

doi:10.3788/gzxb20134211.1360

信号波形调制多阶光盘信道部分响应多项式与均衡器的设计

张龙¹,倪国强^{1,2},裴京³,杨波³

(1 北京理工大学 光电学院,北京 100081)

(2 光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

(3 清华大学 光盘国家工程研究中心,北京 100084)

摘 要:采用信号波形调制多阶记录技术的多阶光盘,其读出信道识别采用了部分响应最大似然检测技术.这种多阶记录方式在提高记录密度的同时,也增加了光盘信道建模的复杂性和非线性.对此,本文提出了一种适用于这种高密度光盘的部分响应多项式及相应均衡器的优化参量设计的新方法.通过寻找光盘读出的高频信号功率谱密度曲线中 useful 信息频段与噪音频段的频率临界点,设计并实现了优化的部分响应多项式参量及与之匹配的部分响应均衡器,从而有效地提高了光盘读出信号的信噪比,降低了信号识别的误码率.这种方法也适用于蓝光光盘等其他高密度基带传输信道的部分响应最大似然检测系统的设计.

关键词:多阶;信号;编码;游程;部分响应;均衡器;误码率

中图分类号:TP302.7

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)11-1360-5

Partial Response Polynomial and Equalizer Design for Signal Waveform Modulation Multi-level Disc

ZHANG Long¹, NI Guo-qiang^{1,2}, PEI Jing³, YANG Bo³

(1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China)

(3 Optical Memory National Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The multi-level disc, which uses the signal waveform modulation method for modulation and recording, employs the partial response maximum likelihood detection techniques for the readout channel recovery. With improving the recording density, the complexity and nonlinearity of the optical disc channel modeling will also increase. Therefore, a optimized design method of the partial response polynomial and the corresponding equalizer design were introduced to solve it. By finding the critical frequency point between signal frequency band and noisy frequency band in the power spectral density curve of the disc readout signal, the optimized parameters of the partial response polynomial and the partial response equalizer were designed, thus effectively improving the optical readout signal to noise ratio, reducing the error rate of the signal recognition. And this method can also be applied to the partial response maximum likelihood detection system of blu-ray and other high-density baseband transmission channel.

Key words: Multi-level; Signal; Code; Run; Partial response; Equalizer; Error rate

基金项目:国家自然科学基金(No. 60977005)资助

第一作者:张龙(1977—),男,副研究员,博士,主要研究方向为光存储. Email:Lzhang27@163.com

导师:倪国强(1946—),男,教授,博士,主要研究方向为光电子学. Email:nigq01@sina.com

通讯作者:裴京(1964—),男,副教授,博士,主要从事光存储相关领域研究. Email:peij@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2013-07-03;录用日期:2013-09-17

0 引言

在光盘系统读出信号的数据恢复过程中,对光盘上读出的信号进行均衡和检测是至关重要的一步.数据恢复是从光学头生成的,具有光通道特性的信号中提取数据码字的过程;在信道特性一定的条件下,决定着光盘信号检测的原始误码率.后续的解调、纠错等处理步骤都是以这一过程的结果为基础进行的;而均衡检测的方案需要根据光盘读出信号的特性及检测方法来确定^[1].

目前清华大学光盘中心提出的红光多阶只读 DVD 光盘采用信号波形调制多阶记录技术,相对于标准 DVD 光盘结构,记录密度提高了近 60%,单盘容量达到了 15GB,满足了高清视频光盘的应用需求.在该多阶光盘系统的读出信号检测过程中,采用部分响应最大似然(Partial Response Maximum Likelihood, PRML)检测技术,其部分响应(Partial Response, PR)多项式参量的设计方法,主要是建立在采用高斯函数描述光盘系统的冲激响应的模型基础上,通过建立线性光盘的幅频响应曲线^[2]来设计的.这种设计方法没有对信号波形调制光盘的复杂性和非线性进行针对性的优化设计,从而还不能实现最佳的读出信道信号识别性能.

