

デジタルオーディオにおける変調

早稲田大学理工学部 山崎 芳 男

コンパクトディスクが正に発売されんとしていた時期の本誌、昨年の8月号に『デジタルオーディオの迷信とその克服』という一稿を書かせていただいた。お読みいただいた方もあると思うが、その要旨は次のようなものであった。

- (1) 音響信号をデジタル化すると音は良くなるが膨大な帯域を必要とする、といった声を耳にすることがある。しかし、これは二重の誤りである。デジタル化すれば音は悪くこそなれ良くなることなどあり得ない。一方、デジタル伝送・記録は決して能率の悪い伝送手段ではない。アナログ伝送路で伝送できる音は同じ伝送系を使って少なくとも同程度の質でデジタル伝送が可能ならずである。
- (2) デジタル化には標本化と量子化の操作が必要であり、量子化による信号劣化である量子化雑音は不可避である。従って元来アナログ信号である広帯域音響信号をデジタル化すると音は劣化こそすれ良くなるはずは

ない。これは無限のエントロピーをもつオーディオ信号を有限の伝送路に押し込めようというのであるから当然である。

- (3) 量子化雑音は信号レベルの低いとき入力と相関の強いデジタル特有のひずみとなることがある。ディザとよばれる量子化ステップ幅に一樣分布する確率変数を量子化に先立ち信号に重畳し、量子化出力から同じディザを引き去ることにより、量子化雑音を入力と無相関な白色性の雑音に帰着することができる。さらに大振幅のディザを重畳、減算することにより、AD、DA変換器の変換誤差に起因するひずみをも低減することができる。
- (4) アナログ伝送・記録では信号が機器を通過すると多かれ少なかれ信号は劣化する。これに対し、デジタル化の際発生する量子化雑音さえ許容すれば、デジタル段では劣化のない伝送、処理が可能である。
- (5) 運用面からみるとデジタル

のほうがレベル設定が難しい。これはアナログでは一般に高レベルになるにつれてひずみも徐々に増えるのに対し、デジタルではレベルが上昇するほどひずみが低減するからである。

- (6) 伝送系の終端に位置する家庭用オーディオ機器は伝送段で信号劣化がないというデジタル化の恩恵を受けることは少ない。従ってユーザーから見た場合“良いから”デジタル化するのではなくむしろ“安くて、丈夫にできる”ならデジタル化されるべきである。

このうち(1)の後段は正に変調技術そのものについてであり、情報論的にみても確かな変調方式を適用すればアナログの質を上回る密度での伝送・記録が可能ならずである。おそらく、音響信号のデジタル化に必要な標本化周波数 $40 \sim 50\text{kHz}$ $14 \sim 16\text{bit}$ を単純に乗算して1チャンネルあたり $500 \sim 800\text{kHz}$ の帯域が必要であると、早合点している結果と思われる。これは $500 \sim 800\text{kb/s}$ の伝送容量を必要としているのであ

って、この周波数帯域が必要なわけではない。帯域 4kHz の電話回線を使って最近では 19,200bit/s の伝送を実現している点からも明らかである。

また、(4) はデジタル伝送・処理の基本的な長所である。このデジタルオーディオの特長はあくまでもデジタル段での的確な伝送、いいかえれば、伝送路とデジタル化された音響信号の整合がなされている場合についていえることである。そこで本号では、この整合において重要な役割を果たす変調について考えてみよう。

デジタルオーディオ と変調方式

デジタル信号を伝送・記録する方法には、搬送波を変調する方法と基底帯域波形をそのまま、あるいは何等かの規則に従って変換する方法とがある。前者については本誌5月号に荒谷孝夫氏が「各種変調方式通信」と題して詳しく解説されている。アナログ信号の振幅変調 (AM)、周波数変調 (FM)、位相変調 (PM) に対応して、デジタル信号の振幅変調 (ASK)、周波数変調 (FSK)、位相変調 (PSK)、振幅変調と位相変調を組み合わせた QAM などがある。

後者には、ここで紹介する NRZ、NRZI、PE、MFM、GCR、EFM などがある。前者は無線・有線の伝送に主として使われ、後者はテープやディスクへの記録に使われている。後者は基底帯域変調とよばれることもあるが、変調というよりは、一種の符号変換、符号化としてとらえら

れていることも多い。また、後者で変調したうえ前者の変調と組み合わせさせて伝送・記録する場合もある。

ところで、伝送技術にとっては多くの情報を、いかに正確に速く送るかということが重要な課題である。単位時間内に多くの情報を送ることができれば、伝送経費の節約になりまた一本のケーブルで多くの信号を一度に送ることができれば、ケーブルの節約、ひいては、伝送経費の低減につながるからである。これが変調の目的の一つである。

