

针对超高密度磁存储磁化跃迁噪声的约束编码

罗可^{1,3}, 李梳^{1,3}, 蹇雨根^{1,3}, 高宏宇^{1,3}, 张克政², 廖彦哲², 吴宇飞², 陈进才^{1,3*}, 卢萍²

(1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北武汉 430074; 2. 华中科技大学计算机科学与技术学院, 湖北武汉 430074;
3. 信息存储系统教育部重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 随着磁存储记录密度的提高, 记录位间距减小, 磁化跃迁噪声显著提高, 由此极大地影响回读信号质量. 为了降低超高密度磁存储系统记录图案磁化跃迁噪声的干扰, 本文分析研究了磁化跃迁噪声对回读信号质量的影响, 提出了限制连续跃迁的最大跃迁游程长度受限 (Maximum Transition Run, MTR) 约束编码 MTR($j=1$), 与允许连续跃迁的约束编码 MTR($j=2$) 和 MTR($j=3$) 相比, 可有效抑制磁化跃迁噪声. 通过实验测试了回读信号的检测效果, 当信噪比为 12 dB 时, 与 MTR($j=2$)、MTR($j=3$) 相比, MTR($j=1$) 相对误码率分别降低了约 30% 和 60%, 证实了限制连续跃迁约束编码 MTR($j=1$) 的数据检测可靠性更高.

关键词: 超高密度磁存储; 磁化跃迁噪声; 约束编码; 读写过程; 均衡检测

基金项目: 国家自然科学基金 (No.62272178, No.61672246)

中图分类号: TP334.5; TQ581

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)02-0483-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230527

Constrained Coding for Magnetization Transition Noise of Ultra-High Density Magnetic Storage

LUO Ke^{1,3}, LI Wei^{1,3}, JIAN Yu-gen^{1,3}, GAO Hong-yu^{1,3}, ZHANG Ke-zheng², LIAO Yan-zhe²,
WU Yu-fei², CHEN Jin-cai^{1,3*}, LU Ping²

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Key Laboratory of Information Storage System, Engineering Research Center of Data Storage Systems and Technology, Ministry of Education of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: As the recording density of magnetic storage increases, the recording bit spacing decreases and the magnetization transition noise increases significantly, which greatly affects the quality of the readback signal. To mitigate the interference of magnetization transition noise problem among recording patterns in ultra-high density magnetic storage systems, the maximum transition run (MTR) constraint code MTR($j=1$), which limits the continuous transition, is proposed to effectively suppress the magnetization transition noise compared with the constraint codes MTR($j=2$) and MTR($j=3$), which allow continuous transitions. We investigate the detection effect of the readback signal experimentally. When the signal-to-noise ratio is 12 dB, the detection bit error rate (BER) of MTR($j=1$) is reduced by about 30% and 60% relatively compared with MTR($j=2$) and MTR($j=3$), respectively. We confirmed that the MTR($j=1$) constrained coding that forbids continuous transitions can achieve higher data detection reliability.

Key words: high-density magnetic storage; magnetization transition noise; constrained coding; write and read process; equalization and detection

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62272178, No.61672246)

1 引言

随着 5G、自动驾驶和生成式人工智能等各类新技

术的融合发展, 全球数据总量呈指数级激增, 预计到 2027 年数据总量将达 291 ZB (ZettaBytes), 磁存储具有

价格低、容量大、数据易恢复、写入次数无限制等优势,未来仍是主要的数据存储方式^[1].磁存储在数据中心和云存储中扮演重要角色,提供高容量和低成本存储解决方案,适合存储海量数据,如用户数据和备份.它在访问频率较低的温冷数据存储方面表现突出,能够长期保存不常访问的数据,如企业历史记录和法律文件.磁存储也是数据备份和归档的理想选择,可有效保障数据安全.对于大数据和分析,磁存储能高效存储和处理大量原始数据,是数据湖(Data Lake, DL)的主要存储介质之一.此外,在视频监控和娱乐内容存储中,磁存储提供了大容量和长时间连续写入能力.由于高密度磁存储需要更小的存储单元,每个信息存储位不可避免地受到相邻位信号的干扰以及介质噪声和系统噪声的影响,如何减少磁化过程中的噪声干扰是高密度磁存储面临的重要挑战^[2].

磁存储系统和通信系统都涉及信号的处理与传输,前者将信息编码并存储在磁介质上,后者通过信道传输信息,二者都需要解决信号的编码、解码和噪声抑制问题.主要差别在于,磁存储系统主要面临数据的持久性和读取精度问题,而通信系统则更关注信道中的信号衰减、干扰和实时传输的可靠性.磁记录系统中,单位比特(bit)由其内部介质颗粒的磁化状态决定,因比特内部颗粒的不规则性导致的介质噪声成为制约当今磁存储密度提升的主要因素.此外,记录系统还受到电子噪声的影响,其谱密度均匀分布在较广的频率范围,是一种白噪声.与电子噪声特征相反,介质噪声是一种彩色噪声,来源因素包括记录区域的非均匀磁化和非线性磁化跃迁噪声,而跃迁噪声是介质噪声的主要来源.

针对超高密度磁记录建立合适的读写通道理论模型以及使用改进的均衡检测算法,可以有效抑制超高密度存储系统存在的非线性干扰^[3].然而,对检测器输出及对应记录图案的分析研究表明,当局部记录图案中存在相邻位的连续磁化状态跃迁时,检测错误的概率增加^[4].总体上,为了降低磁记录系统信号检测的错误概率,提升检测结果的可靠性,需要采用一定的约束条件对记录数据中连续的状态跃迁进行限制,约束编码或调制编码技术就是解决此类问题的有效手段.

