2チャンネル記録方式 HDTV ビデオディスク における信号処理

橘 董[†], 正会員 高橋 宏雄[†]

Signal Processing in an HDTV Video Disc System Using a Two-channel Recording Method

Kaoru Tachibana[†] and Hiroo Takahashi[†]

Abstract : This paper examines two problems in signal processing in a two-channel recording method HDTV video disc system. First, an analysis of the origin of moiré interference made using a simple model of the recording and playback process revealed that the major cause of moiré interference is due to the baseband component in FM signals generated by the asymmetry of pits on a disc. We propose a moiré-reduction circuit which has proved to be effective experimentally. Next, the mechanism behind picture degradation caused by unequal characteristics of two recording channels is examined. A way to reduce the degradation using a vertical filter is demonstrated.

1. ま え が き

2チャンネル記録方式を用いた HDTV ビデオディスクシステムは、1986年に発表され、その後、1987年にまとめられたスタジオ規格¹⁾に対応すべく一部のパラメータが変更されて、1988年からは実用化されている。このシステムの技術的な要点については、すでに報告したが²⁾、そのなかでは、信号フォーマット、ディスクマスタリング、再生光学系など、システム全体について概要を述べるにとどまっている。

本論文では、主に再生信号処理を中心とした2つの問題、すなわち、①モアレ妨害の発生原因の解析とそ

の対策、②2チャンネル間特性差による画質劣化とその対策、にしぼって、このビデオディスクシステムの信号処理における特徴をより詳しく報告する。

2. フォーマット概要

2.1 フォーマットの特徴

このフォーマットのもっとも大きな特徴はアナログ2チャンネル記録という点である。また、副搬送波やパイロット信号などの周波数分割多重をいっさい行わず、単一の搬送波によってすべての信号を記録していることも大きな特徴である。すなわち、各チャンネルのすべての信号(コンポーネントビデオ信号、ディジ

キーワード: HDTV, ビデオディスク, 2チャンネル記録

1990年2月28日受付, 1990年5月28日再受付

[†] ソニー株式会社 総合研究所光技術研究部 (〒108 東京都港区港南1-7-4, TEL 03-458-7880)

[†] Opto-Electronics Research Dep., Corporate Research Laboratory, Sony Corporation (1-7-4, Konan, Minato-ku, Tokyo 108, Japan)

表 1 システムの基本パラメータ
Basic parameters of the system.

ビデオ		
帯域	Y	20 MHz
	C	6 MHz
記録ビデオ		12 MHz
FM 搬送波周波数		16.3 MHz (50%)
デビエーション		1.7 MHz
エンファシス時定数		$\tau_1 = 45 \text{ ns}$ $\tau_2 = 180 \text{ ns}$
ディスク		
	CAV	CLV
記録半径	91.8~145	67.2~145 mm
回転数	1800	2630~1220 rpm
線速	18.5~27.3	18.5 m/s

図 1 YC の 2 チャンネルビデオ信号へのエンコード
Encoding of YC to two-channel video signals.

タルオーディオ信号，時間軸基準用同期信号など）が時分割多重された信号により単一の搬送波を FM 変調して記録している．輝度信号(Y)と色差信号(C)のエンコードは，図 1 のように行われ 2 チャンネルビデオ信号となる．デジタルオーディオ信号は垂直帰線期間 (V プランキング) に多重される．以下の計算に必要なパラメータを表 1 に示す．

2.2 FM 伝送特性

ここで，以下の検討に必要となる，ビデオディスクの記録再生系を総合した FM 伝送特性についての考察を簡単に行う．ビデオディスクの記録(原盤カッティング)用の光学系は，プレーヤの再生光学系と比較すると，スポット径が約 1/3 であるので，記録過程の周波数帯域は，再生過程の周波数帯域よりもはるかに広い．このため，記録再生系の周波数特性は主に再生系で決まる．再生周波数特性は再生光学系のパラメー

図 2(a) 再生光学系の周波数特性
Frequency response of playback optics.

図 2(b) 最外周における等化
Equalization at outermost radius.

図 2(c) 最内周における等化
Equalization at innermost radius.

