

硬盘读写通道的 FIR 噪声预测算法与仿真模型^{*}

刘春 谢长生 黄浩

(华中科技大学计算机学院信息存储教育部重点实验室 武汉 430074)¹

(武汉国家光电实验室 武汉 430074)²

摘要 本文提出了一种嵌入 FIR 噪声预测的部分响应最大似然算法(NPML—Noise-prediction Partial-response Maximum Likelihood),该算法改进了传统部分响应最大似然算法(PRML—Partial Response Maximum Likelihood)中 Viterbi 译码过程的分支度量计算方法,能白化信号中有色噪声,减少误码率,提高硬盘读写通道的性能。本文还建立了读写通道的图形化仿真模型,提出了 FIR 滤波器长系数的快速逼近方法,并构造了检验模型工作正确性的方法。通过仿真模型对传统的 Viterbi 译码算法与嵌入 FIR 预测的 NPML 算法进行了分析。结果表明,在相同的存储密度下,NPML 能获得比 PRML 高 xxdb 的信噪比和低 xxdb 的位错误率。

关键词 NPML, 硬盘读写通道, PRML

FIR Noise Prediction Algorithm and Simulation Model of Read/Write Channel in Hard Disk

LIU Chun XIE Chang-Shen HUANG Hao

(Key Laboratory of Data Storage System, School of Computer Science & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)¹

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074)²

Abstract Because of the improvement of the storage density in the hard disk, and the decreased space between bits to bits, the noises in the read back signals of magnetic head have been nonstationary and correlative colored noises, which can not adapt to Viterbi detect algorithm. By embedding FIR Noise Prediction Maximum Likelihood (NPML) algorithm to the computing process of the branch metric in Viterbi, the colored noises can be effectively whiten. So it can be used to reduce the bit error rate (BER) and improve the system performance. In this paper the comparing analysis of the ordinary Viterbi detector, the noise prediction with FIR is given respectively. Furthermore a SIMULINK simulation model of read/write channel, a fast approaching way to acquire the FIR taps, and a method to verify the correction of the model have been constructed to analyze the different noise prediction algorithms. Simulation results show that under the same storage density NPML detector can attain SNR which is xxdb higher and BER which is xxdb lower than PRML detector.

Keywords NPML, Hard disk read/write channel, PRML

1 引言

硬盘日渐提升的存储密度带来了严重的码间干扰,使磁头读回的信号越来越难以识别。在硬盘读写通道中,采用 Viterbi 算法对受到严重码间干扰的序列执行最大似然估计,这种算法在假定噪声是独立同分布的加性高斯白噪声(AWGN)的情况下,是部分响应最大似然(PRML)系统的最优译码算法。但是随着硬盘读头技术的不断改进以及存储密度的不断提高和位间距的缩小,进入 Viterbi 译码器的噪声已经不再是平稳的白噪声,而是互相关的有色噪声。这种噪声动摇了采用 Viterbi 算法的基础,会引起 Viterbi 译码器较大的误码率,显著降低读写通道系统的性能。由于 Viterbi 算法是一种快速算法,而且目前几乎所有的硬盘读写通道均采用了 Viterbi 译码器,因此寻找能白化有色噪声,使其能继续适用 Viterbi 译码器的方法,对于提高磁存储的容量具有重要价

值。

进入 Viterbi 译码器的噪声主要来自盘片的相关噪声、被均衡器有色化的电子噪声以及不完全均衡残留下来的码间干扰。一方面,在高线密度条件下,每半幅宽超过 2.5 个通道位周期时(PW50/T>2.5),盘片噪声已经成为非平稳、互相关甚至还与数据内容相关的有色噪声^[1]。这种噪声可用 2^{P+1} 个互相关函数部分描述:

$$R(m, n | \bar{a}) = E[n_{k-m} n_{k-n} | \bar{a}] \quad (1)$$

这里 $\bar{a} = a_k a_{k-1} \dots a_{k-(p-1)}$ 是包含时刻 k 的在 k 之前的 P 个数据位。上式中的期望值不仅与噪声相关而且与数据 $a_{-\infty} \dots a_{k-p}$ 相关,但 $a_{k+1} \dots a_{\infty}$ 不包含在条件内。文[1~3]对这种盘片相关噪声作了详细论述。另一方面,在高线密度条件下,线性 FIR 均衡器在把需要的信号均衡为 PR4 或 EPR4 等信号时,需要把通过的波形整形为更尖细的形状,而这会使噪声有色化。图 1 从上到下依次图示了从硬盘采集的实际伺服信

