

用于 HD-DVD 的 PRML 检测系统 的设计与实现^{*}

袁海波[†] 徐端颐 马建设

(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)

(2007 年 3 月 3 日收到, 2007 年 6 月 28 日收到修改稿)

对于高密度 DVD (HD-DVD) 光盘存储系统的部分响应最大似然 (PRML) 检测器的设计和实现进行了详细研究. 通过比较光盘信道的线性模型与记忆长度为 4—7 的部分响应 (PR) 多项式的幅频特性, 从提高 PR 均衡器和维特比检测器性能的角度, 对目标 PR 的记忆长度及系数的选择进行了详细分析. 仿真计算的信噪比-误码率曲线说明, 当目标 PR 的记忆长度为 7 且与光盘信道模型的幅频特性接近时, PRML 检测器的性能最优. 还详细描述了 PRML 系统中维特比检测器的硬件结构, 分析证明当目标 PR 的记忆长度增加时, 维特比检测器的逻辑单元规模也会增加, 但运算速度并不受影响. 经实验验证, 目标 PR 的记忆长度为 7 个的 PRML 系统比现有 PRML 系统的检测性能更好且处理速度也完全满足 HD-DVD 光盘存储系统的要求.

关键词: 高密度 DVD, 码间干扰, 部分响应最大似然检测, 维特比检测器

PACC: 4230N

1. 引 言

为了提高光盘的容量, 下一代光盘存储系统的研究主要有两大方向, 一是采用波长更短的蓝光激光器同时缩小记录符尺寸^[1], 二是采用多阶存储技术^[2-4]. 高密度 DVD (HD-DVD) 系统采用的就是第一种方法. 这导致了光盘读出信号中的码间干扰 (ISI) 非常严重. 因此, 对于高记录密度的 HD-DVD 系统, 已经不能再像传统的 CD, DVD 系统, 采用线性均衡器和逐位峰值检测技术进行信号处理. 为了解决这一问题, 目前主流的方法是把磁存储中已经十分成熟的部分响应最大似然 (PRML) 检测技术^[5]应用到光盘存储中. PRML 是一种用维特比 (Viterbi) 算法实现的^[6]最大似然序列检测 (MLSD) 技术, 在系统有严重的 ISI 情况下, PRML 仍能保持很好的检测性能. 由于光盘存储系统使用了 RLL 调制码, 在一定程度上, 可以降低 PRML 系统的复杂度^[7]. 在 PRML 系统的设计中, 目标部分响应 (PR) 的选择是一个关键. 如果选择的目标 PR 的幅频特性与信道相差太多,

不仅线性均衡器难以设计实现, 还会增强高频噪声, 影响信号质量. 当 PR 多项式变长时, 维特比检测器的复杂度会增加. 因此在选择目标 PR 多项式时必须权衡系统的性能与复杂度^[8]. 在确定了目标 PR 及调制编码后, 即可设计相应的维特比检测器. 目前国内外已发表的有关用于光盘存储系统的 PRML 检测技术的文章中^[7-9], 讨论的大都是目标 PR 记忆长度不大于 5 的 PRML 系统, 也就是说目标 PR 是四阶多项式. 本文研究了具有更长记忆长度的目标 PR, 最多达到 7 个.

本文首先分析了 HD-DVD 系统的信道模型, 该模型是一种简化的一阶线性模型, 忽略了光盘信道中的高阶非线性部分. 虽然简化后的模型与实际信道有一定的差别, 但通过仿真计算得到的信号波形与实际系统的信号波形匹配的很好. 随后, 给出了一个完整的 PRML 系统结构, 并详细讨论了目标 PR 的选择, 以及使用了游程长度受限 (RLL) 调制码对维特比检测的简化. 接下来, 设计了目标 PR 的记忆长度分别为 4, 5, 6, 7 的四种维特比检测器, 并用仿真计算得到的信噪比-误码率曲线对四种维特比检测

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: G19990330) 资助的课题.

