標準テレビ信号に対する各種符号化方式の特性と画質比較

——アダマール変換符号化, DPCM および ΔM ——

沖電気工業株式会社 通信機器研究所

大 平 隆 夫・早 川 元 章・松 本 邦 男
伊 藤 裕 一・古 川 雅 俊・村 上 芳 広

4 MHz テレビ信号を対象としてアダマール変換符号化装置, DPCM および ΔM 等の装置を試作し, 帯域圧縮を行い画質評価を試みた. さらにそれら処理画像の特徴を測定する手段として Picture Quality Distortion Measurement (PQDM) を提案し, 各種画像およびテスト信号を入力信号源として, 各種帯域圧縮装置により生ずる誤差の特徴を調べた.

1. ま え が き

テレビ電話の出現により, より多くの情報を効率良く伝送しようとする要求がますます高まっており, これを実現すべく帯域圧縮の研究がいろいろ行われている. 帯域圧縮を実現する方法は2つに大別できる. ひとつはアダマール行列のような直交行列を利用する線形変換符号化^{1)~3)}であり, 他のひとつは DPCM⁴⁾ や ΔM ⁵⁾ のような予測符号化である. これらの方法は, いずれも相関のあるテレビ信号からできるだけ冗長度を除去して帯域圧縮を行おうとするものである.

本論文は 4 MHz 帯白黒テレビ信号に対する線形変換符号化 (代表例としてアダマール変換符号化), 予測符号化 (DPCM および ΔM) および標準符号化等を行う実時間処理の実験用装置を試作し, テレビ信号の処理を行ったときの特性, すなわち誤差の特徴, 画質等について比較検討を行ったものである.

さらに, 各種の帯域圧縮装置により得られる画質をそれぞれ比較するために, 評価のひとつの目安となる誤差信号を検出する Picture Quality Distortion Measurement (PQDM) を試作した⁶⁾.

実験用装置として試作したアダマール変換符号化 (HTPCM), DPCM および ΔM 等はデジタル演算を

行うので, 入力テレビ信号を8ビットの符号化精度を有する標準 PCM で A/D 変換を行い, これを比較の基準であるデジタルテレビ信号とする. PQDM はこのデジタルテレビ信号と HTPCM, DPCM および ΔM 等の装置から得られる処理画像との差分誤差信号を測定し, それをリアルタイムでモニター上に表示し, その実効誤差電力をレベル計に指示する.

差分誤差信号は各種の帯域圧縮方式の本質的な特徴を示すので, 量子化特性やビット配分等の影響を観察しながら, 各種の処理装置の特性を調べることができる. さらに計算機シミュレーションでは複雑な構成を要する edge busyness や contouring noise 等の影響をリアルタイムで調べることができる.

以下, 各種の帯域圧縮装置の特性, PQDM を用いての比較等について述べる.

2. 符号化形式

帯域圧縮を実現する各種の符号化方式, これを実現するために試作した装置の概要およびデータ等について述べる.

2.1 標準 PCM (SPCM)

HTPCM, DPCM および ΔM 等の各装置はデジタル演算を行うので, それらの差分誤差信号を測定する PQDM もデジタル処理を行わなければならない. そのために入力のテレビ信号を符号化するが, 符号化方式としては経済性のすぐれた逐次帰還比較方式を採用し, 符号化ビット数はテレビ信号を符号化してデジタル伝

“Comparison of Coding Systems for Standard TV Signal—HTPCM, DPCM and ΔM —” by Takao Ohira, Motoaki Hayakawa, Kunio Matsumoto, Yuichi Ito, Masatoshi Furukawa and Yoshihiro Murakami (Communication Equipment Laboratory, OKI Electric Industry Co. Ltd., Tokyo)

送するのに十分な精度を有する 8 ビットとする。

2.2 アダマール変換符号化 (HTPCM)