タと相対速度によって決まり，振幅特性は図 2(a) のようになり位相特性はほぼ直線的である．図の遮断周波数(f_c)は，レーザの波長(λ)，対物レンズの開口数(NA)と相対速度(v)により次の式で与えられる³⁾．

$$f_c = v \cdot 2 \cdot NA / \lambda$$

実際の光学系では， λ : 780 nm, NA : 0.53 であり，またディスクの線速は 18.5~27.3 m/s である．したがって f_c は，

$$f_c = 25.1 \sim 37.1 \text{ MHz}$$

となる．CAV (Constant Angular Velocity) ディスクの外周で， f_c が 28.3 MHz より高いときは両側波が再生されるが，内周および CLV (Constant Linear

Velocity) ディスクでは上側波が一部再生できず、残留側波帯方式となる。このような FM 伝送系については、種々の等化方法が考えられるが⁴⁾、以下の計算においては、比較的直線歪みの小さい例として、内周と外周でそれぞれ図 2(b), (c)の実線のように等化する場合を考える。

3. モアレ妨害

3.1 モアレの原因

ビデオ信号の記録再生において、非直線歪みなどにより生じたスプリアス信号が画面上で干渉縞状の妨害となる現象はモアレと称される。コンポジットビデオ信号の低搬送波 FM 記録においては、特に色副搬送波成分のスプリアスがモアレの原因となる⁵⁾。

現行ビデオディスクの場合、色副搬送波に加えてオーディオ副搬送波が存在することと、記録再生過程が以下に述べるような非直線性を有することにより、各信号間の相互変調が発生し再生画像でモアレとなる^{6)~8)}。

これらのモアレ妨害を避けるための最も有効な方法は、すべての副搬送波成分を取り除き単一搬送波にすることである。この考え方にに基づき、本システムでは、すべての信号を時分割多重し、単一の FM 搬送波によって記録を行っている。しかしながらこの場合も 3.2 節で述べるように、非直線歪みによるモアレ妨害は完全には解消されない。

光学式ビデオディスクの記録再生過程での非直線性発生要因は、次の 3 つに要約できる⁹⁾。

- (1) 記録側ハードリミッタ
- (2) 記録メカニズム
- (3) 再生メカニズム

(1) は奇数次高調波歪みを発生させる。(2) の歪みは、模式的に、図 3 のように周波数に依存しない一定幅のパルスを記録信号に足し合わせたモデルで表すことができる⁹⁾。また逆にピットが短くなる場合もあり、このときは一定幅のパルスを引く。このような信

図 3 ピットのアシンメトリの概念図 (ピットが長くなった場合、実際の再生信号は帯域制限を受けるので図と異なる)
Schematic diagram of pit asymmetry.

号のデューティ比のずれを以下では単にアシンメトリと呼ぶ。アシンメトリの特徴は高調波歪みが発生することのみでなく、FM 信号中にベースバンド成分が生ずることである。これは一定幅パルスの加算あるいは減算であるから、パルスカウンタ型の FM 復調器と同様な原理により理解できる。(3) の歪みも (2) と同様に、高調波歪みだけでなくベースバンド成分を発生させる。

3.2 モアレの計算

この節の目的は各種のモアレの量を概算し、モアレの主要原因を特定することである。

de Haan らは、前述のような非直線性を有する光学式ビデオディスクの記録再生過程を、非対称リミッタと、それに続く直線フィルタとによるきわめて簡単なモデルで近似し、相互変調やモアレの近似計算を行っている⁹⁾。しかし非対称リミッタでは、FM 信号に用いたときに、実際のアシンメトリと異なり、ベースバンド成分の発生がない。そこで、ここでは、より実際のアシンメトリに近いモデルとして、図 3 のように固定幅のパルスを付加した矩形波と、図 2(a) に示したような再生光学系による直線フィルタとで記録再生系を近似する。

(1) リミッタ

ここでは、まずリミッタによるモアレのみを計算するために、アシンメトリがない矩形波を考える。ビデオ信号を 100%_{pp} の正弦波とし、この周波数 (f_m) を 0 から 12 MHz まで変化させたときの搬送波 ($f_0=16.3$ MHz) の基本波と 3 次高調波それぞれに対する各側帯波の広がりをプロットすると図 4 のようになる。計算

図 4 対称矩形 FM 波の側帯波
 J_n : 基本波の n 次側帯波
 J_{nm} : m 次高調波の n 次側帯波
基準レベル: 無変調基本波のレベル

Sidebands of a symmetric square FM wave.