[†] E-mail: yuanhb04@mails.tsinghua.edu.cn

器的性能进行了比较.最后,对维特比检测器的硬件结构进行了分析,并在高速大规模 FPGA 芯片上用 VHDL 语言对其进行了硬件设计实现.

2. HD-DVD 读出信号的线性模型

HD-DVD 只读盘的技术参数列于表 1 中,HD-DVD 只读系统中的信号读出过程可用图 1 简单地表示.二进制用户数据经 ETM 编码后生成数据符号

表 1 HD-DVD 只读盘技术参数^[1]

激光器波长/nm	数值孔径 NA	最短记录符/ μm	道间距/ μm	编码方式	数据传输速率/Mbps	用户数据容量/GB
405	0.65	0.204	0.4	ETM	36	15—20



图 1 HD-DVD 只读系统中的信号读出过程

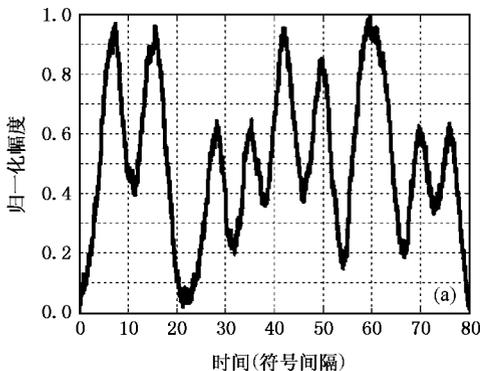
这里采用 Bergmans 建立的光盘读出信号线性模型^[6,40]描述 HD-DVD 只读系统中的光学信道.该模型将光盘读出信号建模为高斯分布的入射光斑轮廓与片上的记录数据图案的卷积.光学信道的冲击响应函数 $f(t)$ 由下式给出:

$$f(t) = \frac{2}{ST\sqrt{\pi}} \exp\left\{-\left(\frac{2t}{ST}\right)^2\right\}, \quad (1)$$

其中, S 为光学信道的归一化信息密度, T 表示每个信息位符号的长度.定义 $S = t_0/T$, 其中 t_0 是聚焦光斑最大光强的 $\frac{1}{e^2}$ 处的光斑直径, 即

$$t_0 = \frac{0.86\lambda}{NA}. \quad (2)$$

对于 HD-DVD 系统, 最小记录符为 $2T$, 所以 $T =$



序列 $a'_k \in \{0, 1\}$, 编码后的用户数据被送入预编码器, 进行倒转不归零(NRZI)变换, 生成数据符号序列 $a_k \in \{-1, 1\}$, 这些序列再被送入光盘系统的光学信道.系统使用的 ETM 调制编码是 RLL(1, 10) 码.码率为 $8/12$. RLL 调制码由参数 (d, k) 定义, 其中 d 代表相邻两个 1 中最少的 0 的个数, k 代表相邻两个 1 中最多的 0 的个数. RLL(1, 10) 码经 NRZI 预编码后, RLL 编码中 $d = 1$ 的约束, 变为最短记录符长度为 $2T$.

0.102 μm , 可以求得 $S = 5.25$. 理想的 HD-DVD 系统的冲击响应如图 2 所示.

