

改良型 (1,7;2,3)RLL 記録符号の開発

古川 輝 雄*・近藤 光 重**
山井 孝 雄**・金平 淳***

(平成12年 8月30日受理)

Development of the improved (1,7;2,3)RLL Code

Teruo FURUKAWA, Mitsushige KONDO,
Takao YAMAI and Jun KANEHIRA

(Received Aug. 30, 2000)

Abstract

(1,7;2,3)RLL Recording code is used in many actual storage devices because of large window margin and high-density ratio parameters. Error propagation and Synchronous/Re-synchronous characteristics are very important factors for the reliability of these storage devices. This paper describes the new (1,7;2,3)RLL code algorithm, hardware constitution, Sync/Re-Sync property and error propagation characteristics. The computer simulation between this code and well known another (1,7;2,3)RLL codes indicate that the Error propagation is the least level in the case of using this code.

Key Words: digital recording code, (1,7;2,3)RLL code, code algorithm, error propagation, error simulation

1. ま え が き

近年、ハードディスクドライブ (HDD) や光ディスクドライブ (ODD) 等のデジタルストレージ機器はコンピュータの普及に連動して、性能の向上と生産規模の拡大が著しい。これらの装置には情報を正確にかつ高密度に記録するために、記録符号化/復号化技術が使われている。(1,7;2,3)RLL 記録符号 (以下 (1,7)RLL 符号と略称) は、検出窓幅と高密度化指数が大きく、これらのストレージ機器に数多く採用されている¹⁾。(1,7)RLL 符号は初期の符号化アルゴリズム²⁾ (A方式と仮称) から、能力が改善された符号³⁾ (B方式と仮称) に移り現在に至っている。本稿では (1,7)RLL 符号の能力改善を試み、改良型 (1,7)RLL 符号 (C方式と仮称) を開発した。その符号構成法と従来型 (1,7)RLL 符号に対する能力評価結果を報告する⁴⁾⁵⁾。

2. (1,7)RLL 符号

2.1 符号概要

磁気記録媒体、あるいは光記録媒体へデータを記録する場合、記録符号化方式に要求される事項として、

- (1) 記録媒体に対して高密度記録が可能である。下記高密度化指数 FOM (Figure of Merit) が大きい。
- (2) 伝送系 (記録再生過程) で誤りが生じた場合の復号誤り伝播が少ない。
- (3) セクター記録を行うため、可変長符号であってもセクター同期信号がデータ内では発生しない特異パターンが存在すること。および、セクター内で同期はずれを検出するサブ同期信号が前後のデータパターンに依存せずに一意的なパターンに変換されること。
- (4) DC が伝送されない記録再生系では DC フリーコードであること。

* 広島工業大学工学部電気・デジタルシステム工学科

** 三菱電機株式会社・技術研修所

*** 三菱化学株式会社・横浜総合研究所

(5) 適切なるハードウェア量で構成できる。

等である。符号を構成する評価指数は d, k, m, n 値を用いて以下に示される。

$$\left. \begin{aligned} \text{弁別窓幅} \quad & Tw = m/n \cdot T \\ \text{最小反転間隔} \quad & Tmin = m/n \cdot (d+1)T \\ \text{最大反転間隔} \quad & Tmax = m/n \cdot (k+1)T \\ \text{高密度化指数} \quad & FOM = Tw/T \cdot Tmin/T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 T ；データ語の時間間隔 d ；最小“0”連続数、 k ；最大“0”連続数、 m ；データ語のビット数、 n ；符号語のビット数

通常この種の符号化方式では、元のデータ系列を m ビットごとに分離し、 (mxi) ビット ($i = 1, 2 \dots$) の符号語を (nxi) ビットの符号語に可変長変換し、変換された符号列において、ビット1の間に d 個から k 個のビット0が存在するように構成される。

一般に記録媒体にデータを記録するとき、 $Tmin$ が短くなると、前後の記録遷移状態が互いに波形干渉を生じる。 Tw が小さいと各種雑音、波形干渉でのビットシフト、トラックずれや、クロストークによる再生波形ジッターに対して復号誤りが増加する。このパラメータの積を高密度化指数 FOM (Figure of Merit) と称し、この値が大きいほど高い評価となる。一方、 $Tmax$ が大きいと再生復号クロックの生成が困難になり、 $Tmax/Tmin$ 比が小さいと、一般に符号化コードのスペクトラムは低域に中心が移り、かつスペクトラムの分布帯域が狭くなり、再生 S/N 比が向上する。表1は各種方式の Figure of Merit を示したものである。(1,7)RLL がもっとも高密度化指数が大きく、各種の磁気記録装置や光記録装置で使用されている。

