

# 一种变阶次多阶游程受限调制码的特征分析

张龙<sup>1</sup> 倪国强<sup>1,2</sup> 裴京<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 北京理工大学光电学院, 北京 100081  
<sup>2</sup> 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081  
<sup>3</sup> 清华大学光盘国家工程研究中心, 北京 100084

**摘要** 提出了一种变阶次多阶游程受限调制编码方案, 在满足读出通道伺服控制及信道信噪比要求的同时, 获得更好的编码效率, 可以根据不同长度游程分阶时的信噪比裕量, 设定不同的分阶限制条件: 短游程少分阶或者不分阶, 长游程多分阶。在最大限度地利用游程长度冗余的同时, 降低了多阶游程造成的码间干扰影响。通过理论分析和实验测试, 分析了该编码方案的特征性能, 给出了该方案应用于 DVD 结构光盘的效果。实验结果表明, 该编码方案的原始字节误码率达到了  $1 \times 10^{-5}$  量级, 且读出信号具有良好的对称性, 满足普通 DVD 光盘系统读出通道及伺服控制的要求。

**关键词** 光数据存储; 游程受限编码; 双调制; 信道特性; 原始误码

中图分类号 TP302.7 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.112101

## Characteristics of Variable Multilevel Run-Length-Limited Code

Zhang Long<sup>1</sup> Ni Guoqiang<sup>1,2</sup> Pei Jing<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China

<sup>3</sup> Optical Memory National Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** We present a new variable multilevel run-length-limited modulation coding scheme. By using this coding scheme, better coding efficiency is obtained while the read out channel servo control and the channel signal-to-noise ratio (SNR) are met. Different phase restrictions can be set according to the SNR margin when the different run length is phased: short-run is phased less and long run is phased more. It can use the run-length redundancy to the extreme extent while reducing the inter-code interference of multi level run. Through theoretical analysis and experimental testing, the characteristics of this coding scheme are analyzed, and the performance of this scheme applied to DVD disc is also given through the test. The experimental result shows that the readout signal of the coding scheme has good symmetry with the raw byte error rate less than  $1 \times 10^{-5}$ , and the coding scheme meets the requirements of the readout channel and servo control of DVD system.

**Key words** optical data storage; run-length-limited coding; double modulation; channel characteristics; raw bit error rate

**OCIS codes** 210.1635; 210.4590; 210.4770

## 1 引言

多阶存储技术是一种非常重要的二维光存储技术, 它能在保持原来读出光学系统不变的情况下有效地提高存储容量<sup>[1]</sup>。目前已有多种多阶存储方案, 典型的有利用不同深度的信息坑记录多阶信息的坑深调制

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-07-30; 网络出版日期: 2013-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(60977005)

作者简介: 张龙(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事光存储方面的研究。E-mail: lzhang27@163.com

导师简介: 倪国强(1946—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: nigq@bita.org.cn

\* 通信联系人。E-mail: peij@mail.tsinghua.edu.cn

(DPD)<sup>[2]</sup>以及改变较长信息坑或岸形状的坑型调制(LML)<sup>[3]</sup>。

本文提出了一种新的变阶次多阶游程受限调制码,在不改变现有 DVD 光盘刻录及读出光学系统的前提下,采用变阶次多阶游程受限编码(VML-RLL)方法,可以有效地将 DVD9 结构光盘的存储容量提高 60%,达到 15 GB<sup>[4]</sup>。

VML-RLL 是一种新型多阶游程受限调制编码方法,在满足读出通道伺服控制及信道信噪比的同时,可以获得更好的编码效率。它在 RLL 编码基础上,可以根据不同长度游程分阶时的信噪比(SNR)裕量,设定不同的分阶限制条件:短游程少分阶或者不分阶,长游程多分阶。在最大限度地利用游程长度冗余的同时,降低了多阶游程造成的码间干扰影响。

