

音響におけるデジタル技術入門

山崎 芳 男

1. 音響機器へのデジタル技術の導入

2回にわたりデジタル技術の基礎、音響測定へのデジタル技術の導入について述べてきたが、今回は最終回として音響機器へのデジタル技術の導入ということで、その現状と可能性について考えてみよう。

図1に現在広く使われているプログラムソースであるディスクレコードの收音から再生までの大まかのブロック図を示す。このうち実際にデジタル技術が信号系へ導入されているのは日本コロムビアによるマスターテープレコーダのPCM化と、調整卓の付加機能としての遅延装置程度である。

最近数社より発表されたビデオデヤスクを利用した音楽用の“PCMディスク”は従来のレコード盤そのものへのデジタル技術の導入を試みたものであるといえよう。

また、本格的にデジタルで構成した調整卓の試作も報告されている。

一方、ディスクレコードと並んで大きな位置を占めるプログラムソースである放送についても、英国のBBCでは“PCMリソク”と称する局間中継のほか中継車とキーステーションの中継もデジタル信号で行っている。占有帯域等問題はあるが技術的にはPCMによる一般放送も可能である。

さらにマイクロホン、アンプ、スピーカ等のデジタル化も各方面で検討されている。音響機器へデジタル化にあたって重要なことは、どの部分をデジタル化するかではなく、どの範囲をデジタル化するかという点である。すなわちA/D、D/A変換を繰り返す度に信号

が劣化するのでデジタル化した信号は最後にアナログに戻す。つまりA/D、D/A変換は原則として一度ずつに留めるべきである。以下個々の音響機器の各種機能のデジタル化について考えてみよう。

2. 調整卓

調整卓に要求されるいくつかの機能のデジタル化についてふれるが⁽¹⁾、これらは何も調整卓に限定されるものではなく音響信号のデジタル処理に広く導入可能である。

2.1 ミキシング

デジタル演算において N ビット同志をオーバーフローなしに加算するには $N+1$ ビットが必要である。ところで第1回1.2でふれたようにデジタル伝送系のダイナミックレンジは量子化ビット数で決まる。いまコンピュータとのインターフェースも考え1チャンネル16ビッ

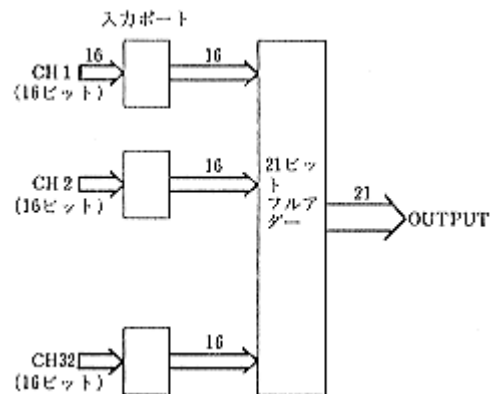


図2 32チャンネル(16ビット/チャンネル)ミキシング装置のブロック図

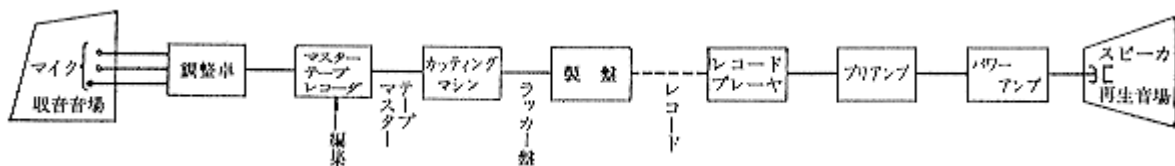


図1 地酸レコードの集音から再生までのブロック図

山崎芳男：早稲田大学理工学部

ト（正弦波に対し 97.8dB ダイナミックレンジ）とする
と、32 系統の信号のミキシングをオーバーフローなしに
行うには $2^5 = 32$ だから、ミキシング後のビット数は 16
 $+ 5 = 21$ 必要となる（図 2）。

ところでミキシングを行う際、各チャンネルの標準化
周波数と転送タイミングは一致している必要があるので、
各入力ポートは信号（16）と 1～2 のハンドシェー
クラインで構成される（図 3）。

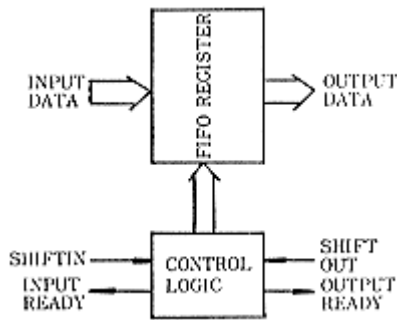


図 3
入力ポ
ートの構成

2.2 ボリュームコントロール（フェーダー）

各系統毎や全体のレベル調整のための機能である。図
4 はデジタル信号のビットを上位および下位方向へず
らした（シフトした）ときのレベルを dB で表示したも
のである。1 ビットシフトすると 6dB の変化が得られ
る。6dB ステップで構わなければこのままでよいが、
より細かいレベル調整やフェードイン、アウトには、シ
フトした信号同志の演算（加、減等）を行うか、係数との
デジタル乗算を行えばよい。