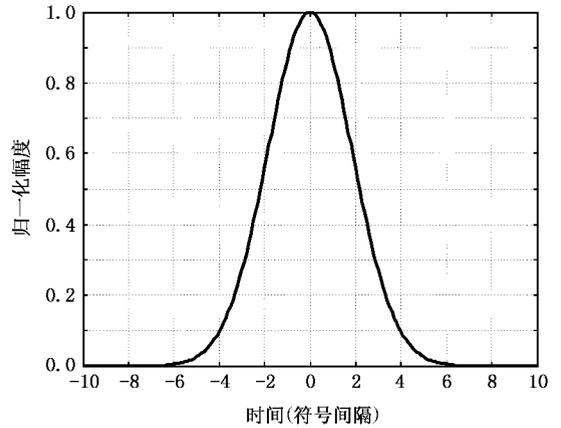


图 2 HD-DVD 系统的冲击响应

图 3 给出了 HD-DVD 系统的实际读出信号和根据光学通道线性模型计算出的仿真信号.可以看出, 仿真结果与实际信号非常接近.但实际信号中的一

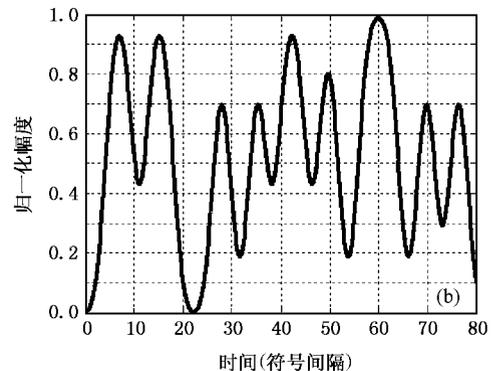


图 3 实际读出信号(a)与仿真结果(b)比较

些高频非线性分量,是用线性模型无法仿真得到的。尽管如此由于线性模型十分简单,它适合用于 PRML 系统的设计。

3. PRML 检测系统设计

图 4 给出了 PRML 系统的结构。从光学头输出的 RF 读出信号,同时送给 A/D 采样和位同步锁相环(PLL),PLL 生成的位时钟又送给 A/D,控制 A/D 按位时钟采样。经过采样后的读出信号先经过 PR 均衡器进行均衡,然后被送入维特比检测器进行最大似然检测,最终输出检测结果 RLL 数据。

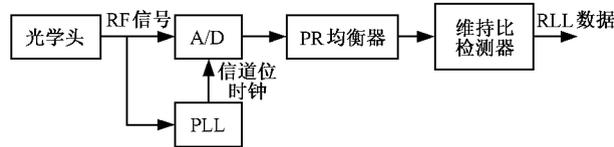


图 4 PRML 系统结构

PR 均衡器的目的是将光盘信道的幅频特性均衡为目标 PR 的幅频特性。因为维特比检测器是根据目标 PR 的特性进行设计的,所以均衡后的光盘信道与目标 PR 越接近,就越能充分发挥维特比检测器的性能。这里我们使用了 13 抽头的 FIR 滤波器来实现 PR 均衡器,FIR 滤波器的抽头系数由最小均方差估计(MMSE)算法计算得出。

3.1. 目标 PR 多项式

图 5 中给出了几种 PR 多项式的幅频特性。当 PR 多项式的记忆长度固定时,通过调整多项式系数可以改变目标 PR 的低频部分和高频部分特性。通常当目标 PR 的低频部分与 HD-DVD 信道接近时,高频部分就会远离 HD-DVD 信道,反之亦然。

通过计算 PRML 系统的信噪比-误码率曲线可知,目标 PR 的低频部分与 HD-DVD 信道的低频部分越接近,维特比检测器的性能就越好,即维特比检测器的误码率越低;目标 PR 的高频部分与 HD-DVD 信道的高频部分越接近,PR 均衡器的性能就越好,即经 PR 均衡器均衡后的光盘信道与目标 PR 越接近。因此在固定目标 PR 记忆长度的情况下,多项式系数的确定要同时考虑到目标 PR 的低频部分和高频部分。如果只注重低频部分,PR 均衡器的均衡偏差就会较大,从而会降低维特比检测器的性能;如果只注重高频部分,PR 均衡器的均衡偏差虽然减小,