在磁记录中,最广为人知的约束是游程长度受限(Run-Length Limited, RLL)编码^[5],可表示为 $RLL(d, k)$,其中“1”之间的间隔至少为 d 个但不超过 k 个“0”. d 约束有助于增加线密度,减少码间串扰, k 约束有助于为定时和增益控制提供反馈^[6].Rădescu等人^[7]提出一种将原序列转换为 (d, k) 约束下的信道序列迭代方法,可被用于磁记录中对信息序列进行RLL编码.码率为 $2/3$ 的 $RLL(0, 1)$ 可有效提高磁带存储的编码效率^[8].在低

密度的磁存储中,码率为 $1/2$ 的 $RLL(2, 7)$ 码和码率为 $2/3$ 的 $RLL(1, 7)$ 码占主导地位^[9].另一种约束方式是最大跃迁游程(Maximum Transition Run, MTR)约束^[10],MTR约束可以描述为 $MTR(j, k)$, j 为连续跃迁约束, k 为通常的RLL约束^[11].由于MTR编码执行了一个 j 约束,它限制了编码比特序列中连续比特的数量,即限制了写入磁盘上的跃迁的最大次数,所以在高密度下可以避免连续跃迁导致系统性能降低^[12].Mittelholzer^[13]基于枚举法提出了一种基于 $j=2$ 的MTR码,实现了高码率调制码.Lee等人^[14]提出了一种能提高垂直磁记录(Perpendicular Magnetic Recording, PMR)系统中检测性能的双MTR编码方案,限制每个码字中 $j=2$,并在码字连接处允许 $j=3$ 、 $j=4$ 和 $j=4.5$ 的MTR调制码被应用于PMR的调制码-纠错码的级联结构中,有效提高了总码率和错误传播控制^[12].

前面MTR的研究均是 $j>2$ 的情况,本文通过对磁化跃迁噪声分析,发现磁化过程中的跃迁偏移会随着跃迁之间距离增加而减小,即理论上跃迁偏移随着 j 减小而减小,因此本文基于 $MTR(j=1)$ 提出了一种有效消除跃迁噪声的约束编码方法,为证明该方法的有效性,将其与 $MTR(j=2)$ 和 $MTR(j=3)$ 编码做了对比,并分析了3种约束编码的理论容量.最终得到该方法相较于传统的约束编码方法具有如下明显优势:一是在相同的信噪比下,降低了系统误码率;二是系统信道容量更大,对相同密度的硬盘而言,可以存储更多的数据.

2 限制磁记录状态跃迁的约束编码

2.1 磁化跃迁噪声分析

在磁盘信号的回读过程中,位于旋转磁盘磁道上方的读磁头通过感应介质的磁化状态的变化读取记录信息,磁化跃迁导致变化的磁场,产生感应电压信号获取信息.记录位元是长度为 B 的窗口.以峰值检测技术为例,当在位元内检测到足够高的电压峰值时,判决为1;否则,判决为0.在磁记录信道中写入数据有2种主要的调制方式:一种情况为使用不归零调制(Non Return Zero code, NRZ)进行数据写入,在NRZ调制中,写入数据可用二进制数字0或1表示,分别对应介质磁化的0或1方向;另一种情况为使用反向不归零调制(Non Return Zero Inverted code, NRZI)进行数据写入,在NRZI调制中,二进制数字1对应2 bits之间的跃迁,0对应无跃迁,本文采用NRZ的调制方式写入.上述2种调制方式中,假定 k 时刻写入数据为 $a(k)$,则跃迁序列中当前位为 $d(k) = a(k) \oplus a(k-1)$, \oplus 表示异或操作.相邻时刻写入比特位相同时,对应跃迁位为0,反之为1,因而跃迁序列可用于描述写入状态的变化情况.由于噪声的存在,实际的回读电压信号通常并不平滑.如果跃迁

序列中连续的 1 靠得太近,那么对应磁化跃迁的电压响应会相互干扰,这种干扰也是码间串扰. 图 1 所示为仿真重构的回读信号,这种连续跃迁干扰会严重降低信号质量. 在这种情况下,记录数据很难被正确区分. 如果跃迁间隔足够远,即跃迁序列中任意 2 个 1 被足够长的 0 间隔分开,可以减少错误发生的可能性.

为提高记录面密度,记录位尺寸被逐渐缩小,而读磁头由于制造工艺的局限,尺寸很难进一步减小,因而在记录平面内二维回读响应沿磁道方向和跨磁道方向的半幅脉宽将逼近或超过比特的长度和宽度,即读磁头的信号读取分辨率降低^[15]. 连续的磁化状态跃迁使相关记录位的回读信号出现严重混叠,如图 1 中虚线框窗口,连续多位磁化跃迁导致无法直接从回读信号中分辨原始写入数据的极性.

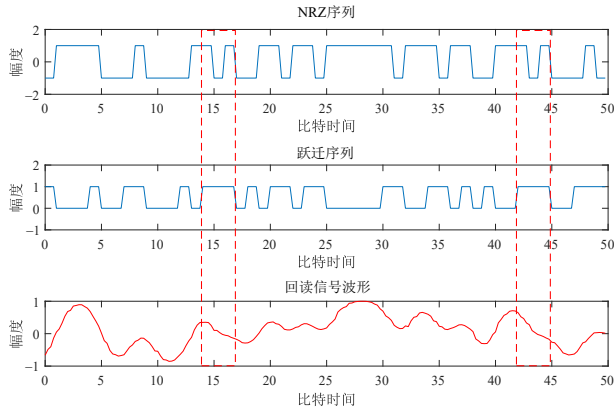


图 1 磁记录读写信号

实际上,由于写入序列中存在磁化状态跃迁,先写入的跃迁位会产生退磁场,写磁头写入下一个跃迁位时,产生的写磁场与前一个记录位的磁化方向相反. 跃迁写入的位置由写磁头线圈的驱动电流控制,由于写磁场受到前一个磁化跃迁退磁场的影响,当前跃迁的实际写入位置会发生偏移,这种由前一个磁化跃迁退磁场导致当前写入跃迁位置的偏移被称为非线性跃迁偏移(NonLinear Transition Shift, NLTS)^[16]. 跃迁位置的偏移量取决于记录介质和磁头的参数以及记录图案中前后跃迁的距离. 随着记录密度的提高,记录图案中跃迁位置相互间距离越来越小,由跃迁位退磁场引发的跃迁位置偏移将成为更重要的非线性噪声源,在超高密度磁存储中其影响不可忽略.