^{*} 国家 973 重大基础课题资助项目(2004CB3182); 国家自然科学基金资助项目(60673002, 60373091); 国家 863 计划资助项目(2005AA114180)。刘春 博士研究生,研究方向为磁存储、光存储系统研究等;谢长生 教授、博士生导师,研究方向为海量数据网络存储系统的研究;黄浩 副教授。

号的波形、用离散时间传递函数为 $(1+D - D^2 - D^3)$ 的 EPR4 均衡器直接对伺服信号均衡后噪声被有色化的波形,以及 EPR4 均衡器的幅频响应曲线。从幅频响应曲线可见,EPR4 均衡器对不同频段噪声的幅频响应特性不同,使得白噪声通过后反成为有色噪声。从通过 EPR4 均衡器后的波形来看,噪声被加重了。

噪声互相关意味着以前采样值的噪声与数据信息会对当前采样值的噪声与数据信息产生影响,根据这个特性可以引入噪声预测方法来改进系统性能。噪声预测就是基于以前位周期的噪声与数据的估计值来预测当前的噪声值,并用此预测值来抵消当前噪声的方法^[4,5,7~9]。通过向 Viterbi 译码器的度量计算过程中嵌入预测噪声或称为白化噪声的算法,就能解决 Viterbi 译码器不适用于有色噪声序列译码的问题,而且这种嵌入方法独立于已有的时钟恢复环路与自动增益环路,对读写通道其他模块没有影响。这种内嵌在 Viterbi 计算过程中能白化噪声、执行最大似然序列估计的算法,就是噪声预测最大似然(NPML)算法。

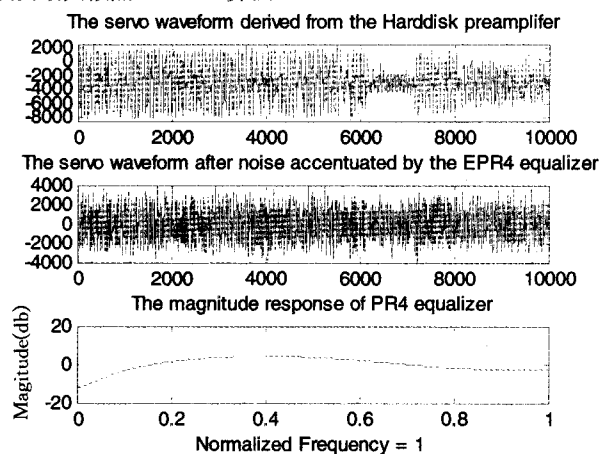


图1 EPR4 均衡器对伺服信号均衡后噪声被有色化

本文首先基于 Lorentz 方程建立了硬盘读写通道的 SIMULINK 仿真模型,并提出了检验模型仿真结果准确性的简便方法,然后利用该模型对比研究了传统的 Viterbi 译码算法,以及采用嵌入 FIR(有限冲击响应)噪声预测滤波器的译码算法。仿真结果表明,在相同的存储密度下,NPML 能获得比 PRML 更高的信噪比和更低的位错误率,提高了硬盘读写通道的性能。