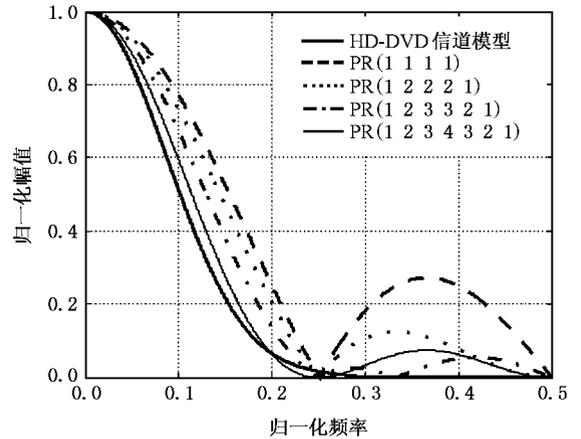


图 5 HD-DVD 信道幅频特性与几种 PR 多项式的幅频特性的比较

但由于低频部分相差较大,维特比的性能仍然不会很好。如果要同时让目标 PR 的低频部分和高频部分都向 HD-DVD 信道接近,就必须增加目标 PR 的记忆长度。

通过比较计算,针对记忆长度分别为 4,5,6,7 的目标 PR,我们选择了如下的多项式系数(1 1 1 1)(1 2 2 2 1)(1 2 3 3 2 1)(1 2 3 4 3 2 1)。

3.2. 维特比检测器

在一个 PRML 系统中,信道被线性均衡器截断成目标 PR,然后,对均衡后的序列进行最大似然检测(MLSD),这里的最大似然检测是用维特比算法实现的^[6]。维特比算法是一种实现最大似然检测最有效的方法,但如果检测中的状态数太多,算法也会过于复杂。PRML 中的状态数 $S = 2^{L-1}$,路径数 $P = 2^L$,其中 L 是 PR 多项式的记忆长度。所以对于长度为 4 的目标 PR,状态数为 8,路径数为 16。由于在 HD-DVD 系统中采用了 RLL(1,10)编码,所以维特比算法中的有些状态将不会出现,这样长度为 4 的 PR 多项式的状态数分别减少为 6,路径数减少为 10。与记忆长度为 4 的目标 PR 类似的,我们可以分别计算出目标 PR 记忆长度为 5,6,7 的维特比检测器的

表 2 不同目标 PR 记忆长度的维特比检测器的状态数和路径数

L	状态数	路径数
4	6	10
5	10	16
6	16	26
7	26	42
8	42	68

状态数和路径数,如表 2 所示.可见,随着目标 PR 记忆长度的增加,维特比检测器的状态数和路径数都在迅速增加.

图 6 给出了采用 $P(D) = 1 + D + D^2 + D^3$ 作为目标 PR 和 RLI(1,10) 编码的维特比检测器的网格图.多项式中的 D 代表一个符号位时延,图中的 a_k 和 z_k 分别代表第 k 个记录数据和对应的目标 PR 的理想输出.因为短记录符的长度为 $2T$,所以状态“-1 +1 -1”和“+1 -1 +1”不可能出现而被排除,同理,还排除了 6 条不可能出现的路径.从图中我们还可以看到 z_k 不仅由 a_k 决定,还受到 a_{k-1} , a_{k-2} , a_{k-3} 的影响,这就是受控的 ISI,它可以用目标 PR 多项式 $P(D) = 1 + D + D^2 + D^3$ 计算出.类似地,我们也可以得到目标 PR 记忆长度为 5,6,7 的维特比检测器的网格图.根据网格图我们就可以实现相应的维特比检测器.

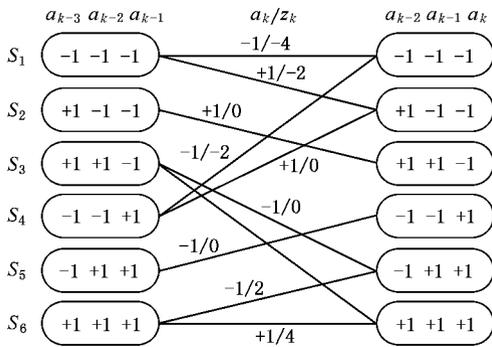


图 6 受 RLI(1,10) 编码约束的 PR(1,1,1) 网格图

4. 仿真计算及硬件实现

4.1. 维特比检测器检测性能比较

仿真系统的原理如图 7 所示.被编码的数据经过 HD-DVD 信道变为按信道时钟采样的 RF 信号.这里,我们假设光盘信道中的噪声为高斯白噪声,加入噪声的 RF 信号被送入 PR 均衡器,均衡后的信号又被送入维特比检测器.用维特比检测器的检测结果与原始的编码数据进行比较,就可以计算出 PRML 系统的比特误码率.

