

信号処理技術について

星子幸男
(東北大学工学部)

§ 1. はしがき

信号処理技術はシステムの機能、特性面において著しい展開がみられ各方面への応用が期待されているが、ここでは通信における信号処理の意義と動向、とくに伝送、交換への信号処理技術の導入に伴う問題点と今後の将来性についての考察を述べる。

通信への信号処理には情報処理の導入にあたってはその方向に次の2通りあるものと考えられる。

(i) 制御、とくに通信網の制御にコンピュータを導入する方向で、その代表的なものが蓄積プログラム形電子交換である。これにはあらゆるアーキテクチャが用いられる。

(ii) 今後の課題であるが、より高度の信号処理を行う立場からのコンピュータの導入。

コンピュータ間通信では(i)、(ii)が当然行われているが、それ以外の通信サービスに対する適用は今後の問題と思われる。

通信サービスに信号処理を導入してゆくに際し、想定されることは、

(i) 伝送系の各機能の処理

- ① 符号構成
- ② 波形構成、等化
- ③ 変復調、多重化
- ④ 信号検出

(ii) 通報(メッセージ)の情報処理

- ① パターン(波形)の冗長度抑圧
⇒ 波形の独立要素の抽出
- ② 情報要素; 画像では輪郭などの画像構成要素、音声なら音韻要素の抽出
- ③ その再構成

といった諸問題である。これらの広義の信号処理として取扱う。

本稿ではこの点に視点を絞って、筆者が行ってきた研究を概観しつつ考察してゆくこととする。

§ 2. 信号処理

2.1 伝送機能の信号処理

① 符号構成

デジタル符号伝送においては、伝送路の周波数特性に適合し、これを有効に利用できるような伝送路符号を得るための符号構成法が高速かつ高信頼度な伝送を実現する上で重要である。

そこで、符号系列の電力スペクトルを近似する電力スペクトル特性関数を定義し、これを因数として含むような符号を得る符号構成法を求めたい。

すなわち得られる符号系列の電力スペクトラム $W(f)$ は、

$$W(f) = C(f) \cdot U(f) \quad (1)$$

となる。ただし、 $U(f)$ は電力スペクトル特性関数によるスペクトル成分である。

$U(f)$ をあらかじめ指定することにより、所望の電力スペクトルの基本構造はほぼ規定でき、とくに実用上重要な電力スペクトルの零点とその近傍のスペクトル抑圧特性は十分よく近似で与えられる。

この方法は任意の原情報系列を(1)式の電力スペクトルをもつ符号系列に変換するもので、従来まで提案されているいくつかの符号構成法を含む一般的なものである。

この方法によって得られる符号系列の電力スペクトルの一例を図1に示す。

しかし符号構成によって任意の電力スペクトルが得られるかどうかについては未だ解決されていない。

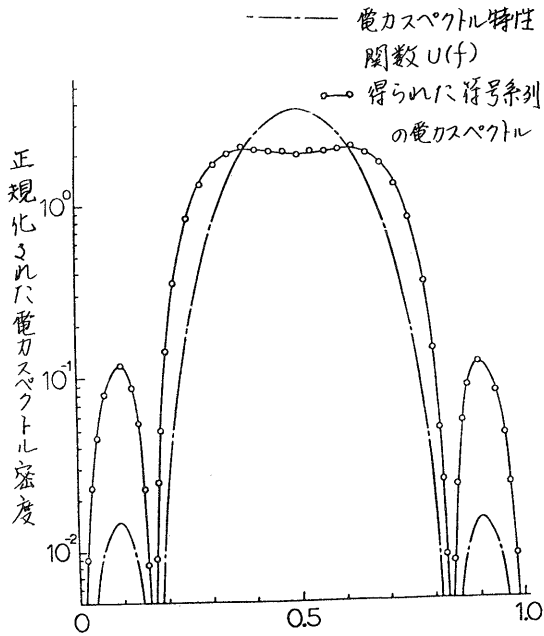


図1

② 変復調系のデジタル処理

データ伝送の発達に伴い、デジタル演算処理による変復調機能の実現に対する要求が強まり、いくつかの方式が提案されている。この場合、システムの高速化、簡易化のためには搬送波乗算によるオーバーヘッドをいかにして軽減できるかが重要な問題となる。

この問題を解決するために、サンプリングレイトの整合とデジタルフィルタの組合せで搬送波乗算を全く用いずに変復調機能の実現を図った⁽²⁾。これはデジタル標本系で生じる高調波の分布がサンプリングレイトの変化により移動する原理を利用したものである。すなわち、サンプリングレイトの間引きおよび補間によるサンプリングレイトの変換とデジタルフィルタによる濾波を組合わせて、基底帯域形状のスペクトルの変調信号をほぼ任意の周波数の帯域形状のスペクトルに変換することができる。これと位相が直交するサンプリングにより得られる直交成