在垂直磁记录中(如图 2 所示),由记录图案跃迁位产生的净退磁场 $H_{\text{demag}}^{\text{net}}$ 可以近似表示为先前写入跃迁在记录层产生的退磁场 H_{demag} 与其在软底磁层(Soft Under-Layer, SUL)镜像产生退磁场 $H_{\text{demag}}^{\text{SUL}}$ 的叠加,即

$$H_{\text{demag}}^{\text{SUL}} = H_{\text{demag}} + H_{\text{demag}}^{\text{net}} \quad (1)$$

假定记录层介质厚度为 T ,介质下表面到 SUL 的间

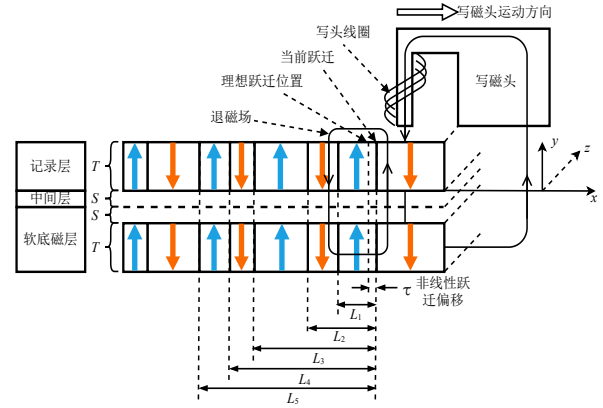


图 2 磁记录写入状态磁化跃迁示意图

距为 S ,介质的剩余磁化强度为 M_r ,写磁头在写入位置产生的写磁场梯度为 HFG,由近及远的跃迁位与当前写入跃迁距离记为 $L_i, i = 1, 2, \dots, n$,每个跃迁位在介质记录层产生的退磁场可以表示为

$$H_{\text{demag}} = (-1)^{i-1} \times \frac{1}{T} \times \int_0^T \frac{M_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{L_i}{y} - \tan^{-1} \frac{L_i}{y-T} \right) dy \quad (2)$$

由 SUL 镜像中每个跃迁位产生的退磁场为

$$H_{\text{demag}}^{\text{SUL}} = (-1)^{i-1} \times \frac{1}{T} \times \int_0^T \frac{M_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{L_i}{y+2S+T} - \tan^{-1} \frac{L_i}{y+2S} \right) dy \quad (3)$$

当前写入跃迁位置相对于理想跃迁写入位置产生的跃迁偏移为

$$\tau = \frac{H_{\text{demag}}^{\text{net}}}{\text{HFG}} \quad (4)$$

当前写入跃迁发生的跃迁位置偏移取决于先前所有写入跃迁的退磁场贡献,理论上,先前写入跃迁距离当前跃迁位置越远,其对当前跃迁的位置偏移影响越小. 考虑当前跃迁位前的 10 个跃迁位,假定记录介质厚度为 10 nm,与 SUL 上表面的间距为 20 nm,记录位即比特长度(Bit Length, BL)分别取 8 nm、12 nm、16 nm、20 nm,介质剩磁场与写磁头写场梯度的比值为 1.5077.

图 3 为不同比特长度条件下与当前跃迁位间隔不同比特数的先前写入跃迁造成当前跃迁位置偏移的程度,随着记录位长度的减小,最近邻的先前写入跃迁会使当前跃迁实际写入位置发生最大的跃迁偏移,且该偏移量随比特长度的减小呈指数增大. 比特长度为 10 nm 时,距离 1 bit 的先前写入跃迁使当前跃迁发生 1 bit 长度的偏移. 在确定的比特长度下,随着跃迁距离的增加,当前跃迁位受到前一个跃迁位退磁场的影响逐渐衰减,因而当前跃迁的非线性偏移量越来越小. 为了防止记录密度提升导致的跃迁位置偏移和连续跃迁导致的回读信号混叠,需要采用一定的约束编码方

法消除记录图案中有害的跃迁噪声,改善回读信号质量.

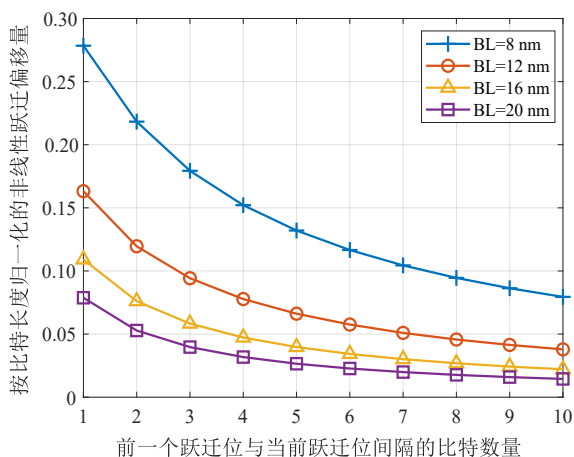


图3 磁记录跃迁偏移

2.2 约束编码原理

高密度磁记录通道存在2类约束:一类是改进时序和增益控制以及简化通道 Viterbi 检测器设计的约束,另一类是提高系统抗噪性的约束.这些约束的编码对象为记录通道的跃迁序列,其中“1”表示记录位发生了状态转换,而“0”表示未发生状态转换.

第1类约束主要包括游长受限(RLL)约束,该约束通常定义为 $RLL(d, k)$ 的形式,参数 d 和 k 分别表示2个跃迁位“1”中间至少和至多间隔连续“0”的个数.此外类似的约束还有在部分响应极大似然(Partial Response Maximum Likelihood, PRML)系统中采用的 $PRML(G, I)$ 约束,对整个(global)序列而言“0”的最大游长是 G ,而在该序列偶数索引和奇数索引定义的2个交错(interleaved)子串中,“0”的最大游长是 I . G 约束与 RLL 编码的 k 约束作用相同,而 I 约束使 Viterbi 检测器能够在实际内存限制内正常工作.为了便于区分 $PRML(G, I)$ 约束和 $RLL(d, k)$ 约束,前者常采用 $(0, GI)$ 的表示形式,其中0可视为 $RLL(d, k)$ 中 $d=0$ 的约束,表明此约束允许存在相邻跃迁的串扰.

