

大容量光メモリー用信号処理

柏 原 裕

Signal Processing Techniques for High Capacity Optical Memory

Yutaka KASHIHARA

Signal processing techniques have made progress with the advancing of optical memory. The techniques applied to conventional optical memories are reviewed in this paper. And the promising techniques for the future optical memories are also explained.

Key words: optical memory, signal processing, deterioration, compensation

1982年のCD発売以来、さまざまな光ディスクが発売されてきた。光ディスク界では、CDを第一世代、DVDを第二世代、HD DVD^{*1}/Blu-ray Disc (BD)^{*2}を第三世代とよぶ。現在、第四世代となるべく、複数の候補の研究が進んでいる。ISOMロードマップ委員会のサブ委員会である信号処理要素技術委員会では、第四世代の候補ごとに、信号処理技術を検討した¹⁾。

本稿では、第三世代までの信号処理技術、および、第四世代への応用が期待される信号処理技術を解説する。

1. 第三世代までの信号処理

信号処理のブロック図を図1に示す。ブロック図全体は、第一世代から第三世代まで共通である。第四世代のブロック図も、同様と予想される。ただし、各ブロックの内部は、世代間で異なる(表1)。

1.1 誤り訂正方式

光ディスクでは、各種信号劣化により、記録再生時に誤りが発生する。誤り訂正方式として、ブロック符号(Reed-Solomon符号)が用いられてきた。ブロック符号では、情報に冗長を付加して符号語を構成する。符号語を光ディスクに記録し、再生時は冗長を利用して誤りを訂正する。冗長を増やすほど、より多くの誤りが訂正できる。誤り訂

正の原理は、専門書に委ねる²⁾。ここでは、光ディスクに特徴的な誤りである、バースト誤りとその対策を解説する。

光ディスクでは、ディスク交換時に表面に埃が付着する。付着した埃は、情報として記録されているマークに比べ非常に大きい。この部分を再生すると、連続した誤り(バースト誤り)となる。埃のほか、傷、指紋、欠陥等も、バースト誤りの原因となる。光ディスクではバースト誤りは不可避であり、その対策が必要である。

バースト誤りの対策として、例えば図2に示す積符号が用いられる。積符号では、内符号と外符号の2種類のブロック符号を利用する。外符号からみると、バースト誤りは、符号語のごく一部の誤りに過ぎない。したがって、外符号を利用して、バースト誤りの訂正が可能である。

1.2 変調方式

変調方式は、記録再生系の物理的制約の緩和を目的とする。例えば、光ディスクでは短いマークの記録再生が困難である。変調方式により最短マークが長くなる様子を図3に示す。

第三世代までの変調方式のおもなパラメーターを表2に示す。コード比は、変調器への入出力ビット数の比率で、高いことが望ましい。コード比が低いと、符号間干渉の増

(株)東芝 新DVD統括室(〒253-8522 横浜市磯子区新杉田8) E-mail: yutaka.kashihara@toshiba.co.jp

^{*1} <http://www.dvdforum.org/hddvd-tech.htm>

^{*2} <http://www.blu-raydisc.com/jp/technical/Section-14194/Index.html>

表1 第三世代までのおもな信号処理.

	第一世代	第二世代	第三世代	
	CD	DVD	HD DVD	BD
誤り訂正方式	CIRC	RSPC	RSPC	LDC+BIS
変調方式	EFM	8/16 変調	ETM	1-7PP
信号検出方式	原波形スライス	等化波形スライス	PRML	limit EQ+波形スライス, または PRML

CIRC: cross interleave Reed-Solomon code, RSPC: Reed-Solomon product code, LDC: long distance code, BIS: burst indicator subcode, EFM: eight to fourteen modulation, ETM: eight to twelve modulation, 1-7PP: 1-7 parity preserve/prohibit repeat minimum transition length, PRML: partial response and maximum likelihood.

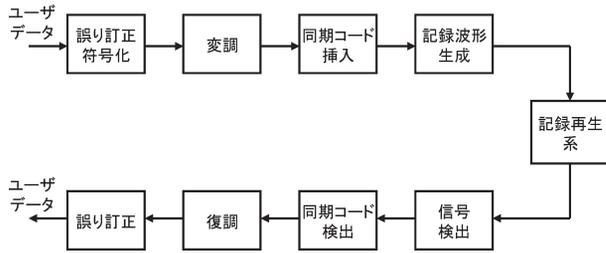


図1 光メモリーの信号処理ブロック図.

