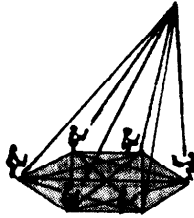


解説

通信網の変革と情報処理

デジタル技術†

高崎 喜孝††



1. 緒言

通信網は従来のアナログ系を主体としたものから、デジタル系へと移行してきている。さらに将来は、現在デジタル化がおこなわれている画像信号をも含めて全デジタル網 (Integrated Service Digital Network) が形成されると考えられている。

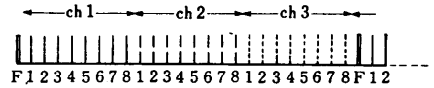
これはデジタル信号が高い伝送品質を提供でき、装置の LSI 化に適しているばかりでなく、網構成に対してもフレキシビリティが大きいのである。また、将来の伝送媒体である光ファイバ・衛星回線等にも適している。

本稿ではまず通信網デジタル化推進のパイプ役であるデジタル伝送技術について述べ、次に網の各ノードに配置されるデジタル交換技術に触れる。最後に情報源の変換のためのデジタル信号処理技術に言及する。

2. デジタル伝送技術

2.1 多重化ハイアラーキと網同期

伝送路使用効率向上のために信号の多重化が行われる。多重化の方法としては、図-1 に示したように、スロット多重とビット多重とがある。前者は、第1段階の多重化、すなわち、多重化されていない信号同志を多重化する場合に行われる。多重化された信号をさらに多重化するには後者の方法がとられる。一般に、多重度を上げる場合、多重化を段階的に重ねて行く方式がとられる。その多重化階梯 (ハイアラーキ) は、図-2 に示したように国によって異なっている。同図において、ビットレートの倍率が、多重度を若干上まわっていることがわかる。これは、非同期の信号同志を多重化するため

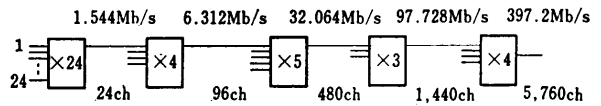


(a) スロット多重化

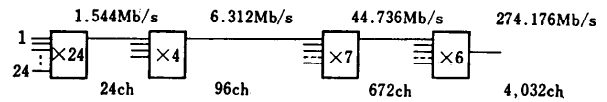


(b) ビット多重化

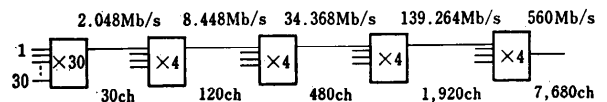
図-1 多重化方式



(a) 日本のハイアラーキ



(b) 米国、カナダのハイアラーキ



(c) 欧州のハイアラーキ

図-2 多重化ハイアラーキの例

に使用される冗長度を含んでいるためである。通常スタッフ同期の技術が用いられる。以下電話音声 (64 kb/s) を 24 ch 多重化する場合を例にとって説明する。多重化すべき各チャンネルのビットレートは公称 64kb/s であるが、実際には非同期で 10⁻⁵ 程度の範囲でずれている。これを 64+1/3 kb/s の同期したパルス列に直した後多重化する。1/3 kb/s が同期化のための冗長分である。これはスタッフパルスとデータチャンネルに割られる。前者はビットレート調整用に入挿されるダミーパルスである。後者は挿入位置を表示す

† Digital Technology by Yoshitaka TAKASAKI (Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所中央研究所第5部

るデータで、受信側でこれを用いてスタフパルス
を除去することが出来る。

通信網の各点において同期したクロックパルス
を得る方法として、従属同期、相互同期および独
立同期の各方式がある。

従属同期方式では1カ所にマスタクロックを設
け他の点のクロックはすべてこれに合わせる。系
の構成自体は簡単なので、デジタルデータ網など
で用いられている。ただし、障害時のマスタク
ロック切替えが複雑になる。