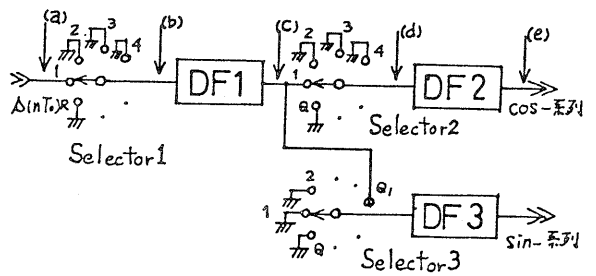


図2. 変調系の基本構成

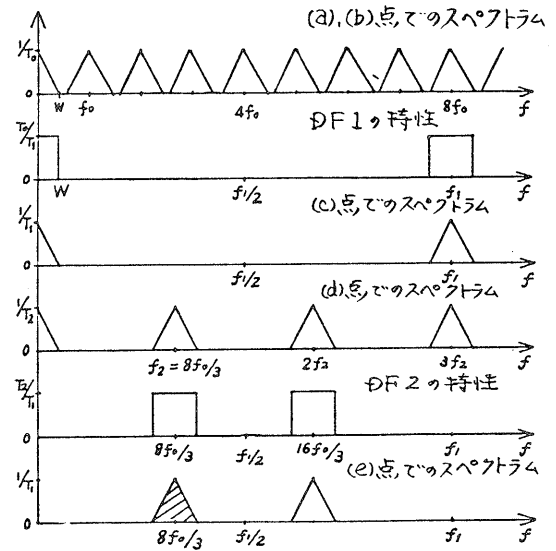


図3. 各部のスペクトル

分を用いることにより、より一般的な変調信号の構成が可能となる。

このような原理による変調系の基本構成を図2に、スペクトルの変換の様子を図3に示す。

これと逆の原理で復調系も構成することができる。

このようなシステムでは、処理速度誤差などの点で問題があったり乗算を用いることなく実現できるので高速かつ高性能な変復調系が構成できる。特にマイクロプロセッサを用いたシステムでプログラム処理による多様な変復調機能の実現のためにも有効であろう。

2.2 通報の冗長度抑圧

[独立な成分の抽出]

① 各種の直交変換

各種の直交変換が信号処理における重要な基本技術の一つとなっている。中心となるものは離散的フーリエ変換(DFT)とその効率的演算法であるFFTである。画像信号の直交変換は冗長度抑圧のための処理として実用的にも重要である。

画像を数画素あるいは数十画素から成るブロックに分割し、ブロック毎に直交変換を施して得られる成分を対応したビットレートで伝送し、受信側では逆変換によって原信号を復元する。

各種の直交変換について検討されているが、実時間処理の点からアダマール変換、傾斜変換がハードウェアの容易さからよく

② 数論変換

有限語長の離散的にのみ込みを高速でしかも誤差なく計算する方法として数論変換(Number Theoretic Transform)と呼ばれる直交変換が提案されている。

有限語長の離散的な循環にのみ込みは次のようになる。

$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(n-m)x(m) \quad (2)$$

$n=0, 1, 2, \dots$
(2) 式の演算は

$$DFT[h * x] = DFT[h] \cdot DFT[x] \quad (3)$$

および
 $y(n) = [DFT\{DFT[h] \cdot DFT[x]\}]$
で実行あることができる。Nが大きくなると、FFTのアルゴリズムを用いることができる場合には、(2)式を直接演算するよりも有利となる。

そこで、(3)式の演算を効率的に行うために次のような変換を考える。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \alpha^{nk} \pmod{M} \quad (4)$$

$$X(n) = N^{-1} \sum_{k=0}^{M-1} X(k) \alpha^{-nk} \pmod{M} \quad (5)$$

ただし

$$\alpha^M = 1 \pmod{M}$$

ここで α は 1 の原始 N 乗根

$$\alpha = e^{j2\pi/N}$$

として複素数体上で (4), (5) 式を定義したものが DFT となる。

計算機で処理ある場合には M を法とする整数環上で (4), (5) 式を定義すれば、まるめによる誤差のない演算ができる。M, N, α を適当に選択すると、(4), (5) 式の演算は加算とシフトだけでよく、しかも FFT のアルゴリズムを用いることができるれば高速処理も可能となる。