第2类约束消除了一些容易检测错误的记录序列图案,以增加剩余码字序列之间的最小距离(距离增强)或消除某些主要错误事件出现的可能性.这类约束通常没有明确的约束定义.在磁记录通道中,距离增强约束的2个重大进展是最大跃迁游程(MTR)约束,它限制了跃迁位“1”的最大游程长度,即连续跃迁的位数. MTR 约束编码可以表示为 $(j; k)$ 的形式,其中 j 为编码后序列中允许的最大连续跃迁次数, k 约束就是普通 $RLL(d, k)$ 约束中的 k 约束,也用于记录信号的定时恢复.

$(0, GI)$ 编码由于容忍了任意长度的连续跃迁,其可归类到 $RLL(0, G)$ 约束,不同约束编码可能存在不同的衍生构造特征和分类方法,具体的编码构造方法不是本文的研究重点.不同编码序列具有不同的跃迁特征,通过编码控制记录位中磁化状态跃迁从而研究其对系统检测可靠性的影响. RLL 与 MTR 的编码约束条件与跃迁特征直接相关,大体上, RLL 约束编码和 MTR 编码可以进行如图4所示的分类和比较.一般而言, $RLL(d=0)$ 约束编码后的码字中允许出现各种游程的连续跃迁,是一种非常宽松的 MTR 编码,而 $MTR(j=1)$ 则是一种更宽松的 RLL 编码.一种极端情况是 $RLL(d=\infty)$, 可以理解为编码后的跃迁序列中仅存在1次磁化状态的转变,跃迁位左侧的记录信息完全相同,右侧的信息也完全相同,例如 NRZ 序列“...000111...”和“...111000...”对于只存在1个跃迁位且其右侧后续位为无限长相同记录数据的序列,可近似认为该序列不存在跃迁位,当然在实际的磁记录设备中,存储数据几乎不会出现这种情况.

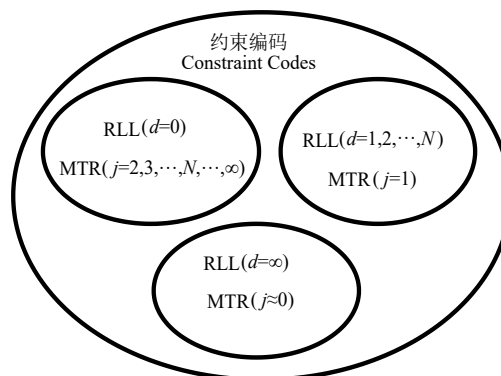


图4 RLL 编码和 MTR 编码的关系

3 最大跃迁游程约束编码

本节提出了限制连续磁化跃迁的约束编码 $MTR(j=1)$, 并给出了一种典型实现, 为了方便比较, 同时列举了2种典型的允许连续磁化跃迁的 MTR 约束, 即 $MTR(j=2)$ 约束和 $MTR(j=3)$ 约束. 针对这3类约束, 分别通过有限状态机转换图(Finite State Transition Diagram, FSTD)表示. 基于查找表的编码器构造方法对每种约束进行分析. 采用 MTR 约束对写入数据的跃迁序列进行编码, 二维回读系统信道模型如图5所示. 在二维回读过程中, 读磁头对记录位的响应强度随着其与该记录位的距离增加而减小, 仅需考虑记录位 (i, j) 的有限邻域 $N_{i,j}$ 内记录比特的影响, 同时介质颗粒采用 Voronoi 模型生成. 二维回读模型中比特 (i, j) 的回读信号样本 $r_{i,j}$ 可表示为读磁头对有限邻域 $N_{i,j}$ 内不同位置记录位 (m, n) 的

响应强度 $h_{m,n}$ 和写入数据 $a_{m,n}$ 的加权和与电子噪声的叠加,即

$$r_{i,j} = \sum_{(m,n) \in N_{i,j}} a_{m,n} h_{m,n} + n_{i,j} \quad (5)$$

其中, $n_{i,j}$ 表示电子噪声, 噪声强度用信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 表示, $\text{SNR} = 10 \log_{10} (V_{\max}^2 / \sigma^2)$. V_{\max} 为最大的回读信号强度, σ 为噪声的标准差. 各比特的响应强度分布可用二维高斯函数表示^[17]:

$$h(\Delta x, \Delta y) = \frac{C}{2\pi \cdot \text{BL} \cdot \text{BW}} \times \exp \left\{ -\frac{C}{2} \left[\left(\frac{\Delta x}{\text{BL}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\text{BW}} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

其中, 沿道方向的比特长度 BL 和跨道方向的比特宽度 BW 分别为 7.3 nm 和 22.1 nm; $(\Delta x, \Delta y)$ 为二维平面内读磁头中心和记录位中心在沿道和跨道方向的相对距离. 读磁头对记录位 (i, j) 的回读响应为该记录位内部所有介质颗粒的累积响应强度:

$$h_{i,j}(x_c, y_c) = \sum_{\{(x_k, y_k) | k \in G_{i,j}\}} h \begin{pmatrix} x_c - x_k + J \\ y_c - y_k \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, $G_{i,j}$ 为记录位 (i, j) 内部颗粒的集合, J 为沿道方向根据长度为 10 的记录图案计算得到的抖动偏移; (x_c, y_c) 为比特 (i, j) 的中心.

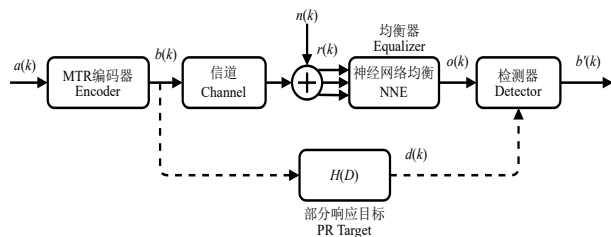


图5 约束编码信道仿真模型

数据首先通过 MTR 编码器将写入数据对应的 NRZI 序列转换成符合约束条件的跃迁序列, 此时跃迁序列为 NRZI 形式, 在已知序列首位比特的情况下, 可以将编码后的跃迁序列还原为实际写入的 NRZ 数据序列. 编码后的数据通过二维回读信道模型时会附加噪声, 回读信道指的是读磁头基于写入磁化状态感应得到电信号的过程, 可用模型表示. 为减少沿道方向的码间串扰和跨道方向的道间串扰, 提出一种基于回读样本数据块的神经网络均衡器^[17]. 使用神经网络均衡器 (Neural Network Equalizer, NNE) 可以有效滤除一部分噪声, 通过二维检测器得到数据, 检测器采用 Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv (BCJR) 算法进行最大后验概率序列检测. 神经网络经常被用于表征特征依赖的回归过程, 可以用于学习写入数据和回读信号之间的相关关

