画像記録のための信号処理(3)

—変復調と再生信号—

正会員 山 光 長寿郎[†] 池 谷 章[†]

1. ま え が き

画像情報をデジタル化すると、そのデータ量は膨大なものになる。これを何らかの媒体に記録するためには、高性能な記録媒体やヘッドの開発が必要であるとともに、種々の信号処理が必要である。

本講座では、画像記録のための信号処理として、これまでに、画像信号のデジタル化、高能率符号化、誤り訂正技術などについて解説してきた。

今回は、デジタル記録の本質ともいえるべき、変復調（記録符号化・復号化）、波形等化について記す。また、最尤復号についても言及する。

2. 記録再生系概要

図1に、デジタル記録再生装置の記録再生系のブロック図を示す。

$\{a_k\}$ は符号系列であり、例えば、映像信号を高能率符号化し誤り訂正符号を付加したビット列を表す。これを変調器を通して記録系列 $\{b_k\}$ に変換する。こ

の $\{b_k\}$ を、記録回路と記録ヘッドをなかだちにして記録媒体上に記録する。

再生された信号 $\{y_k\}$ は、記録再生系の高域低下から波形干渉を生じているので、等化器を通して波形干渉を除去し、判別可能な波形系列 $\{z_k\}$ とする。

これを雑音低減のための処置をほどこして復号器に入力し、2値のデータ ($\{b_k\}$ に相当) に変換する。そして、復調器を通して元の符号系列 ($\{a_k\}$ に相当) に変換する。

3. ブロック化と変調方式

3.1 記録ブロック構成

データをテープなどの記録媒体に記録する際には、ビット列をいくつかの単位に区切る必要がある。

1トラックに入る情報量は限られているので、まず、ビット列をトラック単位に区切る。例えば、画像1フレームのデータを数トラックに分割する。

トラックの中では、先頭に同期信号 (SYNC) を持ったブロック (SYNCブロック) に区切られる。再生時

図1 デジタル VTR の記録再生系

[†] 松下電器産業株式会社

“Digital Image Recording Technology — Toward Multimedia Era —”; (4) Signal Processing Technology for Video Recording (3)” by Chojuro Yamamitsu and Akira Iketani (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Osaka)

図2 記録ブロック構成の例

には、この同期信号をもとにして再生処理が行われる。

なお、同期エラーは大量のエラーを招くので、再生処理において特に注意が必要である¹⁾。

図2に、各トラックの記録ブロックの例を示す。映像信号の他にオーディオ信号やその他の付加情報を記録し、それぞれの間にはギャップが設けてある。

3.2 変調方式に求められる条件

映像信号を高効率符号化し誤り訂正符号を付加したデジタル情報を、記録信号として都合の良い形に変換するのが変調である。記録信号としてふさわしい条件として、以下のことがあげられる。

(1) 直流および低周波成分が少ないこと

直流・低周波成分が多いということは、同一符号が連続することであり、ランレングスが長くなってしまふ。これは(3)で後述するように都合が悪い。

また、特にVTRなどの磁気記録の場合には、磁気ヘッドと記録再生回路との信号の受け渡しには回転トランスが用いられるため、直流成分は記録再生できない。さらに、アジマス記録やオーバーライト記録をする場合には、隣接トラックからのクロストークノイズや消え残りノイズが低周波領域に発生する。したがって、直流成分および低周波成分は少ない方が望ましい。

(2) 最短記録波形が長いこと

最短記録波長が短いと、隣接ビットからの波形干渉が大きくなるので、波形等化量を大きくしなければならず、それによって等化ノイズが増大する。また、波形等化しきれない場合もありうる。したがって、最短記録波長は長い方が望ましい。