このような変換を総称して数論変換と呼ぶ。M の選び方でメルセンヌ数変換やフェルマ数変換が提案されている。

ただし、このような変換は適用条件が厳しく、バッチ込み系列の長さが限定される。

そこで比較的長い系列のバッチ込み演算にも上記の変換が適用し得るようになり、図 4 に示すように剰余数システムで (4), (5) 式の変換を定義し、(2) 式の演算を実行することを考える。(2)

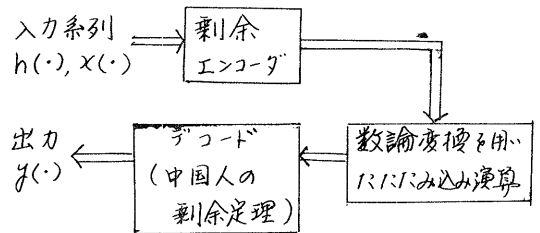


図 4. 数論変換を用いたバッチ込み演算

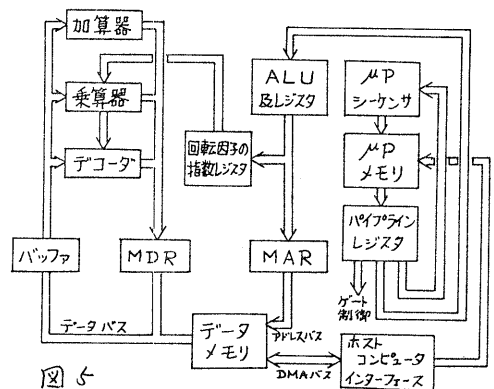


図 5

これをマイクロプロセッサ制御のハードウェアシステムとして実現したものを図5に示す。このシステムは音声周波数帯程度の信号は実時間処理が可能であり、アダプティブディジタルフィルタとしての展開が考えられる。

③ 予測方式

信号の冗長さ抑圧のための有効な手法として予測を用いるものがある。これは原信号値を送る代わりに、各時点での信号値を系内に記憶し、過去のいくつかのデータから予測し、この予測値と現時点での信号値との差の値を量子化して送るものである。受信側ではこの差信号を積分することにより信号を復元する。

この方式は画像信号や音声信号の符号器として、極めて一般的に用いられている。当初は定常信号を対象とあるものであったが、音声も画像も非定常信号であるため、非定常性に対処するために適応形の予測方式が検討されてきた。

このような観点から、筆者らもフレーム内、フレーム間の画像信号の非定常性を処理するものとして図6のような符号化方式について検討した⁽⁴⁾。

その結果、ハードウェア構成はかたまり複雑になるものの、固定係数予測に比べてかなりの改善がみられた。しかし輸部帯域輝度が急変する部分での追従性はあきらかに十分でなく、適応量子化方式を併用することにより更に改善がみられるものと考えられる。

画像信号の生成過程まで考慮した適応形の予測方式としてカルマンフィルタ形の予測器についても検討を行った。しかしシステムがかたまり複雑となるため画像信号の実時間処理には適切ではないと考え、画像の復元(Image Restoration)のためのフィルタとして考察を行った⁽⁵⁾。