2 读写通道模型与噪声预测方法

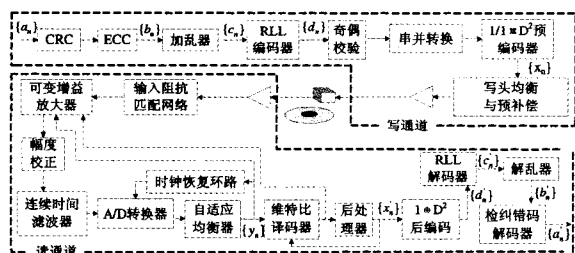


图2 硬盘读写通道结构

图2描述了硬盘读写通道内部的主要模块和结构。用户数据序列 $\{a_n\}$ 逐次经过 CRC、ECC 编码、加乱器加乱、游长受限(RLL)编码、奇偶校验编码和预编码后,成为序列 $\{x_n\}$ 并以

速率 $1/T$ (T 为通道位周期)写入盘片。读头读回的信号包括有码间干扰的调制信号和噪声,经过前置放大、可变增益放大和低通滤波后,进行数模转换,然后由自适应 FIR 均衡器按照设定的目标波形做整形。Viterbi 译码器按照最大似然算法对均衡后的采样序列进行判决和后处理,并将最终判决序列 $\{x'_n\}$ 输出给后编码模块做 $1 \oplus D^3$ 变换,变换结果 $\{d'_n\}$ 再给 RLL 解码器解码。解码后的序列 $\{c'_n\}$ 由解乱器解乱,得出序列 $\{b'_n\}$,最后经过 ECC 和 CRC 解码器解码恢复出原始的用户数据序列。

2.1 仿真模型的构建方法

硬盘磁头的读写过程一般采用 Lorentz 模型进行描述,即单个磁化翻转通过磁头写入-读回后,其等效的幅度响应可用 Lorentz 方程表述:

$$V_{iso}(t) = 1 / [1 + (\frac{2t}{PW50})^2] \quad (2)$$

而由两个连续的磁化翻转形成的脉冲响应函数则为

$$V_{impulse} = \frac{1}{2} [V_{iso}(t) - V_{iso}(t-T)] \quad (3)$$

其中 T 为磁化翻转的间隔, $PW50$ 为单磁化翻转波形的半幅宽。

图3描述了在输入相同的随机序列时,预编码目标分别为 PR4、EPR4,对应存储密度 $PW50/T$ 分别为 2.0 和 3.0 时,利用 Lorentz 模型生成的随机信号的读回波形。

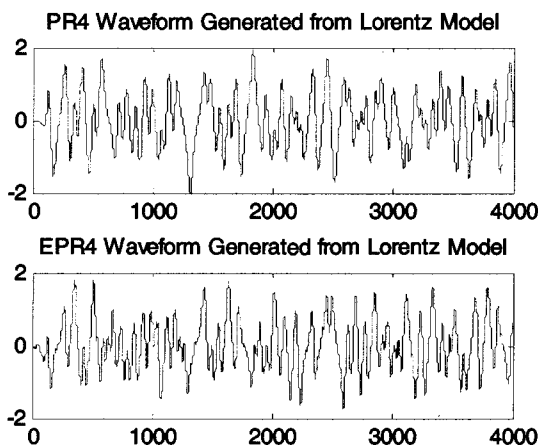


图3 利用 Lorentz 模型生成的 PR4 和 EPR4 波形

整个 SIMULINK 仿真模型主要是实现了图2的基本功能模块。但为了简化模型,假定了模型的输入直接就是已经经过了 RLL 编码、奇偶校验编码和并串转换的数据序列,即只关注于硬盘读写通道的 $\{x_n\}$ 到 $\{x'_n\}$ 之间的部分。该模型支持三种不同类型的输入:自定义序列、随机序列和导入的实际硬盘信号序列。模型的作用是:随机输入和给定输入序列经过预编码和 NRZI 变换后由 Lorentz 波形发生器调制出 Lorentz 波形,然后通过 AGWN 通道叠加高斯白噪声,AGWN 通道的信噪比 SNR 可调。含噪声的序列送入模拟前端的可调增益放大器 VGA、基线校正环节 BSC、连续时间滤波器 CTF 进行放大和滤波,再送入 ADC 模块进行采样率的转换,然后由自适应均衡器按最小均方算法(LMS)对 ADC 采样的数据进行整形。这种模型能对均衡器引起的有色噪声进行仿真。另一个输入为真实信号,它由 LeCroy WavePro 7300A 数字示波器从实验板上的微硬盘前置放大器的输出端测量,并导入 MATLAB 工作空间。由于它是真实信号,因此