(3) ランレングスが短いこと

図3 NRZI・インタリーブドNRZI変調

ランレングスが長いと、再生信号からクロックを生成する際に、そのもととなる信号が少なくなるため、生成するクロック信号にジッタが大きくなり、復号誤りの原因となる。

(4) 検出窓幅が広いこと

検出窓幅が広ければ時間方向の位相余裕が増し、再生のジッタの影響を受けにくくなる。

3.3 変調方式の使用例

(1) NRZI, インタリーブドNRZI²⁾³⁾

図3は、NRZI またはインタリーブドNRZI 変調のブロック図である。⊕は排他的論理和を示す。

ビット間隔を T_b とすると、図3中の遅延器の遅延量が T_b の場合がNRZI, $2T_b$ の場合がインタリーブドNRZIである。特に、インタリーブドNRZIは、家庭用デジタルVTRなどに用いられている。

入力 $\{a_k\}$ と出力 $\{b_k\}$ の間に、以下のような関係をもたせることによって実現できる。

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1} \quad (1)$$

($i=1$: NRZI, $i=2$: インタリーブドNRZI)

(2) MFM⁴⁾, M²符号⁵⁾

MFM符号は、入力 $\{a_k\}$ が「1」の場合、ビット期間の中央で出力符号の極性が反転し、「0」の場合はそれが2個以上連続するときに限りビットの境界部で符号の極性が反転する。MFM符号は主にハードディスクに用いられている。

M²符号は、通常はMFMの符号則に従い「0」の後に「1」が偶数個続く場合に、最後の「1」を無視する。これによって直流成分がなくなる。

M²符号は放送用のD2VTRに採用されている。

(3) ブロック符号

入力されるデータを m ビットごとに区切り、これを n ビットのデータに変換して ($m \leq n$)、直流および低周波数成分の少ないビット列に変換するのがブロック符号化である。 m としては、量子化ビット数に合わせて8がとられることが多い。 n としては9, 10, 12, 14などが提案されている。例えば、8-10変換符号はDATに採用されている⁶⁾。

図 4 記録符号の例

図 4(a)に、ここまで述べた変調方式のうち、いくつかの記録波形の例を示す。また図 4(b)に、いくつかの変調方式の記録符号のスペクトラムを示す。このように低周波成分を減衰させている。

4. 波形等化と信号検出

4.1 再生系の線形等価モデル

図 5 に、再生系の線形等価モデルを示す。

記録媒体(テープ、ディスク等)から再生される理想再生系列が $\{x_k\}$ であり、記録再生系の録再特性 $H(f)$ を通って、高周波成分が減衰した再生系列に変化する。この再生系列に雑音系列 $\{n_k\}$ を加えることにより、再生信号系列 $\{y_k\}$ が得られる。この再生信号系列 $\{y_k\}$ に波形等化を行うことにより等化系列 $\{z_k\}$ が得られ、さらに、後述するパーシャルレスポンスのような雑音低減のための回路を通ることにより検出系列 $\{p_k\}$ が得られる。これを LPF を通した後、復号器に入力する。

4.2 等化と雑音

記録媒体上に記録された信号系列 $\{b_k\}$ は、記録再生系において劣化や雑音がないと仮定すると、理想的な再生系列 $\{x_k\}$ を生成する。理想再生波形のピークレベルを A とすると、理想再生系列 $\{x_k\}$ は VTR のよ

図 5 再生系の線形等価モデル

うな磁気記録の場合では

$$x_k = A(b_k - b_{k-1}) \quad (2a)$$

となり、光ディスクのような光記録の場合では

$$x_k = Ab_k \quad (2b)$$

となる。

理想再生系列 $\{x_k\}$ は、記録再生系の線形特性 $H(f)$ を通って高周波成分が減衰した再生系列に変化する。この再生系列に雑音系列 $\{n_k\}$ が加わった $\{y_k\}$ が、再生信号系列として観測される。ここで、 $H(f)$ のインパルス応答を $\{h_i\}$ とすると、 $\{y_k\}$ は次式で与えられる。

$$y_k = \sum_{i=-L}^L x_{k-i} h_i + n_k \quad (3)$$

ただし、インパルス応答は $\pm L$ サンプルの有限応答とする。

理想再生系列 $\{x_k\}$ の周波数特性を $X(f)$ 、雑音系列の周波数特性を $N(f)$ 、再生系列 $\{y_k\}$ の周波数特性を $Y(f)$ とすると

$$Y(f) = H(f)X(f) + N(f) \quad (4)$$

となる。

信号の高周波成分が減衰した再生系列 $\{y_k\}$ は、波形干渉により信号レベルが低下する。また、信号レベルの低下の度合いが、前後の波形によって変化する。このため、ヘッドアンプ出力の再生信号 ($\{y_k\}$ に相当) からは、直接アイパターンが開いた様子を見ることはできない。