線形変換を利用した帯域圧縮方式としてアダマール変換符号化が, Karhunen-Löve 変換のような他の直交変換符号化と比較して, ハードウェアの立場から構成が容易なため注目され, 各所で研究開発が進められている。

線形変換は入力信号の標本値をブロックごとに分けて, ブロック単位に行われる。いまひとつのブロックの信号行列を $[X_i]$, アダマール行列を $[H_{ji}]$ で表わすと, 変換後の出力 $[h_j]$ は,

$$[h_j] = [H_{ji}] \cdot [X_i] \quad (1)$$

となる。変換出力は $[h_j']$ に圧縮されて伝送される。受信側では $[h_j']$ が逆変換演算,

$$[X_i'] = [H_{ji}]^{-1} \cdot [h_j'] \quad (2)$$

により $[X_i']$ が復号される。実験装置では次数が 8 次のアダマール行列を用いており, 各標本値を同一水平走査線上から標本化する, いわゆる 1 次元ブロック符号化を行っている。

アダマール変換をハードウェアで実現する方法としていくつかあるが, この実験装置では枝分れ方式を用いている。この方式では, おおのの行に並列に出力が同時に得られるので, ビット圧縮を任意に行ってその影響を調べたり, 傾斜アダマール変換を行う場合に都合が良い。

他に, 縦続型方式⁷⁾, RAM を使用した簡易方式等が提案されている。標本化周波数はカラー副搬送波のほぼ 3 倍の 10.7 MHz に選んである。

入力の符号化ビット数を 8 ビットに選ぶと, 8 次アダマール行列による変換出力は最大 11 ビットになるが, H_1 から H_8 までの出力はそれぞれ 1~8 ビットに任意に圧縮できる。アダマール変換符号化で帯域圧縮が行えるのは, ブロック化された入力信号を行列演算により $H_1 \sim H_8$ の各成分に分解すると, 白黒テレビ信号の場合各成分の平均電力が sequency の高くなるに従って小さくなっている。したがって, 平均電力の小さな変換出力へのビット配分を少なくすることにより, 視覚効果を同時に考慮してテレビ信号に含まれる冗長度は除去される。

カラーテレビ信号の場合にはサブキャリヤ成分の集中する H_6 と H_7 に多くのビットを割当てて必要がある。ここで問題となるのは, 画質をできるだけ損なわずにビット配分をどのようにするかである。これを実験的に確かめるために SMPTE (#12) の写真について振幅レベルの頻度分布を測定した。その結果が図 1 である。

水平軸は正側の量子化レベル数を示しており, 64 レベルが行列演算後の $H_2 \sim H_8$ に対する最大値である。た

図 1 各変換出力の振幅頻度分布

Amplitude distributions of each transformed coefficient for HTPCM.

表 1 8 次アダマール変換符号化のビット配分

Bit assignments for 8th-order Hadamard transform coding.

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	ave.
CNL_1	8	5	4	3	3	4	3	2	4.0
CNL_2	7	4	4	3	2	4	2	2	3.5
CNL_3	7	4	3	2	2	3	2	1	3.0
ML	8	7	6	5	2	2	2	0	4.0
MNL_1	8	4	4	3	2	2	1	0	3.0
MNL_2	7	4	4	3	2	0	0	0	2.5
MNL_3	7	4	3	2	0	0	0	0	2.0

ただし CNL カラー信号に対する非線形量子化
 ML 白黒信号に対する線形量子化

だし H_1 は演算が加算のみであるので 128 レベルが最大値である。この結果から, 行列演算後の各係数のビット配分を推測することができる。たとえば, 入力レベルが水平軸の設定レベルを全確率の 1% および 10% を越えるとき各ビット配分が図中に示してある。

このようにして求めたビット配分を参考にして, 最適ビット配分を主観評価を行いながら求めたものが表 1 である。

カラーテレビ信号に対するビット配分は白黒テレビ信号の場合と異なっている。すなわち, カラーテレビ信号は 3.58 MHz のサブキャリヤを中心にカラー信号成分の情報量を持っているので, これに対してもビットを割当てなければならない。それ故 H_6 および H_7 に割り当てられるビット数が白黒テレビ信号の場合にくらべて多くなっている。

次に, 被験者 25 人を対象として NHK の 5 段階法による主観評価テストを行った。信号源として SMPTE

図 2 NHK の 5 段階法による主観評価テスト

Result of subjective test using 5-step inpairment scale proposed by NHK.