系, 被用来研究高密度磁记录的串扰消除. NNE 是一个 2 层的神经网络, 与文献中提出的结构类似, 其中, $\mathbf{r}(r_i, i=1, 2, \dots, N)$ 表示与目标中心比特邻域内每个比特对应的回读信号块. N 是每个局部邻域块内的比特数量, 隐藏层中有 N 个神经元, 每个输入样本信号连接到隐藏层中的 1 个神经元. 输出层是线性计算单元, 每层的输出如下:

$$\mathbf{o}_{\text{hidden}} = \sigma(\mathbf{W}_{\text{hidden}} \mathbf{r} + \mathbf{b}_{\text{hidden}}) \quad (8)$$

$$\mathbf{o}_{\text{out}} = \mathbf{w}_{\text{out}} \mathbf{o}_{\text{hidden}} + \mathbf{b}_{\text{out}} \quad (9)$$

其中, 激活函数 $\sigma(\cdot)$ 为双曲正切函数 \tanh ; $\mathbf{W}_{\text{hidden}}$ 、 \mathbf{w}_{out} 分别代表隐藏层和输出层大小为 $N \times N$ 、 $N \times 1$ 的权重; $\mathbf{b}_{\text{hidden}}$ 和 \mathbf{b}_{out} 分别代表隐藏层和输出层大小为 $N \times 1$ 和 1×1 的偏置向量和标量. 最后一层的输出是一个标量, 用于表示记录位回读信号的均衡输出估计值. NNE 的损失函数是网络输出与编码通道比特之间的均方误差 (Mean Square Error, MSE), 公式为

$$L(\mathbf{r}, \mathbf{o}) = \frac{1}{K} \sum_i^K |r_i - o_i|^2 \quad (10)$$

每个信噪比 (SNR) 下使用 12 288 000 个样本按 7:3:1 分成训练集、验证集和测试集. 网络模型的参数随机初始化, 学习率初始设为 0.001, 当损失降低时, 学习率按 0.1 的比例减小; 当一个学习步骤导致损失函数增加时, 学习率按 10 倍的比例递增. 为减少计算开销, 采用 3×3 的滑动窗口获取记录平面对应的回读样本块作为均衡器训练所需的特征数据. 每个样本块包含沿磁道 3 bits 和相邻 3 磁道的回读采样信号, 其中心位置对应的写入比特为神经网络均衡器的标签, 每个训练样本包含 9×1 个特征数据和一个对应的标签.

3.1 MTR ($j=1$) 约束编码

对于经过编码的跃迁序列, 如果“1”表示有跃迁, “0”表示无跃迁, 如图 6 所示, 分别用带有箭头的实线和虚线代表跃迁序列的转换过程, 1 个圆圈表示 1 个确定的状态, 跃迁序列就是在这些状态之间发生转换经过路径的标签表示的序列. 符合 MTR ($j=1$) 约束的编码器设计, 就是要寻找可以经历该 FSTD 的有限长度约束序列, 同时需要使序列与序列连接的边界同时满足约束条件. 设计编码器的一种简单思路是利用枚举法得到所有可能的备选序列集合, 从中挑选出满足编码率需求的部分备选序列作为编码器的码字集合. 假定信息块长度为 m , 该信息块编码后得到的码字长度为 n , 此时编码率 $R = \frac{m}{n}$. 对于长度为 n 的二进制序列, 共有 2^n 种可能的排列, 去除其中不符合约束条件的序列就是编码器可以选择的备选码字集合, 只有当备选码字的数量大于或等于 2^n 时, 这些备选序列才可以用于构

造编码率为 $\frac{m}{n}$ 的编码器. 一般地, 当被编码的信息块长度越长, 编码器的编码效率越高. 编码效率指的是实际设计的编码器编码率与该类约束编码所能达到的最大编码率(容量)之比.

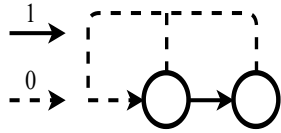


图6 MTR($j=1$)约束编码的FSTD描述

本文以编码率 $3/5$ 的 $MTR(1; \infty)$ 的编码器为例, 构造信息块长度为 3, 码字长度为 5 的约束编码, 信息块到码字的映射关系如表 1 所示. 编码和译码过程可以通过查找表的方式实现, 将要写入数据的跃迁序列分为长度为 3 的数据块, 通过信息块与码字映射关系的查表找到对应长度为 5 的码字进行替换, 根据被替换后的跃迁序列向磁盘中写入数据, 译码过程与此类似, 通过查找表反向查找替换即可. 对于 $MTR(j=1)$ 的编码器实现还有很多不同的方法, 但总体而言, 此类编码器由于对跃迁游程长度具有非常严格的限制, 因而也限制了不同的码字长度可用的备选码字数量, 间接表现为编码容量受到限制.

表1 编码率 $3/5$ 的 $MTR(j=1)$ 约束编码信息块与码字的映射关系

信息块	码字
000	00000
001	00001
010	00010
011	00100
100	00101
101	01000
110	01001
111	01010

3.2 MTR($j=2$)约束编码

实际上, 提出 $MTR(j=2)$ 就是为了消除跃迁序列中连续 3 次及以上跃迁, 这种约束编码就是将连续跃迁次数限制到 2 次及以下, 即连续 2 个“0”之间允许出现“1”“11”的跃迁图案, 该约束被证明可以消除连续 3 bits 错误的图案. 满足 $MTR(j=2)$ 约束的 FSTD 如图 7 所示, 该编码只允许出现最多 2 次连续跃迁(图中带箭头实线).