この種の処理は推定値が再帰的に得られるので計算機処理には有利である。

画像信号モデルを工夫することにより、カルマンフィルタにおける各種の演算はFFTを用いて効率的に処理できるようなフィルタシステムを構成した。

基本構成を図7に示す。輸部部分の適応処理を加えることにより推定誤差を更に減少させることができる。

音声、画像とも非定常性をいかにうまく処理するかが今後の重要な問題となる。

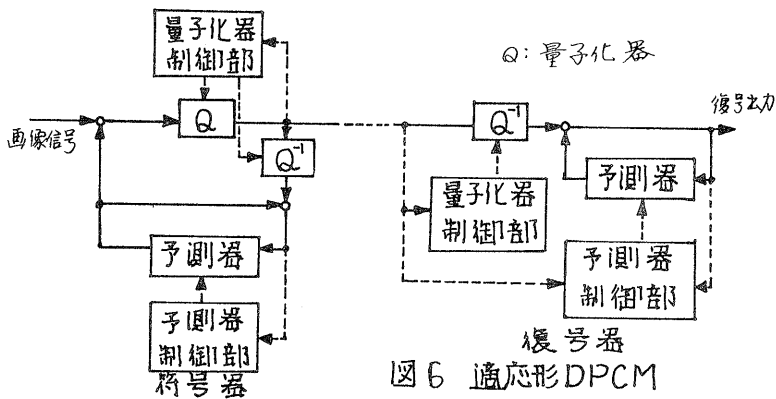


図6 適応形DPCM

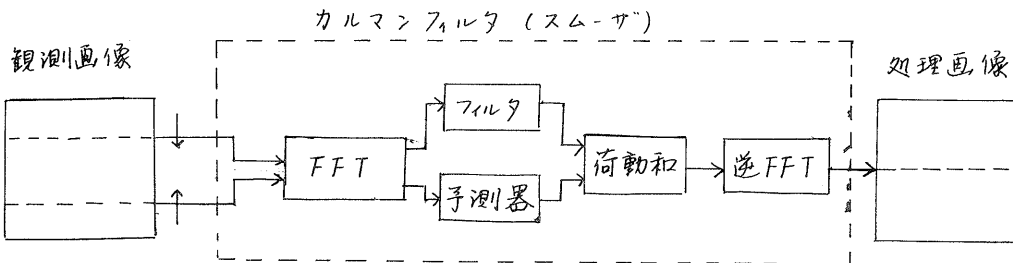


図7. カルマンフィルタによる画像の二次元フィルタリング

[再生法]

④ 最大エントロピー法(MEM)による信号再生

伝送系のみならず他の応用分野においても、不十分な測定データあるいは雑音等が混入する不正確なデータから所望の信号を再生しなければならない場合が多い。

一方、スペクトル解析の分野では、最大エントロピー法と呼ばれるパワー・スペクトル推定法が注目されている。この方法によると、少ない測定データからでも分解能の高いスペクトルが得られることから、急速に応用分野を広めつつある。そこで、この方法を用いた画像再生法について検討を行う。(6)(7)。

すなわち、再生画像上でのエントロピー・メジャーを定義し、得られた測定値、事前情報に矛盾のないようにして、このエントロピー・メジャーを最大にする推定値が最も偏見の少ないものであると考えて、再生を行う処理法である。

この方法はエントロピー・メジャーを最大にする推定値を傾斜法などによって逐一求めなければならないが、実時間処理

法としては問題が多い。

そこで、医学診断や各種の計測などで広く用いられるようになった。投影からの画像再生の問題への適用について検討した。

すなわち、限られた数の投影データ、あるいは観測雑音が含まれるような不正確な投影データからでも分解能の高い画像を再生するために考察した。この方法による再生誤差と現在一般的に用いられている再生法であるフィルタ補正逆投影法(FBP)および代表的再構成法(ART)によるものと比較して図8に示す。

処理時間が長くなる難点はあるが、良好な特性を示している。

⑤ 外挿法による信号再生

帯域制限された実信号は任意の一部周波数区間の振幅が分かれば他の部分は外挿によって決定できることが明らかにされている。そのため各種の外挿法も提案されたり、one-stepで外挿することも可能になっている。

我々が取扱う信号は帯域制限された実信号(解析信号)と考えてよいので、外挿法を用いて不完全なデータから所望の信号を推定する処理について現在検討中である。

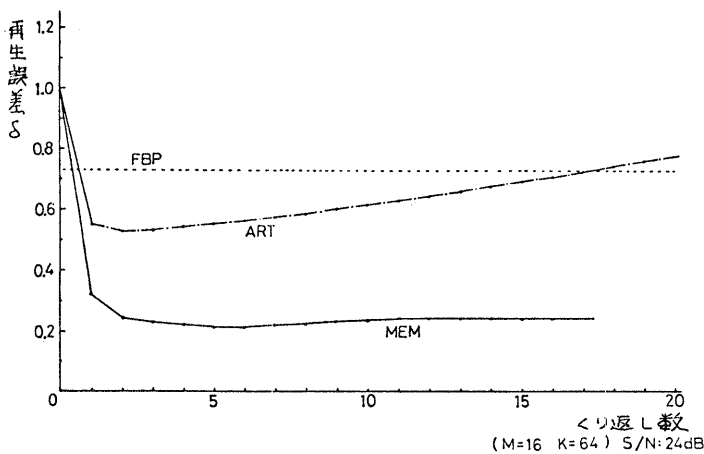


図8. 再生誤差

§ 3 信号処理用コンピュータシステム

伝送系における各種の信号処理においては、基本的には実時間処理が要求される。高速の各種プロセッサが開発されつつある現在でも、通信システムにおける各種の信号処理をリアルタイムで実行するという事は極めて苛酷な条件であると言える。

筆者はこの問題を並列処理による高速化によって解決あることを考え、並列処理プロセッサについての考察を進めている。LSI技術の進歩は並列処理、分散処理による高速処理の実現可能性を示唆しており、与えられた処理アルゴリズムを適切に反映させる計算機アーキテクチャの確立が重要な問題にならうと考えられる。