(#12) のカラー写真を用いたときの結果が図 2 である。横軸は観測者とモニターとの間の距離の関数で、 H はモニター画面の高さに等しい。モニターから $6H$ 以上離れて評価パラメーターが 4 以上の画質を良好とすれば、1 画素当り 8 ビットから 3.5 ビットに圧縮できることを示している。

写真 1 はカラー信号成分のベクトルスコープ波形を示している。圧縮比の増加とともに振幅および位相ひずみ

が増加している。 R, G, B の各カラー信号成分の振幅が小さくなると色がうすくなり、位相ひずみが大きくなるにつれて色相のずれが大きくなっている。この特性はエンファシス回路を挿入することにより改善できる。

次に、8 次アダマール変換による 1 次元符号化を 4 MHz 系の白黒テレビ信号 (NTSC テレビ信号) および 1 MHz 系の白黒テレビ信号 (テレビ電話) に適用して両者を比較してみよう。1 M テレビ信号と 4 M テレビ信号とでは標準化を行ったときに画素間の距離が異なってくる。すなわちブロック化を行うと 1 M テレビ信号の場合、水平および垂直方向の画素間の距離は 4 M テレビ信号の場合の約 2 倍となる。したがって、ブロック内の画素間の相関は 1 M テレビ信号のほうが弱いことが想定される。

4 M 白黒テレビ信号に対する 1 画素当りの符号化ビット数は、カラーテレビ信号の場合よりも約 0.5 ビット少ない 3 ビットで良好な画質が得られた。これに対して、1 M テレビ信号の場合、良好な画質を得るためには 3.5 ビットが必要で、4 M 系ほど圧縮が期待できない。

これは前述のような理由により理解できるが、さらに圧縮を可能とするためにアダマール変換符号化に予測符号化を組合せた Differential アダマール変換符号化方式が提案されており、1 M テレビ電話信号を対象として実験した結果、1 画素当り 3 ビットで良好な画質が得ら

写真 1 カラーバー信号のベクトル図

Vector diagrams of color-bar signals of HTPCM.

図3 S_0 近くの標本点TV scan showing picture elements near S_0 .

れたと報告されている⁸⁾。Differential アダマール変換は水平方向にアダマール変換を行い、その出力を1ラインメモリーを用いて垂直方向にDPCMを行った、いわゆる2次元符号化であり、1次元アダマール変換よりも1画素当たり約0.5ビット圧縮比が改善されている。

2.3 Differential PCM (DPCM)

標準PCMで行われるように入力信号自身を符号化して伝送する代りに、DPCMは入力信号の標本値とそれ以前の信号からの予測値との差信号を量子化して伝送する。受信側では受信信号に予測値を加えて元の信号を再生する。テレビ信号には画素間に強い相関があるためにDPCMは適している。

図3は標本点の配置を示している。いま定常信号 $S(t)$ が時刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ で標本化され、それぞれの値を $S_1, S_2, \dots, S_n$ とする。このとき次の標本値 S_0 の線形予測値 $\hat{S}_0$ は次式で与えられる。

$$\hat{S}_0 = a_1 S_1 + a_2 S_2 + \dots + a_n S_n \quad (3)$$

ここで $a_1, a_2, \dots, a_n$ は定数である。

$\hat{S}_0$ が線形予測器で作られると、 S_0 と $\hat{S}_0$ の差、すなわち、

$$e_0 = S_0 - \hat{S}_0 \quad (4)$$

が量子化されて伝送される。定数 $a_1, a_2, \dots, a_n$ は送信信号 e_0 の平均2乗予測誤差が最小となるように決定される。

このように任意の画素から S_0 を予測することができ

るが、標本化されたテレビ信号を1次のマルコフ系列と考えると、 $\overline{e_0^2}$ を最小にする S_0 の予測は S_1 から S_0 を予測する前置予測であることが明らかにされている。このときの予測係数 a_1 は1に近いことが示されているので⁹⁾、実験装置では a_1 が1の前置予測方式を採用している。