一种典型的 $MTR(j=2)$ 的编码实现如表 2 所示, 该表展示了编码率为 $4/5$ 的 $MTR(2; 8)$ 约束编码映射. 同样地, 根据映射表查找跃迁序列分块对应的码字进行替换即可得到符合编码约束条件的跃迁序列. 相比于 $MTR(j=1)$ 约束编码, $MTR(j=2)$ 约束编码对跃迁

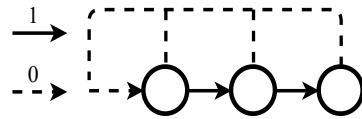


图7 MTR($j=2$)约束编码的FSTD描述

游程的约束更为宽松, 可用码字数量更多, 可以满足更长信息块的编码. 表 2 中排除了同样满足约束条件的全 0 码字, 任意码字前后拼接可得到 2 个跃迁位“1”中间至多间隔 8 个“0”的跃迁序列, 将 k 约束降低至 8.

表2 编码率 $4/5$ 的 $MTR(2; 8)$ 约束编码信息块与码字的映射关系

信息块	码字
0000	10000
0001	00001
0010	00010
0011	10001
0100	00100
0101	00101
0110	00110
0111	10110
1000	01000
1001	01001
1010	01010
1011	10010
1100	01100
1101	01101
1110	10100
1111	10101

3.3 MTR($j=3$)约束编码

根据前述 2 种 MTR 约束, 进一步增大允许连续跃迁数即跃迁游程, 允许最多连续 3 次跃迁的 $MTR(j=3)$ 约束编码的 FSTD 表示如图 8. 由于编码器允许产生至多连续 3 次跃迁, 编码后的码字可以包含最多 3 个连续的“1”, 如表 3 所示, 这使得可以使用的码字数量更多, 间接表明这种约束编码的容量更高, 防止了序列中出现连续 4 次的跃迁, 但其无法消除造成连续 3 bits 错误的写入图案.

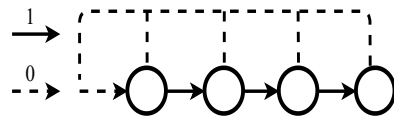


图8 MTR($j=3$)约束编码的FSTD描述

以上介绍了 3 类 MTR 约束, 分别消除了 2、3、4 次及以上连续的跃迁, 从消除连续跃迁能力的角度看, $MTR(j=1)$ 约束可以有效防止跃迁序列中出现连续的状态改变, 极大程度上降低了连续跃迁情况下的跃迁

表3 编码率4/5的MTR(3;8)约束编码信息块与码字的映射关系

信息块	码字
0000	00001
0001	00010
0010	00011
0011	00100
0100	00101
0101	00110
0110	01000
0111	01001
1000	01010
1001	01011
1010	01100
1011	01101
1100	01110
1101	10000
1110	10001
1111	10010

噪声,理论上采用这种约束编码可以降低跃迁噪声对检测结果可靠性的影响.另一方面,由于MTR(j=1)对连续跃迁的容忍程度较低,一定程度上限制了其编码容量和编码效率.

4 约束编码性能比较分析

通过在数据写入磁盘前对跃迁序列施加3类最大跃迁游程约束,分别将允许连续跃迁数限制在1~3以内,对比在不同约束条件下记录系统可达到的检测性能.实验中所采用的颗粒大小为7.3 nm,比特长为7.3 nm,比特宽为16.1 nm,扇区大小为512 Bytes,读头精度1%,共使用了4 096 000 bits的读写样本,据此分析对比了不同约束编码的编码容量.

4.1 检测误码率分析

根据3种约束编码,即R3/5-MTR(1;∞)编码、R4/5-MTR(2;8)编码和R4/5-MTR(3;8)编码,将需要写入磁盘的信息数据分块编码成等长的码字序列,在磁盘中写入编码后的数据.系统中分别引入8~28 dB的电子噪声,记录在不同电子噪声环境下采用不同约束编码所能达到的检测性能.采用了3类约束编码方案的系统性能分别记为“MTR1”“MTR2”和“MTR3”,未采用任何约束进行编码的系统记为“Uncoded”.如图9所示,在不同电子噪声环境下,系统检测达到的原始误码率从低到高依次是MTR(j=1)约束编码、MTR(j=2)约束编码、MTR(j=3)约束编码的系统和未采用任何约束编码的系统.

从实验结果可以看出,通过尽可能地限制连续跃迁的次数即减少最大跃迁游程,可使系统在不同电子噪声

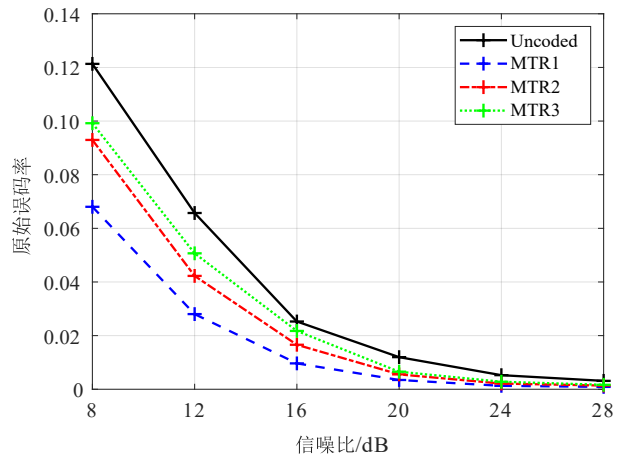


图9 采用3类MTR约束编码记录系统的检测性能

情况下检测结果的可靠性更高,在信噪比较低时,更小的最大跃迁游程约束可以带来更加明显的性能改善.当检测误码率为0.02时,相比于其他约束,MTR(j=1)约束具有至少2 dB的增益.对于信噪比为12 dB的情况,相比于MTR(j=2)约束,MTR(j=1)约束可将误码率降低约30%,而相比于MTR(j=3)约束,MTR(j=1)约束则可将误码率降低约60%.同时,MTR(j=1)约束与未采用约束编码的方案对比,误码率则降低了约50%,系统可靠性得到明显改善.