波形等化特性 $EQ(f)$ は、波形干渉の原因である高域減衰特性 $H(f)$ を補正するためのものであり、次式の関係がある。

$$EQ(f) = 1/H(f) \quad (5)$$

再生信号特性 $Y(f)$ に等化特性 $EQ(f)$ を掛けることによって、等化出力系列 $\{z_k\}$ が得られる。

$$\begin{aligned} Z(f) &= Y(f)EQ(f) \\ &= (X(f)h(f) + N(f))/H(f) \\ &= X(f) + N(f)/H(f) \end{aligned} \quad (6)$$

上式からわかるように、波形等化によって理想的な再生信号 $\{x_k\}$ が復元される。一方、雑音に関しては、

再生時点での雑音特性 $Z(f)$ が、波形等化によって $N(f)/H(f)$ になる。 $H(f)$ が高域減衰特性であるので、 $1/H(f)$ は高域強調特性になる。一般に $N(f)$ は周波数特性的にはフラットと見なしてよいので、波形等化後の雑音は高域強調型となり、その電力は次式で与えられる。

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \{N(f)/H(f)\}^2 df \quad (7)$$

記録再生特性 $H(f)$ は、孤立再生波形を分析することによって知ることができる。孤立再生波形とは、テープ上の単一磁化反転に対する応答波形で、ここでは $h(t)$ とする。孤立再生波形としては Lorentz 波形を用いる場合が多く、比較的現実系に適している。Lorentz 波形はパルス半値幅で定義される。パルス半値幅とは、孤立再生波形のレベルがそのピーク値 A の半分になる時間 $T_{1/2}$ であり、この時間 $T_{1/2}$ をビット間隔 T_b で正規化した値を正規化半値幅 k とする。このとき、Lorentz 波形 $h(f)$ は(8)式で与えられる。また、 $H(f)$ はこの逆フーリエ変換により得られ、(9)式となる。ただし、 $f_b = 1/T_b$ はビット周波数である。

$$h(t) = \frac{A}{1 + (2kt/T_b)^2} \quad (8)$$

$$H(f) = \frac{\pi A k}{f_b} e^{-\pi A k |f/f_b|} \quad (9)$$

4.3 パーシャルレスポンス⁷⁾

パーシャルレスポンスは、狭帯域の基底帯域伝送のために 1960 年代に開発された技術であり、インタリーブ NRZI 記録とパーシャルレスポンス・クラス IV との組合せが、高密度記録に適した信号検出方式として有効であることが知られている。

パーシャルレスポンスは、いろいろな種類があるが、PR(1), PR(1, -1) のように表すことが多い。PR に続くかっこ内の数字は、単一パルスを記録したときの再生応答波形を示す。

磁気記録の場合を例にとると、磁気記録再生系の微分特性により、4.2 節で述べた等化のみを行った場合は、PR(1, -1) となる。また積分検出を行った場合は、微分特性を打ち消すので PR(1) である。

磁気記録に多く用いられるパーシャルレスポンス・クラス IV は PR(1, 0, -1) である。これは次式(10)のように、再生波形を 1 クロック時間分遅延させた信号を現在の信号に加算させることによって得られる。俗に「1+D」と呼ばれるゆえんである。ただし、 D は 1 クロック時間分の遅延を表す演算子(遅延演算子)である。

$$p_k = z_k + z_{k-1} \quad (10)$$

パーシャルレスポンス系列 $\{p_k\}$ の周波数特性を $P(f)$ とすると

$$\begin{aligned} P(f) &= 2 \cos(\pi f/f_b) Z(f) \\ &= 2 \cos(\pi f/f_b) \left\{ X(f) + \frac{N(f)}{H(f)} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