本文针对这种红光多阶只读光盘,提出一种通过寻找红光多阶光盘射频(Radio Frequency, RF)信号功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)函数中有用信息频段与噪声频段的频率临界点,来设计 PR 多项式参量,并得到与之匹配的 PR 均衡器的优化设计方法.临界点的确定保证了 PR 均衡器只对 RF 信号有用信息频段功率进行放大,使 RF 信号有用信息频段的信息利用率最大化,从而提高 RF 信号的信噪比,降低信号识别的误码率.

1 红光多阶只读光盘

红光多阶光盘采用信号波形调制技术,在相同长度游程上可以得到多种不同的读出信号波形,并利用这些读出信号在空间上的波形变化来区分相同游程的阶次.为得到这样的调制波形,需要在游程物理坑中增加一个子岸,或者在游程物理岸中增加一个子坑.当子岸或者子坑在相同长度游程的相对位置不同时,在空间上会调制出不同的读出信号波形^[3-5].

在基于 DVD 光盘技术基础上实现的红光多阶光盘系统中,通过增加相同游程的阶次来提高编码效率,是提升红光多阶光盘存储容量的核心技术之一.其中子岸与子坑为红光多阶光盘的最小记录符,

其物理长度仅为标准 DVD 光盘最小记录符的 39%.因此,使用相同刻录设备制作光盘时,得到的红光多阶 DVD 光盘读出 RF 信号的频带较标准 DVD 光盘会变宽,且子坑与子岸对应的信号频段的信噪比较低.同时,较小的记录符在采用光刻技术加工时,其记录符的非线性亦会相应增大.因此需要采用具有针对性设计的高性能 PRML 检测系统来对红光多阶光盘的读出信号进行检测,从而增加了均衡器与最大似然检测器的复杂性及非线性.

从图 1 的 PSD 曲线可以看出,由于加入了子坑与子岸,多阶编码在高频部分的信号功率比标准 DVD 的要高,高频部分的信号主要表现在相同游程的不同阶次所包含的高频信息.

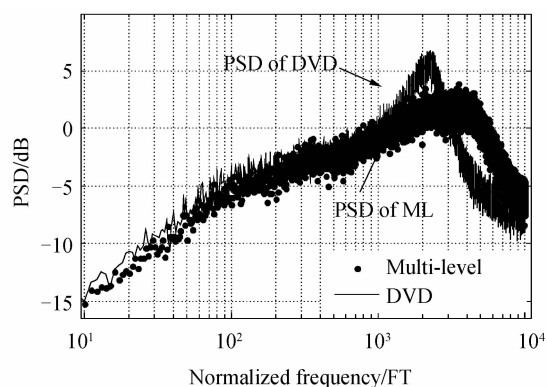


图 1 DVD 编码与多阶编码的功率谱密度

Fig. 1 The power spectral density of DVD encoding and multistage encoding

传统 PRML 设计是建立在用高斯函数描述光盘系统的冲激响应模型^[6]基础上.光盘系统的冲激响应,可以表示为

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

式中, T 为信道单位符号; t 为单位时间; S 为光盘信道的记录密度,可表示为

$$S = d_0 / L_T \quad (2)$$

式中, d_0 为聚焦的光斑直径, L_T 为通道位物理长度.

不同的 d_0 取值会得到不同的光盘系统的冲激响应模型,因而造成 PR 多项式与均衡器设计的差异.这种差异主要表现在采用 PRML 检测时,能否充分地利用读出信号高频段数据信息,实现 PRML 检测系统目标参量的自适应修正,以降低光盘动态读出信号检测的误码.特别是在包含更多高频信息的多阶读出 RF 信号的识别中,这种差异对读出信号检测结果的误码率影响很大^[7-11].

因此本文提出一种全新的 PR 多项式与均衡器的设计方法.这种方法通过寻找实际读出的 RF 信号功率谱中代表记录数据特征的有用信息频段与噪

音频段的临界频率点,来设计 PR 均衡器,使之在不放大噪音频段功率的前提下,将有用信息频段的功率进行放大.