VML-RLL 编码记录方式不仅可以用于 DVD 系统中,还可以用于任何一种 RLL 调制的信道,如蓝光系统(BD 或 HD-DVD)中。当游程约束条件为 DK(1, $n$ )时,VML-RLL 编码效率可以达到 7/8,8/9 甚至 1,可以将 BD 或 HD-DVD 容量提高 31%~50%。

本文首先阐述了变阶次多阶游程受限编码的基本原理<sup>[5-8]</sup>,然后提出了一种新的 VML-RLL 编码方案,并对其进行实验分析。实验结果表明,该编码方案的原始字节误码率(BER)达到了  $1 \times 10^{-5}$  量级,且读出信号具有良好的对称性,满足普通 DVD 光盘系统读出通道及伺服控制的要求。

## 2 基本原理

### 2.1 VML-RLL 编码原理

VML-RLL 编码采用两步方式实现,即双调制的方法。首先使用常规的( $M, d, k$ )编码方式,获得一个较高码率  $R$  的 ML-RLL 编码码流  $x$ ,然后通过合并或分割游程的方式,有目的地去改变码流  $x$  中特定游程的阶次  $M$  的限制,或游程  $d, k$  的约束条件,从而获得更好的信道特性的 VML-RLL 码流  $y$ <sup>[9]</sup>。

本文构造了一种码率为  $R=4/5$ ,DK(1,10)的 VML-RLL 码。表 1 给出了它的具体分阶表。可以看出,每个游程的坑和岸的种类一样,这是因为,同一游程坑和岸的读出信号相对切分电平是对称的,所能提供的波形调制的空间(幅值上的和长度上的)是相当的,所以它们能获得相同的阶次数目。这样处理的好处,一是信号有很好的对称性,有利于信号的直流控制;二是在调制编码时只需要提供游程和阶次的序列,而不必再考虑它在光盘上对应的是坑还是岸。图 1 是实采的信号波形调制  $8T$ ( $1T$  表示 1 个信道位长度)多阶射频(RF)信号的典型网眼图<sup>[4]</sup>。

表 1 VML-RLL (1,10)码的游程分阶表

Table 1 Levels of VML-RLL (1,10)

| Run-length       | 2T | 3T | 4T | 5T | 6T | 7T | 8T | 9T | 10T | 11T |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| Pit type number  | 1  | 1  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7   | 8   |
| Land type number | 1  | 1  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7   | 8   |
| Level number     | 2  | 2  | 2  | 4  | 6  | 8  | 10 | 12 | 14  | 16  |

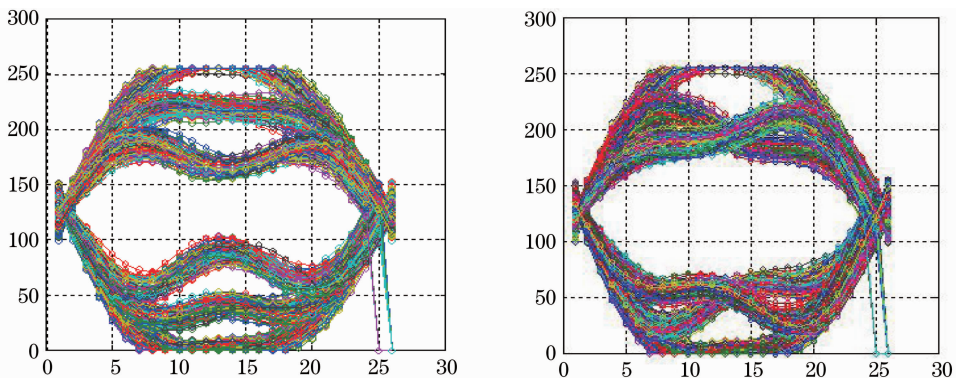


图 1 实采的  $8T$  多阶 RF 信号的网眼图

Fig. 1 Mesh map of  $8T$  RF signal

## 2.2 只读光盘的刻录原理

VML-RLL 编码方案的只读光盘的刻录实现,其基本原理是在光盘的原始坑中加子岸,在原始的岸上加子坑,使得在读出光盘信号时,当聚焦光斑扫描过子坑子岸时,读出信号的幅值会发生局部的变化,从而造成读出信号波形的变化。不同的信号波形,就可以作为多阶识别的依据。这里所说的子坑子岸,是相对于光盘上原始的坑和岸而言的,它们的长度小于光盘上原始的坑岸的最短长度,因此它们的加入不会破坏原来的游程信息。图 2 是 VML-RLL 编码方案阶次调制原理图。