可用于对非平稳数据相关噪声的仿真。实验板主要由 CF-USB 转接卡、JTAG 接口卡和微硬盘组成,如图 4 所示。微硬盘采用贵阳南方汇通公司生产的 1 英寸 6GB 微硬盘。

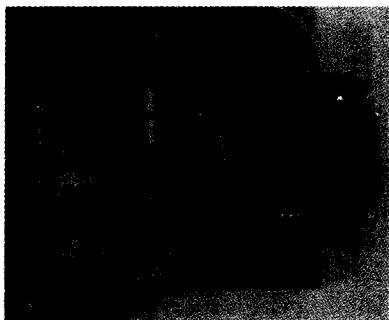


图 4 提供实验信号的微硬盘接口实验板

模型中的 Viterbi 译码器按照通道位速率接收整形后的序列,并按照 PR4 网格图计算最小欧式距离做最大似然序列估计。模型中的 Viterbi 译码器由自编写的 M 文件产生,内置了几种噪声预测算法和最大似然算法。Viterbi 输出的结果经过后编码处理后送入误码率检测模块,该模块比较原始信号和译码后的信号,并计算误码率,将结果保存到工作空间。

2.2 仿真模型有效性的判别方法

为了判别该模型的有效性,采用了一种比较伺服码信息的间接判定方法。图 5 显示了硬盘伺服扇区信息格式,其中伺服编号 Sector No 为 8 组 Manchester 编码,共 32 位。在读取相邻扇区的数据时,通过数字示波器测量微硬盘前置放大器输出端,将得到的数据导入模型后,若解码后得到的 Sector No 相差一位,则可判定模型工作正确。

Preamble	STM	Sector No	Track No	Gap	A	B	C	D	pad
----------	-----	-----------	----------	-----	---	---	---	---	-----

图 5 硬盘伺服扇区格式

2.3 传统的 Viterbi 译码算法

设在时刻 j , 自适应均衡器的输出 y_j 被送到以 8 状态 EPR4 网格工作的 Viterbi 译码器中,EPR4 网格图如图 5 所示。网格上的每一个状态代表由 3 个历史输入序列组成的可能序列对,离开每一个状态的 2 个分支表示当前可能输入的两个可能值。设 s 和 s' 是由分支 b 连接的网格上的两个状态,如果 $m_j(s)$ 是在时刻 j 进入状态 s 的存活路径的累加路径度量, $y(b)$ 表示对应分支 b 的无噪声均衡器输出,则累加度量的更新按照以下过程进行:

$$m_{j+1}(s') = \min\{m_j(s) + [y(b) - y_j]^2\} \quad (4)$$

其中的 $B=[y(b) - y_j]^2$ 即是分支度量的计算式。 $y(b)$ 由状态转换 $S_j \rightarrow S_k$ 决定,可用 $[a_n(j) - a_{n-2}(j)]$ 代替。当从状态 s 出发进入状态 s' 的所有分支 b 都计算完后,由其中的最小值将累加路径度量更新。对应最小值的那个分支作为保留路径用来延伸存活路径,而其他路径则被淘汰。

这种译码过程实际上是沿着设定的网格路径比较接收到的采样值与理想采样值的均方欧氏距离,然后选择有最小累积均方欧氏距离的网格路径作为最大似然的存活路径,再根据存活路径上每一个分支的输入值推导判决结果,并迭代执行这种操作进行译码。这种最大似然算法的前提是噪声为零均值的加性高斯白噪声,而且信道无记忆,即噪声独立的影响