我们分别计算了目标 PR 多项式为以下四种 PRML 系统的信噪比-误码率曲线:

$$P(D) = 1 + D + D^2 + D^3,$$

$$P(D) = 1 + 2D + 2D^2 + 2D^3 + D^4,$$

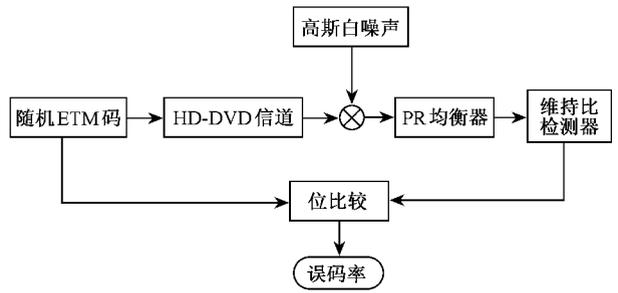


图 7 MATLAB 仿真原理图

$P(D) = 1 + 2D + 3D^2 + 3D^3 + 2D^4 + D^5$,
 $P(D) = 1 + 2D + 3D^2 + 4D^3 + 3D^4 + 2D^5 + D^6$.
 实验结果如图 8 所示,从图 8 中可以看出,目标 PR 的记忆长度越长,PRML 检测器的性能就越好.近似地,目标 PR 的记忆长度每增加一个,PRML 检测器的性能就提高约 0.5 个 dB.在信噪比为 18 dB 时,目标 PR 的记忆长度为 4 的 PRML 检测器的误码率仅为 10^{-4} 量级,而长度为 7 的 PRML 检测器的误码率达到了 10^{-6} 量级,低了两个数量级,检测器性能有了极大提高.

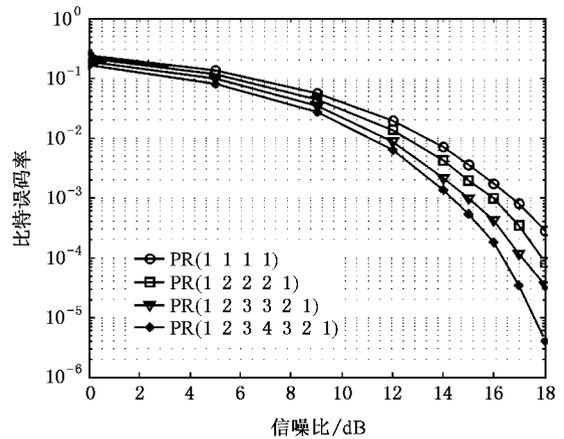


图 8 不同目标 PR 记忆长度的 PRML 系统的信噪比-误码率曲线

4.2. 维特比检测器的硬件实现

如图 9 所示,一个完整的维特比检测器是由支路度量计算(BMC)单元、加比选(ACS)单元、状态度量存储(SMM)单元和路径存储(PM)单元组成的.下面我们就对每个单元模块进行详细的分析.

4.2.1. BMC 单元

BMC 单元根据经 PR 均衡器均衡后的 RF 数据,计算出所有支路的度量值.计算公式如下:

$$BM_m = (I - z_m)^2, \quad (3)$$

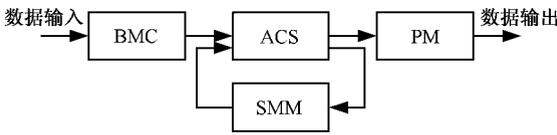


图 9 维特比检测器结构框图

式中 BM_m 代表每条支路的度量, I 代表输入数据, z_m 代表图 5 中每条支路的 z_k 值. 因为支路度量计算是一个开环操作, 所以可以采用流水线操作, 便于实现高速处理.