例えば原信号（0dB）から 4 ビット下位方向へシフト
した信号（- 24dB）を減ずれば原信号に対し -0.56dB
のレベルの信号が得られる。表 1 は原信号と加、減等
で得られるレベルをシフト数に応じて示したものである。
これらの組み合わせにより任意のレベルを得られ、さら
にこれを時間的に制御することにより任意のステップに
よる任意の速度でのフェードイン、アウトの機能の実現
が可能である。

2.3 遅延装置

遅延装置（ディレイマシン）
は最も早くデジタル化され
た機器で、独立した装置として
すでに数多くのものが市販
されている。これは従来のテ
ープ式遅延装置に比較して、
デジタルでは音質劣化がなく
しかも可動部分のない、保
守性に優れ、信頼性の高い装
置が容易に得られるからであ

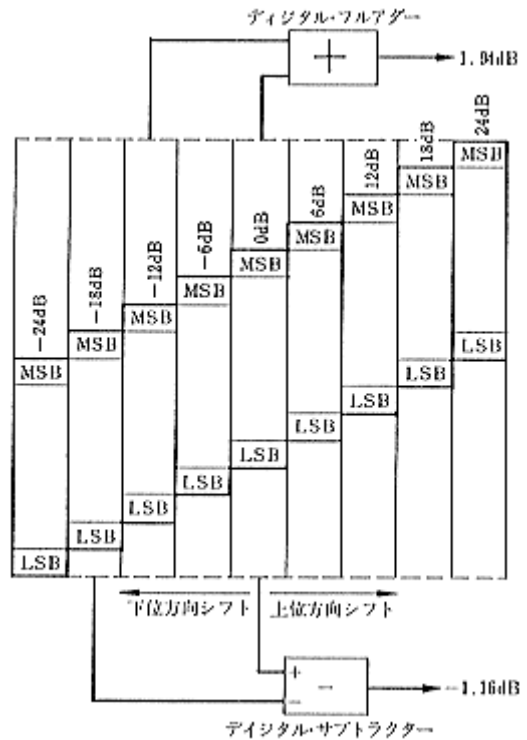


図 4 ビットシフトおよびデジタル
加減算器によるレベル変化

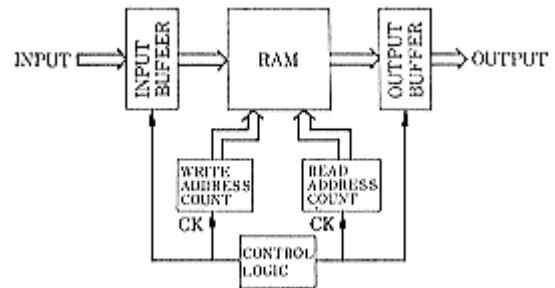


図 5 RAM（Random Access Memory）を使った
デジタル遅延装置のブロック図

表 1 各種の変調方式の比較

変調方式	磁化の反転間隔（ビットセル）									伝送密度 ビット密度	パルス幅比 （最大/最小）	直流成分	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
NRZI	████████████████████									1	∞	有	800 BPI MT
S-NRZI	██████████████████									1.125	8	有	BELL & HOWELL VR-DICII
GCR	██████									1.25	3	有	6250 BPI MT
PE	██									2	2	無	1600 BPI MT
MFM	███									1	2	有	IBM 3330 DISC
ZM	███									1	2	無	IBM 3450 MASS STORAGE
3PM*	██████████									0.667	4	有	Uni vac 8434 DISC

* 3 Position Modulation

ろう(図5)

標準化周波数を50kHzとすると、 n 段のシフトレジスタにより $20n(\mu s)$ の遅延が得られる。すなわち1,000段で20msである。すでに1チップ(16ピン)で16kビットのRAMが入手できるので秒の単位の遅延も容易である。

2.4 フィルタ, イコライザ(デジタルフィルタ)

アナログフィルタによるフィルタ, イコライザの機能のデジタル化である。前回も述べたようにデジタル信号処理は時間, 振幅とも離散的な処理であり, 特にフィルタは多くの点でアナログとは概念を異にしている。デジタルフィルタの特長は,

- (1) 演算により動作が定まるので, アナログフィルタで問題となるドリフト, 素子偏差, 経年変化等により生ずる誤差がない。
- (2) 演算精度を上げることにより, 原理的にはいくらでもフィルタ精度が高くなるので, 超低周波や, Q の高い複雑なフィルタの実現も可能である。
- (3) 使用する素子の演算速度が速ければ, 素子を時分割使用することが可能となり少ないハードウェア負担でフィルタを構成できる。