一方、通信路では、前述のように多かれ少なかれ雑音が混入する。雑音のために受信側で受け取った信号が、送信側で送った信号と異なった形になり質が低下する。変調は、雑音に打ち勝って通信の質を改善することを目的としている。すなわち、変調の意義は伝送路と信号の整合をいかにして最適化するかという点にある。

望ましい条件

変調方式の決定にあたっては伝送路、記録系の特性を考慮しなくてはならないが、ここでデジタル記録変調方式として一般に望ましい条件を考えてみよう。

(1) ビット同期情報の抽出が容易であること

別にしっかりした時間基準がない場合は受信あるいは再生信号系列中から、読み取り用のクロックを抽出するために受信信号系列に長い空白が連続して生ずることのない変調方式が望ましい。

(2) 直流遮断特性の影響を受けにくいこと

磁気記録のように微分検出形の再生系では直流の伝送は不可能である。また、場合によっては伝送路に直流を重畳して給電する系もある。このような場合には、変調された信号は直流成分を含まないことが望ましい。

(3) 所要伝送帯域幅が小さいこと
記録・再生系や伝送路の伝送特性は、一般に高域になるほど減衰量が增大するので、なるべく所要帯域幅の小さい変調方式が望ましい。

(4) 雑音、ジッターに強いこと

対象とする伝送・記録系の雑音や時系軸のゆらぎジッターを考慮して余裕のある復調の可能な変調方式が望ましい。

などの条件があげられる。

変調方式として2値符号を用いる場合、具体的には、まず所要帯域を広くしないために、まず極性の最小反転間隔 (T_{min}) が大きいこと、つぎに、読み取り同期信号の抽出を可能ならしめるため最大反転間隔 (T_{max}) が小さいこと、さらに正確な読み取りが可能な時間幅、判別窓幅 (T_w) が大きいことが望ましい。

各種の変調方式

実際に伝送路に送られる伝送波形としては、伝送路特性に適合するように、VTR を利用した PCM プロセッサのように2値以外の波形が使われることもあるが、一般には2値の波形が使われる。特に搬送波を用いずにデジタル信号を2値に対応

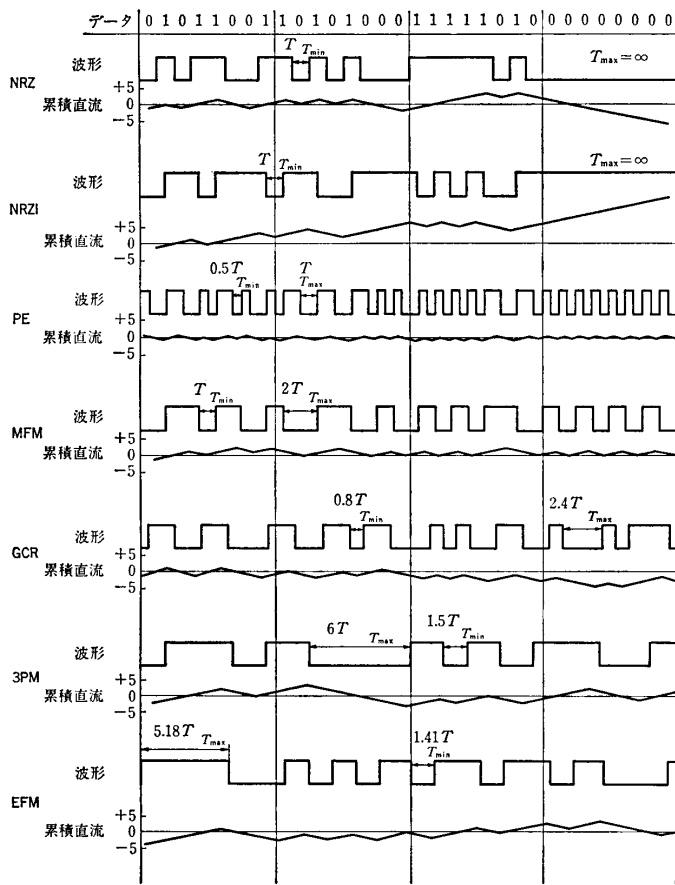


図1 各種変調方式の変調波形

表1 データの極性反転間隔とクロック抽出の可否

変調方式	データの極性反転間隔									クロック抽出				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8		9			
NRZ	×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	不可
NRZI	×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	不可
PE	×	—	×											可
MFM	×	—	×	—	×									可
GCR	×	—	×	—	×									可
3PM			×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	可
EFM	×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	—	×	可

させる変調を2値基底帯域変調と呼ぶ。

図1にデジタル記録に使われているいくつかの2値の基底帯域変調方式、NRZ、NRZI、PE、MFM、GCR、3PMおよびEFMの各種変調方式の変調波形と、それぞれの高レベルを1、低レベルを-1としたときの累積直流を示す。