基于实际读出系统的这种设计方法,可高效利用实际 RF 信号的有效信息频段,并与理想的目标 RF 信号模型获得更有效的匹配,更适合高密度光盘存储读出系统的 PRML 设计.

2 关键频率点的信噪分析

多阶信号噪音主要包括:多阶光盘物理坑与岸的不平整产生的盘片物理噪音、信号读出通道噪音,其中盘片物理噪音对信号识别影响最大.

由于制盘工艺的影响,多阶光盘由光盘中心沿径向向外,物理坑与岸的边沿倾斜度会逐渐发生变化,导致盘片的 RF 信号物理噪音功率不一致,从而造成 RF 信号信噪比不一致.因此,根据这个特点来分析多阶盘片不同半径处的 RF 信号 PSD,可以区分 RF 信号的有效信息频段和噪音频段.

图 2 是采用多阶信号读出系统的光盘在不同半径处所读出的 RF 信号的 PSD 曲线.理论上^[1],理想的各个子坑与子岸的记录符大小相同,在归一化 PSD 曲线上对应的频率点为 0.5.实际记录时,经过写策略控制矩阵修正后,各个子坑与子岸的大小会根据前后游程间的码间干扰进行修正,其对应在读出信号 PSD 曲线中的频段也会有所变化.根据不同的写策略修正参量,子坑与子岸对应的 PSD 曲线中的频段在 0.5 ± 0.05 (设计值) 区间.在多阶光盘的实际测试中,通过分析读出只读多阶光盘的、不同半径 RF 信号频率归一化后的 PSD,很容易发现在三个半径点上,信号频率为 0.53 的频点处,PSD 曲线都出现拐点.因此可认为 $0 \sim 0.53$ 频段为有用信息频段, $0.53 \sim 1$ 为噪音频段;得到 0.53 为有用信息频段和噪音频段分界的临界频率点.

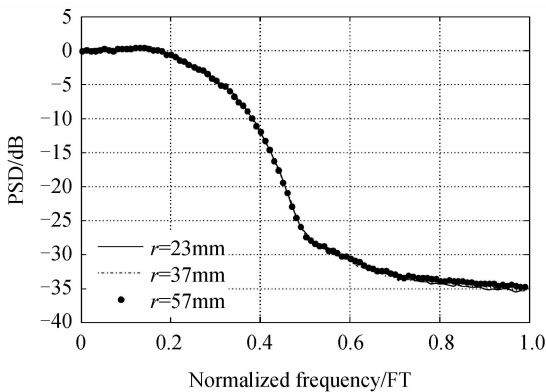


图 2 多阶光盘在不同半径处读出 RF 信号的功率谱密度
Fig. 2 The power spectral density of the read-out RF signal produced by different radii of multistage disc

图 3 是同一个读出系统读出的两个具有相同调制编码和相同通道位物理长度的不同信噪比盘片的多阶 RF 信号 PSD 曲线.可以看出,有用信息频段和噪音频段的临界频率点并不会因为信噪比的不同而发生变化.该现象在较多的同类光盘读出系统中都得到了验证^[1].因此,基于寻找有用信息频段和噪音频段的临界频率点来设计的 PRML 检测系统,适用于其他光存储读出系统.

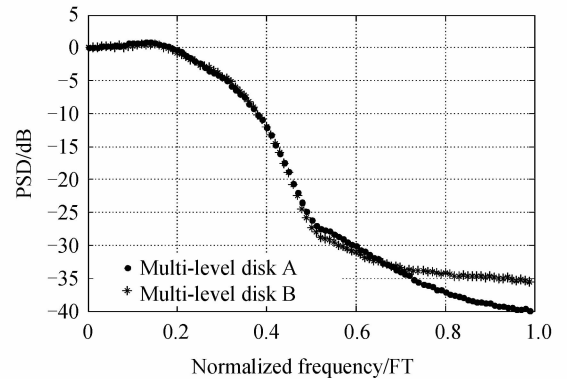


图 3 不同信噪比盘片的红光多阶射频信号功率谱密度
Fig. 3 The red-multistage RF signal power spectral density of the discs of different signal to noise ratio

3 PRML 检测

PRML 检测系统由 PR 均衡器与维特比检测器两部分构成.均衡器将 RF 信号有用信息频段信号功率放大,然后由最大似然检测器来进行维特比检测,过程如图 4.