等である⁽²⁾。反面, アナログでは極く簡単に実現できる特性を構成するのに複雑な演算が必要な場合もある。

図6にハードウェアによるデジタルフィルタの一般的構成を示す⁽¹⁾。詳しいことにはふれないが, このフィルタの伝達関数 $H(z)$ は,

$$H(z) = a_0 \cdot \frac{1 + \sum_{j=1}^M a_j z^{-j}}{1 + \sum_{j=1}^N b_j z^{-j}} \dots\dots\dots (1)$$

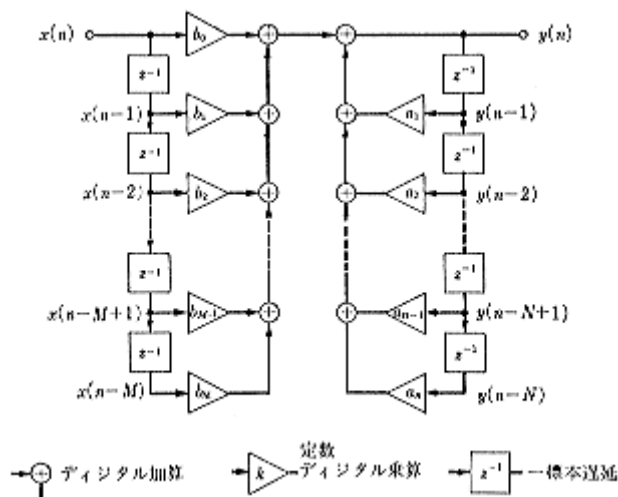


図6 デジタルフィルタの一般的構成

となる。ここで z^{-i} は段の遅延を意味する。(1) 式の a_j, b_j の定め方によって, 低域戸波, 高域戸波, 帯域戸波, 帯域阻止等のフィルタ, 特殊な場合として発振器をも構成することができる。

(1) 式で全ての $b_j = 0$ の場合, 帰還がなくなるので非巡回形フィルタ, 少なくとも一つの b_j が0でなければ巡回形フィルタとよぶ。一般に非巡回形フィルタは急峻な遮断特性は特にくいだが, 一定の遅延を持つだけの直線位相特性を実現しやすい。逆に巡回形では急峻なフィルタが低い次数で実現できるが位相特性は乱れがちである。

2.5 演算素子と制御素子

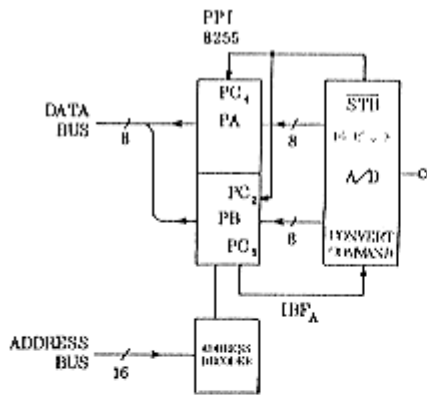
以上述べたような各種のデジタル処理を行う方法としては専用ハードウェアによる方法, ソフトウェアによる方法, 両者を併用する方法がある。広帯域の音響信号のリアルタイム(実時間)処理をソフトウェアだけで行うのは現段階ではむずかしい。従ってTTL等の高速演算素子を用いてディスクリートに構成するか, ミニコン, あるいは高速マイクロプロセッサと専用の演算用素子を組み合わせる。特に最近の乗除等や浮動小数点の演算素子の処理速度と分解絶の向上には目ざましいものがある。16ビット×16ビットの乗算が100ns以下で行える素子もあるので相当複雑なデジタルフィルタが少ない素子数で実現可能である。

一方, 最近では8ビットマイクロプロセッサですらプログラム制御のもとで16ビットの音響信号のとり込みが可能である。図7に一般的な8ビットマイクロプロセッサ, インテル 8080A系, モトローラ 6800系, ザイログ Z80系の各プロセッサについての16ビットAD変換器からメモリーへのデータの取入れプログラムおよび処理時間を示す。さらに16kバイト×4ページの大容量メモリーへの伝送を行う場合についての処理も併記してある。なお8080Aについてはクロック周波数が標準の2倍の4MHz, 6800についても倍の2MHz, Z80については1.6倍の4MHzの高速形も発表されているので, 高速形の素子を用いればその分だけ処理速度を向上させることが可能である。

3. 記録部(PCMレコーダ, PCMディスク)

音響信号の伝送系において, ダイナミックレンジ, 直線性, 変調雑音, 転写, 経年変化等々の理由によりトプレコーダが隘路になっていることは良く知られている。このテープレコーダのもつ記憶という機能のデジタル化について考えてみよう。