J_n : n th sideband of fundamental.

J_{nm} : n th sideband of m th harmonic.

Reference level: level of the fundamental carrier component.

図5 等化後の第1両側波と妨害成分(基準レベル:無変調基本波のレベル) ((a) 最外周, (b) 最内周)とFM復調後のモアレ妨害(基準レベル:復調信号の振幅) ((c) 最外周, (d) 最内周)

First sidebands and interference components after equalization. (Reference level: level of the fundamental carrier component.) ((a) Outermost radius, (b) innermost radius.) and Moiré interference after FM demodulation. (Reference level: amplitude of demodulated signal.) ((c) Outermost radius, (d) innermost radius.)

に必要な、デビエーションとエンファシス時定数は表1に示した。FM復調の帯域内に入り込んでモアレ妨害の原因となりうるのは、基本波の第2下側帯波の折り返しと3次高調波の第2, 第3下側帯波である。2.2節で述べたように等化を行うと、図4は記録再生および等化後には、最内周と最外周でそれぞれ図5(a), (b)のようになる。それぞれに対して、復調、ディエンファシス後の復調信号とモアレ成分の振幅を計算すると、図5(c), (d)のようになる。最も大きな妨害は、基本波の第2下側帯波の折り返しによるもので、内周の方が大きい。最大となるのは f_m が10.3 MHzのとき、すなわち、折り返し成分の周波数 $|f_0 - 2f_m|$ が第1下側帯波の下限周波数 $(f_0 - 12)$ に等しくなるときで、妨害波は12 MHz, -21 dBである。

(2) アシメントリ

続いて、搬送波の周波数($f_0 = 16.3$ MHz)でのデュエティ比が60/40であるようなアシメントリのある矩形波の場合(以下20%のアシメントリと呼ぶ)を考えると、各側帯波と、アシメントリにより生ずるベースバンド成分は図6のようになる。これはいくつかの f_m についてDFT (Discrete Fourier Transform)でスペクトラムを計算し、その中の主な側帯波およびベースバンド成分のみをプロットしたものである。サン

図6 アシメトリ20%の矩形FM波の側帯波とスペリアス b: ベースバンド成分

Sidebands and spurious components of a 20%-asymmetric square wave. b: baseband component.

プリング周波数は f_0 の400~500倍程度に選んでいる。サンプリングによる折り返し成分の影響による計算誤差は、-40 dBで1 dB以内、-50 dBで約3 dB以内である。等化後の第1両側帯波と妨害成分を図7(a), (b)に示す。復調後の復調信号とモアレ成分の振幅は図7(c), (d)のようになる。最も大きなモアレは、内周でのベースバンド成分による妨害で、 f_m が4.3 MHz、すなわち、ベースバンド成分の周波数 f_m が第1下側帯波の下限 $(f_0 - 12)$ となると最大となり、妨害波は12 MHz, -14 dBである。 f_m が4.3

図 7 等化後の第1両側帯波と妨害成分((a) 最外周, (b) 最内周)と FM 復調後のモアレ妨害 ((c) 最外周, (d) 最内周)

First sidebands and interference components after equalization. ((a) Outermost radius, (b) innermost radius.) and Moiré interference after FM demodulation. ((b) Outermost radius, (c) innermost radius.)

図 8 モアレ除去回路のブロック図
Block diagram of moiré-reduction circuit.