表1にそれぞれの変調方式の反転位置とクロック抽出の可否を示す。

それぞれの変調方式について変調規則を簡単に説明し、前述の望ましい条件と照らし合わせて各変調方式を評価してみよう。

(1) NRZ (Non Return to Zero)

NRZは、信号の'0' '1'を変調波の正負に対応させるといふ、両極符号の典型的なものであり、この方式は、VTR、ビデオディスク、データレコーダなどの、既成のシステムをデジタル記録に利用する場合広く用いられている。 T_{min} は原信号の標本化間隔 T に等しく、 $T_{max} = \infty$ であるから、直流変動が大きく、クロック抽出も不可能である。

(2) NRZI (Non Return to Zero Immediately)

NRZIは、データの'1'あるいは'0'(図1では'1')のときのみ、極性を反転させる。とも、NRZと同じであるが、極性反転のみに情報が含まれるので、磁気記録のような微分検出形の媒体に対して有利になる。550BPI (Bit Per Inch), 800BPIのコンピュータ用の磁気テープ装置に使われている。

NRZ同様、直流変動は大きい。

(3) PE (Phase Encoding)

PEは、データが'1'のとき上

向き, '0' のとき下向きの極性反転を行う変調方式で, '1' または '0' が連続する場合, あらかじめ極性を反転しておく必要があるので $T_{min} = T/2, T_{max} = T$ となる。従って間隔は $T/2$ と最大反転間隔だけとなり, クロックの自己抽出が可能である。そのうえ直流の累積は生じない。磁気記録に使用する場合この点で, NRZ 系の変調方式に比べ優れており, 電子計算機では T_{min} が短いにもかかわらず記録密度の高い1,600BPI のMT (Magnetic Tape) 装置に採用されている。

(4) MFM (Modified Frequency Modulation)

MFM はデータが '1' のときはデータの中央の時点で極性反転, '0' がひとつだけのときはなにもせず '0' が連続するときはその境目で極性を反転するという変調方式である。その結果, 反転間隔は $T, 1.5T, 2T$ の3種類となる。直流変動は若干あるが, 自己クロック抽出が可能となり, コンピュータ用磁気ディスク装置や, 固定ヘッド形PCMレコーダなどに広く用いられている。

(5) GCR (Group Coded Recording)

GCR は, IBM が6,250BPI のMT装置に導入した変調方式で, データを4bitごとに区切り, これを表2の規則に従って5bitに変換したうえ, NRZIの形式で変調するというものである。この変換により必ず3bitに1回は極性反転が生じる。この結果 $T_{min} = 0.8T, T_{max} = 2.4T$ となり, 他に $1.6T$ の場合がある。従って直流変動は若干あるが, クロックの抽出が可能である。

表2 GCRの変調則

1ブロックのデータ	変換された5bitの値
0 0 0 0	1 1 0 0 1
0 0 0 1	1 1 0 1 1
0 0 1 0	1 0 0 1 0
0 0 1 1	1 1 1 0 1
0 1 0 0	1 0 0 1 1
0 1 0 1	1 0 1 0 1
0 1 1 0	1 0 1 1 0
0 1 1 1	1 0 1 1 1
1 0 0 0	1 1 0 1 0
1 0 0 1	0 1 0 0 1
1 0 1 0	0 1 0 1 0
1 0 1 1	0 1 0 1 1
1 1 0 0	1 1 1 1 0
1 1 0 1	0 1 1 0 1
1 1 1 0	0 1 1 1 0
1 1 1 1	0 1 1 1 1

表3 3PMの変調則

1ブロックのデータ	反転位置
	$P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6$
0 0 0	0 0 0 0 1 0
0 0 1	0 0 0 1 0 0
0 1 0	0 1 0 0 0 0
0 1 1	0 1 0 0 1 0
1 0 0	0 0 1 0 0 0
1 0 1	1 0 0 0 0 0
1 1 0	1 0 0 0 1 0
1 1 1	1 0 0 1 0 0
$\rightarrow T \leftarrow$	$\rightarrow T \leftarrow$

表4 EFMの変調則(一部)