4.2.2. ACS 单元和 SMM 单元

ACS 单元首先将每条支路度量与其前一状态的路径度量相加, 得到新的路径度量, 然后比较进入同一状态的两个路径度量, 并选择值小的路径度量作为该状态新的路径度量存入 SMM 单元, 对只有一条路径进入的状态, 直接将路径度量作为该状态新的路径度量存入 SMM 单元, 最后将选择结果作为控制信号送入 PM 单元. 从图 9 可以看出, ACS 和 SMM 这两个单元构成了一个闭环处理过程, 所以这部分的运算延时必须小于一个符号间隔的时间. 该部分的性能也决定了维特比检测器的处理速度. 闭环过程中对应每个状态都包括一次加法运算, 一次二选一比较运算和一次更新, 所有的状态都是并行处理的, 因此当状态数增加时, 只是逻辑单元的规模会增加, 而运算速度并不受影响. 根据 (3) 式可知, 路径度量是一个不断增大的数, 所以为了防止其溢出, 硬件中必须有溢出控制部分. 本方案中采用的溢出控制方法是用所有路径度量与其中任意一个路径度量相

减, 这样存储的实际上是相对路径度量. 因为路径的选择是依据小的路径度量值, 所以从所有的路径度量中减去一个相同的值并不影响选择结果.

4.2.3. PM 单元

路径存储单元存储着与状态对应的路径, 这些路径代表着候选的输出数据序列. 这些路径在 ACS 单元输出的选择结果信号的控制下, 进行更新和合并. 通常, 当路径的存储长度为目标 PR 多项式长度的 5—6 倍时, 在 PM 的最后几位, 所有路径都将合并为同一个值. 这个数就可以作为检测结果移出, 同时新的候选数据将从 PM 的首位移入. 所以 PM 单元实际上是一组交错互换移位寄存器. PM 单元是一个开环操作, 所以也可以采用流水线操作.

图 10 是基于 VHDL 语言实现的目标 PR 为 (1 1 1 1) 的维特比检测器, 其中合并了 ACS 单元与 SMM 单元. 对于状态数较多的维特比检测器, 我们编写了通用的 C 语言程序, 可自动生成记忆长度不同的维特比检测器的 VHDL 代码. 最后我们用 Xilinx 公司生产的 FPGA 芯片进行了硬件实验, 结果证明, 所有维特比检测器的处理数率均不低于 100 Mb/s, 完全适用与 HD-DVD 系统.

5. 结 论

本文讨论的 PRML 检测技术是一种全数字序列检测方法, 与传统的 CD, DVD 系统的检测方法相比, 在控制 ISI 和降低检测误码率方面, 有着更好的性能. 尤其是光盘系统中使用了 RLL 调制码, 降低