相互同期方式は、特にマスタクロックは定め
ず、相互にクロック周波数を制御して同一の周波
数に同期させる。クロックの位相が伝送遅延の影
響を受ける。平衡相互同期方式はこの問題を解決
するため位相情報のやりとりを行う方式である。
障害探索が困難であり同期系の構成が複雑化する
などの問題がある。

独立同期方式は、セシウム原子発振器等周波数
安定度の良い発振器を用いて独立にクロックを用
意する方式である。発振周波数ずれによるスリッ
プすなわち信号の脱落、重複をある程度許
容する。たとえば音声 PCM の場合、周波
数安定度 10^{-11} でスリップ頻度は150日に
1回程度となる。主として国際間の同期方
式として検討されている。

2.2 基底帯域 (baseband) 伝送

搬送波 (carrier) を用いずに直接パルス
を伝送する方式である。

(1) 再生中継における3Rの機能(図-3)

送信されたパルス(a)はケーブルにより減衰および
帯域制限をうけ(b)のようななまった波形になる。等
化器(Equalizer)はケーブルの周波数特性を補正し、
かつ雑音成分を可及的に抑圧するように設計される。
この機能を Reshaping という。クロックパルス(d)
は、Reshaping された波形のピーク値付近でサン
プルするために用いられる。クロックパルスは通常等化
波形を整流した後、タンクあるいはPLL(Phase
Locked Loop)等の同調回路を通して得られた正弦波
から成形される。これを自己タイミングと呼ぶ。サン
プル値を識別してパルスを再生する操作を Regenera-
tion と呼ぶ。以上の機能を3Rと総称する。

(2) ナイキストの規準

Reshaping された波形はサンプル点で零交叉する
ことが望ましい。このためにはパルスのスペクトルが

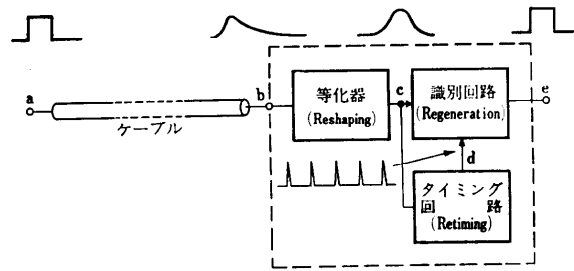


図-3 再生中継器における3Rの機能

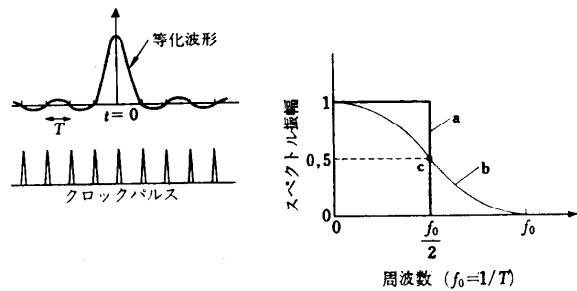


図-4 ナイキストの規準

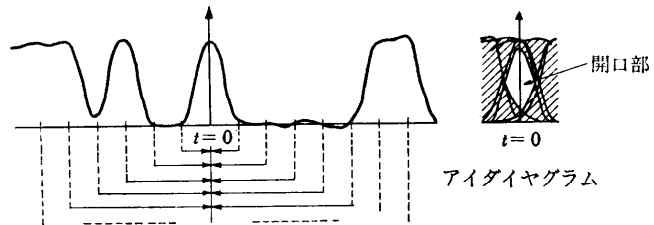


図-5 符号間干渉とアイダイアグラム

図-4 の c 点を中心に曲線 a, b のごとく点対称であ
ればよい。これをナイキストの(第1)規準と呼ぶ。

(3) 符号間干渉とアイダイアグラム

(eye diagram)

図-4 で $t=0$ の点を除いたすべてのサンプル点にお
ける振幅の絶対値の総和が最悪の符号間干渉である。
パルスの振幅を200%として表示する。図-5 のごと
く、すべてのサンプル点を $t=0$ に重ね合わせた波形
をアイダイアグラムと呼ぶ。符号間干渉100%で中心
の開口部が閉じる。