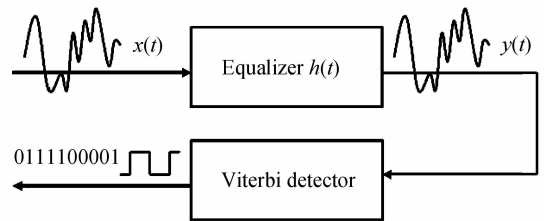


图 4 部分响应最大似然检测系统
Fig. 4 PRML detection system

PR 均衡器输出由式(3)得到,其中 n 为均衡器的抽头数.

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \sum_{k=1}^n x(k)h(k) \quad (3)$$

维特比检测器通过对比对各种理想目标多阶 RF 信号序列与实际多阶 RF 信号序列的路径差值,选择出路径差值最小的理想目标多阶 RF 信号来匹配当前实际多阶 RF 信号,作为对应的维特比检测器的输出序列.要得到理想的目标多阶 RF 信号,需要多阶调制编码序列卷积光盘信道的冲激响应(PR 多项式参量).假如 PR 多项式为 $P(D) = a + bD + cD^2 + bD^3 + aD^4$,则仿真理想的目标多阶 RF 信号 $m(t)$ 可由式(4)得到,其中 $g(t)$ 为盘片上的通道位

符号序列,由 0 或者 1 组成

$$m(t) = g(t-2)a + g(t-1)b + g(t)c + g(t+1)b + g(t+2)a \quad (4)$$

3.1 部分响应多项式设计

确定 RF 信号 PSD 曲线中 有用信息频段与噪声频段的临界频率点后,就可以开始进行 PR 多项式参量的优化设计. 因为理想均衡器的幅频特性曲线是理想的目标多阶 RF 信号与实际多阶 RF 信号的 PSD 曲线的差. 为了保证只放大实际多阶 RF 信号有用信息频段功率,理想的目标多阶 RF 信号 PSD 曲线的边沿应该与实际多阶读出 RF 信号 PSD 曲线相交于临界频率点 0.53 处. 根据这一条件,在图 5 中给出了几个具有代表性的 PR 多项式对应的理想目标多阶 RF 信号的 PSD 曲线. 其中: $P(D) = 1 + 2D + 2D^2 + 1D^3$ 与 $P(D) = 4 + 9D + 13D^2 + 9D^3 + 4D^4$, 虽然将有用信息频段功率放大了,但是噪声频段功率也被放大了;而 $P(D) = 1 + 2D + 2D^2 + 2D^3 + 1D^4$, 则并没有将有用信息频段功率充分利用. 从图 5 中看出, PR 多项式 $P(D) = 4 + 10D + 11D^2 + 10D^3 + 4D^4$ 与以上多项式相比较,更为理想.

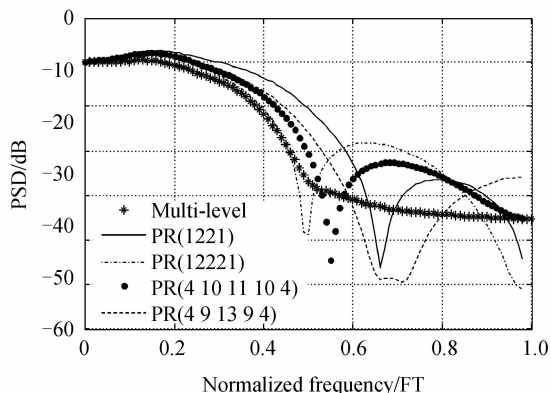


图 5 实际读出射频信号与不同部分响应多项式对应的目标射频信号功率谱密度

Fig. 5 The power spectral density of actually read-out RF signal and the target RF signal corresponding to different partial response polynomial

3.2 均衡器设计

采用 PR 多项式 $P(D) = 4 + 10D + 11D^2 + 10D^3 + 4D^4$, 通过实际 RF 信号与理想的目标 RF 信号 PSD 的差,得到理想均衡器的幅频响应曲线,如图 6.