各个码元,但事实上在高存储密度下由于有色噪声的出现该前提已经不成立了。

$$\text{EPR4: } r_k = a_k + a_{k-1} - a_{k-2} - a_{k-3} \quad S_{ik} = (a_{k-3}, a_{k-2}, a_{k-1})$$

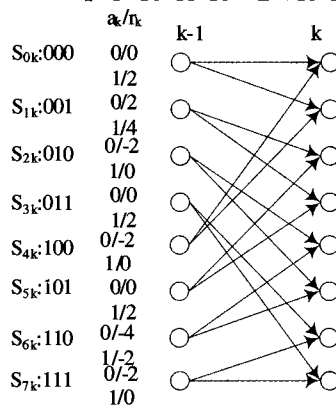


图 6 EPR4 网格图

2.4 噪声预测最大似然译码方法

如果在 Viterbi 译码器的分支度量计算过程中,对均衡器输出值不但减去理想的无噪声均衡器输出值(实际上是用 Viterbi 的译码输出值替代),还减去预测的噪声值,就可以抵消有色噪声的功率,使其白化。噪声预测最大似然译码方法的原理,就是根据 Viterbi 历史路径推导出过去噪声预测估计值,然后由噪声预测算法推导当前的噪声估计值,再反馈回 Viterbi 输入端,与当前的噪声值相减,以抵消有色噪声或白化噪声。由于噪声预测算法在形式上与滤波器结构相当,因此也可以称为预测滤波器。采用 FIR 形式的预测滤波器结构简单易实现,因此本文以它来说明噪声预测算法和分支度量的计算过程。

2.4.1 嵌入 FIR 噪声预测的 Viterbi 译码算法

设 y_n 是 EPR4 均衡器的输出,它由数据信号、有色噪声以及未完全均衡的残留干扰组成: $y_n = a_n - a_{n-2} + w_n$, w_n 表示总失真,包括有色噪声和均衡器输出中的残留干扰分量。若用 $p(D) = p_1 D + p_2 D^2 + \dots + p_N D^N$ 表示采样值 w_n 的有 N 个抽头的最小均方(MMSE)误差噪声预测滤波器的传递函数多项式, $S_j, j=1, 2, \dots, 8$, 表示 8 状态 EPR4 网格图中的第 j 个状态,则在 nT 时刻,对应从状态 $S_j \rightarrow S_k$ 的状态转换, NPML 检测器的分支度量的计算式为

$$B_n(S_j, S_k) = [y_n - \sum_{i=1}^N (y_{n-i} - \hat{a}_{n-i}(S_j) + \hat{a}_{n-i-2}(S_j)) p_i - a_n + a_{n-2}]^2 \quad (5)$$

这里 $\hat{a}_{n-i}(S_j), \hat{a}_{n-i-2}(S_j)$ 表示从与状态 S_j 有关的历史路径中得出的过去的判决结果,而 a_n 和 a_{n-2} 根据假设的状态转换 $S_j \rightarrow S_k$ 决定。 $\sum_{i=1}^N (y_{n-i} - \hat{a}_{n-i}(S_j) + \hat{a}_{n-i-2}(S_j)) p_i$ 部分就是根据历史结果预测的当前噪声值,将其从 y_n 中减去,即等于抵消 y_n 中的有色噪声分量和残余干扰,使噪声白化。白化后的总失真分量为

$$e_n = w_n - \hat{w}_n = w_n - \sum_{i=1}^N w_{n-i} p_i = (y_n - a_n + a_{n-2}) - \sum_{i=1}^N (y_{n-i} - a_{n-i} + a_{n-i-2}) p_i \quad (6)$$

可以看出,通过噪声预测方法能减少总失真的功率,使 Viterbi 面对的噪声由 w_n 降为 e_n ,达到了使噪声白化的目的。此外,如果把预测器的系数设置为 0,等式(2)中的分支度量就等价于传统的 PRML 译码器。