(4) 伝送路符号

伝送路符号化の主目的は(1)低周波成分の抑圧。
(2)タイミング情報の強化、(3)符号誤りの検出、な
どである。図-6 に示したAMI (Alternate Mark In-

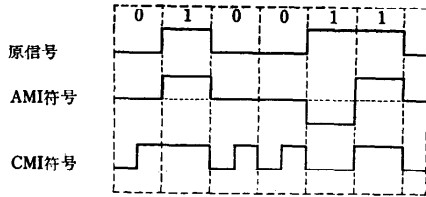


図-6 伝送路符号の代表例

version) 符号が代表例である。光通信ではこれを2値化した CMI (Coded Mark Inversion) 符号がよく用いられる。スクランブラにパリティを併用することもある。最近では BSI (Bit Sequence Independence: 信号の統計的性質に依存しないこと) の条件が重要視されるため、スクランブラの使用を避けることがある。

(5) ケーブルの周波数特性と等化

ペアケーブルも同軸ケーブルもその減衰量の周波数特性は dB 表示ではほぼ周波数の平方根に比例する。これを \sqrt{f} 特性と呼ぶ。受信側で逆特性の回路を用いて平坦に補正することを等化という。等化器は通常 \sqrt{f} 補正特性とナイキストの規準を満足するロールオフフィルタの特性を合成した特性に設計する。なおケーブルの周波数特性は周囲温度、ケーブル長などにより変化するため、これを可変抵抗1個を含む回路により補正する。これを可変等化器という。

(6) ペアケーブル伝送方式

デジタル伝送方式として 1.544 Mb/s のものが最初に実用化され現在最も広く用いられている。2本の銅線をより合わせたペアケーブルを用いる。0.65 mmφ(芯線外径) のものを用いた場合、中継間隔は 2 km となる。小形、低消費電力の IC 化中継器が製品化されている。

一条方式(多芯のケーブル一条により両方向に信号を伝送する)においては近端漏話が支配的で、これにより中継間隔が制限される。漏話の大きいケーブルでは芯線を選択して用いる場合がある。

二条方式では、各ケーブル内一方方向のみに信号が伝送されるので遠端漏話のみを考えればよい。

伝送路符号としては AMI 系の3値符号が用いられる。中継器への電力は信号と重畳した重信給電により供給され、中継器入出力トランスで分離し取出される。

本邦、米国、欧州とも第二次群までペアケーブル方式を採用している。

(7) 同軸ケーブル伝送方式

2.6/9.5(内部導外径/外部導体内径、単位 mm)の標準同軸、あるいは 1.2/4.4 細心同軸が用いられる。漏話は無視でき、受信増幅器の熱雑音によって中継間隔が制限される。AMI 符号を用いた場合、中継間隔は標準同軸で 3.7 km(100 Mb/s)、1.6 km(400 Mb/s) 程度となる。細心同軸ではその 1/2 程度である。中継器への電力は通常中心導体を用いて重信給電される。

2.3 通過帯域 (pass band) 伝送

搬送波 (carrier) を変調して信号を伝送する方式である。光ファイバおよび衛星通信は本特集号別項を、ミリ波導波管方式については参考文献を参照されたい。

(1) 無線 PCM 方式

無線伝送は有線伝送と比較して工事費の点で有利になる場合が多いが、周波数割当てにより伝送容量が制限される。変調方式としては、振幅、位相および周波数変調等があるが、C/N(搬送波対雑音比)の点から位相変調が有利となる場合が多く、よく用いられる。

位相変調方式としては通常 4 相位変調が用いられる。位相変調の復調方式としては、遅延検波および同期検波がある。前者は、受信信号とこれを 1 ビット遅延させたものを用いて検波を行うので回路規模が小さくて済む。一方、同期検波では受信信号から搬送波を再生して用いるため回路規模は大きくなるが、C/N が高くとれるので一般によく用いられている。

我が国で使用される周波数帯域は 2 GHz、11/15 GHz、20 GHz 帯で中継間隔はそれぞれ 25 km(3~12 Mb/s)、10~20 km(約 100 Mb/s)、3 km(約 400 Mb/s) 程度である。