画質に関しては4MHz 白黒テレビ信号を8MHzで標本化後1画素当たり4ビットで符号化するとcontouring noiseやedge busyness等のまったく目につかない原画相当の画質となった。3ビット符号化ではedge busynessが多少目立つが、標準PCMの5ビット相当以上の良好な画質となった。

2.4 Delta Modulation (ΔM)

ΔM は、入力標本値とその予測値との大小を比較器で比較後、0または1を発生して1ビット伝送を行うために、DPCMとくらべて装置は簡単となるが、標本化周波数をPCM方式よりもかなり高くしなければならぬ。

ΔM には特有の雑音としてgranular noiseとoverload noiseがある。前者は量子化にともなう生ずる雑音であり、後者は積分器の量子化ステップと標本化周波

図4 適応型ステップ変化則

Rules of step changes for adaptive ΔM .

図5 PQDMの系統図

Block diagram of PQDM.

数とで決まる一定の勾配よりも入力勾配が大きくなった場合に積分器の出力が追従できずに生ずる雑音である。標本化周波数をあまり高くしないで両者の雑音を少なくする方法として、量子化ステップの大きさを入力信号の性質に応じて変化させる適応型 ΔM がある。

実験用装置として、線形および適応型量子化特性を有する装置を試作し、適応型ステップ変化則は図4に示されるものを用いた。

4 MHz 白黒テレビ信号を対象として ΔM の標本化周波数を A/D 変換器のその3倍、すなわち 32.1 MHz に選び、画質評価を行った。量子化ステップが 32 レベルの線形 ΔM ではエッジ部分が overload noise の影響により若干ばやけて、偽輪郭が多少認められて、granular noise が背景雑音として少し目についた。量子化ステップが最小レベルに換算して 98 レベルの適応型 ΔM では、edge busyness がほんのわずかに認められたが偽輪郭は認められず、線形 ΔM よりも画質の改善が確認された。

3. Picture Quality Distortion Measurement (PQDM)

HTPCM, DPCM および ΔM 等の符号化装置はデジタル演算を行うので、PQDM もデジタル処理を行わなければならない。そのために入力テレビ信号を DPCM の場合 8 MHz, HTPCM の場合 10.7 MHz, ΔM の場合 32.1 MHz の標本化周波数でそれぞれ標本化後、符号化し、PQDM はそれと処理画像信号との差信号を計算する。 ΔM の標本化周波数は A/D 変換器のその3倍に選んであり、PQDM は A/D 変換後の同一標本値と3つの連続した ΔM の出力と比較する。

この差信号は被測定装置により生ずる誤差に相当するので、これが小さいほど被測定装置による処理画像は原画像に忠実であるといえる。次に差信号は復号されてモニターに表示され、その実効値はレベル計で測定される。系統図を図5に示す。

図6 SPCM の差分誤差電力

Difference error measured by PQDM for SPCM.

図7 HTPCM の差分誤差電力

Difference error measured by PQDM for HTPCM.

4. 実験結果

入力信号源として各種の写真やテスト信号を用いて前述の各方式により信号処理を行い、PQDM を用いて差信号を求め、その実効電力値をレベル計にて測定した結果を図6～図9に示す。

図6は標準 PCM, 図7は HTPCM, 図8は DPCM

図 8 DPCM の差分誤差電力

Difference error measured by PQDM for DPCM.