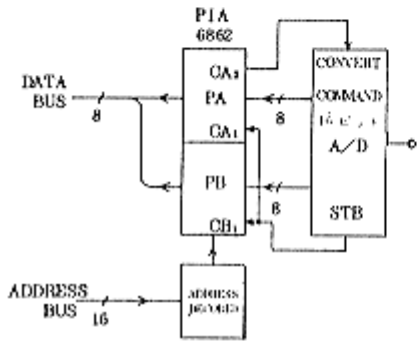
デジタル信号の記憶にはコンピュータでは半導体, 磁気コア等の主記憶装置と大容量の記憶用に磁気ディス



注: I/Oポート(8255)はメモリーマップドにする

(a) FOR 8080A CPU

ラベル	ニーモニック	オペランド	命令実行 クロック数
LOOP	LDAX B	PA	7
	MOV,M,A		7
	INX,H		5
	LDAX D	PB	7
	MOV,M,A		7
	INX,H		5
JMP	LOOP		+10
クロック 2 MHz で 24 μ s			
4000~7FFFに16kバイト4ページのページングメモリーを使う場合の追加命令			
	MOV,A,H		5
	ORI 40		7
	ANI 7F		7
	MOV,H,A		+5
			24
合計 36 μ s			

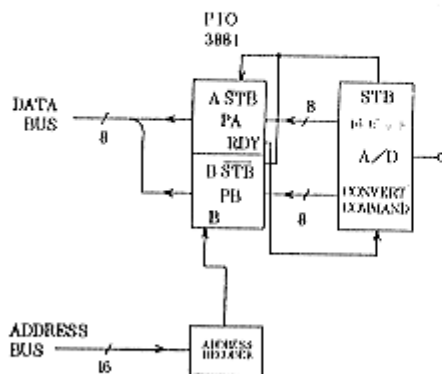


注: 6800ではダイレクト・アドレッシングが使えるのでI/Oポート(6862)はベースページに置く

例 PA = 0000
PB = 0001

(b) 6800 MPU

ラベル	ニーモニック	オペランド	アドレッシング	命令実行 サイクル数
LOOP	LDAA PB		DIRECT	2
	STAA 00		INDEX	6
	INX			4
	LDAA PA		DIRECT	2
	STAA 00		INDEX	6
	INX			4
JMP	LOOP	EXTEND		+3
クロック 1 MHz で 27 μ s				
4000~7FFFに16kバイト4ページのページングメモリーを使う場合の追加命令				
	STX SIX		DIRECT	4
	LDAA SIX		DIRECT	2
	ORAA 40		IMM	2
	ANDA 7F		IMM	2
	STAA SIX		DIRECT	4
	LDX SIX		DIRECT	+5
				19
SIX インデックスレジスタ 退避のメモリー番地(ベースページ)				
合計 46 μ s				



ブロック図

ラベル	ニーモニック	オペランド	命令実行 クロック数
LOOP	LD C,D4	PA	7
	INI		16
	LD C,D2	PB	7
	INI		16
JP	LOOP		+10
クロック 2.5 MHz で 22.4 μ s			
4000~7FFFに16kバイト4ページのページングメモリーを使う場合の追加命令			
	LD A,H		4
	OR A,D		4
	AND A,E		4
	LD H,A		+4
			16
合計 28.8 μ s			

D: 4 ϕ
F: 7 F
INI: (HL)+(C)
B ← B-1
HL ← HL+1

(c) FOR Z80 (3880) CPU

2バイト1データとしてメモリーへストアするプログラムのLOOP部分

図7 A/D変換機とマイクロプロセッサのインターフェース

ク、磁気テープ等が用いられる。アクセスや信頼性の点では可動部分のない半導体、コア、バブルメモリ等があるかに有利であるが、半導体等のメモリの集積度がかなり向上した現在でも、長持問の音響信号の記録は磁気ディスク、テープに頼らざるを得ない。

アナログ信号をAD変換して電子計算機に直接入力したり、外部記憶装置である磁気ディスクや磁気テープ装置に記録するデータ収集装置はかなり以前から特に音声信号の研究に使われていた。純粋に広帯域音響信号の記録をデジタル化した専用のテープレコーダ、いわゆるPCMレコーダは1969年工業用VTRを使用したものがNHK技術研究所で試作され、1970年には日本コロムビ

アがNHKの2チャンネルPCMレコーダを使ってレコードを発売、さらにコロムビアでは1972年に放送用ローバンドVTRを利用した8チャンネルのマスターレコーダを開発、以後互換性のあるポータブル機により海外録音等も行われている。一方、一般家庭の再生用として昨年オーディオ・フェアでソニーから家庭用VTRを利用したPCMアダプタ、三菱からインチテープによる固定ヘッドPCMレコーダが発表され、今年各社からVTRを利用したものや固定ヘッド形等数多くのレコーダが発表されている。