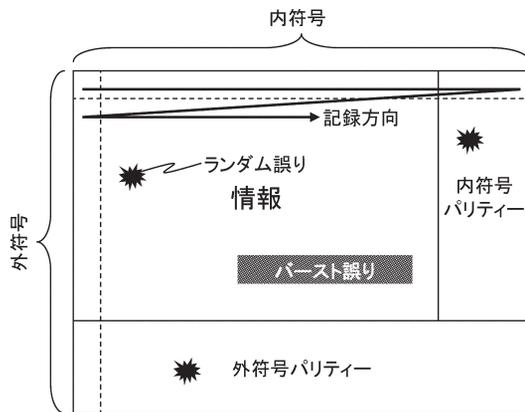


図2 積符号によるバースト誤り対策.

加, 光ディスク装置の内部クロックの高速化を招く. 最小ランゲンスは最短マーク長に関連し, 大きいことが望ましい. 最大ランゲンスが大きいと, ビット同期ずれや低域成分の変動をもたらす. 最大ランゲンスは小さいことが望ましい.

光ディスクでは, 再生波形の低域成分を, サーボ信号として使用している. また, 再生波形は, 高域通過フィルター通過後, 信号検出される. そのため, 変調方式では, 低域成分を抑圧している.

第三世代の変調方式では, 最小反転間隔の繰り返し回数の制限も導入された. 最小反転間隔が繰り返す箇所は, 連続した誤りとなりやすい. 最小反転間隔の繰り返し回数は, 小さいことが望ましい.

1.3 信号検出方式

信号検出方式は, アナログ信号として得られる再生信号

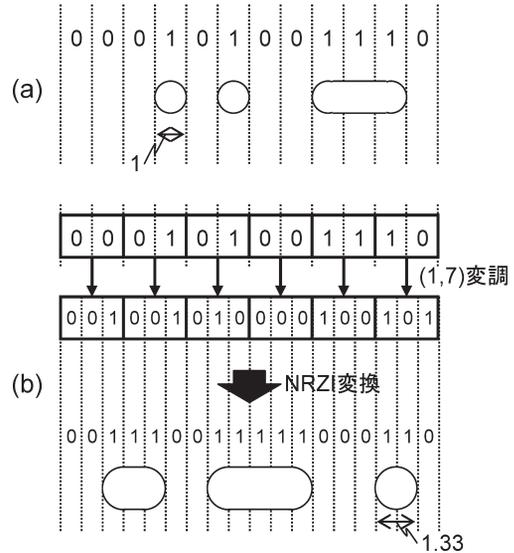


図3 最短マーク長の差. (a) 変調符号なし, (b) (1,7) 変調.

表2 第三世代までの変調方式のおもなパラメーター.

	CD	DVD	HD DVD	BD
変調方式	EFM	8/16 変調	ETM	1-7PP
コード比	8/17	1/2	2/3	2/3
最小, 最大ランゲンス	2, 10	2, 10	1, 10	1, 7
低域抑圧	有	有	有	有
最小反転間隔の繰り返し回数	∞	∞	5	6

を二値化する. 第三世代までの再生信号 (擬似再生信号³⁾) の様子を図4に示す. CDでは, 再生信号の振幅はほぼ一定であり, 再生信号が閾値を交差するタイミングから, 信号を検出する (原波形スライス方式).

光ディスクの記録再生系には高域遮断特性がある. DVDはCDよりも線密度 (ビームスポットの大きさと規格化した線密度) を高くしたため, 短いマークやスペースに対する再生信号の振幅が低下する. DVDでは, 高域増幅特性をもつ等化器で, 低下した再生信号の振幅を増幅した後, 等化再生信号が閾値を交差するタイミングから, 信号を検出する (等化波形スライス方式).