最近では帯域有効利用の観点から多値直交振幅変調方式 (QAM) が商用化されている (5 GHz 帯、200 Mb/s、16 QAM)。

(2) PCM-FDM 方式

既存のアナログ FDM(周波数分割多重) 回線を用いて PCM 信号を伝送する方式である。本来アナログ信号伝送用に設計されているため低雑音の回線でありこれを有効利用するため、パルスを多値化して伝送する。この場合、雑音よりも波形歪による劣化が支配的になるので、自動等化器を用いてこれを補正する。その代表例である DAT-1C 方式では、1.544 Mb/s のデジタル信号を 480 kHz の帯域で伝送するために、8 値のパルスを用いている。

2.4 データ伝送

(1) 符号方式

数字符号としては、2進法10進符号が広く用いられている。欧文符号としては5単位の国際電信アルファベット No. 2, 和文符号としては6単位の JIS 符号 (JIS C 0803) が代表的である。情報交換用符号としては、7単位符号 (データおよびメッセージ伝送用国際アルファベット No. 5) が主流で、我が国では JIS C 6220 (1976) が広く使用されている。

(2) 通信方式

情報の流れとその方向により、単向、半二重、および全二重に分けられる。単向通信では一方のみに情報を伝送し、逆方向伝送は行わない。半二重通信では方向を切替えて両方向に伝送できるが、全二重通信のように両方向同時の通信を行うことは不可能である。

(3) 伝送方式

端末装置の入出力符号形式はキャラクタ単位に並列構成されるのが普通である。これをそのまま並列に複数の通信路を用いて伝送する並列伝送方式と、一旦これを並直列変換した後伝送する直列伝送方式がある。

(4) 同期方式

常に一定周期で信号が伝送される連続同期方式と、ある一定の信号グループごとに同一周期の信号を伝送する部分同期方式とがある。前者はタイミング信号を別に伝送する外部タイミング方式と、信号から抽出する内部 (自己) タイミング方式とに分けられる。後者の代表例として、情報ビットの前後にスタートおよびストップビットを付加する調歩同期伝送方式がある。

(5) 変調方式

基底帯域伝送、通過帯域伝送および PCM 伝送に分けられる。基底帯域伝送とは信号を変調せずにそのまま伝送する方式である。通過帯域伝送方式としては振幅、位相および周波数変調がある。特に高効率のデータ伝送用としては、振幅位相変調方式があり自動等化器を併用する。PCM 伝送方式ではデータを同期化する必要がある。このために単純サンプリング方式、スライディングインデックス方式、デュアルモード方式、スタック同期方式などが開発されている。

電電公社が現在提供している電話帯域用 (0.3~3.4 kHz) 変復調装置の主要諸元を表-1 に示す。

(6) データ通信回線

特定通信回線および専用線用として D 規格 (34 kHz) I 規格 (48 kHz), J 規格 (240 kHz) などがある。公衆通信回線, 加入電信電話回線は, モデム, 接続機器,

表-1 変復調装置主要諸元

データ速度 (b/s)	同期方式	変調方式
200	調歩式	FM
1,200		
2,400	同期式	4相 PM
4,800		8相 PM
9,600		PM-AM

音響カップラ, 付属設備などを介してデータ通信を行う。

電電公社が1979年12月よりサービスを開始した DDX 回線交換網では 200 bit/s~48 kb/s の7種の通信速度をサポートしている。

2.5 デジタル加入者線伝送

公衆通信の加入者系において、電話のみならず、非電話系のサービスを導入することが世界各国で検討されている。まず既存のペアケーブルを利用した 64 kb/s+8 kb/s (デジタル電話とファクシミリの同時通信サービス) 程度の方式を導入し、将来は光ファイバを用いて、広帯域のビデオサービスなども併せて提供する方向で検討が進められている。ここでは前者について述べる。

開発目標例としては、符号誤り率 10^{-7} , 伝送距離 5 km (0.4 mm 紙ケーブル)~7 km (0.5 mm 紙ケーブル) 程度のものが検討されている。