	データビット	チャンネルビット
64	0 1 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0
65	0 1 0 0 0 0 0 1	1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0
66	0 1 0 0 0 0 1 0	1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0
67	0 1 0 0 0 0 1 1	1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0
68	0 1 0 0 0 1 0 0	0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0
69	0 1 0 0 0 1 0 1	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0
70	0 1 0 0 0 1 1 0	0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0
71	0 1 0 0 0 1 1 1	0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0
72	0 1 0 0 1 0 0 0	0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0
73	0 1 0 0 1 0 0 1	1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
74	0 1 0 0 1 0 1 0	1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
75	0 1 0 0 1 0 1 1	1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0
76	0 1 0 0 1 1 0 0	0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
77	0 1 0 0 1 1 0 1	0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
78	0 1 0 0 1 1 1 0	0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
79	0 1 0 0 1 1 1 1	0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0
80	0 1 0 1 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0
81	0 1 0 1 0 0 0 1	1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0
82	0 1 0 1 0 0 1 0	1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0
83	0 1 0 1 0 0 1 1	0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0
84	0 1 0 1 0 1 0 0	0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0
85	0 1 0 1 0 1 0 1	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0
86	0 1 0 1 0 1 1 0	0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0
87	0 1 0 1 0 1 1 1	0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0
88	0 1 0 1 1 0 0 0	0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0
89	0 1 0 1 1 0 0 1	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
90	0 1 0 1 1 0 1 0	1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
91	0 1 0 1 1 0 1 1	1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0
92	0 1 0 1 1 1 0 0	0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
93	0 1 0 1 1 1 0 1	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0
94	0 1 0 1 1 1 1 0	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
95	0 1 0 1 1 1 1 1	0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
96	0 1 1 0 0 0 0 0	0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0

(6) 3PM (3 Position Modulation)

3PMは1977年ユニバックが、8434ディスク装置に採用した変調方式である。表3の規則に従って3bitのデータを6bitに変換する。この表をよく見ると6bit目は常に'0'で、'1'が少なくとも1つ存在し、'1'と'1'の間には'0'が少なくとも2つ存在している。5bit表現できる32種類の符号のうち少なくとも1つ'1'を有し、'1'と'1'の間に2つ以上の'0'を含む組み合わせはちょうど3bit分の8種類ある。変換された6bitにNRZI則をあてはめて変調すると、最小反転間隔は元のデータ間隔で数えて1.5bitとなる。

ところがデータが例えば011, 111と続くような場合、変換された12bitは010010100100となり、境目で101すなわち反転間隔が原信号の1bit間隔になってしまう。

ここで常に'0'であった6bit目を利用する。つまり、境目で101となってしまう場合には前の5bit目'1'と後の2bit目の'1'をとともに'0'とのしたうえ、常に'0'であった前の6bit目を'1'にする。この操作により最小反転間隔1.5bitは確保される。この方式も読み取りクロックの抽出は可能である。

今までに述べた他の方式が、 $T_{\min} = T$ であったのに対し、3PMでは反転間隔は $T_{\min} = 1.5T$ 、続いて、

$2T, 2.5T, \dots, 6T$ となる。いいことづくめのようなのであるが、ここで注意しなくてはならないのはNRZ系の変調方式に比較して判別窓幅が半分の $1/2T$ になっている点である。もっともこの点はPE, MFMでも同様であるから3PMが優れた変調方式である点には変わりはない。

3PM方式を採用することにより、従来MFMが使われていたディスク装置などの記録密度がハードウェアの大幅な変更を行うことなく1.5倍に向上した。直流変動は若干ある。

(7) EFM (Eight to Fourteen Modulation)

3PMの導入がきっかけとなり、その後各方面からさまざまな変調方式の提案が相次いだ。

EFMはソニーとフィリップスによって提案された現行のコンパクトディスク(CD)に使われている変調方式である。まず、データ8bitをチャンネルビットとよばれる14bitに変換する。

変換規則の一部を表4に示す。この変換によりチャンネルビットの'1'と'1'の間には'0'が2つ以上10以下となる。このような条件に適合する組み合わせは全部で267とおりあるが、8bitの変換に必要な数は256である。残り12のうち2つはディスプレイとコントロールの同期用に使用し、直流の累積が多

くなりそうなものなどは使用しない。また3PMにおける6bit目と同じ役割、すなわち境目で101とならないように14bitとは別に3bitのチャンネルビットが14bitのあとに挿入される。この3bitの目的は最小反転間隔の維持の他に変調された信号の直流成分の抑圧にも使われる。直流変動は3PMより少ない。

他に、2M, FM, HDMなど、さまざまな変調方式が提案あるいは使用されているが、いずれも何等かの評価指標の改善をねらったものである。

ところでデジタル伝送・記録においてその無ひずみ伝送を実現するには誤りの検出・訂正は不可欠である。この誤り制御用に付加する冗長ビットを利用して変調の欠点を補う方法もある。

NRZ系の変調は最小反転間隔が比較的長く、判別窓幅も T と広く、この観点からは使いやすい変調方式であるが、最大反転間隔が無限度でクロックの抽出が不可能であるという大きな欠点がある。