MHz から高くなるほど妨害波の周波数は下がり、振幅も小さくなる。図 7 (c) では、外周でも内周に近い大きさの妨害波が出ているが、これは、外周でも内周と同じ 20% アシメントリとして計算したためである。実際は、アシメントリ量はディスク上の一定長に対応するので、線速の大きい外周では、内周より小さくなる。

以上(1), (2)の計算より、最も大きなモアレの要因はアシメントリによるベースバンド成分である。

3.3 モアレ妨害の除去

3.2 節において、モアレの最も大きな要因なアシメントリによって生ずるベースバンド成分であることを示した。実際のディスク製造と再生光学系においては、ある程度のアシメントリは許容しなければならず、これを再生側回路で除去する方法を考えてみる。現実的なアシメントリの許容量は、ディスク製造設備によって異なるが、10 から 20% の間と思われる。

アシメントリによって生ずるベースバンド成分を再生 RF から除去することは、例えば以下のような方法により可能である。図 8 に示したように、RF を FM 復調し、その復調出力のベースバンド成分(a)を、振幅が FM 信号中のベースバンド成分の振幅に等しくなるようにし(c), 再生 RF 信号から引けばキャンセルできる。図 8 の FM 復調器は、キャンセル用ベースバンド信号発生のための FM 復調器である。この出力ベースバンド信号(a)で FM 信号中のベースバンド成分を同期検波し、その検波器出力(b)が 0 になるように、キャンセル用信号の振幅を制御する帰還ループを構成することにより、FM 信号中のベースバンド成分は常に 0 となる。

実際にアシメントリの大きなディスクの再生に、この回路を用いた効果の例を写真 1 に示す。ディスクから再生し等化した後の RF が写真 1(a)である。ベースバンド成分が存在するため、上下のエンベロープが非対称になっている。このまま復調すると、写真 1 (b)のように、モアレ妨害が生ずる。これに対し、ベースバンド成分除去回路を用いると、写真 2(a), (b)のように、RF 中のベースバンド成分が低減され、復調出力のモアレ妨害も低減される。

アシメントリは復調ビデオにモアレ妨害をもたらすばかりでなく、ドロップアウト検出にも悪影響を与える。例えば、ドロップアウト検出を、RF のエンベロ

(a) 等化後の RF

(b) FM 復調後のビデオ信号

写真 1 モアレ除去回路がない再生系の波形
Waveforms in a playback system without moiré reducer.

(a) RF after equalization, (b) FM-demodulated video signal.

(a) 等化後の RF

(b) FM 復調後のビデオ信号

写真 3 モアレ除去回路がない再生系の波形
Waveforms in a playback system without moiré reducer.

(a) RF after equalization, (b) FM-demodulated video signal.

(a) 等化後の RF

(b) FM 復調後のビデオ信号

写真 2 モアレ除去回路を用いた再生系の波形
Waveforms in a playback system with moiré reducer.

(a) RF after equalization, (b) FM-demodulated video signal.

(a) 等化後の RF

(b) FM 復調後のビデオ信号

写真 4 モアレ除去回路を用いた再生系の波形
Waveforms in a playback system with moiré reducer.

(a) RF after equalization, (b) FM-demodulated video signal.

ープ低下の検出により行う場合を考える。写真 3(a) はアシメントリの大きいディスクの、ビデオ信号の立ち上がり部の RF である (等化後)。この写真からわかるように FM の瞬時周波数が高く RF のくびれた部分で、上下のくびれが非対称となりドロップアウトとして誤検出される恐れがあり、それを避けるためには検出感度を下げなければならない。またビデオ信号で

ドロップアウト検出を行う場合も、写真 3(b) のモアレ妨害成分はドロップアウト検出にも妨害となる。これらの妨害は、ベースバンド成分除去回路により写真 4(a), (b) のように低減される。

4. チャンネル間特性差による画質劣化

一般に、本システムのような、1 つの信号を 2 チャ

ンネルに分割して記録する方式においては、チャンネル間の特性差は大きな画質劣化をもたらす¹⁰⁾。本システムでは、例えば2チャンネルビデオ信号のレベル差は画面上で固定の横縞状の妨害となる。この画質劣化を抑えるために、従来行われてきた方法は、できるかぎり高精度に両チャンネルの特性を良くし、差を小さくすることである。しかし実際には、記録再生を通して、レベル、ゲイン、直線性、波形応答、時間軸誤差等の2チャンネル間の特性を高精度に合わせることは

図 9(a) 線順次サンプリングによる折り返し
Aliasing caused by line-sequential sampling.

図 9(b) チャンネル間特性差による残留折り返し成分

Residual aliasing component caused by unequal characteristics of two channels.

