

文章编号: 0253-2239(2010)04-1130-05

波形调制多阶光盘的自适应阶次检测

唐毅 裴京 潘龙法 刘海龙

(清华大学精密仪器系光盘国家工程研究中心, 北京 100084)

摘要 波形调制多阶的时钟恢复后的读出信号跟符号序列没有对应关系,部分响应最大似然(PRML)检测不能直接使用。提出了一种基于最小欧氏距离的自适应阶次检测方法,该方法用实际波形与标准波形的欧氏距离作为阶次检测的依据。自适应调整能让设定的标准波形值向实际波形接近。保护机制能防止设定的标准波形严重偏离真实值。实验结果表明,在不调整参数的情况下,该检测方法能对不同批次盘片获得相当的阶次错误率—— 2×10^{-4} 以下。该方法对缺陷盘片也有很好的适应性。使用该检测方法的播放系统实现了高清视频的连续稳定播放。

关键词 光存储;多阶;波形调制;阶次检测;自适应

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1130

Adaptive Level Detection for Multi-Level Optical Disk Using Signal Waveform Modulation

Tang Yi Pei Jing Pan Longfa Liu Hailong

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

Abstract The partial response maximum like-hood (PRML) can not be directly used for the signal waveform modulation (SWM) multi-level (ML) recording, because in SWM ML, the signal after time recovery does not respond to a symbol sequence. An adaptive level detection method based on minimum Euclid distance is proposed. The Euclid distance between the actual waveform and reference waveform is employed for the level detection. Adaptation can make the set reference waveform approach the actual waveform. The protection mechanism can prevent the case that the reference waveform greatly deviates from the actual. Experimental results show that, without adjusting parameters, this detection method can achieve a low level error ratio, which is less than 2×10^{-4} , for different disk batches. It also has capability for disks with defects. Using this level detection method, the playback system realizes stable and continuous playback of high definition video.

Key words optical storage; multi-level; waveform modulation; level detection; adaptation

1 引言

光存储^[1,2]是信息技术的一个重要方面。多阶存储是大容量光存储的研究热点之一,它能在不改变读出装置光学系统的前提下,有效地提高存储容量。目前,已有多种多阶存储方案被提出^[3~6]。只读光盘是光盘家族的重要成员,因为其价格便宜、易于复制的特点,在光存储产业中占有十分重要的地

位。在只读多阶领域,一种利用信号波形调制的多阶存储方法被提出^[7,8],并在DVD系统上得到了实现。相比传统的利用坑的深度和宽度变化的信号幅值调制多阶的方法^[5,6],波形调制多阶在存储容量、制作工艺和伺服性能等方面具有相对优势^[9]。

阶次检测是多阶存储所特有的信号检测步骤,不同的多阶存储方案在阶次检测方法上也会有所不

收稿日期: 2009-03-12; 收到修改稿日期: 2009-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(60677036)资助课题。

作者简介: 唐毅(1982—),男,博士研究生,主要从事光存储方面的研究。E-mail: tangyi00@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 潘龙法(1946—),男,研究员,博士生导师,主要从事光存储、微细工程和精密机械等方面的研究。

同。本文将研究波形调制多阶的阶次检测方法，提出了一种基于最小欧氏距离的自适应阶次检测方法，并用实际读出信号对这种方法进行了验证，该方法在视频播放实验平台上进行了硬件实现。

2 波形调制多阶原理和读出信号

波形调制多阶的基本原理是在原有坑和岸中插入子岸和子坑。子岸和子坑都很短，不会引起原有坑岸游程的改变，但会引起读出信号波形的改变。这种波形的改变被用作阶次识别的依据。更进一步

地，改变子坑/子岸的长度或(和)位置，将得到更多种类的波形，也就是能实现更多的阶次。同时，考虑不同游程的坑/岸可提供的子坑/子岸变换的空间不一样，不同游程将实现不同的阶次数目。

图 1 是 6T, 9T 和 11T 的各个阶次的读出信号。图中 T6L0 表示 6T 游程 0 阶的岸, T6P1 表示 6T 游程 1 阶的坑, 以此类推。可以明显地看到各个阶次波形上的不同。下面就要研究如何检测出同一个游程上的不同阶次。