さらに最近ではビデオディスクの技術を応用した再生専用のいわゆる“PCMディスク”の発表が数社から

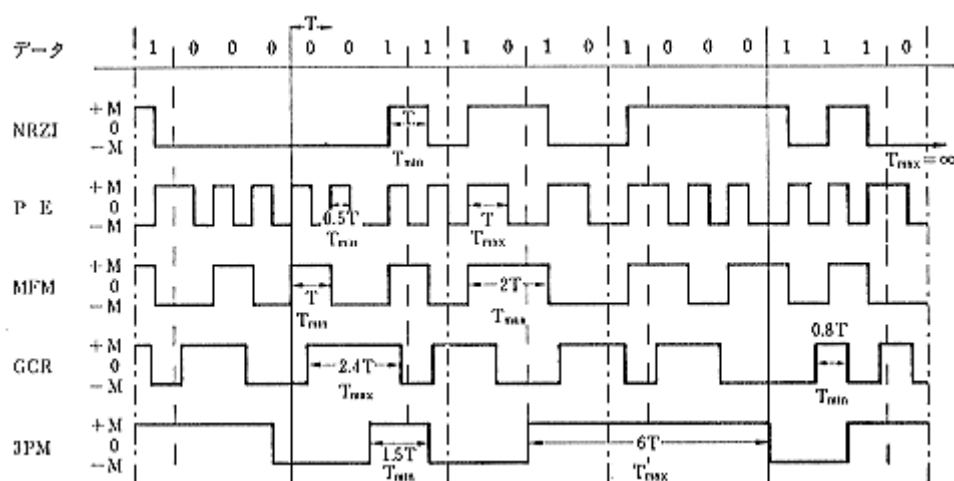


図8 NRZI (Non-Return-to-Zero Inverted), PE (Phase Encoding), MFM (Modified Frequency Modulation) 3PM (3Position Modulation)の書き込み波形と符号化規則

1グループ(4ビット)のデータ	変換された5ビットの値
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 0 0 1 1
0 1 0 0	1 1 1 0 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

変換された5ビットをNRZIの形式で記録する

(c) GCRの符号化規則

1グループ(3ビット)のデータ	反転位置 P ₅ P ₇ P ₃ P ₄ P ₆ P ₈
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

(c) 3PMの符号化規則

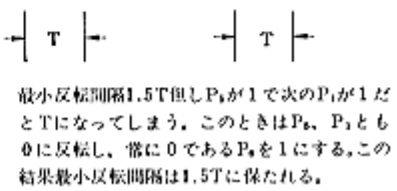


表2 ビットシフトおよびシフトした信号との加減算により得られる減衰量

シフト数	シフトによる レベル変化(dB)	シフト(下位方向)したデータとの 加減算によるレベル変化(dB)	
		加算	減算
0	0	6.02060	-∞
1	-6.02060	3.52183	-6.02060
2	-12.04120	1.93820	-2.49877
3	-18.06180	1.02305	-1.15984
4	-24.08240	0.52658	-0.56057
5	-30.10300	0.26728	-0.27577
6	-36.12360	0.13467	-0.13679
8	-42.14420	0.06759	-0.06812
8	-48.16480	0.03386	-0.03400
9	-54.18540	0.01695	-0.01698
10	-60.20600	0.00848	-0.00849