伝送方式として、2線式、4線式、時分割方式、周波数分割方式、ハイブリッド回路を用いる方式などが報告されているが、上記目標を達成するためには、2線/時分割伝送方式が有利であると考えられる。この方式は、送信と受信を時間的に切替えてパルスバーストとして一本のペアケーブルを双方向伝送するもので、ピンポン伝送方式とも呼ばれている。

ヨーロッパ諸国ではラインビットレート 256 kb/s, バースト繰り返し周期 125 μ s, 我が国ではそれぞれ 192 kb/s, 2 ms で研究を進めている。

主要課題は、既設ケーブルのブリッジドタップからの反射波による劣化の補償であり、自動等化器が用いられる。スイッチドキャパシタの技術などを適用し、低消費電力の LSI 化回路が開発されている。

3. デジタル交換技術

データ交換を主体に述べる。交換方式は回線交換と蓄積交換に分けられる。前者は呼ごとに通信端末相互間の通話路を設定するものである。通信路を並列に持

つ空間分割方式と時間的に分割して共用する時分割方式に分類できる。蓄積交換方式は入線からのあて先符号と情報とを一旦蓄積した後、あて先符号に従って情報を仕分けして出回線へ転送する方式である。情報を扱う単位の相違によりメッセージ交換およびパケット交換に分けられる。

3.1 回線交換

データ交換には時分割回線交換方式が主として用いられる。この方式は磁気テープ情報の転送、デジタルファクシミリデータの転送など長いメッセージの転送に適している。これは通信路設定のための手続があまり負担にならないためである。

加入者とのインタフェースはデータリンクの設定と解放の手順だけを規定すればよい。CCITT 勧告VシリーズおよびXシリーズに規定されている。

3.2 メッセージ交換

公衆電報中継交換などが該当する。メッセージの蓄積処理のため網内での遅延時間が大きい。ただし通信に先立って通信経路を設定する必要がないのが特徴である。即時性が要求されない多数のあて先へのメッセージ転送に適する。

3.3 パケット交換

回線使用効率が高く各種蓄積サービスの実現が可能であるが、符号、制御、速度等の任意性は失われる。パケット長は通常 1,000 bit 程度であるが、最大スループット、最小遅延時間、ホスト計算機の処理効率などを考慮して選択する。

Virtual Call (VC), Permanent Virtual Circuit (PVC), datagram (DG) などの方式がある。VC は各通信ごとに論理的データリンクを設定する。各データリンク独立に各種制御、経路選択を行うことが出来る。PVC ではデータリンクが常設され専用線的に使用される。DG 方式では通信ごとにデータリンクを設定しないので網とのインタフェースが簡単になる反面通信の独立性は保証されず、パケットの送達確認は加入者間で行う必要がある。

パケット交換方式の代表的な規約として CCITT 勧告 X.25 がある。

4. デジタル信号処理技術

4.1 符号化

アナログ信号のデジタル符号化は、標本化—量子

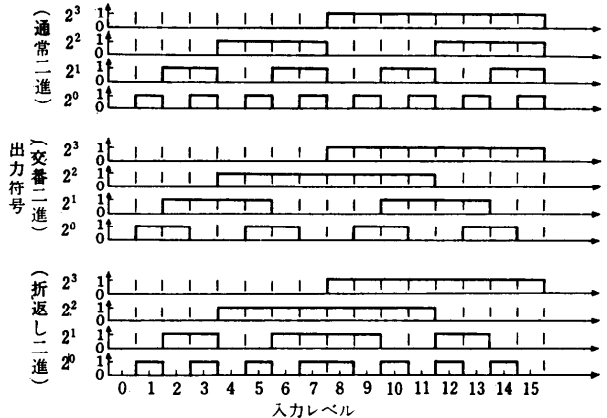


図-7 代表的2進符号の例

化—符号化の順に行われる。逆にデジタル信号をアナログ信号に復号する場合には、復号化—補間予測の順に行う。以下これら諸技術について説明する。

(1) 標本化定理

連続信号を $g(t)$ としその帯域が $0 \sim f_0/2$ に制限されているものとする。 $g(t)$ とその標本値 $g(nT)$ との間には次の関係がある (ただし n は整数, $T=1/f_0$)