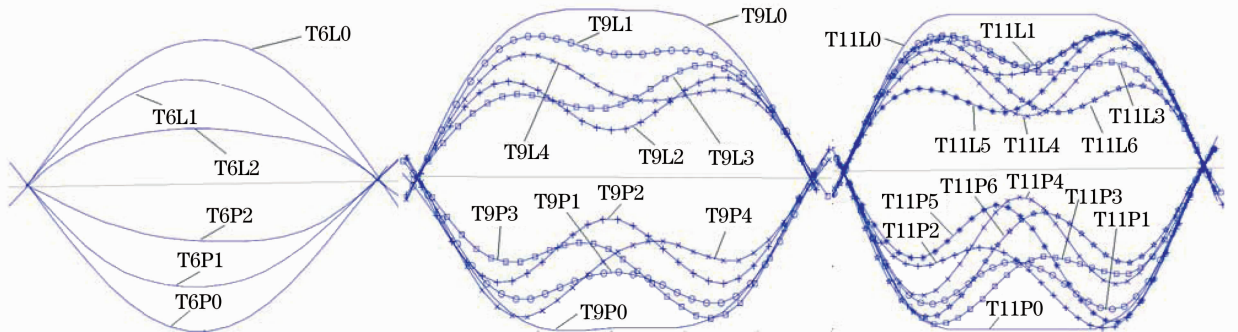


图 1 6T, 9T 和 11T 的各阶读出信号

Fig. 1 Readout signal of different levels for 6T, 9T and 11T

3 信号检测的整体方案

部分响应最大似然 (PRML) 检测^[10,11]是一种在大容量光盘系统中普遍采用的检测方法, 它已运用在蓝光和多阶光盘系统中。但 PRML 是针对符号序列的检测方法, 它输入的每一个值(读出信号时钟恢复后的值)都必须对应某个符号, 符号的种类为有限多个。例如在四阶存储中, PRML 的输入可以看成是 0, 1, 2, 3 组成的符号序列。这种输入值与符号序列的对应关系是进行部分响应均衡和最大似然检测(一般使用维特比检测器)的前提。而波形调制多

阶时钟恢复后的值不具有这种对应关系, 它需要用游程范围内所有的值所代表的整体波形特征来表示它的阶次, 单个的或部分的值并不能表示一个阶次。例如, 9T2 阶坑的第 2 个值, 或者第 2~4 个值都不能跟符号或符号序列对应。因此, PRML 检测方法不能直接应用于波形调制多阶的信号检测。

根据波形调制多阶自身的特点, 采用图 2 所示的信号检测方案。它的特点是游程检测和阶次检测分开, 先游程检测, 后阶次检测。游程和时钟恢复后的数据是阶次检测的输入。

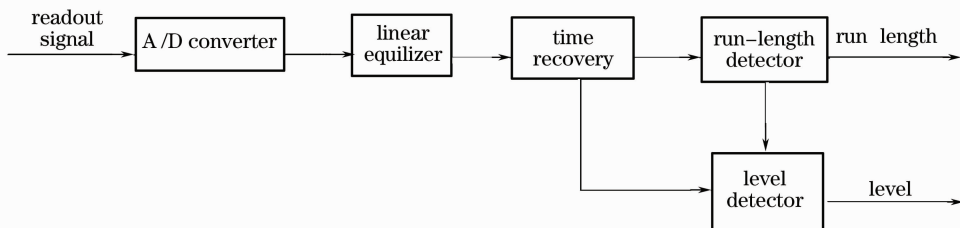


图 2 信号检测整体方案框图

Fig. 2 Block diagram of overall scheme of signal detection

4 阶次检测方法

模/数(A/D)采样的数据跟信道时钟异步, 如果

把它用于阶次检测, 波形与波形之间将会在时间轴上存在错移, 所以用时钟恢复后的数据作为阶次检

测的输入。它跟信道时钟同步,能保证波形的对齐。这样,用于各个游程阶次检测的数据个数就等于该游程所包含的信道时钟数目,但并不是游程范围内每个数据都对阶次识别有贡献,可以去掉其中对阶次识别贡献小的数据,进一步简化阶次识别的运算量。图3是9T的时钟恢复后的所有阶次的数据。可以看出,各个阶次的前两个和后两个数据重叠在一起,对阶次识别作用不大。其他游程信号也有类似的结果。所以,在阶次识别时去掉头尾各两个数据,只使用中间的数据。