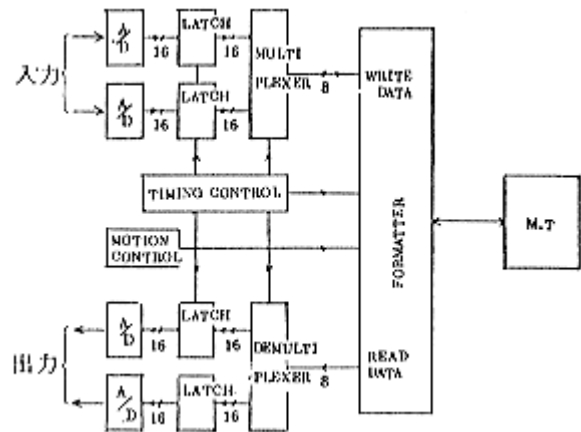
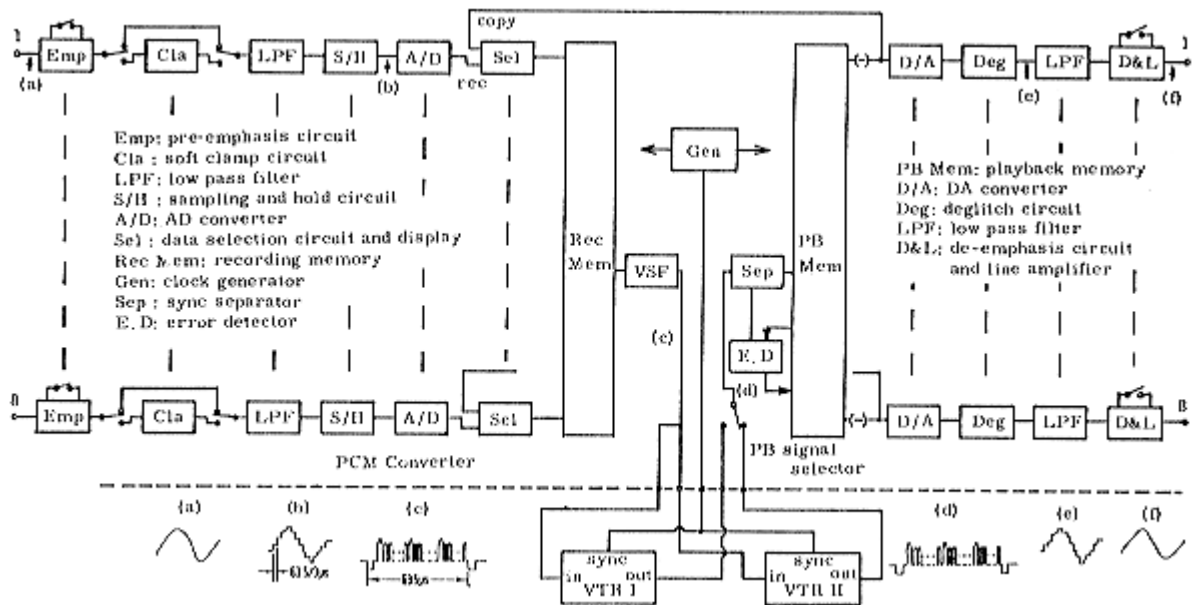
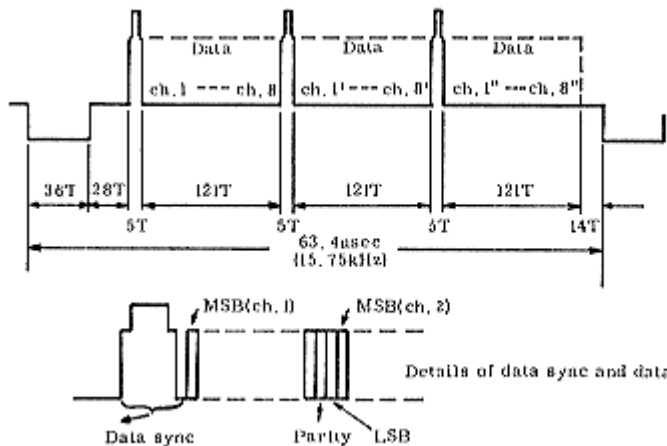


図9 1600 BPI MTを用いた2チャンネルデジタル記録装置



(a) ブロックダイアグラム



(b) 伝送波形

図10 日本コロムビア DN-034R型 PCMレコーダのブロック図および伝送波形 (日本コロムビア技術資料より転載)

相次いで行われた。PCMレコーダがテープレコーダをデジタル化したものであるのに対し、PCMディスクは文字どおりディスクレコードのデジタル化である。VTRを利用したPCMレコーダがそうであったのと同様にPCMディスクでは、ビデオディスクでつちかわれた広帯域のビデオ信号記録のノウハウを音響信号に利用したものである。ディスクレコード同様プレスによる大量複製が可能であるため、近い将来高忠実度プログラムソースとして定着する可能性も大きい。ただここで問題となるのは一つは第1回にも述べたように情報論的には100チャンネル以上の容量をもつ媒体をどう利用するかの問題、もう一つは半導体メモリや磁気バブル等の可動部分のないメモリ素子の急速な発展に伴いこれら素子による“固体レコード”の実現前に前述の規格統一を行った上、ソフトおよびハードウェアの供給体制が整うか否かである。

表2は各種のデジタル記録の変調方式を比較したものである。変調方式の選択にあたっては最小反転間隔が長く、変調効率が高く、できれば直流およびナイキスト周波数にスペクトル分布のないことが望ましい。最終的には、使用する記録、再生系で誤り率を最小にする方式を選択すべきである。

磁気テープやビデオディスクのような記録媒体ではドロップアウトやキズによる符号誤りが $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度発生する。誤りの検出・訂正は高品質再生には不可欠である。誤りの検出・訂正は一般に信号の他に検出・訂正の符号(冗長ビット)を付加して行う。最も簡単な誤