RLL 符号化方式において、 d 値と k 値を決定した場合の Tw の理論限界値、および d 値と Tw が決定した場合の k 値の理論限界が報告されている⁶⁾。

表2に $d = 1$ の理論限界 Tw を示す。 $m = 2, k = 3$ の符号では $Tw = 0.667$ であり、 $d = 1$ とすると、 k は6以上が理論値となる。ここで提案する符号は $k = 7$ である。

表1 各方式の Figure of Merit¹⁾

項目	MFM	(2,7;2,4)RLL	(1,7;2,3)RLL	EFM
FOM	0.5	0.75	0.89	0.664

表2 $d = 1$ の場合の k 対理論限界 Tw

k	2	3	4	5	6
Tw/T	0.406	0.55	0.62	0.65	0.67

k	7	8	9	10
Tw/T	0.679	0.685	0.69	0.69

2.2 符号化/復号化アルゴリズム

従来型 (1,7) 符号の符号化/復号化アルゴリズムは文献 2, 3 で示されている。この符号は高密度化指数が大きいので、各種の装置に使用されているが、上記サブ同期信号が一意的に決定されないこと、および復号誤りが大きい等の欠点があった。筆者等はこの符号の符号化アルゴリズムの改良を試み上記欠点が改良された改良型 (1,7)RLL 符号を実現した。

2.2.1 符号化アルゴリズム

データ列を $\{Dn\}$ とし、変換符号列を $\{Mn\}$ とする。

(基本変換則)

2 ビットデータを $\{D2n, D2n+1\}$ とし、変換パターンを $\{M3n, M3n+1, M3n+2\}$ とし、以下の変換を行う。

$$\left. \begin{aligned} M3n &= Dn, M3n+1 = \neg M3n+M3n+2, M3n+2 \\ &= D2n+1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1 次変換則では、2 ビットデータ間で隣接するビットが共に1でない場合には、 $d = 1, k = 7$ を満足する。

(2 次変換則)

$\{D2n, D2n+1\}$ と $\{D2(n+1), D2(n+1)+1\}$ のデータで、 $D2n+1 = D2(n+1) = 1$ のときには、以下の2 次変換を行うことによりすべての変換コード列において $d = 1, k = 7$ を満足する。

$$\left. \begin{aligned} M3n &= D2n \cdot D2(n+1) \\ M3n+1 &= \neg M3n \cdot M3n+2 \\ M3n+2 &= D2n+1 \cdot D2(n+1)+1 \\ M3(n+1) &= M3(n+1)+1 = M3(n+1)+2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2.2 復号化アルゴリズム (その1)

(基本復号則)

復号すべき3 ビット符号 $\{M3n, M3n+1, M3n+2\}$ に対して、後続3 ビット符号 $\{M3(n+1), M3(n+1)+1, M3(n+1)+2\}$ が $\{0 0 0\}$ でない場合には以下の基本復号を行う。

$$D2n = M3n \quad D2n+1 = M3n+2 \quad (4)$$

(2 次復号則)

基本復号則で、 $M3(n+1) = M3(n+1)+1 = M3(n+1)+2 = 0$ の場合には、 $\{M3n, M3n+1, \dots, M3(n+1)+2\}$ の6 ビット符号を用いて以下の4 ビットデータへ復号を行う。

$$\left. \begin{aligned} D2n &= M3n & D2n+1 &= 1 \\ D2(n+1) &= 1 & D2(n+1)+1 &= M3n+2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2.3 復号化アルゴリズム (その2)

常に3 ビットの符号語を用いて、2 ビットのデータに復号する方法として、前後の符号列の論理判定により、2 ビットデータへ復号を行うことができる。

($M_{3(n+1)} = M_{3(n+1)+1} = M_{3(n+1)+2} = 0$) の時

$$D_{2n} = M_{3n}, D_{2n+1} = 1 \quad (6)$$

($M_{3(n+1)} \cdot M_{3(n+1)+1} \cdot M_{3(n+1)+2} \neq 0$) の時

$$D_{2n} = 1, D_{2n+1} = M_{3(n-1)+2} \quad (7)$$

この符号化／復号化アルゴリズムの特徴は、仮に M_{3n+1} が誤っても、基本変換則 ($M_{3n+2} = D_{2n+1}$) が成立するケースでは誤りは発生しない。さらに、サブ同期は変換すべき先頭2ビットを“01”または、“00”と設定することにより変換パターンは前のデータに影響されず一意的に変換パターンが決定される。