困難であり、ある程度は許容しなければならない。その許容すべき量は安価なシステムほど大きくなる。そこで、2チャンネル間の特性差をある程度許容し、それによる画質劣化を低減する方法を考える。

まずYについて考える。Yは線順次に2チャンネル分割されるので、各チャンネルのY信号は垂直方向に $f_L/2$ でサンプリングされ折り返しを含んだ信号となる(図9(a)の破線)。ただし f_L は走査線による垂直方向のサンプリング空間周波数である。各チャンネルのY信号は逆位相の $f_L/2$ でサンプリングされており、記録再生され再び1ライン毎に合成されるときに、両チャンネル間に全く特性差がなければ、 $f_L/2$ 成分が消え、信号は完全に復元される。チャンネル間特性差があると、 $f_L/2$ 成分が若干残る(図9(b)破線)。したがって、2チャンネル間特性差による残留成分は、垂直方向周波数 $f_L/2$ を中心とした成分である。

この残留成分は、 $f_L/2$ の近傍を減衰させる垂直フィルタによって抑圧できる。図10に実現例のブロック図を示す。この例では、まず垂直BPF (Band Pass Filter)によって $f_L/2$ 成分を抜き出す。これを、大振幅分は振幅制限し小振幅分はゲインを0.5倍とする非直線回路を通した後、元の信号から引くことにより、2チャンネル間の差によるノイズを1/2に抑圧している。ただしこのような回路は信号の垂直 $f_L/2$ 近傍の成分も抑圧してしまうので、2チャンネルに分割する

図 10 垂直ノイズ低減回路のブロック図
Block diagram of vertical noise reducer.

写真 5 垂直ノイズ低減回路の効果
Effect of vertical noise reducer.

前に、逆特性をもつ $f_L/2$ 小振幅成分の強調処理を行うことが望ましい。また、小振幅分のみに対して行うのは、垂直強調によって垂直エッジ部でビデオ信号の振幅が大きくなり、FM 変調で過変調となるのを防止するためである。

実際に、2 チャンネル間で 4% 程度の波形特性の差があり、Y の立ち上がりエッジ部が写真 5(a) のようになっているとき、この回路により写真 5(b) のように差が低減される。

C については、2 つの色差信号が線順次であり、各色差は 2 ライン毎に 2 チャンネルへ分割されるので、垂直周波数を Y の場合の $1/2$ にして考えればよい。

5. む す び

2 チャンネル記録方式の HDTV ビデオディスクの信号処理における問題点の解析と解決方法の検討を行った。

まず、モアレ妨害の最も大きな原因が、記録ピットのアシンメトリによって FM 信号中に生ずるベースバンド成分であることを近似計算により示し、その結果に基づいたモアレ除去回路を提案し、実際の効果を確認した。

つぎに、多チャンネル記録に特有の問題であるチャンネル間の特性差による画質劣化の発生メカニズムの解析に基づき、これを、特定の垂直周波数成分を抑圧する垂直フィルタにより低減する方法と実現例を示した。

これらは、いずれも記録再生過程での信号劣化を再生系信号処理により改善するためのものであり、システムを実用化するに当たって有効な手法である。

終わりに、日頃光学系について御教示いただく当所光技術研究部の大里潔、福本敦両氏に感謝します。

【参 考 文 献】

- 1) "BTA S-001, 1125/60 高精細度テレビジョン方式スタジオ規格", 放送技術協議会 (Aug. 1987)
- 2) K. Tachibana, T. Kashiwagi, H. Momiyama, M. Yamamoto and H. Takahashi: "Optical Disc System for Wideband High Definition Video Signal", IEEE Trans., Consum. Electron., **35**, 3, pp. 208-215 (Aug. 1989)
- 3) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. Schouhamer Immink: "Principles of Optical Disc Systems", pp. 1-23, Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston (1985)
- 4) 吉田: "VTR における残留側帯 FM 伝送特性", 信学誌, **42**, 9, pp. 797-803 (Sep. 1959)
- 5) M. O. Felix and H. Walsh: "F. M. Systems of Exceptional Bandwidth", Proc., IEE, **112**, 9, pp. 1659-1668 (Sep. 1965)
- 6) B. A. J. Jacobs: "Laser Beam Recording of Video Master Disks", Appl. Opt., **17**, 13, pp. 2001-2006 (July 1978)
- 7) C. H. F. Velzel: "Laser Beam Reading of Video Records", Appl. Opt., **17**, 13, pp. 2029-2036 (July 1978)
- 8) P. W. Bögels: "System Coding Parameters, Mechanics and Electro-Mechanics of The Reflective Video Disc Player", IEEE Trans. Consum. Electron., **CE22**, 4, pp. 309-317 (Nov. 1976)
- 9) M. R. de Hann and C. H. F. Velzel: "Intermodulation and Moiré Effects in Optical Video Recording", Philips Res. Repts, **32**, pp. 436-459 (1977)
- 10) 佐々木, 千葉, 坂内, 栗本: "帯域圧縮方式ハイビジョン用 VTR", National Technical Report, **32**, 4, pp. 420-428 (Aug. 1986)