しかし、例えば8bitに1bitの奇数パリティ検査ビットを付加すると、パリティ検査が可能となるばかりか最大反転間隔が一挙に $16T$ となり、クロックの抽出も可能になる。8bitに1bitの奇数パリティ検査ビットをもうけたNRZ変調方式を図2に示す。このような変調方式をエンハンスドNRZ方式とよぶことがある。また、特にパリティ検査ビットを付加しなくとも、データと擬似ランダム系列との乗算等を行ってスクランブルすることにより、NRZ系の変調波形の最大反転間隔を実用上十分短くすることも可能で

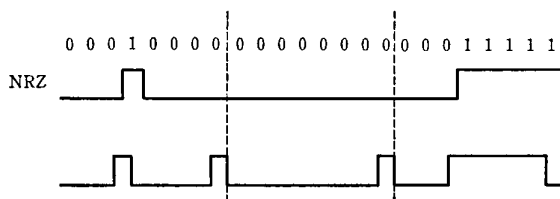


図2 パリティを付加したエンハンスドNRZ変調

ある。

超能力変調方式？

3PM が発表され、その最小反転間隔が $1.5T$ だと聞いたとき、それまでの変調方式が最小反転間隔が T 以下であったので魔法にかけられたように感じた人も多かったと思う。また、一部ではそんな変調方式などあるはずがないと、まゆつばものだといいたげな人もいた。

それではここで一つ取って置きの変調方式を紹介しよう。3PM や EFM どころか図 3 に示すように最

小反転間隔が実に $15T$ 、最大反転間隔は $17T$ になるという見事な変調方式といえる。このように単に最小反転間隔が長く、最大反転間隔が短い変調方式は判別窓幅を狭くしてさえよければいくらかでも考えることができる。変調方式の決定にあたってはあくまでも対象とする伝送系、記録再生系の特性を考慮したうえで、前記の望ましい条件をあてはめていく必要がある。

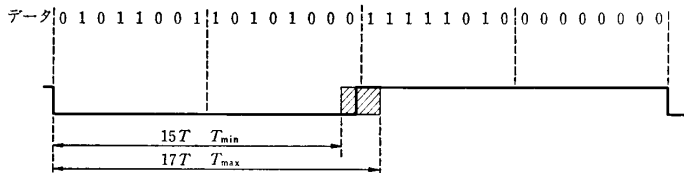


図3 最小反転間隔が長く、最大反転間隔の短い“優れた”符号

小反転間隔が実に $15T$ 、最大反転間隔は $17T$ になるという見事な変調方式が真正銘実現可能なのである。この変調方式は、長いことが望ましい最小反転間隔は $15T$ と長く、短い方が望ましい最大反転間隔は最小反転間隔とほとんどかわらない $17T$ と短く、そのうえ $32T$ 毎に必ず反転しているから読み取り用のクロックの抽出も可能である。この変調方式の変換規則はデータ 32bit を 1 ブロックとしてその間に 1 回だけ反転を設け、その位置を入力データに対応させる変調方式である。0000...00 すなわち 16 進の 00 のとき反転位置をブロック始点から $15T$ に、0000.....01、16 進の 01 のとき $(15 + 1/2^{31})T$ 、16 進 02 のとき $(15 + 1/2^{31})T$

基底帯域変調方式について、それぞれの特徴と、その代表的な例を示した。2 値基底帯域変調方式はすべてここでとり上げる RLLC (Run-Length-Limited-Code) の一種と

RLLC (Run-Length-Limited-Code)

して統一的に扱うことができる。RLLC はとくに和訳されていないが、有限長反転間隔符号とでも訳するのが適当であろうか。

デジタル信号は、正論理・負論理によって、レベルの Low が '0' か、High が '0' かが変わるが、一般に '0' と '1' の連なり (run) によって構成されている。このような 1010001011..... とした '0' と '1' からなるデジタルデータを、NRZ や PE などの変調方式では順にその変調の規則に従い変換する。これに対して 3PM や GCR では被変調データのあるビット数に区切り、その区切ったブロックに対して、それぞれの変換規則に従い変調する。

いま、デジタル原データが与えられたとき、これを Mbit ずつ区切り、Mbit を 1 ブロックとするデータを作り、このデータに対応する N ビット ($M \leq N$) の NRZI 変調を変調出力とする。このとき、その符号語の '1' と '1' の値には、最小 K 個、最大 L 個の '0' を含むものとする。また、隣接した符号語においてこの条件を満たさない場合には補正用ビットを必要に応じて設けたその数を A 個とする。例えば 3PM では $A=1$ である。

これをまとめると、
 M : 原デジタルデータの切り出しビット数
 N : 符号語の長さ
 K : 符号語の '1' と '1' の間にはさむ '0' の数の最小数
 L : 符号語の '1' と '1' の間にはさむ '0' の数の最大数
 A : 隣接符号語間で上の 2 条件を満足させるための補正用の桁数