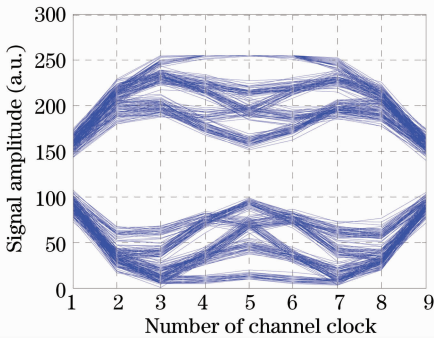


图3 9T游程时钟恢复后的数据

Fig. 3 9T data after time recovery

设计了一种自适应的最小欧氏距离分类器来进行阶次识别,它的结构框图如图4所示。基本思想是为每个游程的每个阶次设定一个标准波形,计算出实际波形与各个阶次标准波形之间的欧氏距离。然后找出这些欧氏距离中的最小值,它对应的阶次就是阶次检测的结果。这种方法与PRML中最大似然法类似,都是用欧氏距离来度量实际波形与标准波形的相似性,距离越小相似性越大。第*i*个阶次的欧氏距离计算公式为

$$d_i = \left[\sum_{j=3}^{n-2} (x_{i,j} - w_j)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 $x_{i,j}$ 表示第*i*个阶次的标准波形的第*j*个时钟

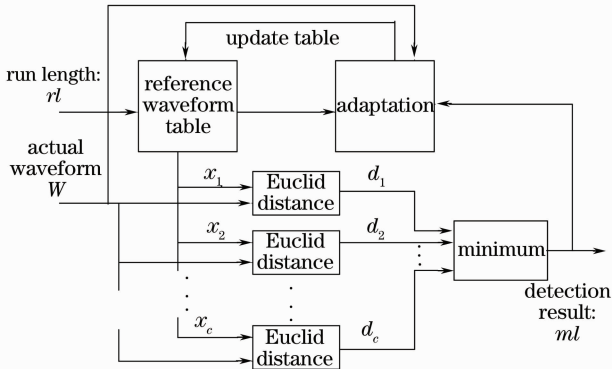


图4 阶次识别算法框图

Fig. 4 Block diagram of level detection algorithm

的值, w_j 表示实际波形的第*j*个时钟的值, nl 表示波形的游程,即当前信息符包含的时钟数。

不同批次盘片由于工艺偏移,读出信号波形会有较大偏移;盘片在读取过程中由于读取条件的变化,信号幅值也会有波动。所以,本方案还加入了对标准波形表的自适应调整。自适应调整在阶次识别以后进行。它通过比较检测结果对应的游程阶次的标准波形与实际波形的差异来对设定的标准波形进行调整,算法如下:

$$\begin{cases} x'_i = x_i - \delta, & w_i - x_i < -\phi \\ x'_i = x_i + \delta, & w_i - x_i > \phi \\ x'_i = x_i, & -\phi \leq w_i - x_i \leq \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中 w_i 为实际波形的第*i*个值, x_i 为更新前对应游程阶次的标准波形的第*i*个值, x'_i 为更新后的值, ϕ , $\delta = 1$ 为设定的参数。 δ 为调整量,一般设定为较小的值。 ϕ 为调整的阈值,只有当偏差大于 ϕ 时才进行调整,一般情况下, $\phi > \delta$ 。 ϕ , δ 的值需要通过实验来确定,以检测的错误率最低为目标。

以上自适应调整算法没有乘除法运算,只有比较和加减运算,计算量很小,易于实现。另外,以上算法能让设定标准波形去接近真实波形的前提是本次阶次识别的结果是正确的,否则自适应调整的方向就是错误的。在正常读取过程中,由于阶次识别的错误率很低,这种错误的调整得不到积累,设定的标准波形不会严重偏离真实值。而当盘片存在缺陷时,在较长的时间内会读到错乱的信号,其错误的调整在某些游程的某些阶次上还是有可能积累的,从而造成部分阶次的标准特征向量严重偏离正常值,这样阶次识别算法就不能正常工作了。为了提高算法的稳定性,加入了自适应调整的保护机制:当调整后的标准波形的某一个数据的值超出设定的范围时,整个标准波形的值被置为初值。该机制可表示为

$$\begin{cases} x' = x_{i, \text{int}}, & x'_i > x_{i, \text{int}} + \xi \text{ or } x'_i < x_{i, \text{int}} - \xi, \\ x' = \text{constant}, & x_{i, \text{int}} - \xi \leq x'_i \leq x_{i, \text{int}} + \xi, \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, c) \quad (3)$$