① FFT用並列処理

信号処理の基本的な算法であるFFTアルゴリズムの並列処理装置としてマルチプロセッサシステムを製作した⁽²⁾。

並列処理による効果は十分に得られたものの、用いた素子の特性からの制約で絶対的な速度としては十分なものは言い難いものであった。

② データフロープロセッサ

非ノイマン形の計算機アーキテクチャとして近年注目されているデータフロー

プロセッサは、問題のもつ並列処理性を自然な形で効率よく実行できる計算概念であると言える。また関数概念に基づく非逐次的なプログラムによって処理を記述する関数形システムとしても適している。

データフロー計算機としてこれまで種々のシステムが提案されている。処理本体をどのようなレベルで考えるかにより見方が変わるが、これまで述べてきた信号処理という観点からは処理の基本レベルを演算器レベルでとらえるべきであると考え、基本プリミティブのレベルまで関数性を徹底した関数形のデータフロープロセッサについて検討を進めている⁽³⁾。

考えているアーキテクチャを図9に示す。

命令語メモリ(インストラクションメモリ)には連想記憶を導入し、システム内に待ち行列(Queue)を用いるなどして効率的な情報転送が行えるような具体的なハードウェアシステムを現在設計中である。

プロセッサ全体のパフォーマンスや信号処理用プロセッサとして適切であるかどうかなどの詳しい点についてはまだ明確な結論は得られていない。

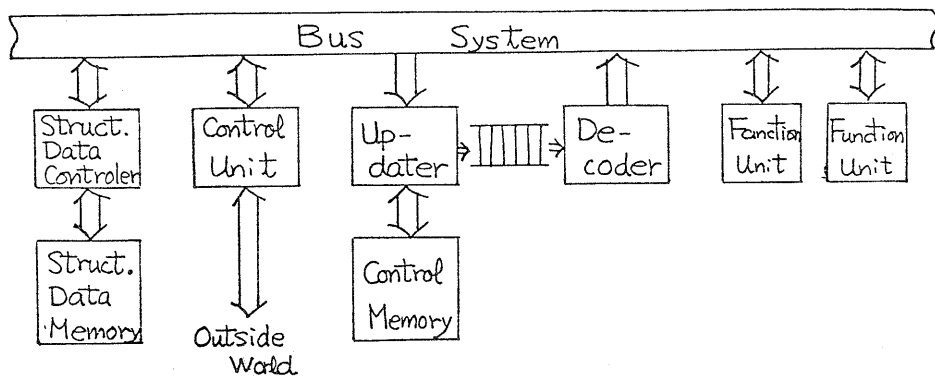


図9. データフロープロセッサ

§4 計算機間通信

計算機網の発達により，待ち行列理論の計算機システムへの応用が重要な問題となっている。データフロー計算機も，コンピュータの通信システム化という見方をするこもできよう。

そこで

- ① 通信網(あるいはコンピュータ内)のトラヒック制御
 - ② G/G系に対する状態変数を用いた待ち行列理論の確立
- などの研究を進めている。

コンファレンス論文集 8-5, (昭53)

- (7) 山口, 成沢, 菰田, 斎藤, 星子, "最大エントロピー法による投影からの画像再生," 信学技報 IE 79-69, (昭54-11)
- (8) 伊藤, 山本, 斎藤, 星子, "マルチマイクロプロセッサによる並列フーリエ変換," 情報処理学会論文誌, 20巻, 2号, pp. 187-189. (昭54-03)
- (9) 伊藤, 出口, 斎藤, 星子, "関数型データフローシステム," 情報処理学会21回大会, 25-1, (昭55-05)

文 献

- (1) 大内, 斎藤, 星子, "電カスペクトル特性関数に基づく符号構成法," 信学論, 62-B巻, 10号, pp. 940-947 (昭54-10)
- (2) 嵩, 星子, "サンプリングレート変換を用いた変復調のデジタル処理," 信学技報 CS 79-157, (昭54-06)
- (3) 小谷野, 斎藤, 星子, "数論変換を用いたデジタルバビュ込み処理装置," 信学論, 62-D巻, 6号, pp. 387-394, (昭54-06)
- (4) 向井, 斎藤, 星子, "適応形線形予測を用いた画像信号の符号化方式," 信学論, 62-B巻, 11号, pp. 1037-1044, (昭54-11)
- (5) 下江, 斎藤, 星子, "カルマンフィルタによる画像の二次元フィルタリング," 信学論, 61-D巻, 8号, pp. 541-548, (昭53-08)
- (6) 小林, 菰田, 星子, "最大エントロピー法による再生問題," 9回画像