である。

(2)式と(10)式から、 $\{p_k\}$ のノイズを除いた信号成分 p'_k は次のように求められる。ただし、簡単のために $A=1$ とした。

$$\begin{aligned} p'_k &= x_k + x_{k-1} \\ &= (b_k - b_{k-1}) + (b_{k-1} - b_{k-2}) \\ &= b_k - b_{k-2} \end{aligned} \quad (12)$$

(12)式から、ノイズがない場合、 p'_k の絶対値は、 $b_k \neq b_{k-2}$ のとき 1, $b_k = b_{k-2}$ のとき 0 となる。つまり、 $|p'_k|$ が 0 か 1 かという判別は、 b_k と b_{k-2} が等しいか等しくないかの判別と等価である。等しければ 0, 等しくなければ 1 という演算は排他的論理和であるから、 $|p'_k|$ の 2 値判別結果は b_k と b_{k-2} との排他的論理和に等しい。したがって、次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} |p'_k| &= b_k \oplus b_{k-2} \\ &= (a_k \oplus b_{k-2}) \oplus b_{k-2} \\ &= a_k \oplus (b_{k-2} \oplus b_{k-2}) \\ &= a_k \end{aligned} \quad (13)$$

つまり、絶対値 $|p'_k|$ の 2 値判別結果は変調前の符号 a_k に等しい。このように、パーシャルレスポンス・クラス IV を用いても正しく $\{a_k\}$ が復号できる。

ここで、パーシャルレスポンス・クラス IV による雑音の増減について考察する。

パーシャルレスポンス・クラス IV を行わない場合の雑音電力 P_2 は、(14)式で与えられ、また、パーシャルレスポンス・クラス IV を行った場合の雑音電力 P_4 は(15)式で与えられる。ただし、 N_0 は白色雑音の電力である。

$$\begin{aligned} P_2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{N(f)}{H(f)} L(f) \right\}^2 df \\ &= N_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{f_b}{\pi A k} e^{\pi A k |f/f_b|} L(f) \right\}^2 df \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P_4 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{N(f)}{H(f)} P(f) L(f) \right\}^2 df \\ &= 4 N_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \frac{f_b}{\pi A k} \cos(\pi f/f_b) e^{\pi A k |f/f_b|} L(f) \right\}^2 df \end{aligned} \quad (15)$$

(14)式および(15)式における $L(f)$ は低域通過型フィルタの特性であり、ナイキスト周波数を $f_b/2$, ロールオフ率を β とすると、(16)式で表される。

図 6 記録密度と雑音電力

$$\begin{aligned}
 L(f) &= \frac{1}{f_b}, \quad \frac{f}{f_b} < \frac{1+\beta}{2} \\
 &= \frac{1}{2f_b} \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{\beta} \left(\frac{f}{f_b} - \frac{1}{2} \right) \right) \right], \\
 \frac{1-\beta}{2} &\leq \frac{f}{f_b} < \frac{1+\beta}{2} \\
 &= 0, \quad \frac{1-\beta}{2} \leq \frac{f}{f_b} \quad (16)
 \end{aligned}$$

(16)式を(14)式および(15)式に代入し、ロールオフ率 $\beta=0.3$ として求めたそれぞれの雑音電力を図6に示す。

図6でわかるように、正規化半値幅 k が小さい場合は、パーシャルレスポンス・クラスIVを行わない方が雑音電力は小さい。一般に、パーシャルレスポンス・クラスIVは、雑音電力を低減できる方法といわれているが、場合によっては必ずしもそうではない。 $k < 1.5$ となるようなテープ・ヘッドの磁気特性が高周波領域で優れている場合や、線記録密度が大きい場合などでは、パーシャルレスポンス・クラスIVを行うことは雑音電力を増大させることになり、誤り率を悪化させるもととなる。記録密度によって検出方法を選択することが必要である。

4.4 最尤復号⁸⁾⁹⁾

通常、アナログ再生信号からデジタルデータへの復号を行う場合は、再生信号をある閾値と比較し、その大小によって「0」または「1」に復号する。つまり、その時点だけの再生信号のレベルによって復号する。