橋 薫 (かおる) 昭和 54 年、東北大学工学部通信工学科卒業。同年、ソニー(株)に入社。総合研究所、光技術研究部に勤務。光ディスクによる、ビデオ記録技術の研究開発に従事。

高橋 宏雄 (ひろお) 昭和 43 年、早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。同年、ソニー(株)に入社。総合研究所、光技術研究部に勤務。トリニトロン CRT の開発を経て、現在、光ディスクシステムの開発に従事。正会員。

2 チャンネル記録方式 HDTV ビデオディスクにおける信号処理

橘 薫, 高橋宏雄

この論文は、2チャンネル記録方式 HDTV ビデオディスクシステムの信号処理における2つの問題点の解析および解決方法について述べている。最初に、モアレ妨害の発生要因の解析を簡単な記録再生モデルにより行い、モアレ妨害の最も大きな原因が、記録ピットのアシンメトリによってFM信号中に生ずるベースバンド成分であることを示し、その結果に基づいたモアレ除去回路を提案し、実際の効果を示す。つぎに、2チャンネル間の特性差による画質劣化の発生メカニズムについて考察し、それに基づき、特定の垂直周波成分を抑圧する垂直フィルタによりこの画質劣化を低減する手法と実際の効果を示す。

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 10, pp. 1383~1390 (1990)

光ディスク装置におけるトラッキング引込み条件および方式

鈴木基之, 田中久光, 三浦芳夫

光ディスク装置のトラッキング引込みを安定に行うための条件について検討した。5.25インチ追記型光ディスク(WO)において、ISOで規格となっている連続サーボ方式およびサンプルサーボ方式について、サーボ系の帯域、位相余裕およびサーボ系をオンするタイミングをパラメータとして光ビームとトラックとの相対速度とオーバーシュートの関係についてシミュレーションと実験を行い、安定に引込むための条件を求めた。また、引込み可能な相対速度を向上するため、トラッキング誤差検出特性を正弦波特性から位相周波数比較器特性とする方式について検討を行った。サンプルサーボ方式光ディスク装置に適用し、相対速度12.5 mm/sec以上においても安定に引込めることを確認した。

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 10, pp. 1391~1397 (1990)

光ディスク駆動装置のサーボオフセット補正方式

吉本恭輔, 伊藤 修, 田中邦麿

光ディスク駆動装置のトラッキングサーボにおいて、構造が簡単のためよく使用されるプッシュプルセンサは、集光レンズが光軸に対して横ずれしたり、ディスクが傾くことによって、オフセットを生じやすい。我々は、これらオフセットを自動的に検出し、電氣的に補正する方式を考案した。トラック1周にわたりセクタごとの内周外周交互のトラックジャンプを実施し、各々のジャンプ中のプッシュプルセンサ信号の最大値と最小値の各々の平均値の中心値として、オフセットの直流成分を検出する方法である。サンプリング2 μ s、分解能8 bitのディジタル系に最大値、最小値検出回路を組合わせることにより、制御目標 $\pm 0.1 \mu$ mの1%以下の精度でオフセットが再現性よく測定可能であることを実証した。この測定値を利用して、自動オフセット補正を行うことが可能である。また、光軸の傾きに対して本補正方式が有効であることを実証した。

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 10, pp. 1398~1402 (1990)