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT)h_s(t-nT)$$

ただし $h_s(t)$ は標本化関数と呼ばれ次式で定義される。

$$h_s(t) = \frac{\sin \pi f_0 t}{\pi f_0 t}$$

すなわち標本値のみ判れば $g(t)$ を完全に記述できる。

標本化関数は図-4 に示したように $t=0$ にて 1 となり他の標本点では零となる。またその周波数スペクトルは $-\frac{f_0}{2} < f < \frac{f_0}{2}$ の外で零となる (図-4a)。

(2) 符号化

通常量子化と符号化は同時に行われる。符号化形式の代表的なものとして、通常2進、交番2進および折返し2進がある。通常2進では量子化した標本値を2進法であらわす。交番2進では図-7 に示したように量子化値1ステップの変化に対し、符号は1ディジットのみ変化する。折返し2進は同図に示した如く通常2進を中央値から折返しした符号構成となっている。

符号器としては並列形、帰還形および縦続形が代表的なものである。並列形は比較器を量子化ステップ数だけ備えており、比較結果を論理処理して各ディジ

ト並列に出力する。高速処理に適するが、回路規模は大である。帰還形は逐次比較形とも呼ばれ、まず最大レベルの $\frac{1}{2}$ に対して大小判定を行い、次にその結果により所定の値を差し引いた後さらに比較レベルを $\frac{1}{2}$ にして大小判定を行う。このような処理を逐次行う。縦続形は同一の単位回路を縦続接続することにより符号器を形成する。単位回路は入力信号あるいは入力信号から比較レベルを差し引いた値（入力信号が比較レベルより大きい場合）を2倍して出力する。これが次の回路への入力となる。また比較による大小判定結果も出力する。

(3) 復号化および補間波

復号器として各ディジット出力を荷重加算する抵抗回路網が通常用いられる。復号された標本値は時間的に引き伸ばされ階段波とした後 $f_0/2$ の帯域に制限することにより平滑化した原信号を得る。

(4) 量子化雑音と非直線量子化

均一量子化の場合量子化ステップ幅を Δ とすると、量子化誤差の確率平均電力は $\frac{\Delta^2}{12}$ となる。 n ビット符号化の場合最大正弦波入力に対する S/N は $6n+2$ (dB) となる。入力振幅が減少すると S/N は劣化する。非直線量子化は S/N の入力振幅依存性を低減するために用いられる。すなわち量子化ステップを大振幅の部分で粗く、小振幅に対して細かくする。音声信号の符号化に適用され、S/N の音量依存性を軽減する。

(5) 画像符号化

カラーテレビ信号を直接符号化すると 100 Mb/s の速度を必要とする。画像信号は標本値間に相関を有するため、これを利用した符号化方式を用いて伝送速度の低減が可能である。その代表例は DPCM (Differential Pulse Code Modulation) である。これは局部復号器を用いて次のサンプル値を予測し、予測誤差を符号化して伝送する方式である。通常3~4ビットの非直線量子化が用いられ 30~50 Mb/s 程度の伝送速度が達成できる。これを簡易化して1ビットで符号化すればいわゆるデルタ変調と同じになる。ただし回路的には簡易化されるが、量子化雑音を低減するため標本化速度を上げる必要があり、符号速度低減は期待できない。

さらにテレビ信号のフレーム間の相間がきわめて大きいことを利用して伝送速度低減を図る方式として、

フレーム間符号化方式がある。6 Mb/s 程度の伝送速度を達成した例もある。

4.2 データモデム

非同期モデムは変調方式として FM を採用しておりデジタル技術の応用により LSI 化されている。従来アナログ回路で構成されていた送信部の可変周波数発振回路および受信部の周波数弁別回路をそれぞれ分周回路および PLL (Phase Locked Loop) でおきかえ1チップ MOS LSI 化が達成されている。