运用 MATLAB 工具 Filter Design 中的 Inverse Sinc Lowpass,设计与理想幅频响应曲线匹配的均衡器. 此均衡器为 31 抽头的有限脉冲响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器,如图 7. 实

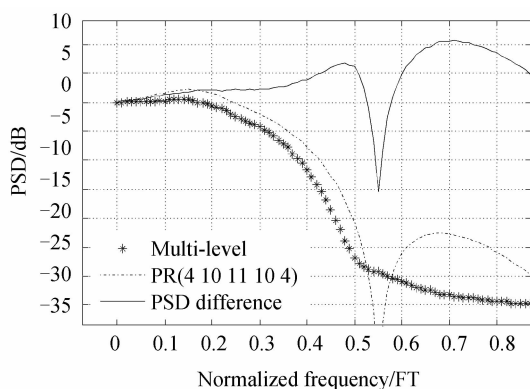


图 6 理想均衡器的幅频响应曲线

Fig. 6 The frequency response curve of ideal equalizer

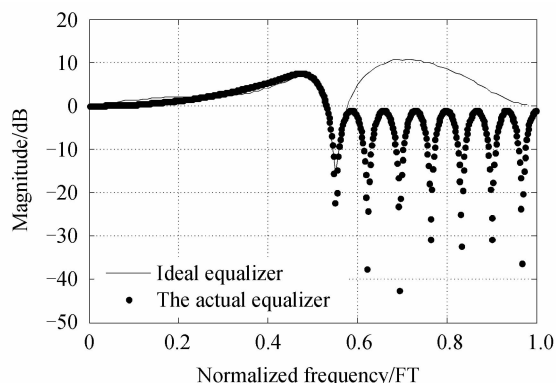


图 7 实际均衡器与理想均衡器的幅频响应曲线对照

Fig. 7 The frequency response curve comparison of equalizer between the actual and the ideal

际得到的均衡器幅频响应曲线基本符合理想的均衡器幅频响应曲线,并且在噪声区域频段功率没有被放大.

3.3 结果分析

在实际的多阶光盘读出系统中,通过使用不同的 PR 多项式参量和均衡器,设计不同的 PRML 检测系统,来得到与之对应的误码率,以此来评判设计思路的实用性. 选定具有代表性的 4 种 PR 多项式: $P(D) = 1 + 2D + 2D^2 + 1D^3$; $P(D) = 1 + 2D + 2D^2 + 2D^3 + 1D^4$; $P(D) = 4 + 9D + 13D^2 + 9D^3 + 4D^4$; $P(D) = 4 + 10D + 11D^2 + 10D^3 + 4D^4$.

使用这 4 种 PR 多项式与均衡器设计的 PRML 检测系统,分别对内容相同并且同一半径位置的 20 张多阶双层光盘进行信号识别,得到如图 8 所示的误码率.

通过对比,PR 多项式 $P(D) = 4 + 10D + 11D^2 + 10D^3 + 4D^4$ 的检测性能优于其他 PR 多项式,从而验证了这种 PR 多项式与均衡器的设计方法的实用性.