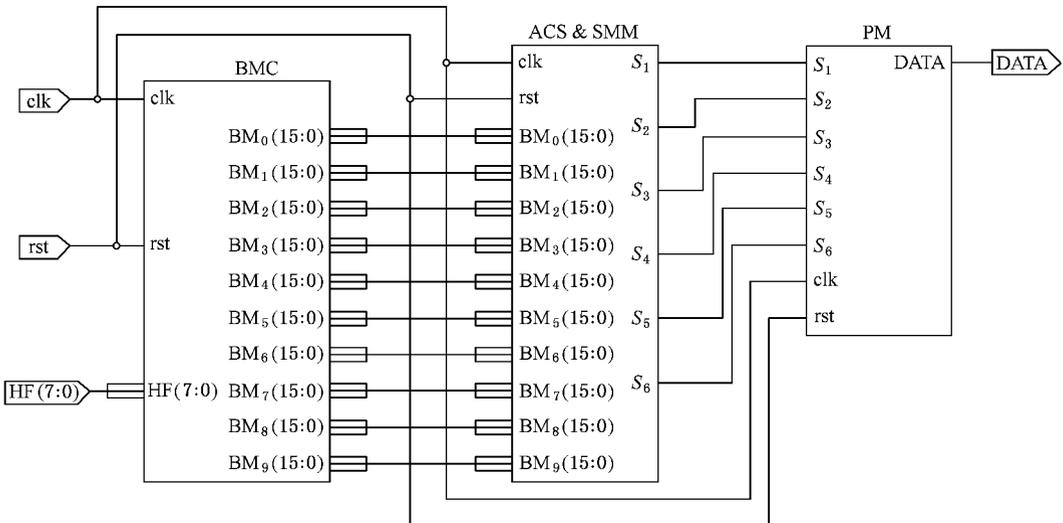


图 10 基于 VHDL 语言实现的维特比检测器

了 PRML 检测器的复杂度,使得它在下一代高密度蓝光光盘存储系统中的应用成为可能.目前国内外已发表的文章中,讨论的大都是记忆长度不大于 5 的目标 PR,本文研究了具有更长记忆长度的目标 PR,最长的达到 7 个.并通过仿真实验证明具有目标 PR 为 7 个记忆长度的 PRML 检测器的性能有很大提高.以往的文章中为了权衡 PRML 检测器的性能和复杂度,而普遍采用记忆长度小于等于 5 的目标 PR,这种权衡随着大规模高速集成电路的性能不

断提高而已经偏向于进一步增加 PRML 的复杂度.本文对基于 FPGA 芯片的 PRML 检测器的硬件结构进行了分析并得出结论:增加目标 PR 的记忆长度后 PRML 检测器的逻辑规模近似线性增加,但运算速度并不受影响.随着对 PRML 检测技术在高密度光盘存储领域的应用研究日臻成熟,它已经为下一代蓝光光盘系统所采用.另外,PRML 在各种多阶光盘的检测领域,也有着广泛的应用前景.

- [1] Shen Q H , Xu D Y , Qi G S , Zhang Q C , Hu H , Song J 2005 *Opt. Tech.* **6** 921 (in Chinese) [沈全洪、徐瑞颐、齐国生、张启程、胡 恒、宋 洁 2005 光学技术 **6** 921]
- [2] Xiao J X , Qi G S , Hu H , Xu D Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **53** 102 (in Chinese) [肖家曦、齐国生、胡 华、徐瑞颐 2005 物理学报 **53** 102]
- [3] Hu H , Pan L F , Qi G S , Hu H , Xu D Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1759 (in Chinese) [胡 恒、潘龙法、齐国生、胡 华、徐瑞颐 2006 物理学报 **55** 1759]
- [4] Song J , Xu D Y , Qi G S 2006 *Chin. Phys.* **15** 1788
- [5] Roy D C *et al* 1992 *IEEE Journal on Selected Areas in Commun-*
- ications* **10** 38
- [6] Bergmans J W M 1996 *Digital Baseband Transmission and Recording* (Boston : Kluwer Academic Publishers) p80 , 301
- [7] Joohyun L , Jaejin L 2004 *Japanese J. Appl. Phys.* **43** 4856
- [8] Cho H Y , An J H , Ong S H , Hong D 2001 *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* **40** 1621
- [9] Sonu G H , Kim Y C , Lee J S 2006 *IEEE Transactions on Magnetics* **42** 2570
- [10] Chen W L , Chen C C , Chen S C 2001 *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference* **2** 912

Design and implementation of a PRML detection system for HD-DVD *

Yuan Hai-Bo[†] Xu Duan-Yi Ma Jian-She

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

(Received 3 March 2007 ; revised manuscript received 28 June 2007)

Abstract

A PRML detector suitable for high-density DVD (HD-DVD) system is developed in this paper. After comparing the spectrum characteristics of the linear optical channel model with various PR polynomials (memory length from 4 to 7) , the criteria of determining memory length and coefficients of target PR is given. The simulated SNR-BER curves show that the Viterbi detector 's performance is much better when the memory length of PR is seven. The architecture of a Viterbi detector in PRML system is also described. By computer simulation and experiments , it is proved that the performance and speed of the PRML system with memory length seven can completely satisfy the requirements of the HD-DVD system.

Keywords : high density DVD , intersymbol interference , partial response maximum likelihood , Viterbi detector

PACC : 4230N

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G19990330).

[†] E-mail : yuanhb04@ mails. tsinghua. edu. cn