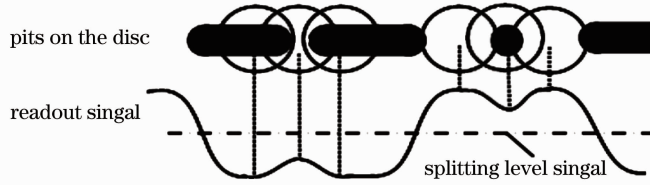


图 2 VML-RLL 编码阶次调制原理图

Fig. 2 Diagram of VML-RLL modulation

在母盘刻录时,只改变母盘刻录的激光功率控制信号,让其按照图 3 所示的形式在原有坑和岸中加入子岸和子坑。所采用的激光功率与刻录普通 DVD 时一致。实验表明,原始坑中加子岸,会使原始信号的幅值局部升高;原始岸上加子坑,则会使原始信号的幅值局部降低。子坑子岸的大小,会影响信号幅值局部降低或者升高的程度;子坑子岸的位置,会影响信号幅值局部降低或者升高的位置。因此,改变子坑子岸的大小、位置,就能刻录不同的多阶信号。

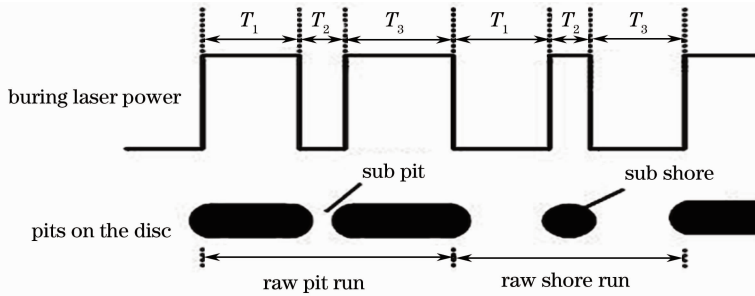


图 3 VML-RLL 母盘刻录原理图

Fig. 3 Diagram of VML-RLL mastering

## 3 VML-RLL(1,10)码的特征性能

无论是多阶游程受限调制编码(ML-RLL),还是 VML-RLL 编码方法,最终的记录容量密度系数(DR), $D_R = (1+d)R$ 与阶次是没有关系的,多阶记录的容量提升在  $R$  的变大中表现出来,( $1+d$ )代表了最小记录符密度。

表 2 给出了几种编码情况的容量密度系数,及其与 DVD 的 EFM Plus 和 BD 的 17PP 码的比较。通过比较可以看出,如果不改变光盘最小记录符尺寸,采用 VML-RLL(1,10)编码,应用在 DVD 结构光盘上,可以将存储容量提高 7%;应用在蓝光光盘上,可以将容量提高 22%。而如果保持信道位长度不变,则 VML-RLL(1,10)编码容量是 DVD 光盘的 1.6 倍。

表 2 几种游程受限编码的容量密度系数比较

Table 2 Comparison of capacity density for some RLL coding schemes

|                              | $D$ | $K$ | $R$  | $D_R$ | Compared with DVD | Compared with BD |
|------------------------------|-----|-----|------|-------|-------------------|------------------|
| DVD EFM plus                 | 2   | 10  | 8/16 | 1.5   |                   |                  |
| ETM <sup>[10]</sup>          | 1   | 10  | 8/12 | 1.33  | 0.87              |                  |
| 17PP <sup>[11]</sup>         | 1   | 7   | 0.65 | 1.31  | 0.87              |                  |
| Four-ry(1,4) <sup>[12]</sup> | 1   | 4   | 1.09 | 2.18  | 1.45              | 1.66             |
| VML-RLL(2,9)                 | 2   | 9   | 2/3  | 2     | 1.33              | 1.53             |
| VML-RLL(1,9)                 | 1   | 9   | 1    | 2     | 1.33              | 1.53             |
| VML-RLL(1,10)                | 1   | 10  | 4/5  | 1.6   | 1.07              | 1.22             |