これをまとめると、
 M : 原デジタルデータの切り出しビット数
 N : 符号語の長さ
 K : 符号語の '1' と '1' の間にはさむ '0' の数の最小数
 L : 符号語の '1' と '1' の間にはさむ '0' の数の最大数
 A : 隣接符号語間で上の 2 条件を満足させるための補正用の桁数

これらのパラメータを使って前記の変調方式を表すと次のようになる。

NRZ () : (K , N , K , L , A)
= (1 , 1 , 0 , , 0)

PE : (K , N , K , L , A)
= (1 , 2 , 0 , 1 , 0)

MFM : (K , N , K , L , A)
= (1 , 2 , 1 , 3 , 0)

GCR : (K , N , K , L , A)
= (4 , 5 , 0 , 2 , 0)

3PM : (K , N , K , L , A)
= (3 , 6 , 2 , 5 , 1)

EFM : (M , N , K , L , A)
= (8 , 17 , 2 , 10 , 3)

このように NRZ や PE など
も、ブロック長を 1bit と考えれば、RLLC の 1 つとみなすことができる。すなわち前述の変調方式は、みな RLLC の一種であることがわかる。前述の“超能力変調方式”は (M , N , K , L , A) = (32 , 2 , 2 , 2 , 0) と書ける。

次に RLLC の各パラメータを先の望ましい条件と対応させて考えてみよう。K は最小反転間隔に対応するので大きい方が、L は最大反転間隔に対応するので小さい方が望ましい。判別窓幅は、 $T_w = \frac{M}{N}$ となり、当然大きい方が望ましい。