式中 $x_{i, \text{int}}$ 为该游程阶次对应的标准波形设定初值的第*i*个值, ξ 为设定的值。

5 实验结果

对上述阶次检测方法进行了数值仿真实验,实验数据是从现场可编程门阵列(FPGA)上采出的实际读出信号时钟恢复后的数据。实验数据用8 bit

无符号整数型量化,取值范围为 $0 \sim 255$ 。经过实验,算法中的参数选定为: $\delta=1, \phi=4, \xi=15$ 。图 5 是同一张盘片上连续的读出信号的阶次错误率的统计结果,每 5×10^4 个游程进行一次统计,标准波形表的初值设定为每个阶次游程开始的 1×10^3 个实际波形的均值。可以看出,自适应功能有效地降低阶次识别的错误率,使其保持在 2×10^{-4} 以下。

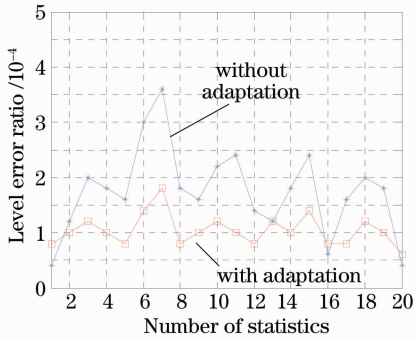


图 5 同一盘片上连续信号的阶次识别错误率统计

Fig. 5 Error rate of level detection for the continuous signal on one disk

图 6 是不同批次的盘片的阶次检测错误率统计,每个批次的盘片选 1×10^6 个游程进行统计,标准波形表的初值根据第一张盘的真实信号的均值来确定。可以看出,没有自适应功能时,2~5 批次的盘片的阶次错误率很高,这是因为各个批次光盘读出信号的波形均值漂移较大,根据第一张盘设定的标准波形表已经不能反映其他批次光盘的真实波形了。而有自适应功能时,各个批次的光盘的阶次错误率相差较小,说明自适应功能能让标准波形表被调整到真实值均值附近,消除标准波形表初值设定不准带来的阶次错误率上升。

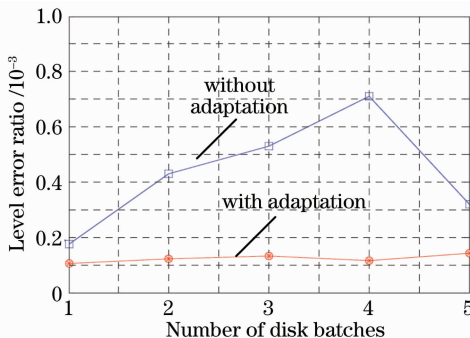


图 6 不同批次光盘的阶次识别错误率

Fig. 6 Error rate of level detection for different disk batches

当设定的标准波形初始值跟真实波形相差较大时,自适应算法能让其很快的调整到真实值附近。进行如下仿真实验,盘片实际信号的 9T4 阶岸的波

形均值为 $[232 \ 215 \ 189 \ 182 \ 186]$ (已经去掉前两个和后两个值),设置的标准波形均值为 $[245 \ 225 \ 205 \ 196 \ 172]$ 。图 7 是标准波形被调整的过程。可以看出,在自适应开始后,9T4 阶岸出现不到 50 次,标准波形值就被调整到实际均值附近,然后在均值附近小幅度波动。标准波形到实际均值的收敛时间跟两者偏差大小和该阶次波形出现的概率有关。