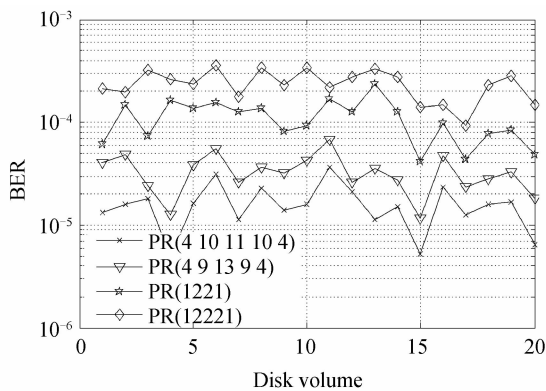


图 8 不同部分响应多项式与均衡器的部分响应最大似然检测系统得到的误码率

Fig. 8 The error ratio of PRML detection system produced by different partial response polynomials and equalizer

4 结论

通过寻找实际系统 RF 信号有用信息频段与噪声频段的临界频率点进行 PR 多项式与均衡器的设计,可以在有效利用有用信息频段的同时,使噪声频段对信号识别产生的干扰最小化,从而能更有效地提高读出信号的信噪比,降低信号识别的误码率.同时,对于红光或者蓝光等光存储介质读出的 RF 信号 PSD 来说,均有有用信息频段与噪声频段的临界频率点可寻.因此,这种方法也适用于蓝光等其他高密度光存储读出系统中 PRML 检测系统的设计.

参考文献

- [1] ZHANG Qi-cheng. Research on the maximum likelihood detection and write strategy for the readout signals of the multilevel read-only optical discs [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007: 91-93.
张启程. 多阶只读光盘读出信号最大似然检测与写策略研究 [D]. 北京:清华大学,2007: 91-93.
- [2] PROAKIS J G, SALEHI M. Digital communications[M]. 4th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2003:264-275.
普罗科斯基 J G, 萨利希 M. 数字通信[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社, 2003: 264-275.
- [3] TANG Yi, PEI Jing, PAN Long-fa, et al. Simulation analysis and experimental 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.
- [4] YAN Ming-ming, PEI Jing, PAN Long-fa. A new tracking error detection method using amplitude difference detection for signal waveform modulation multi-level discs [J]. *Chinese Physics B*, 2010, **19**(10): 104209.
严明铭, 裴京, 潘龙法. 多阶光盘信号波形调制中一种新的利用振幅差跟踪误差检测的方法[J]. *中国物理 B*, 2010, **19**(10): 104209.
- [5] BERGMANS J W M. Digital baseband transmission and recording[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996: 256-287.
- [6] NUTTERA P W, WRIGHT B C D. A new technique for the prediction and correction of nonlinearities in simulated optical readout waveforms[C]. SPIE, 2002, **4342**: 364-374.
- [7] YAN Ming-ming, MA Jian-she, PAN Long-fa. Novel DPD signal detection method for read-only high density optical disks [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(6): 786-789.
严明铭, 马建设, 潘龙法. 用于只读高密度光盘的 DPD 信号检测方法[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(6): 786-789.
- [8] YAN Ming-ming, PEI Jing, XU Hai-zheng, et al. New differential phase detection method for signal waveform modulation multi-level discs[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49**(7): 072503.
严明铭, 裴京, 徐海峥, 等. 多阶光盘信号波形调制中的新型差分相位检测方法 [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49**(7): 072503.
- [9] YAN Ming-ming, PEI Jing, PAN Long-fa, et al. Analysis of the push-pull signal in the multi-level run-length limited read-only disc[C]. SPIE, 2009, **7125**: 71550D.
- [10] XU Kuan-hong, LIANG Yan-mei, WANG Jing-yi, et al. Noise analysis and experimental study of time domain optical coherence tomography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 344-349.
许宽宏, 梁艳梅, 王静怡, 等. 时域光学相干层析系统噪声分析和实验研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 344-349.
- [11] HUANG He, ZHANG Hui-sheng, HUANG Ying, et al. A loop-template matching algorithm for target tracking based on Kalman filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 346-349.
黄鹤, 张会生, 黄莺, 等. 一种基于 Kalman 滤波的环形模板匹配相关跟踪算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 346-349.