音響機器に使われている変調方式

(1) PCM プロセッサ

図 4 に日本電子機械工業会の技術ファイルに基づく家庭用 VTR を対象とした PCM エンコーダ・デコーダ、いわゆる EIAJ 方式 PCM

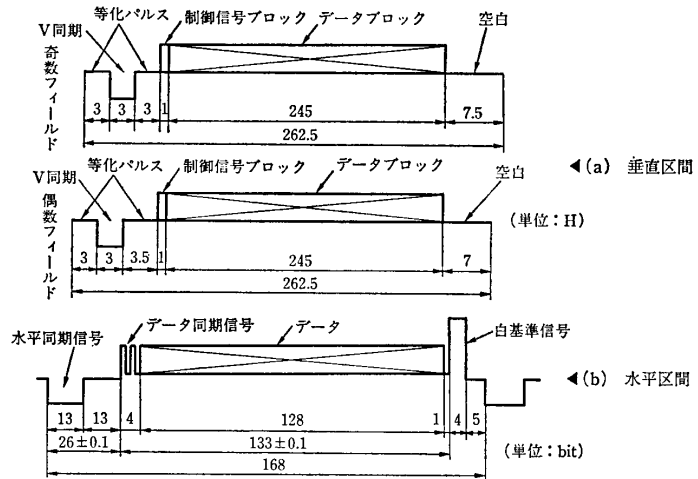


図 5 EIAJ 方式 PCM プロセッサの変調波形

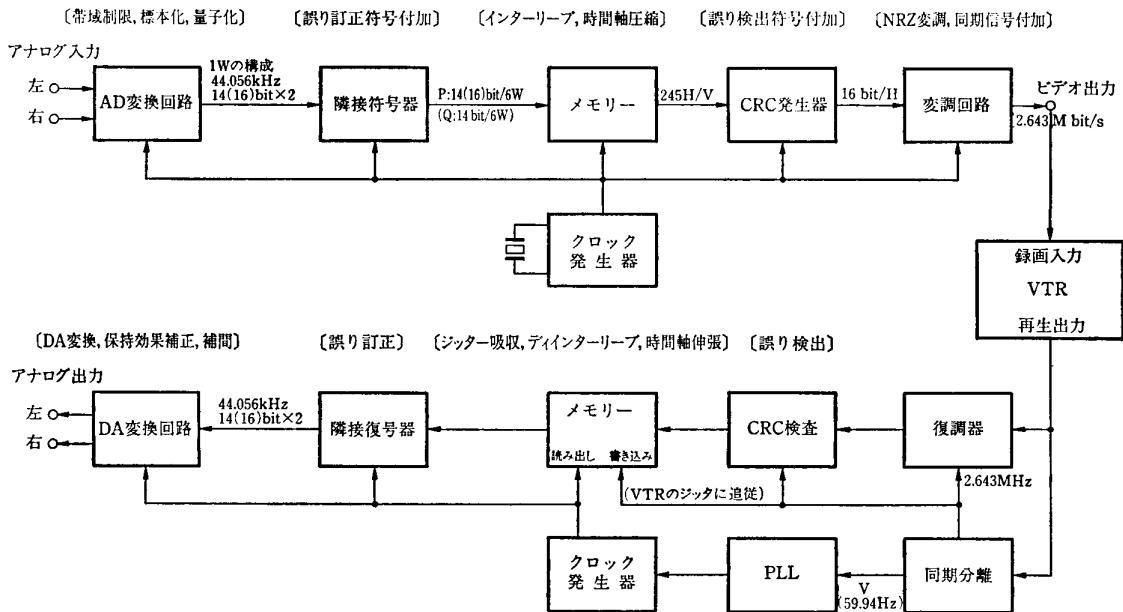


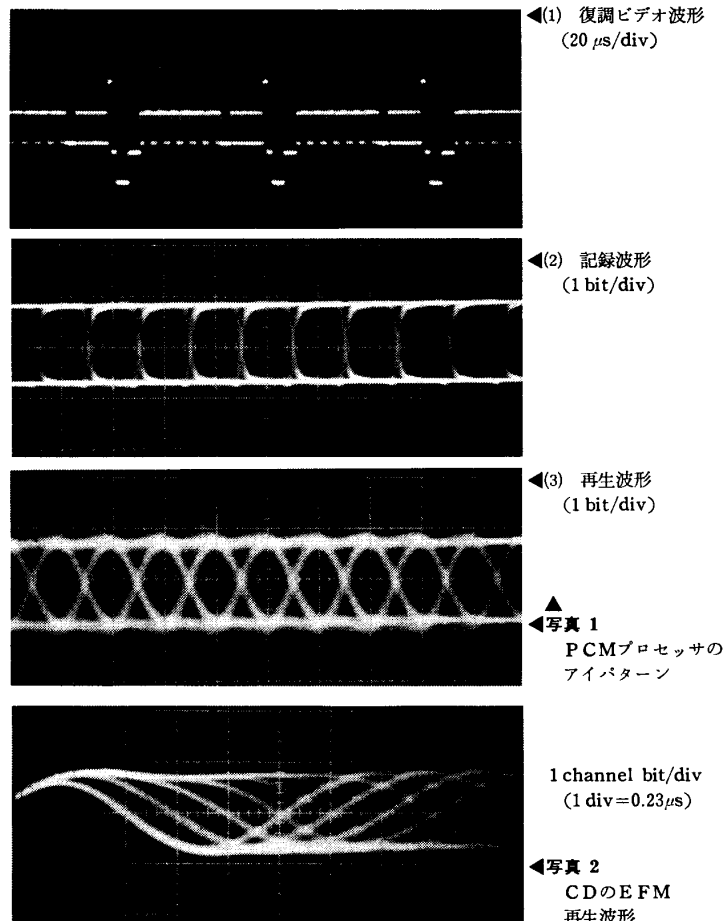
図 4 EIAJ PCM方式プロセッサの構成と各部の動作

プロセッサの構成を示す。AD変換された信号は誤り検出・訂正符号を付加したうえ、テープの連続したバースト誤りの影響を分散させる目的でデータの順序に入れ替える操作（インターリーブ）を施し、水平・垂直同期部分を避けてNTSCのビデオ信号に準拠した波形に変調する。

図5に変調波形を示す。データは‘0’を黒、‘1’を灰色に対応させたNRZ変調で1水平区間に128bitおさめ、ビデオ信号としての同期レベル、ペダスタルレベル、白レベルを加えて全部で5値の変調となる。ビデオテープへの記録はVTRで周波数変移が3.5～7MHzのFM変調で行われる。なお、データを黒と白でなく、黒と灰色に対応させているのはレベル変化が少ない方がVTRの記録、再生特性のスループットの制約を受けにくく、結果的に良好なアイパターン（後述）が得られるからである。

再生されたビデオ波形にはジッターが含まれているので、これに追従したクロックでデータを読み取り、バッファメモリに書き込む。これをPLLあるいは水晶で作った変動のないクロックで読み出しジッターを吸収すると同時にディインターリーブを施し、誤りの検出、訂正を行い、DA変換してアナログ信号に復元する。

ところでPCMプロセッサに使われているNRZ方式は前述のように読み取りクロックの抽出は不可能である。にもかかわらず採用されているのはビデオ波形にはテレビジョンの同期用として格好の同期パルスが用意されているからである。写真



1に水平同期に同期させて観測した再生ビデオ波形を示す。この波形を一般にアイパターンとよび、記録・再生特性や伝送特性の評価に使う。アイパターンとは文字どおり目のことで、目の開きが大きいほど‘0’‘1’の判定が楽なことで、すなわち余裕があることを示している。

(2) コンパクトディスク

図6にコンパクトディスク・システムの構成と各部の動作を示す。全体の流れはPCMプロセッサと大差ないが、記録媒体および変調方式は大きく異なっている。ビデオ波形

にはもともと同期信号が規定されているので、もっとも単純でしかも判別窓幅の広いNRZを採用したが、コンパクトディスクでは読み取りクロックおよび信号の同期が可能な変調方式としなくてはならない。そこで導入されたのが、信号をフレームで分割したEFMである。