同期モデム (2, 400, 4, 800 および 9, 600 bit/s) についてもデジタル化が進んでいる。従来アナログ回路で構成されていたロールオフフィルタ、自動等化器、変復調器などもデジタル信号処理技術の活用により、シグナルプロセッサまたは専用 LSI を用いて1~数チップの MOS LSI が開発されている。

また、送受信フィルタ、等化器、AGC 回路、A/D 変換器等のアナログ回路もスイッチドキャパシタの技術による LSI 化が進められている。

符号変換、スクランブラ等は論理処理部であるので専用 LSI あるいはマイクロプロセッサで構成できる。上記のごとくデータモデムは LSI 化による経済化と小形化のために大きくデジタル信号処理技術に依存している。

4.3 トランスマルチプレクサ

デジタルおよびアナログ信号の多重化にはそれぞれ時分割多重 (TDM: Time Division Multiplex) および周波数分割多重 (FDM: Frequency Division Multiplex) が適用される。TDM および FDM 信号の相互変換には、一旦多重化分離後、A/D 変換を行い再多重化するのが普通である。トランスマルチプレクサは多重化レベルのまま相互変換を可能とするものである。

Weaver 変調器を基本とするものと FFT を利用する方式とがある。前者は演算処理を異なったサンプリング周波数で2段階に分けて行い全体の所要掛算数を低減している。後者は全チャンネルに共通な演算処理を除去する。Weaver 変調法に比して掛算数が数分の一になる。

4.4 エコーキャンセラ

加入者線 (2線式) と長距離伝送路 (4線式) とを接続するハイブリッドコイルの不完全性が4線回線受信信号の送信側への漏話源となりエコーを生ずる。これが衛星、国際海底ケーブル回線において通話品質を劣化させる。エコーサプレッサにはエコーのみなら

ず、話頭をも切断するという欠点があった。エコーキャンセルはエコーを打消すものでこのような問題は生じない。デジタル演算によりエコーの応答特性を推定する。学習同定法、カルマンフィルタリング法などが検討されている。演算量低減のため、高速カルマンフィルタアルゴリズムなども検討されている。

4.5 MF/PB 受信器

押しボタン電話器はダイヤル信号を2周波の音声周波の混合信号として送出する。低群および高群各4波の中から1波ずつ選択し、16のダイヤル数字をあらわすことが出来る。周囲の雑音による誤動作防止が重要課題である。デジタル的周波数登算等の処理技術により誤動作低減、ハードウェア簡易化が図られている。

多周波(MF)信号は、局間信号方式に用いられる。700~1,700 Hz の間 200 Hz おきの6周波のうちから2周波を組合せて用いる。PB 受信器ほど厳しい規格は要求されない。デジタルフィルタバンク、離散フーリエ変換等を用いた受信器が検討されている。

5. 結 言

デジタル技術は LSI 技術の進展にともなって、

高機能化、経済化、小形化等の面で新しい展開を見せている。現在ではまだ音声、データ、静止画等比較的低速の段階にとどまっているが、将来は動画を含んだ新サービス等さらに高速の分野へと発展することが期待されている。光ファイバ、衛星等の大容量デジタル伝送技術がこれら新しい局面の展開を支えて行くものと考えられる。

本稿では紙数の制限から説明を省略した部分も多いが、不十分な点については参考文献等を参照されたい。

参 考 文 献

- 1) 電子通信学会編：電子通信ハンドブック，オーム社（1979）。
- 2) 電子通信学会編：デジタル信号処理，電子通信学会（1975）。
- 3) 電子通信学会：デジタル通信網特集，電子通信学会誌，Vol. 64, No. 11, pp. 1123-1218(1981)。
- 4) 電子通信学会：マイクロエレクトロニクス応用特集，電子通信学会誌，Vol. 65, No. 11, pp. 1139-1230（1982）。
- 5) 金子尚志：PCM 通信の技術，産報（1976）。

（昭和58年6月9日受付）