2.3 ハードウェア構成法

2進データ列を $\{D_{2n}, D_{2n+1}\}$ とし、変換される3ビット符号列を $\{M_{3n}, M_{3n+1}, M_{3n+2}\}$ とするとき、符号化論理式及び、復号化論理式は以下となる。

(符号化論理式)

$$\left. \begin{aligned} M_{3n} &= D_{2n} \cdot (Y_n - 1 / Z_n - 1) \\ M_{3n+1} &= /M_{3n} \cdot /M_{3n+2} \cdot (Y_n - 1 / Z_n - 1) \\ M_{3n+2} &= D_{2n+1} \cdot (Y_n - 1 / Z_n - 1) \\ &\quad \cdot (Y_n + Y_n \cdot D_{2(n+1)} + 1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし、 $Y_n = D_{2n+1} \cdot D_{2(n+1)}$

$$Z_n = M_{3n} + M_{3n+1} + M_{3n+2}$$

(復号化論理式)

$$\begin{aligned} D_{2n} &= M_{3n} / Z_n \\ D_{2n+1} &= /Z_{n+1} + M_{3n+2} \cdot Z_{n+1} / Z_n \cdot M_{3(n-1)+2} \end{aligned} \quad (9)$$

(符号化／復号化共通論理式)

上記符号化／復号化論理を一体化した PLA (Programmable Logic Array) を用いたハードウェア構成を図1に示す。入力信号とクロックにより、下記 PLA 論理で変換された出力 ($V1 \sim V4$) がシフトレジスタで出力される。PLD 端子 I7 は符号化時“1”，復号化“0”で制御される。復号化時には端子 V4 には、下記説明の誤りフラグが検出され出力される。

$$\left. \begin{aligned} V1 &= I7 \cdot I3 \cdot (Y1 + Z1) \cdot (Y2 + Y2 \cdot I5) \\ V2 &= I7 \cdot /V1 \cdot /V3 \cdot (Y1 + Z1) + I7 \\ &\quad \cdot (P2 + I3 \cdot P2 + I12 \cdot /P1) \\ V3 &= I7 \cdot I2 \cdot (Y1 + Z1) + I7 \cdot (I1 + /P1) \\ V4 &= /I11 \cdot (/I1 \cdot /I2 \cdot /I3 \cdot /I4 \cdot /I5 \cdot /I6 \\ &\quad + I1 \cdot I2 + I2 \cdot I3 + I3 \cdot I4 + I4 \cdot I5 + I5 \cdot I6) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし、 $Y1 = I1 \cdot I2$ $Y2 = I3 \cdot I4$

$$Z1 = I8 + I9 + I10 \quad Z2 = V1 + V2 + V3$$

$$P1 = I1 + I2 + I3 \quad P2 = I4 + I5 + I6$$

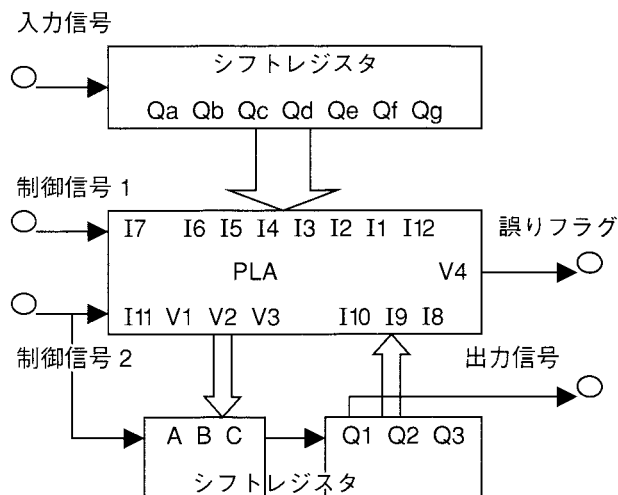


図1 (1,7)RLLC 符号化／復号化回路の構成

3. 符号能力評価結果

上記符号化／復号化則は NRZL 符号である。通常磁気あるいは光記録装置では NRZL 符号を NRZI 符号に変換して記録されるため、誤り特性は両符号化則で評価した。符号 M_n (NRZL 則) と符号 M'_n (NRZI 則) 間の変換則を以下に示す。

$$\begin{aligned} M'_n &= M'_{n-1} (\text{EXOR}) M_n, M_n \\ &= M'_{n-1} (\text{EXOR}) M'_n \end{aligned} \quad (11)$$