図7に1フレームの変調過程を示す。1フレームは44.1kHzで標準化された16bitの左右の信号それぞれ6組192bitからなる。したがって、1フレームの周波数は7.35kHzとなる。まず誤り訂正用に32

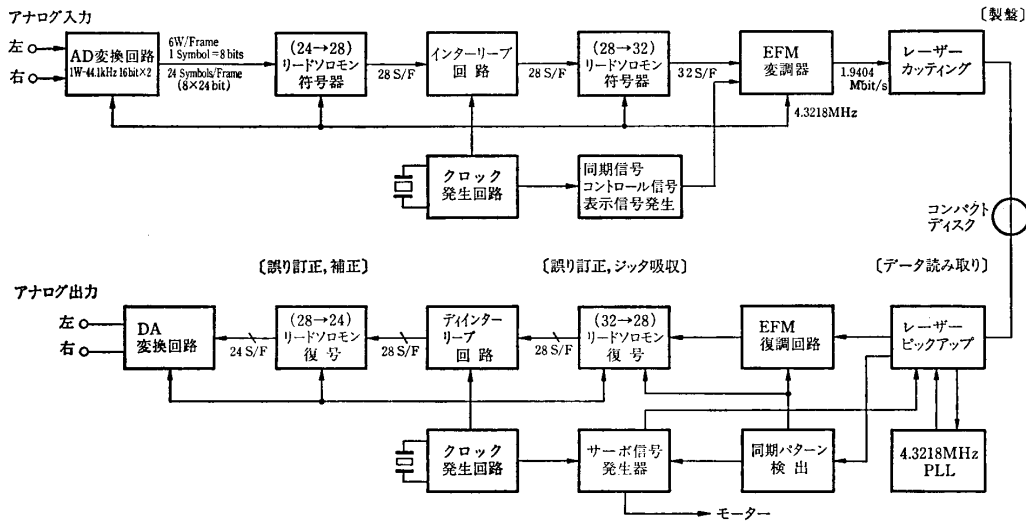


図6 コンパクトディスク・システムの構成と各部の動作

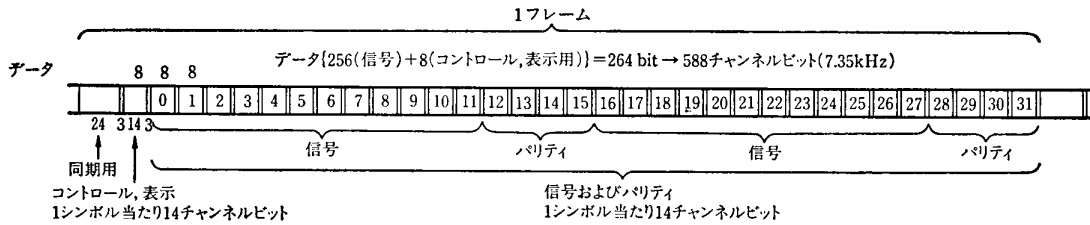


図7 フレーム構成

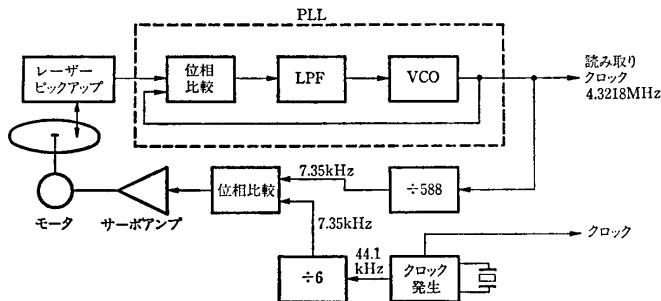


図8 コンパクトディスクのクロックの構成

bit のリードソロモン符号を生成して付加し、インターリーブした後、さらに 32bit のリードソロモン符号を付加した 1 フレーム分の 256 bit を EFM 変調する。ところで変

調されたチャンネルビットは 544 bit である。この 544bit にフレーム同期用の 27bit と制御およびコントロール用の 17bit を加えた 588bit が 1 フレームのチャンネル

ビットの総数となる。ディスク再生時にはこれと逆の流れとなる。

図 8 に読み取り部のクロックの構成を示す。

EFM の採用で読み取りクロックは読み取った波形の反転に同期した 4.3218MHz の PLL を構成し読み取りクロックとする。これを 588 分周した 7.35kHz と水晶発振器から作った 7.35kHz を位相および周波数比較することにより回転系のサーボを行う。

写真 2 に CD プレーヤで読み取った再生波形のアイパターンと PLL で作った読み取り用クロックを示す。