それに対して、その前後の時点での情報をも考慮し、確率的に最も確からしい復号系列を選択するのが最尤復号である。

例えば、磁気記録の場合を考えると、理想再生波形 $\{x_k\}$ は3値符号と見なすことができ、しかも冗長度

を含む。つまり、正のピーク値 A が2サンプル続くことはなく、また、負のピーク値 $-A$ も2サンプル続くことはない。この性質を用いれば、誤り検出機能を持つことが可能となる。この誤り検出機能と雑音の統計的性質に基づいて誤りを訂正する機能を実現するのが、最尤復号法の一つであるビタビ復号法である。

以下、磁気記録の場合を例として、ビタビ復号を簡単に説明する。説明を簡単にするために、記録した符号自体を復号することにし、4.3節に示したパーシャルレスポンスも行わないものとする。これらの制約をはずしても、ほぼ同様の手法でビタビ復号が行える。

2値符号を記録する場合、復号結果は、当然のことながら「0」と「1」の2通りである。

いま、現時点 k で0が記録されていると仮定する。その場合、1クロック前の時点 $(k-1)$ では0か1が記録されている2通りの場合がある。 $(k-1)$ の時点で0が記録されているとすると、その間には磁化反転がないので、ノイズがなければ再生信号は0である。よって、再生信号 z_k そのものがノイズ成分と考えられる。 $(k-1)$ で1が記録されているとすると、1→0の磁化反転があるので、ノイズがなければ再生信号は $-A$ となる。ただし A は再生信号の平均振幅レベル $(0-p)$ である。よって、 $(z_k + A)$ がノイズ成分と考えられる。各時点での事象をそれぞれ独立であると仮定すると、 $(0 \rightarrow 0)$ の確率 $M_k(0 \rightarrow 0)$ は、 $(k-1)$ での0が記録されている確率 $m_{k-1}(0)$ とノイズ成分 z_k が生じる確率 $p(z_k)$ の積で表され、次式ようになる。

$$M_k(0 \rightarrow 0) = m_{k-1}(0) \cdot p(z_k) \quad (17)$$

同様に $(1 \rightarrow 0)$ の場合は

$$M_k(1 \rightarrow 0) = m_{k-1}(1) \cdot p(z_k + A) \quad (18)$$

である。ただし、 $p(n)$ はノイズ n が生じる確率密度関数であり、例えば白色ガウス雑音であると

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{n^2}{2\sigma^2}} \quad (19)$$

のようになる。ここで、 σ^2 はノイズの分散である。 $(k-1)$ の時点で0か1のどちらが記録されているか決定するには、それぞれの確率 $M_k(0 \rightarrow 0)$ と $M_k(1 \rightarrow 0)$ を比較し、確率の大きい方を選択する。例えば、 $M_k(0 \rightarrow 0)$ が大きかった場合、 $0 \rightarrow 0$ の遷移を選択し、これを残留パスと呼ぶ。このようにして、 k の時点で0が記録されていると仮定した場合の $(k-1)$ 以前の残留パスが決定する。

現時点 k で1が記録されていると仮定した場合も、同様に、 $M_k(0 \rightarrow 1)$ と $M_k(1 \rightarrow 1)$ を比較し、確率の大きい方を選択し、残留パスを決定する。

このようにして、 k 時点で0または1が記録されて

図7 ビタビ復号における残留パスの例

いる確率および残留パスをそれぞれ決定する。図7に残留パスの様子を例示する。復号結果のうち「*」は、まだ残留パスが1本化しておらず、復号結果が確定していないことを示す。現時点 k で残留パスは2本となっており、図7の例では $k-3$ の時点以前は各留パスは1本になっている。このように残留パスが1本であるということは、そこで復号結果が確定したことになる。