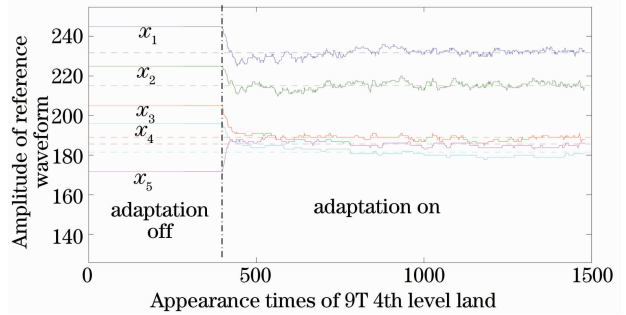


图 7 9T4 阶岸的标准波形的自适应调整过程

Fig. 7 Adaptation process for reference waveform of 9T land level 4

在实时读出系统平台上用 FPGA 实现了上述阶次识别算法,标准波形表的初值选为各个批次盘片的实际波形均值的中间值。得到的结果与仿真结果相当,阶次错误率能保持在 2×10^{-4} 以下,并且不同批次的光盘的结果差别不大。算上游程识别错误,整个信号识别系统的误码率能保持在 4×10^{-4} 以下,小于 DVD 错误检查和纠正 (ECC) 块能纠正的最大误码率 2.5×10^{-3} ,并具有一定的裕量。使用以上阶次识别方法,本实验平台实现了高清视频的连续稳定播放。

用缺陷 (指纹、划痕) 盘片验证了自适应算法保护机制 [(3) 式] 的有效性和必要性。在开启保护机制时,虽然在读取过程中会出现较大的突发误码率,但盘片能够连续稳定播放。在关闭保护机制时,当读取到有缺陷区域时,视频出现马赛克,并且越来越多,很快就会完全不可播放。这说明盘片上的缺陷让自适应算法将标准波形表中的值进行了错误的调整,并且这种错误调整会随着缺陷的连续出现而积累,最终使表中的值完全偏离真实值,阶次识别算法崩溃。而 (2) 式的保护机制能防止这种情况发生。

6 结 论

根据波形调制多阶自身的特点,设计了一种基于最小欧氏距离的自适应阶次识别方法。该方法能根据实际信号自动调节设定的标准波形表中的值,

对各个批次的盘片有很好的适应性,能让阶次识别的错误率保持在 2×10^{-4} 以下。自适应调节的保护机制能防止在读取缺陷盘片时错误调整被积累而导致的算法崩溃。使用该阶次识别方法后,整个信号识别系统的误码率能保持在 4×10^{-4} 以下,小于 DVD ECC 块能纠正的最大误码率 2.5×10^{-3} ,并具有一定裕量。实验平台实现了高清视频的连续稳定播放。

参 考 文 献

- 1 Shen Zhaolong, Jiang Bing, Cai Jianwen *et al.*. Synchronizing focus error detection of dual-pickup in multi-layer data storage system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 685~689
沈兆龙, 江 兵, 蔡建文等. 双光头多层数据存储系统同步聚焦误差检测[J]. 光学学报, 2007, **27**(4): 685~689
- 2 Cai Jianwen, Cheng Yezeng, Shen Zhaolong *et al.*. Influence of refractive index mismatch on the optical aberration in two-photon three-dimensional optical data storage [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 443~446
蔡建文, 程晔增, 沈兆龙等. 折射率失配对双光子三维光存储中像差的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 443~446
- 3 S. Spielman, B. V. Johnson, G. McDermott *et al.*. Using pit-depth modulation to increase capacity and data transfer rate in optical discs [C]. *SPIE*, 1997, **3109**: 98~104
- 4 J. Nakajima, S. Terashima, K. Ohta *et al.*. Readout of optical disk recorded by pit edge and depth modulation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 1846~1849
- 5 Song Jie, Xu Duanyi, Qi Guosheng *et al.*. Multilevel read-only optical recording methods [J]. *Chin. Phys.*, 2006 **15**(8): 1788~1792
- 6 J. Song, Y. Ni, D. Y. Xu *et al.*. Modeling and realization of a multilevel read-only disk [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(03): 1199~1207
- 7 Tang Yi, Pei Jing, Pan Longfa *et al.*. Simulation analysis and experiment validation of a new multi-level read-only optical recording method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1353~1358
唐 毅, 裴 京, 潘龙法等. 一种新的多阶只读光存储方法的仿真分析和实验验证[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1353~1358
- 8 Tang Yi, Pei Jing, Pan Longfa *et al.*. experiments of multi-level read-only recording using readout signal wave-shape modulation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(5): 1709~1712
- 9 Tang Yi, Pei Jing, Ni Yi *et al.*. Multi-level read-only recording using signal waveform modulation [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 6156~6172
- 10 Q. C. Zhang, J. P. Xiong, D. Y. Xu *et al.*. A viterbi detector with feedback used in multilevel run-length-limited modulation optical recording [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(8A): 6331~6333
- 11 H. Cho, J. An, S. Ong *et al.*. Partial response maximum-likelihood system and crosstalk cancellation method for high-density optical recording [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(8): 1621~1628