4.2 信道容量估计

磁盘所能达到的用户面密度(User Areal Density, UAD)受限于磁盘可达到的最大信道容量C和磁盘通道面密度(Channel Areal Density, CAD),UAD是磁盘实际存储用户数据的面密度,而CAD是用户数据以编码率(记为R)经过编码加入冗余信息后的记录面密度,用户面密度和通道面密度的关系为UAD=R*CAD.香农定理指出,以编码率R经过具有信道容量C的噪声信道发送信息,当信息速率低于信道容量时(R<C),通过采用一定的信道编码方法,接收机处可以达到任意小的错误概率p,即信息可以无差错地经过信道传输.由于写入0和1的概率近似相同,可以把磁记录信道近似视为二进制对称信道(Binary Symmetry Channel, BSC)^[18],并基于香农公式粗略估计,其中p是转换概率^[19],将其指定为回读通道比特错误率.检测器输出端的错误概率p为信号检测的原始误码率(raw BER),BSC所能达到的最大理论信道容量C^[20]为

$$C = 1 + p \log_2 p + (1 - p) \log_2 (1 - p) \quad (11)$$

检测器错误概率p越小,理论上信道容量C越高,可以采用的编码器码率R上限越高,差错控制需要的编码代价越小,对于磁记录信道而言,其用户面密度也越高,即磁盘容量越大.

尽管通过消除记录数据存在的连续跃迁可以有效

提升系统数据恢复过程的检测可靠性,但对最大跃迁游程的约束越严格,编码器可选的码字数量越少,其可能达到的最大编码率也越低.针对 MTR 约束编码,还需要考虑各种约束条件下的编码容量.根据符号动力学的相关理论,受限系统 S 的容量 Cap 表示编码器通过 S 系统的约束生成序列最大可实现的编码率,可表示为

$$\text{Cap}(S) = \log_2 \lambda_{\max}(\mathbf{A}) \quad (12)$$

其中, $\lambda_{\max}(\mathbf{A})$ 是邻接矩阵 \mathbf{A} 的最大实特征值,该邻接矩阵与表征约束系统 S 的确定性 FSTD 相关.

由图 6 所示的 FSTD,最大跃迁游程编码 MTR ($j=1$) 约束的邻接矩阵 \mathbf{A}_1 为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其特征多项式为 $\chi_{\mathbf{A}_1}(t) = t(t^2 - t - 1)$, 可得最大实特征根 $\lambda_{\max}(\mathbf{A}_1) = (1 + \sqrt{5})/2$, 进一步可得 MTR ($j=1$) 约束编码的容量为

$$\text{Cap}(\text{MTR}(j=1)) \approx 0.6942 \quad (14)$$

图 7 所示的 FSTD,最大跃迁游程编码 MTR ($j=2$) 约束的邻接矩阵 \mathbf{A}_2 为

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其特征多项式为 $\chi_{\mathbf{A}_2}(t) = t^3 - t^2 - t - 1$, 可得最大实特征根 $\lambda_{\max}(\mathbf{A}_2) \approx 1.8329$, 进一步可得 MTR ($j=2$) 约束编码的容量为

$$\text{Cap}(\text{MTR}(j=2)) \approx 0.8791 \quad (16)$$

由图 8 所示的 FSTD,最大跃迁游程编码 MTR ($j=3$) 约束的邻接矩阵 \mathbf{A}_3 为

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其特征多项式为 $\chi_{\mathbf{A}_3}(t) = t^4 - t^3 - t^2 - t - 1$, 可得最大实特

征根 $\lambda_{\max}(\mathbf{A}_3) \approx 1.9276$, 进一步可得 MTR ($j=3$) 约束编码的容量为

$$\text{Cap}(\text{MTR}(j=3)) \approx 0.9468 \quad (18)$$

用二进制对称信道(BSC)近似表征磁记录信道,通过检测 BER 估计信道容量 C . 对于一个标准的磁记录系统,通常需要同时采用差错控制编码(Error Control Code, ECC)和约束编码,根据编码器级联方式的不同,某些类别的编码器可能使用了不只一个.考虑采用了 ECC 编码及 MTR 约束编码的标准级联系统,即用户数据首先经过 ECC 编码器编码,然后采用约束编码器对 ECC 编码后的码字序列进行编码,使其满足写入约束条件.磁记录系统的总编码率为 MTR 约束编码器的编码率与 ECC 编码率的乘积,香农定理表明,当信息以不超过信道容量的编码率经过一个有噪信道传输时,通过合适的信道编码方法可以实现数据的可靠传输.表 4 列出了不同约束编码情况下在电子噪声信噪比为 12 dB 时总信道容量的估计结果.

由表 4 可知,采用了 MTR ($j=1$) 约束编码的系统信道容量最大,尽管 MTR 约束编码的编码率较低,但由于约束编码方法有效消除了跃迁噪声的影响,使得系统检测误码率降低,其理论信道容量最高,对相同面密度的硬盘而言,系统可以实际存储的数据更多,存储容量更大.此外,在使用 MTR ($j=1$) 约束编码的情况下,系统回读信号检测准确性更高,允许采用编码率更高的 ECC,只是对更高编码率 ECC 的纠错性能带来更高要求.尽管在采用 MTR ($j=1$) 约束时,考虑到 ECC 编码容量无法超过满容量 1 从而达到理论信道容量,而由于 MTR 编码受限,系统理论编码容量仍无法达到信道容量,但由于回读信号检测的原始误码率较低,对 ECC 编码器的纠错能力要求更低,更容易设计相对简单的 ECC 编解码器.在更宽松的 MTR 约束条件下,较高的检测误码率对 ECC 编码器的纠错能力要求更高,使编解码器设计更为复杂,解码效率降低的同时读取过程更加耗时,且在错误率较高的情况下系统读取数据的可靠性难以保证.

表 4 信噪比 12 dB 时不同 MTR 约束编码系统所能达到的最大容量

编码类型	BER p	信道容量 C	MTR 编码率 R_{MTR}	ECC 最高编码率 $R_{\text{ECC}} = \frac{C}{R_{\text{MTR}}}$	MTR 理论容量 Cap	ECC 理论容量 $R = \frac{C}{\text{Cap}}$
Uncoded	0.0657	0.6503	1.0	0.6503	1.0000	0.6503
MTR ($j=3$)	0.0507	0.7107	0.8	0.8884	0.9468	0.7507
MTR ($j=2$)	0.0423	0.7474	0.8	0.9343	0.8791	0.8502
MTR ($j=1$)	0.0280	0.8156	0.6	1(1.3593)	0.6942	1(1.1749)

注:加粗数据代表最优效果,数值后的括号表示计算的理论参考值,编码容量不会超过 1.