当噪声预测滤波器 $P(D)$ 的抽头数 $N=1$ 时可以得到一

个简单的且有一定实际价值的 NPML 检测方案, 这时有 $P(D) = P_1 D$, 分支度量的计算式变为

$$B_n(S_j, S_k) = [y_n - y_{n-1} p_1 + \hat{a}_{n-1}(s_j) p_1 + a_{n-2}(s_j) - \hat{a}_{n-3}(s_j) p_1 - a_n]^2 \quad (7)$$

在单抽头预测器的限制下, 系统可以调整到不同的通道操作点来获得最佳的性能。对应固定系数值 $p_1 = 0$ 或 $p_1 = -1$, 该译码器分别对应为 PRML 和 EPRML 译码器。

当抽头数 $N=4$ 时, 系数值可根据 MMSE 方法自适应决定, 此时预测器对噪声的预测更精确, 但显然代价是计算复杂度增加了。

2.4.2 FIR 预测滤波器系数的快速逼近方法

仿真需要确定 FIR 预测滤波器的系数, 但长系数 FIR 预测器的最优系数值难以得到。文[6]附录 A 提出的逼近方法可以得到这种系数, 但计算过程复杂。本文采用了一种利用 MATLAB LMS FILTER 模块做 MMSE 逼近的技巧, 可以快速地逼近得到长系数 FIR 预测滤波器的最优系数值。将自定义的规则洛伦兹波形一路输入自适应 LMS FILTER 的 Before 端口, 一路则经过升余弦滤波器调制后输入 After 端口, 则经过一段稳定时间后, LMS FILTER 的 Weights 端口即可得到各系数的权值。图 7 为 $N=20$ 时, 利用上述方法计算得到的 20 个系数的最优值。利用同样的方法可得 $N=4$ 时的最优系数值, 为 $[0.5869 \ 0.8824 \ 1.1985 \ 1.5312]$ 。

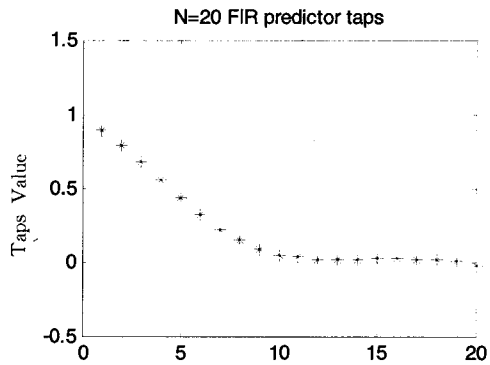


图 7 $N=20$ 时 FIR 预测器抽头的 20 个系数值

3 仿真结果

当各系数值计算得到后, 可以观测它们的频率响应特性。图 8 描绘了 $N=4$ 和 20 的 FIR 预测器以及两个零点为 $\beta_1 = -0.98, \beta_2 = -0.32$, 两个极点为 $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = -0.67$ 的 IIR 预测器的幅度响应曲线。IIR 预测器的系数是利用 ARMA 方法根据通道的响应特性辨识得到的。

图 8 预测器分别为 2 个零极点的 IIR 预测器、4 个系数的 FIR 预测器和 20 个系数的 FIR 预测器的预测器幅频响应曲线。通过设置通道模型中的 AWGN 模块的 SNR 参数值为 5~12, 并分别测量不同算法下误码总数达到 10 个时的位错误率, 发现在相同信噪比下, 通过对均衡器输出的有色噪声和残余干扰进行白化, 系统的位错误率得到了不同程度的降低。从图 9 看到, 在 $BER=10^{-4}$ 附近时, 设置 1 个系数 ($N=1$) 的 FIR 预测器, 通道的 SNR 比 PRML 可提高约 1dB。系数设为 4 个, 改善更明显, 约为 2dB。若采用 2 个零点和极点的 IIR 预测器, SNR 改进约为 3dB。而对应 SNR 都等于 12 时, BER 随 FIR 系数增加按数量级下降, 性能改进明显。