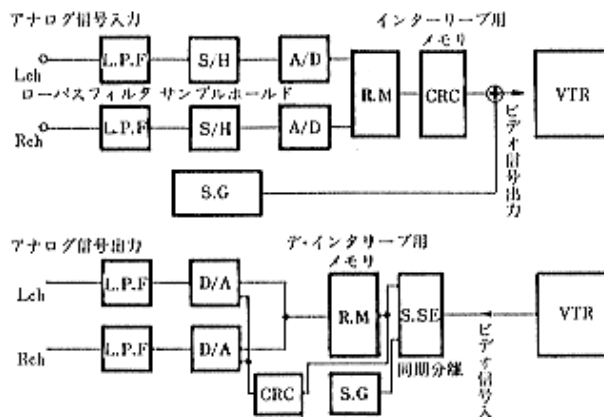


図11 ソニーPCMオーディオユニットのブロックダイアグラム

り検出は良く知られたパリティチェックがある。これはあるブロックの情報中の“0”または“1”の数が偶(奇)数になるように1ビットの冗長ビットを付加する方法である。パリティチェックにより1ビット誤りはすべて検出されるが、偶数ビットの誤りは検出できない。見かたを変えるとパリティチェックでは単に情報ブロックを2で割り余りをチェックビットに用いたが、これを少し複雑な数(2進では多項式)で割った余りを冗長ビットとするのが計算機のMTや最近のPCMレコーダに使われているCRC(Cyclic Redundancy Check)で誤りの検出もれは多項式の次数を N とすると $\frac{1}{2}^N$ となり、大幅に検出能力が増加する。誤りの検出は比較的容易であるが、一方誤りの訂正符

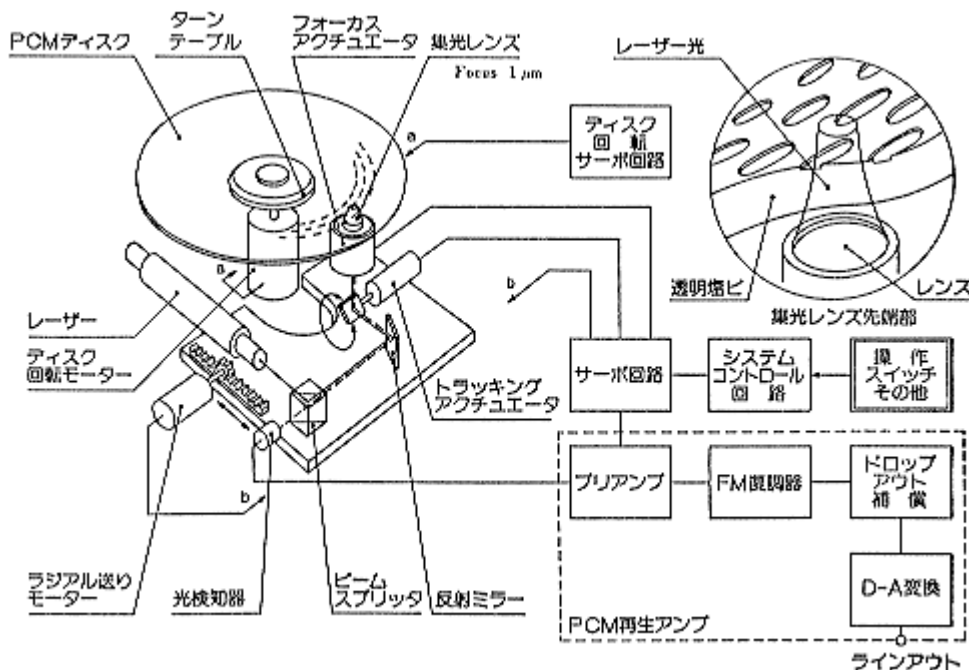


図12 三菱電機・ティアック・東京電化によるPCMレーザーサウンドディスクプレーヤの構成(発表会広報より転載)