5 结论

本文提出了一种有效消除跃迁噪声的约束编码方法,与传统的编码方法相比,在不同电子噪声环境中,采用所提出的 MTR($j=1$)约束编码的系统具有更高的检测可靠性.与未采用任何约束编码方案的系统相比, MTR($j=1$)约束编码可以使系统误码率降低近 50%.采用了 MTR($j=1$)约束编码的系统信道容量相较于 MTR($j=2$)和 MTR($j=3$)最大,意味着对相同密度的硬盘而言,可以存储更多的数据,因而所提出的限制连续跃迁的约束编码方案对超高密度存储具有十分重要的现实意义.

参考文献

- [1] LAUHOFF G, SINHA R, IMAINO W. Storage infrastructure in the AI era using tape, HDD, and NAND flash memory[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 99: 1.
- [2] SIEGEL P H, HAREEDY A, SOLJANIN E, et al. Information theory and data storage-75 years and counting[J]. IEEE BITS the Information Theory Magazine, 2023, 3(3): 2-5.
- [3] SAYYAFAN A, ABOUTALEB A, BELZER B J, et al. Deep neural network media noise predictor turbo-detection system for 1-D and 2-D high-density magnetic recording [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(3): 3101113.
- [4] JIAN Y G, LUO K, LI W, et al. Pattern constraints limiting nonlinear transition shift in high density magnetic recording[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023, 588: 171370.
- [5] CIDECIYAN R D, DOLIVO F, HERMANN R, et al. A PRML system for digital magnetic recording[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1992, 10(1): 38-56.
- [6] SABAG O, PERMUTER H H, KASHYAP N. Capacity of the $(1, \infty)$ -RLL input-constrained erasure channel with feedback[C]//2015 IEEE Information Theory Workshop (ITW). Piscataway: IEEE, 2015: 1-5.
- [7] RĂDESCU R, MURGAN T, MĂRUNTU B. A generalized LUT method for RLL constraints in storage media[J]. The Cientifica Journal of the National Polytechnic Institute, 2001, 5: 89-95.
- [8] 胡恒, 潘龙法, 雷志军, 等. 用于数字磁存储的(0, 1)游程长度受限码[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(8): 1051-1054.
HU H, PAN L F, LEI Z J, et al. Run-length limited (0, 1) code for digital magnetic storage[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(8): 1051-1054. (in Chinese)
- [9] BLAUM M, CIDECIYAN R D, ELEFTHERIOU E, et al. High-rate modulation codes for reverse concatenation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(2): 740-743.
- [10] MOON J, BRICKNER B. Maximum transition Run codes for data storage systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(5): 3992-3994.
- [11] DJURIC N, SENK V. Methods for the soft-decision decoding of MTR codes in multiple-head magnetic recording systems[C]//2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2010: 1-5.
- [12] BLAUM M, GALBRAITH R, LAKOVIC K, et al. Reverse concatenation with maximum transition run (MTR) codes for high-density perpendicular recording[C]//IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 1-4.
- [13] MITTELHOLZER T. Enumerative maximum-transition-run codes[C]//2009 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2009: 1549-1553.
- [14] LEE J, LEE J. A PRML with modified branches of a dual MTR code for high-density PMR channels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 287: 410-415.
- [15] LUO K, JIAN Y G, LIAO Y Z, et al. A graded precompensation scheme by pattern classification on nonlinear transition shift for perpendicular magnetic recording[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(8): 3100206.
- [16] ZHANG Y, BERTRAM H N. A theoretical study of nonlinear transition shift[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4): 1955-1957.
- [17] LUO K, WANG S B, CHAN K S, et al. A study on block-based neural network equalization in TDMR system with LDPC coding[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(11): 6700605.
- [18] YAMANE H, GREAVES S J, TANAKA Y. Heat-assisted magnetic recording on dual structure bit patterned media[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 3200706.
- [19] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [20] LUO K, LIAO Y Z, ZHANG K Z, et al. On the impact of interlayer misalignment for dual-layer data detection in three dimensional magnetic recording[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 610: 172522.

作者简介

罗可 男,1993年1月出生,湖北武汉人.华中科技大学武汉光电国家研究中心博士后.主要研究方向为超高密度数据存储、磁存储器和光存储器读写系统、编码和信号处理.

E-mail: luoke_kenleo@hust.edu.cn

李 桅 女,2000年9月出生,湖北宜昌人.华中科技大学武汉光电国家研究中心硕士研究生.主要研究方向为磁记录及其系统.

E-mail: 957603274@qq.com

蹇雨根 男,1998年1月出生,四川成都人.华中科技大学武汉光电国家研究中心博士研究生.主要研究方向为磁性存储器件.

E-mail: ygjian@hust.edu.cn

高宏宇 男,2000年1月出生,湖南桃江人.华中科技大学武汉光电国家研究中心硕士研究生.主要研究方向为光盘信号处理.

E-mail: 13874328030@163.com

张克政 男,2000年9月出生,福建三明人.华中科技大学计算机科学与技术学院硕士研究生.主要研究方向为高密度信息存储.

E-mail: 846009097@qq.com

廖彦哲 男,2000年4月出生,湖北黄冈人.华中科技大学计算机科学与技术学院硕士研究生.主要研究方向为高密度信息存储技术研究.

E-mail: lyz_master@hust.edu.cn

吴宇飞 男,1998年9月出生,安徽合肥人.华中科技大学计算机科学与技术学院硕士研究生.主要研究方向为高密度信息存储.

E-mail: 1328988774@qq.com

陈进才 男,1960年12月出生,陕西富平人.华中科技大学武汉光电国家研究中心教授.主要研究方向为新型存储理论与技术、大数据存储与分析、机器学习、图像处理与情感计算.

E-mail: jechen@hust.edu.cn

卢 萍 女,1966年10月出生,江西赣州人.华中科技大学计算机科学与技术学院副教授.主要研究方向为信息存储理论与技术、大数据处理与机器学习、图像处理与情感识别.

E-mail: pinglu06@hust.edu.cn