第三世代では, DVDよりも高線密度化したため, 短いマークやスペースの再生信号振幅はさらに低下する. 低下し

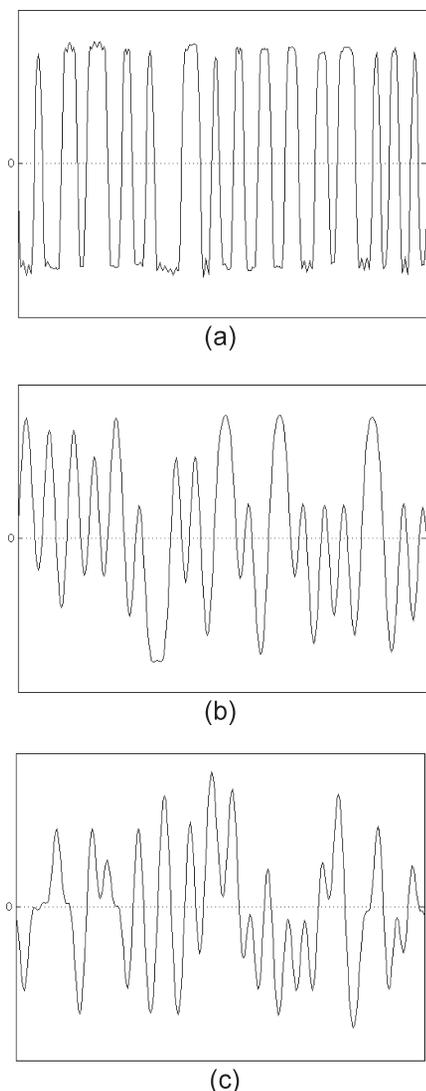


図4 再生波形の様子。(a) CD, (b) DVD, (c) HD DVD-RAM.

た振幅を増幅すると、同時に雑音も増幅してしまい、正しく信号が検出できなくなる。そこで、第三代では、PRML (partial response maximum likelihood) を採用した (図5)。PRML では、等化器を用いて、再生信号に PR 特性とよばれる既知の相関を与える。記録再生系に近い PR 特性を選んでおけば、等化での雑音増幅が抑えられる。等化器後段の最尤復号器では、等化再生信号の既知の相関を利用して、信号を検出する。信号間の相関を利用しているので、雑音に強いという特徴がある。さらに、第三代では、適応等化も導入された。記録再生系の特性は、ディスクや光学系のばらつきにより変化する。特性変化に応じて、等化係数を適応的に調整することで、その影響を抑圧する。

2. 第四世代用の信号処理技術

第四世代では、各候補固有の信号劣化と、複数の候補に

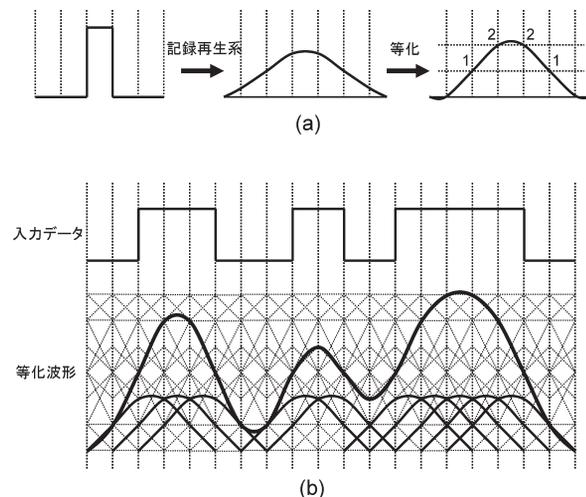


図5 PRMLの原理。(a) インパルス応答, (b) 等化再生信号の様子。

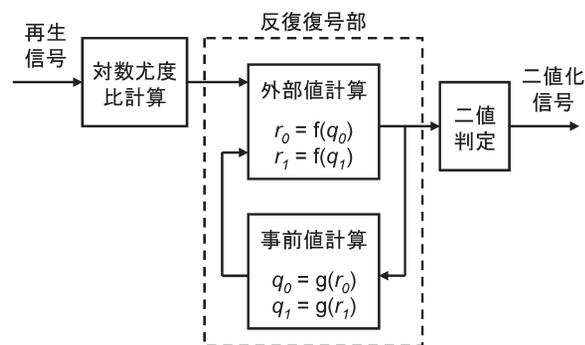


図6 反復復号方式のブロック図。

共通する信号劣化とが予想される。後者の多くは、面密度の向上に伴う劣化である。

2.1 面記録密度向上技術

面密度の向上に伴い、符号間干渉やトラック間クロストークが増加する。また、加工精度や熱干渉等から、非線形成分の増加が予想される。これらの劣化は、SNR (signal-to-noise ratio) の低下をもたらす。