结论 本文介绍了一种 FIR 噪声预测最大似然算法与一套硬盘读写通道的仿真模型, 利用该模型研究了向 Viterbi 算法的分支度量计算过程中嵌入 FIR 形式的白化滤波算法

的有效性。仿真结果表明, 由于能将有色噪声白化, 在相同的存储密度下, NPML 能获得比 PRML 更高的信噪比和更低的位错误率。总体上采用 NPML 使 Viterbi 译码的误码率大为减少, 可大幅度提高硬盘读写通道系统的性能。

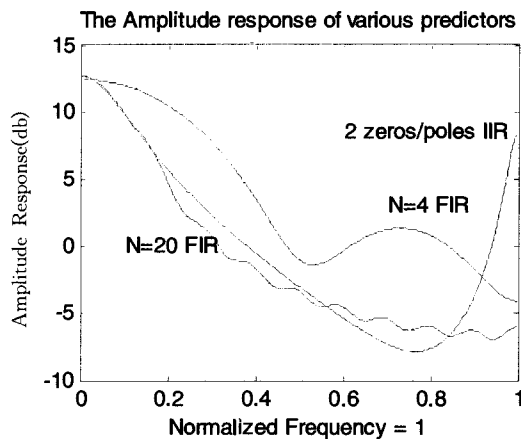


图 8 $N=4$ 和 $N=20$ 的 FIR 预测器的幅频响应曲线以及有两个零点和极点的 IIR 预测器的幅频响应曲线

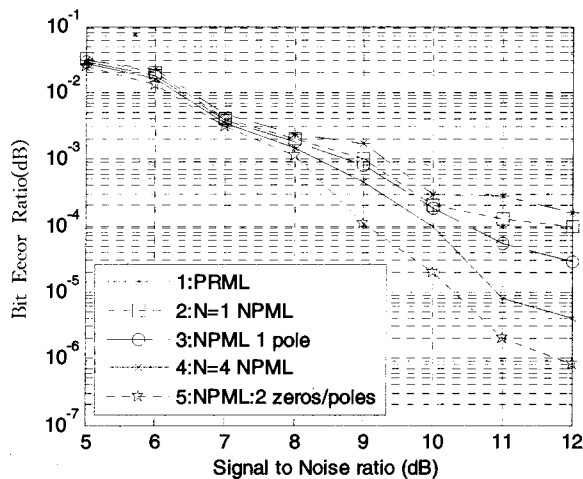


图 9 相同信噪比下不同算法的位错误率

参考文献

- 1 Moon J, Park Jongseung. Pattern-Dependent Noise Prediction in Signal-Dependent Noise. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 4(19): 730~743
- 2 Caroselli J, Altekar S A, McEwen P, et al. Improved Detection for Magnetic Recording Systems with Media Noise. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(5): 94~97
- 3 Dorfman V, Wolf J K. Viterbi Detection for Partial-Response Channels with Colored Noise. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 5(38): 2316~2318
- 4 Aviran S, Siegel P H, Wolf J K. Noise-Predictive Turbo Equalization for Partial-Response Channels. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 10(41): 2959~2961
- 5 Cideciyan R D, Coker J. Noise-Predictive Post-Processing for PRML Data Channel. US Patent No: 6,460,450B1, 202-10-1
- 6 Coker J D, Eleftheriou E, Galbraith R L, et al. Noise-Predictive Maximum Likelihood (NPML) Detection. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 1(34): 110~117
- 7 Eleftheriou E, Hirt W. Noise-predictive maximum-likelihood (NPML) detection for the magnetic recording channel. In: IEEE Conf Records, ICC'96, June 1996. 556~560
- 8 Kav'ci c A, Moura J M F. Correlation-Sensitive Adaptive Sequence Detection. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 3(34): 763~771
- 9 Kin Younggyun, Moon Jaekyun. Noise-Predictive Maximum-Likelihood Method Combined with Infinite Impulse Response Equalization. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 6(35): 4538~4543