表 3 是一种采用 VML-RLL(1,10) 编码光盘的信道特性及其与 DVD5 和 DVD9 的比较。从表中可以看出,该光盘的信道位长度是  $41/36 \times (400/3) = 152$  nm,比 DVD5 的 133 nm 要长 14%,在同等盘面制作工艺条件下,信噪比大大提高,因此可以容忍更大的道间距压缩增加的道间干扰。实验表明,在 DVD 道间距的 740 nm 基础上,优化伺服控制及信道识别技术,道间距可以压缩到 650~690 nm。

表 3 系统参数比较

Table 3 Comparison of parameters

| Parameter                     | DVD5 | DVD9 | VML-RLL(1,10) |
|-------------------------------|------|------|---------------|
| Information symbol length /nm | 400  | 440  | 304           |
| Channel bit length /nm        | 133  | 147  | 152           |
| Track pitch /nm               | 740  | 740  | 650           |
| Data area diameter /mm        | 116  | 116  | 116.5         |
| Capacity /GB                  | 4.7  | 8.5  | 15.1          |

如果把道间距压缩到 690 nm,相对于 DVD 结构光盘,其容量变化为  $(1.6/1.5) \times (400/304) \times (740/690) = 1.5052$ ,则单面单层的容量为  $4.7 \text{ GB} \times 1.5052 = 7.075 \text{ GB}$ 。由于信道位长度大于 DVD9 的信道位长度,单面双层不再需要改变最小记录符长度,因此,容量是单面单层的 2 倍,即 14.2 GB。实际应用中,信道位长度可以采用 DVD9 的信道位长度(147 nm),且道间距可以进一步压缩,则单盘容量很容易达到 15 GB。

VML-RLL(1,10) 编码方案与传统的 DVD 在读出装置上完全兼容,能很好地满足 DVD 伺服系统要求,读出信号良好。图 4 是 VML-RLL 光盘在 CATS 光盘测试仪的标准驱动器和普通商用驱动器上的 RF 读出信号。实验用光盘在标准 DVD 子盘复制设备上制作。光盘上的数据通过 ECLIPS 7000 编码器,在荷兰 ODME 公司的 AMD 200 标准 DVD 母盘刻录设备上,按 DVD9 单倍速刻制母盘。