2.1.1 反復復号

低 SNR 対策として、turbo 符号や LDPC (low density parity check) 符号に代表される、反復復号方式が挙げられる (図6)^{4,5)}。反復復号方式は、理論限界 (シャノン限界) に迫る復号性能を有する。反復復号方式では、まず、ある再生信号が 0 である確からしさと、1 である確からしさととの比 (対数尤度比) を求める。対数尤度比を 2 種類の復号器で交互に反復復号することで、確からしさが高まる。確からしさが高められた対数尤度比を二値化する。

2.1.2 クロストーク抑圧技術

高トラック密度化は、トラック間クロストークの増加を

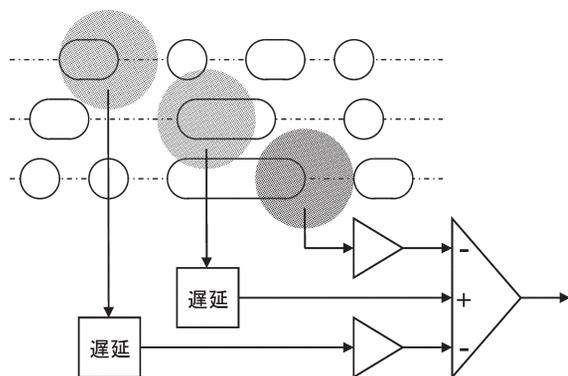


図7 トラック間クロストークキャンセラー。

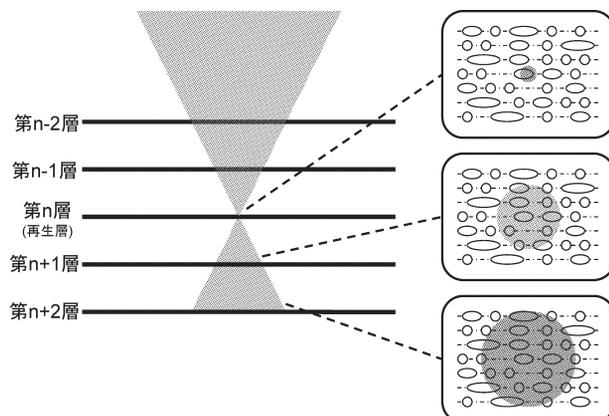


図8 層間距離と層間クロストークの関係。

招く。対策として、トラック間クロストークキャンセラーが提案されている(図7)⁶⁾。トラック間クロストークキャンセラーでは、ビームスポットを再生トラック(図7の中央のトラック)および隣接トラック(図の上下のトラック)に形成する。隣接トラックの再生信号から算出したクロストーク成分を、再生トラックの再生信号から減算することで、トラック間クロストークを抑圧する。

2.1.3 非線形性抑圧技術

第三世代で採用したPRMLは、再生信号の線形性を前提とする。しかし、高密度化により、非線形成分の増加が予想される。非線形性抑圧のため、PRMLに工夫を加えることが提案されている。例えば、記録パターンを予測し、適応的に最尤復号器内部の参照レベルを調整する⁷⁾、あるいは、等化器にヴォルテラフィルターを利用する方法⁸⁾が提案されている。

2.2 多層ディスク

多層ディスク特有の信号劣化として、層間クロストークが挙げられる。多層ディスク再生時の各層のビームスポットの様子を図8に示す。再生層以外の層では、デフォーカスしたビームが照射されることとなる。再生層からの距離が十分大きい層では、ビーム径は大きい(図8の第 $n+2$ 層)。この場合、高域遮断特性(1章3節参照)により、層間クロストークは低域成分のみの雑音となる。したがって、高域通過フィルターにより、層間クロストークは抑圧できる。

しかし、再生層からの距離が小さい層では(図8の第 $n+1$ 層)、層間クロストークと再生信号とは帯域が重なるため、フィルターによる分離ができない。層間距離が小さくなった場合でも、層間クロストークが抑圧できる方式として、変調符号を工夫する方式⁹⁾が提案されている。

2.3 媒体超解像

媒体超解像では、通常再生信号と超解像再生信号との合

成信号が再生信号として得られると考えられる。これに起因して、再生信号の非線形性が問題となる。非線形性抑圧のため、低域通過フィルターを用いて再生信号から通常再生信号を抽出し、これを再生信号から減じることで、超解像再生信号のみを得る方法¹⁰⁾が提案されている。また、ニューラルネットワークを応用した等化器を用いる方法¹¹⁾や、DFE(decision feedback equalizer)を用いる方法¹²⁾も提案されている。