図 9 ΔM の差分誤差電力Difference error measured by PQDM for ΔM .

図 9 は ΔM に対してそれぞれ求めたものである。標準 PCM に対する差分誤差電力は各種の写真やテスト信号に対してほとんど一定で、符号化ビット数の増加に対して約 6 dB ずつ減少している。これに対して、HTPCM DPCM および ΔM のそれは、テスト信号に対してはある周波数特性が存在しているが、画像の構成内容にはあまり依存していない。

写真 2 は各種の処理画像を示している。(b)から(g)

は各符号化装置の出力画像であり、(h)から(o)はこれらの出力画像と(a)の標準 PCM によりデジタル化された原画像との差信号を示している。(h)および(i)の標準 PCM では contouring noise が明らかにわかり、(j)~(k)の HT-PCM では変換誤差信号は画面上にほとんど一様にばらまかれている。これに対して(l)~(m)の DPCM および(n)~(o)の ΔM では誤差成分は変化の激しいエッジ部分に集中している。(n)の線形 ΔM では量子化が荒いため contouring noise がわずかに存在している。これらの結果から、PQDM は各種の符号化系の特徴を示すことがわかるであろう。ただし、各符号化の特徴を強調するためにモニターの輝度を上げてあるので、これら PQDM の出力画像は誤差の絶対値を示しているわけではない。

5. む す び

画像信号の帯域圧縮効果を調べる目的で、HTPCM, DPCM および ΔM を、またこれらの符号化装置によって処理された画像の特徴を調べるために PQDM をそれぞれ試作した。そして、この PQDM を用いてこれらの符号化装置によって処理された画像を実時間で測定した。

実験の結果、PQDM は各符号化装置の特徴をそれぞれ示すことを確認した。すなわち DPCM および ΔM で生ずる誤差成分は変化の激しいエッジ部分に集中しており、また HTPCM のそれは画面全体にばらまかれており、これは理論的に考えられることと一致している。さらに各種の画像に対して測定された差分誤差電力は、モニター上に示された画質にほぼ相対的に比例することが確認され

た。これより PQDM の測定結果が処理画像の主観評価に対応することがわかるであろう。

さらに、任意の画像に対して主観評価を定量化できるように、眼の視覚特性に対応するフィルター等を用いて PQDM による処理画像の評価の確立を進めたい。

終りに、日頃御指導いただく当社開発本部通信機器研究所 増田所長に深く感謝いたします。

(昭和 49 年 4 月 30 日受付)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

(j)

(k)

(l)

(m)

(n)

(o)

写真 2 処 理 画 像
Processed pictures.

[参 考 文 献]

- 1) 榎本, 芝田: 直交変換によるテレビジョン信号の PCM 方式, テレビ誌, **24**, 2 (1970)
- 2) P. A. Wintz: Transform Picture Coding, Proc. IEEE, **60**, 7 (1972)
- 3) T. Ohira, et al.: Picture Quality of Hadamard Transform Coding Using Nonlinear Quantizing for Color Television Signal, 5th Walsh Functions Symposium (Apr. 1973)
- 4) P. Kaul: Differential PCM Encodings of TV Signal Using a Digital Loop, ICC 1970
- 5) M. R. Winkler: Pictorial Transmission with HIDM, 1965 IEEE Int'l Conv. Record, Part I (1965)
- 6) T. Ohira, et al.: Comparison of Hadamard Transform Coding and DPCM based on Difference Error Signals from Original Pictures, ICC 1973
- 7) 吹抜ほか: 二次元縦続型アダマール変換によるテレビ電話信号の符号化, 信学会通信方式研資, CS71-135(1972. 3)
- 8) 有沢ほか: Differential Hadamard 変換による画像信号符号化の実験, 信学会通信方式研資, CS73-99(1973. 11)
- 9) J. B. O'Neal, Jr.: Predictive Quantizing Systems for the Transmission of Television Signals, BSTJ, **45**, 5, May/June (1966)