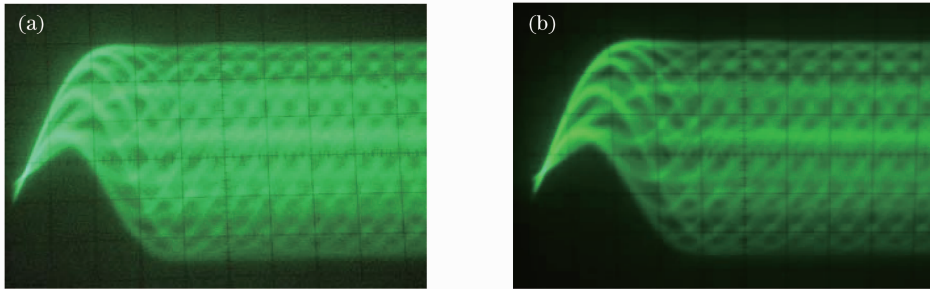


图 4 (a) 标准驱动器和(b) 普通商用驱动器的 RF 信号网眼图

Fig. 4 Mesh maps of (a) standard drive and (b) commercial drive

测试表明,VML-RLL(1,10) 码具有与普通 DVD 基本相同的原始误码性能,比 DVD 读出通道中检纠错算法要求的高限原始字节误码率(小于等于  $2.5 \times 10^{-3}$ )提高了 1~2 个数量级。表 4 是实验光盘 0 层和 1 层的内( $r=25$  mm)、中( $r=40$  mm)、外( $r=55$  mm)3 个位置的误码特性的测试结果。需要说明的是,L0\_R25\_RF指的是光盘 0 层半径  $r=25$  mm 处的 RF 信号,其他依次类推,ECC\_LBA 是光盘的物理扇区地址,PIE 是在该扇区位置上用于检错的外码的错误个数,ber 代表的是原始信道位误码率,BER 代表的是原始字节误码率。表中前 8 列为连续 8 个 ECC 块的数据分别统计的误码评估数值,最后 1 列为 8 个 ECC 数据块汇总统计的数值(即最后 1 列 PIE 值为前面 8 列的总和,最后 1 列 ber 及 BER 值为前面 8 列的平均值)。

表 4 采用 VML-RLL(1,10) 编码方案光盘的内、中、外误码情况

Table 4 Error rates of inner, middle, and outer positions of VML-RLL (1,10) disc

(a) L0\_R25\_RF

| ECC_LBA         | 00   | 02   | FD   | 30   |   |   |      |   |       |
|-----------------|------|------|------|------|---|---|------|---|-------|
| PIE             | 5    | 2    | 3    | 4    | 0 | 0 | 5    | 0 | 19    |
| ber / $10^{-6}$ | 36.2 | 7.76 | 7.76 | 31.1 | 0 | 0 | 2.85 | 0 | 10.71 |
| BER / $10^{-5}$ | 13.2 | 5.28 | 7.92 | 1.06 | 0 | 0 | 13.2 | 0 | 5.08  |

续表 4

(b) L0\_R40\_RF

| ECC_LBA         | 00 15 32 70 |   |   |      |      |   |      |   |      |
|-----------------|-------------|---|---|------|------|---|------|---|------|
| PIE             | 0           | 0 | 0 | 2    | 1    | 0 | 6    | 0 | 9    |
| ber / $10^{-6}$ | 0           | 0 | 0 | 10.4 | 5.18 | 0 | 38.8 | 0 | 6.80 |
| BER / $10^{-5}$ | 0           | 0 | 0 | 5.28 | 2.64 | 0 | 1.58 | 0 | 1.19 |

(c) L0\_R55\_RF

| ECC_LBA         | 00 308C 10 |   |      |   |      |      |      |      |      |
|-----------------|------------|---|------|---|------|------|------|------|------|
| PIE             | 1          | 0 | 3    | 0 | 2    | 1    | 3    | 2    | 12   |
| ber / $10^{-6}$ | 5.18       | 0 | 15.5 | 0 | 10.4 | 2.59 | 5.18 | 7.76 | 5.83 |
| BER / $10^{-5}$ | 2.64       | 0 | 7.92 | 0 | 5.28 | 2.64 | 7.92 | 5.28 | 3.96 |

(d) L1\_R25\_RF

| ECC_LBA         | 1002 F0 D0 |      |      |      |      |      |      |   |       |
|-----------------|------------|------|------|------|------|------|------|---|-------|
| PIE             | 21         | 3    | 1    | 30   | 1    | 39   | 22   | 0 | 117   |
| ber / $10^{-6}$ | 77.6       | 15.5 | 2.59 | 1.47 | 5.18 | 1.79 | 8.54 | 0 | 14.08 |
| BER / $10^{-5}$ | 55.5       | 7.92 | 2.64 | 79.2 | 2.64 | 103  | 58.1 | 0 | 38.63 |

(e) L1\_R40\_RF

| ECC_LBA         | 10 15 43 60 |   |      |      |      |      |   |      |       |
|-----------------|-------------|---|------|------|------|------|---|------|-------|
| PIE             | 0           | 0 | 5    | 5    | 2    | 1    | 0 | 7    | 20    |
| ber / $10^{-6}$ | 0           | 0 | 15.5 | 38.8 | 2.59 | 7.76 | 0 | 46.6 | 13.91 |
| BER / $10^{-5}$ | 0           | 0 | 13.2 | 13.2 | 5.28 | 2.64 | 0 | 18.5 | 6.60  |