2.4 近接場記録

ここでは、SIL(solid immersion lens)を用いた近接場記録を考える。近接場記録では、SILと媒体との距離が小さい。当初、埃等によるバースト誤り対策が必要と思われた。しかし、SILが埃等に衝突した場合、サーボ系が破綻する。結局、バースト誤り対策は第三世代と同程度で十分と思われる。

光メモリーでは、高転送レートに対する要求も高まっている。高転送レートを目的に、多チャンネルの記録再生系をもつ近接場記録システム¹³⁾が提案されている。多チャンネル対応のため、信号処理技術の高速化、あるいは、並列化が必要となる。

2.5 ホログラム記録

ホログラムでは、二次元のページデータを単位として記録再生される(ビット単位で記録再生するものも提案されている)。そのため、二次元の信号処理技術が必要となる。ホログラム特有の信号劣化として、ページの回転や輝度むらが挙げられる。回転は、同期コードの検出位置から回転角度を算出し、回転角度に応じて補間することで抑圧する。輝度むらは、二次元高域通過フィルターを用いた抑圧が考えられる。ただし、輝度むらと信号との帯域分離が必要である。

第三世代までの光ディスクに応用された信号処理技術を解説した。また、第四世代光メモリーの候補ごとに、応用が期待される信号処理技術を解説した。

第三世代までの信号処理は、高線密度の達成およびバースト誤り耐性の強化を目指して進歩してきた。第四世代の信号処理はこれらに加え、各候補特有の信号劣化を抑制することが必要である。

文 献

- 1) K. Tanaka, T. Iwanaga, Y. Kashihara, H. Kobayashi and M. Yamamoto: "Signal Processing," *ISOM Optical Memory Roadmap Report* (Adthree Publishing Co. Ltd., Tokyo, 2007) pp. 98-104.
- 2) W. W. Peterson and E. J. Weldon: *Error Correcting Codes*, 2nd ed. (MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972).
- 3) H. H. Hopkins: "Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs," *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979) 4-24.
- 4) E. Yamada, T. Iwaki and T. Yamaguchi: "Turbo decoding with run length limited code for optical storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 1753-1756.
- 5) T. Ohkubo, J. Shiraishi, T. Watanabe, Y. Urakawa and T. Saito: "Application of LDPC codes to high-density optical disc storage using 17PP code," *International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Conference Program and Technical Digest*, TuP27 (2005).
- 6) A. Hirotsune, J. Ushiyama, H. Minemura, H. Kudo, H. Miyamoto, R. Tamura and K. Adachi: "Write and read technology for a 50 GB/layer at 100 Mbps," *International Symposium on Optical Memory Technical Digest* (2004) pp. 22-23.
- 7) I. Ichimura, T. Maruyama, J. Shiraishi and K. Osato: "High-density multilayer optical disc storage," *Optical Data Storage Topical Meeting Conference Proceedings* (2006) pp. 185-187.
- 8) T. Nakagawa, A. Itoh, T. Hiura and H. Ino: "Adaptive third-order Volterra filter for high-density Blu-ray Disc ROM," *International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Conference Program and Technical Digest*, TuP1 (2005).
- 9) 前田武志, 近藤昌晴: "多層光ディスク用信号処理方式の一考察", 電子情報通信学会技術研究報告, **105**, No. 649, MR2005-63 (2006) 41-46.
- 10) T. Shintani, S. Eto, H. Minemura and Y. Anzai: "Perspectives of normal-resolution cross-talk cancellation to reduce random data bit error rate in super-resolution readout," *International Symposium on Optical Memory Technical Digest* (2007) pp. 74-75.
- 11) M. Seo, J. Kim, S. Im, J. Lee, C. Lee and K. Kwak: "Non-linear equalization for super-RENS disc," *International Symposium on Optical Memory Technical Digest* (2007) pp. 252-253.
- 12) R. Kasahara, T. Ogata, T. Kawasaki, H. Miura and K. Yokoi: "Decision feedback PRML for super-resolution media," *International Symposium on Optical Memory Technical Digest* (2006) pp. 68-69.
- 13) M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, A. Nakaoki and M. Yamamoto: "High density near-field optical disc system," *International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Conference Program and Technical Digest*, WD1 (2005).

(2007年12月7日受理)