ここで (EXOR) は排他的論理和である。

3.1 誤り伝播シミュレーション

- (1) 各方式の復号化アルゴリズムは共通して復号ビット“1”を最小有効論理式で求める方法を使用した。A, B 方式は文献 2, 3 で規定された論理を採用した。
- (2) $2^{16}-1$ 周期の M 系列信号5000ビットをソースデータとし、ソースデータの始めから終わりまでの5000個所に誤りを発生させ、その復号データの誤り伝播長を計測した。誤りパターンが“100101”では誤り伝播長は6ビットと計測した。
- (3) 誤りビット数を1～5ビット変化させて、NRZL 則と NRZI 則の両方式での復号エラーを求めた。

3.2 復号誤り測定結果

(1) 誤り伝播長特性

A, B, C 各方式で2ビット誤りと4ビット誤りの誤り伝播長分布を図2, 図3に示す。C方式は1ビット誤りに急峻なピークを持っている。

(2) 平均誤りビット数

1～5ビットデータ誤りに対する加重平均誤りビット数を図4, 図5に示す。C方式がすべての誤り発生に対して

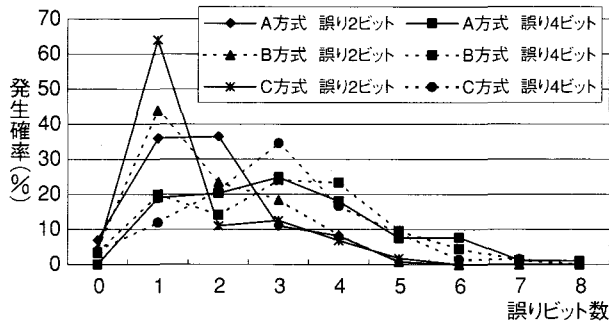


図2 誤り伝播長の分布 (NRZL)

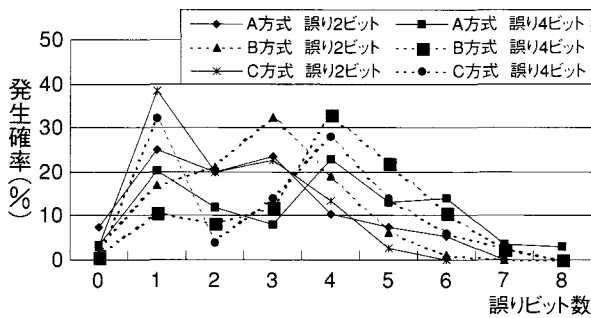


図3 誤り伝播長の分布 (NRZI)

最も平均誤り伝播長が小さい。

(3)最大誤りビット数

1～5ビットデータ誤りに対する最大誤り伝播ビット数を図6、図7に示す。C方式が最も良好であった。

3.3 同期信号の構成

HDD や ODD ではセクター単位でデータを記録するため、セクター開始を示す同期信号や、セクター内での復号同期外れを復帰させるサブ同期信号が使用される。これらの同期信号はデータと同じ符号パラメータを持ち、さらに前後のデータに影響されずに、その変換パターンが一意的に決定される必要がある。

従来の (1,7)RLL 符号ではサブ同期の直前で変換が完了する場合と、サブ同期まで含めて変換が行われる場合では、サブ同期の変換パターンが異なる欠点があった。本方式では、サブ同期のデータ構成を、先頭の2ビットを“01”あるいは、“00”とすることにより、データの変換は常にサブ同期直前で完結し、一意的にその変換パターンが決定される。

3.4 誤りフラグの検出

これらの情報記録機器では、復号データはその後段で誤り訂正制御が行われデータ誤りが訂正される。一般に誤り訂正制御能力は再生データ中から誤りを示すフラグが検出できれば、その能力は最大2倍のデータ誤りを訂正可能とすることができる。本符号化方式では先に考察した、1ビ