実際には、残留パスが確実に1本化するある時間幅を定めておいて、その時間幅だけ前の時点での残留パスを復号値としている。

5. 復 調

5.1 ブロック再構成

再生後、2値データに復号されたビット列は、同期信号をもとにして、各ブロックを確定する。再生時にビット落ちなどが生じた場合も、この時点で落ちたビットを補い、ブロック内のビット数を規定値にする。

5.2 復 調

復号されたデータ列 $\{b_k\}$ に相当)は、変調前の符号系列 $\{a_k\}$ に相当)に復調する必要がある。

NRZI やインタリーブド NRZI の場合は、直接、符号データ列 $\{a_k\}$ に復号するので、特別な復調器は必要ない。

ブロック符号の場合は、変調時に m ビットのデータから n ビットのデータに変換している($m \leq n$)ので、変調の逆変換をして、 n ビットのデータを m ビットのデータに変換することによって復調する。

6. 具体的な例

ここでは一例として、1994年4月に規格化された家庭用デジタルVTRに使用されている信号処理を簡単に説明する¹⁰⁾。

変調は、インタリーブド NRZI をベースにした24/25変調を行っている。24/25変調とは、24ビットごとに1ビットの0または1の符号を挿入し、25ビットにするものである。これにより、ランレングスの制限などを行うとともに、再生時のトラッキングに必要

なパイロット信号も生成している。再生した信号は、波形等化を行った後、パーシャルレスポンス・クラスIVの変換を行って復号する。復号したビット列は、同期信号をもとにして各25ビットの区切りを見つけ、変調時に挿入したビットを除去する。

7. む す び

デジタル記録再生装置の変復調、波形等化、最尤復号について述べた。記録密度の向上とともに、この分野では新しい技術が生まれてきている。今後も記録密度は上がっていくと思われるので、どのような新しい技術が生まれるか楽しみである。

(参 考 文 献)

- 1) C. Matsumi, T. Mizushima, A. Iketani: "A Study on Detection of Blocks for Digital VCR", IEEE Trans. Consum. Electron., **40**, 3, pp. 257-262 (Aug. 1994)
- 2) H. Kobayashi, D. T. Tang: "Application of Partial-Response Channel Coding to Magnetic Recording Systems", IBM J. Res. & Develop., **14**, 4, pp. 368-375 (July 1970)
- 3) S. Nagasawa, K. Yokoyama, H. Katayama: "A Study on Detection Methods of NRZ Recording", IEEE Trans. Magn., **MAG-16**, 1, pp. 104-110 (Jan. 1980)
- 4) A. M. Patel: "Zero-Modulation Encoding in Magnetic Recording", IBM J. Res. & Develop., **19**, 4, pp. 366-378 (July 1975)
- 5) J. C. Mallinson, J. W. Miller: "Optimal Codes for Digital Magnetic Recording", The Radio and Electronic Engineers, **47**, 4, pp. 172-176 (Apr. 1977)
- 6) The DAT Conference Standard for the Digital Audio Tape Recording System, Electronic Industries Association of Japan (June 1987)
- 7) E. R. Kretzmer: "Generalization of a Technique for Binary Data Transmission", IEEE Trans. Commun., **COM-14**, 1, pp. 67-68 (Feb. 1966)
- 8) H. Kobayashi: "Application of Probabilistic Decoding to Digital Magnetic Recording Systems", IBM J. Res. & Develop., **15**, pp. 64-74 (Jan. 1971)
- 9) M. J. Ferguson: "Optimal Reception for Binary Partial Response Channels", BSTJ, **51**, 2, pp. 493-505 (Feb. 1972)
- 10) Specifications of Digital VCR for Consumer-Use, HD-Digital VCR Conference (Apr. 1994)

やまみつ ちようじろう

山光 長寿郎 昭和43年、広島大学工学部電子工学科卒業。同年、松下電器産業(株)に入社。以来、映像信号処理、デジタルVTR等の開発に従事。同社映像研究所所長等を経て、現在、開発本部知的財産権部部長、正会員。

いけだに
池谷 章

昭和54年、愛媛大学工学部電子工学科卒業。昭和56年、愛媛大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。同年、松下電器産業(株)に入社。以来、デジタルVTRの開発に従事し、現在に至る。