(f) L1\_R55\_RF

| ECC_LBA         | 10 32 9D 50 |      |      |   |      |      |      |      |       |
|-----------------|-------------|------|------|---|------|------|------|------|-------|
| PIE             | 91          | 30   | 9    | 0 | 2    | 2    | 2    | 1    | 137   |
| ber / $10^{-6}$ | 380         | 135  | 38.8 | 0 | 7.76 | 15.5 | 7.76 | 2.59 | 73.43 |
| BER / $10^{-5}$ | 240         | 79.2 | 23.8 | 0 | 5.28 | 5.28 | 5.28 | 2.64 | 45.19 |

## 4 结 论

VML-RLL 调制编码方法对提高光盘的容量具有很重要的作用。本文提出的 VML-RLL(1,10) 编码方案, 应用于 DVD9 光盘, 可使容量提高至 15 GB。实验结果表明, 该编码方案的原始字节误码率达到了  $1 \times 10^{-5}$  量级, 且读出信号具有良好的对称性, 可满足普通 DVD 光盘系统读出通道及伺服控制的要求。

## 参 考 文 献

- Hu Hua, Qi Guosheng, Xu Duanyi. Experiment study of multilevel data storage based on photochromism[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(8): 951-954.
- 胡 华, 齐国生, 徐端颐. 基于光致变色原理的多阶存储实验研究[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 951-954.
- Hirofumi Haeiwa, Hisao Nakashima, Yasuo Kokubun, *et al.*. Precise formation of fine pits on birefringent film for multilevel optical data storage[J]. Jpn J Appl Phys, 2002, 41(7B): 4841-4844.
- Geert Langereis, Wim Coene, Louis Spruijt, *et al.*. An implementation of limited multi-level(LML) optical recording[J]. Jpn J Appl Phys, 2001, 40(3B): 1711-1715.
- Jing Pei, Lihua Li, Haizheng Xu, *et al.*. Theory and practice of multilevel method in high-definition discs[C]. SPIE, 2009, 7125: 712503.
- Tang Yi. The Key Technology Research of Waveform Modulation Multi-Level Optical Disc[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. 13-17.
- 唐 毅. 波形调制多阶光盘的关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. 13-17.
- Liu Xiangwei, Pei Jing. A modulation coding method of multi-level recording optica disk[J]. China Mediatech, 2009, (3): 36-39.
- 刘相伟, 裴 京. 一种多阶记录光盘的调制编码方法[J]. 记录媒体技术, 2009, (3): 36-39.
- Pei Jing, Ni Yi, Xu Haizheng, *et al.*. A Method of Variable Multilevel Run Length-Limited Modulation Code[P]. China, CN 200910130015.9, 2009-03-26.
- 裴 京, 倪 屹, 徐海峥, 等. 一种变阶次多阶游程受限调制编码方法[P]. 中国, CN200910130015.9, 2009-03-26.

- 8 Tang Yi, Pei Jing, Pan Longfa, *et al.*. Simulation analysis and experimental validation of a new multilevel 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.
- 9 Xiangwei Liu, Jing Pei, Longfa Pan, *et al.*. Designing a new multilevel run-length limited modulation code[C]. *SPIE*, 2009, 7125: 712525.
- 10 KK Kayanuma, C Nota, T Iwanaga. Eight to twelve modulation code for high density optical disk[C]. *Tech Dig Intl Symp Optical Memory (ISOM)*, 2003. 160–161.
- 11 Heng Hu, Jing Pei, Jianping Xiong, *et al.*. DC-free four-ary(2,8) run-length limited code for multi-level recording channels[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45(7): 5786–5790.
- 12 Jing Pei, Heng Hu, Longfa pan, *et al.*. Constrained code and partial-response maximum-likelihood detection for high density multi-level optical recording channels[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 46(6B): 3771–3774.