the recording density more effectively than the first way. Multilevel RLL coding is a key technology in multilevel RLL modulation optical recording. In this paper , a new 8-ary (1 3) RLL code is designed with state splitting algorithm. The recording density of this code is as high as 3.0 bits/symbol , and the encoder/decoder is simple and easy to implement. The proposed code can be used for future high density multilevel RLL modulation optical disc systems.

Keywords : multilevel optical data storage , modulation codes , M -ary run-length limited (RLL) codes , state splitting algorithm

PACC : 4230N , 4280T

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577035).