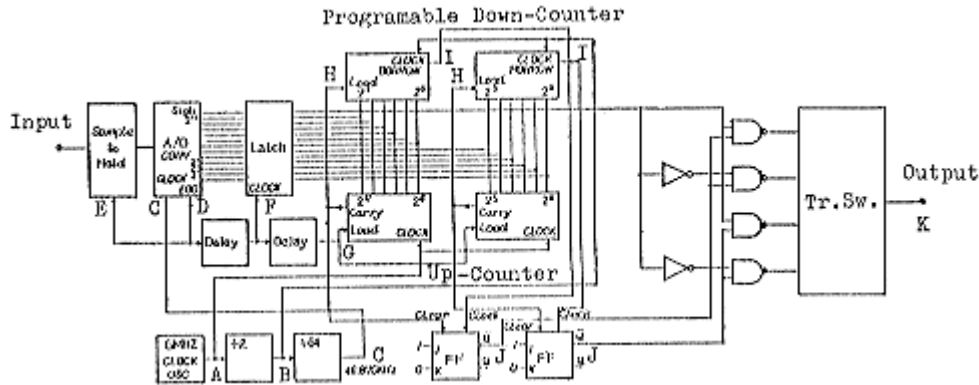


図 13
13ビットPCM-
PWM電力増幅器
のブロック図

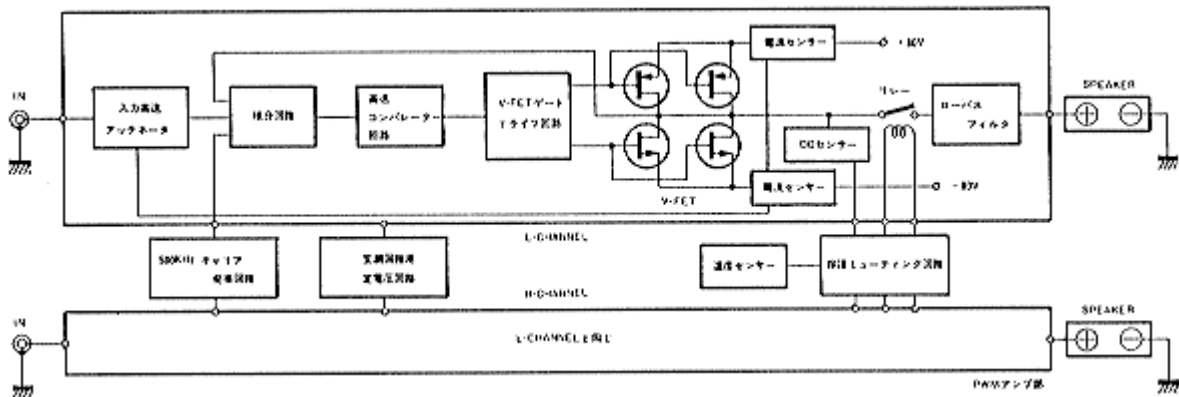


図 14 ソニー TA-N88PDM パワーアンプの構成 (発表会技術開設資料より)

号はひとすじなわではいかず、いくつか提案されているが、かなり複雑な符号生成と多くの(情報の倍程度)冗長ビットを要する。

いずれにしても、何度複製しても音質劣化がないPCMレコーダ本来の特長を生かす研究、業務用レコーダには誤りの非常に少ない記録媒体を用いて簡単な検出を行うか、高度の誤り訂正符号を用いる必要がある。一方、再生専用のPCMディスクでは簡単な検出と平均値補間、前値ホールド等の誤り補正で聴感上十分といえよう。

一方変調波の再生波形のエンベロープや、MFMの規則制等からもドロップアウトや誤りを検出することが可能であり、CRC等による検出と良く一致するので、これらの信号が使える場合には、符号による誤りの検出・訂正と組み合わせることにより、効率を上げることができる⁽³⁾。

図8に計算機で使われる800 BPI(ビット/インチ)のNRZI, 1600 BPIのPE(Phase Encoding), 6250 BPIのGCR(Groop Coded Recording)の記録形式を示す。1600 BPIでは1 m/sで1チャンネル, 6250 BPIでは38 cm/sでステレオの記録も可能である。

図9に1600 BPIの可搬形MT装置で構成したPC

Mレコーダのブロック図を示す。

図10に日本コロムビアのPCMレコーダDN-043Rのブロック図, 図11にソニーのPCMオーディオユニットPCM-1, 図21に三菱・ティアック・東京電化によるPCMレーザーサウンドディスクのシステム構成を示す。

4. 増幅器

デジタル段でのレベルの増減は2.2の手法で可能である。ここではD/A変換器とアナログ電力増幅器を使わずデジタル信号で直接スピーカを駆動するPCM-PWM電力増幅器の構成およびタイミングを図13に示す⁽⁴⁾。電源用スイッチングレギュレータと同様の考え方で13ビットのデジタル化された音響信号を符号と $2^0 \sim 2^5, 2^6 \sim 2^{11}$ に分け、トランジスタスイッチにより電源をスイッチングして1:64の電圧比をもつ二つの標準化周波数のPWM波を作り、ローパスフィルタを介してスピーカを駆動するものである。これはあくまでもPCM信号をアナログに戻すことなくモニターする目的で構成したものであるが、最近、電源利用効率の高さに注目して小型軽量化を図ったアナログ入力の独立したPWMアンプの製品化の例も見られる(図14)。

5. む す び

以上、音響機器それも信号系へのデジタル技術の導入について述べたが、導入にあたっては冒頭にもふれたようにデジタル化をまずどこから行うか、そしてそれをどこまで広げるかを十分検討する必要がある。くどいようであるが、断片的に思いつくところのみ、あるいは標本化周波数や量子化特性の異なる既製の機器を組み合わせA/D, D/Aを繰り返したのではデジタル化の特長は生かされないばかりか、弊害を生みかねない。全システムとしての最適設計がなされて、はじめてデジタルのもつ特長である安定した正確な処理が達成しうるも

のである。

【参考文献】

- (1) 山崎・伊藤：「広帯域音信号のPCM伝道について」電子通信学会，電気音響研究会資料，EA74 - 23，1974年10月。
- (2) 金子・友沢・丹羽：「デジタルフィルタ」日本音響学会，第15回技術講習会資料，昭和52年9月，p.89。
- (3) 山崎・伊藤：「PCM - PWM電力増幅器」日本音響学会講演論文集，昭和50年5月，p.357。