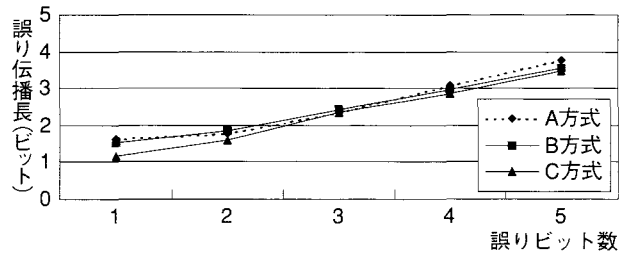


図4 平均誤り伝播特性 (NRZL)

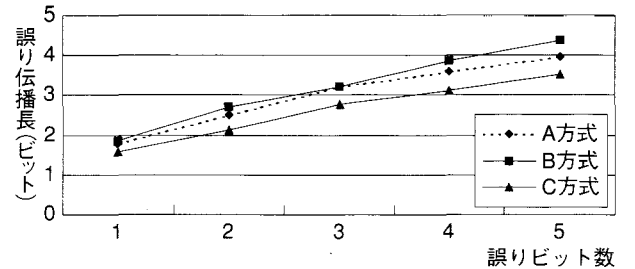


図5 平均誤り伝播特性 (NRZI)

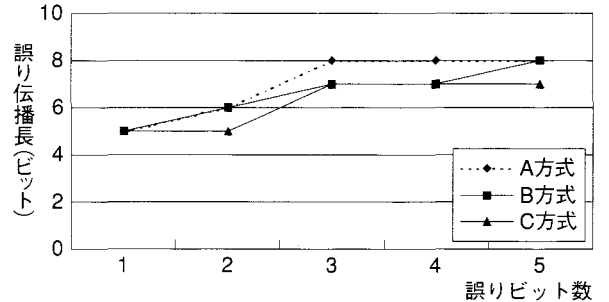


図6 最大誤り伝播特性 (NRZL)

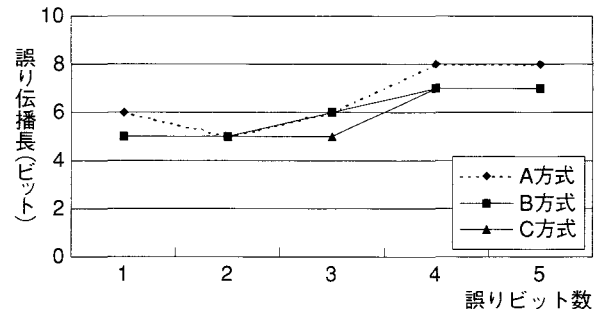


図7 最大誤り伝播特性 (NRZI)

ット及び2ビット誤りにおいて、復号時に5ビット以上の誤り伝播が生じた場合、誤りを示すフラグ情報（イレージャ）が検出できる。これは、任意に変換された連続する3ビット符号パターンが共に“000”パターンは存在せず、復号時に5ビット以上の伝播が生ずる誤りパターンの“000”パターンが連続する特徴を検出できるためである。

4. む す び

新規な (1,7)RLL 符号を開発し、符号化/復号化アルゴリズム、ハードウェア構成法および、復号誤り評価をおこなった。その結果、構成ハードウェアは簡単な PLA ロジ

ックにて構成でき、また、復号誤りは従来の (1,7)RLL 符号に対して最大誤り伝播ビット数、平均誤り伝播ビット数ともに改善出来ることが判った。さらにセクター記録に必須の特異同期パターンの存在と前後のデータに依存しないサブ同期信号も存在することが判った。今後同種の (1,7)RLL 符号における DC フリー化特性の改善を行うつもりである。

文 献

- 1) 田中邦麿 他 “データ圧縮とデジタル変調98年版, デジタル変調編”, 日経BP社, pp169-191, (1998)
- 2) T. Horiguchi and K. Morita “An optimization of modulation codes in digital recorder”, IEEE Mag., Mag-12, NO. 6, pp. 740-742 (1976)
- 3) “Information Interchange on 130mm Optical Disc Cartridges-Capacity 2.6 Gigabyte per Cartridge”, ISO/IEC14517
- 4) 古川輝雄, 尾崎 稔 “2進データ符号化及び復号化方式”, 日本国特許第2096534号 (1995)
- 5) 古川輝雄, 近藤光重, 山井孝雄, 金平 淳, “1-7 記録符号の誤り伝播特性評価”, 第51回電気・情報関連学会中国支部連合大会 021808 (2000)
- 6) D.T. Tang, “Block Codes for a Class of Constrained Noiseless Channels”, Information and Control, Vol. 17, No. 5, pp. 436-461, (1970)