パーシャルレスポンス
プリコーダの役割

正会員 三田 誠一†

キーワード：パーシャルレスポンス、プリコーダ、ビタビ復号、PRML

図1 整数比を持つ符号間干渉の例

図2 整数比を持つ符号間干渉の復号上の問題点

最近、磁気ディスクあるいは光ディスクでパーシャルレスポンス(Partial Response: PRと略す)処理が多用されている。プリコーダは、PRにおいてビット毎の復号時に生じる誤り伝搬を防止する。まず本稿では、プリコーダの構成と効果を明らかにする。次に、実際の磁気ディスク用PRの構成を述べる。実際には、PR処理とビタビ復号器を併用する場合が多い。この場合のプリコーダの役割を考える。さらに、PRと畳込み誤り訂正符号を併用する場合のプリコーダの役割も併せて述べる。

議論を簡単にするために、ここでは伝送系あるいは記録系は“1”あるいは“0”の2値(2元)信号を取り扱うものとする。まず図1で、PRを簡単に説明する。図1(a)に示す1ビットのパルスを伝送すると、一般に伝送系の周波数特性の劣化により波形が広がる。ここで、PRはまず第一に波形等化器により、図1(b)に示すように、符号間干渉が整数比をなすように成形する。

この整数比の値や極性の選択によって、PR本来の意味である周波数スペクトラムを偏らせる(伝送すべきチャンネルに適合させる)ことができる。この周波数スペクトラムは5クラスに分類されている¹⁾。低域通過フィルタの特性を有するクラス1あるいは2は光ディスクで、帯域通過特性を有するクラス4は磁気ディスクで使用されている。なお、図1(b)の例はPRクラス2の応答に対応する。このように整数比を持つ応答にすれば、判定時点において多値レベルになるが、復号可能である。

復号は、図2に示すように、同じ整数比を有する逆回路を使用すれば、原理的に可能である。しかし、この場合の問題は、図2下段に示すように復号器に誤りを持つ信号が入力されると、これが長く伝搬することである。この点は、復号回路が帰還構成になっている

ことから容易に理解できる。この誤り伝搬の対策は、図2のPRチャンネルと復号処理が互いに逆特性になっているから、順番を入れ替えることで可能になる。しかし、この場合には信号のレベル数が無限になるため、実用に供せない。

ここで、PRを実用可能にした第2のアイデアは、図3に示すように、全体構成をMod.2の演算に置換することであった。このようにすれば、復号器のレベル数を元の2値に維持したままで、誤り伝搬のない伝送ができる。

次に、この過程を図3により説明する。まず、Mod.2演算(構成要素は“1”と“0”)は2元の四則演算が可能な有限体であることを注意する。図3のプリコーダとチャンネルAは、図2に示したPRチャンネルと復号処理の順

図3 パーシャルレスポンスのプリコーダの構成

† 豊田工業大学 情報通信研究室

“Effects of Partial Response Precoder” by Seichi Mita (Toyota Technological Institute, Nagoya)

$$\text{PR4} : (1-D)(1+D) = 1-D^2 \\ = 1+D^2 \pmod{2}$$

$$\text{EPR4} : (1-D)(1+D)^2 = 1+D-D^2-D^3 \\ = 1+D+D^2+D^3 \pmod{2}$$

$$\text{EEPR4} : (1-D)(1+D)^3 = 1+2D-2D^3-D^4 \\ = 1+D^4 \pmod{2}$$

図4 磁気ディスク用パルシャルレスポンス多項式

図5 磁気ディスク用パルシャルレスポンスのプリコーダ

番を入れ替えたまま Mod. 2 の演算に置換したものである。すなわち図3では、Mod. 2 の演算則(すなわち、 $1+1=0$)により係数2の回路が省略できる。また、図3のチャンネルBはチャンネルAの特性を保存したまま、元のアナログチャンネルの形態を残したものである。

線形加算を前提とすれば、チャンネルAとチャンネルBは等価であることが見て取れよう。すなわち、チャンネルBに示す係数2で生じる項も、後のMod. 2の演算則により0になる。結果として、偶数レベルは“0”に、また奇数レベルは“1”に復号すればよいことなどがわかる。

図4、図5に、磁気ディスクで実際に使用されているPRの係数とプリコーダの構成を示す。クラス4に分類されるPR(1, 0, -1), PR(1, 1, -1, -1)やPR(1, 2, 0, -2, -1)等の整数係数を有するPRが、PRML, Extended PRML (EPRML), Extended EPRML (EEPRML) などと呼ばれ、多用されている。

以上は、PRチャンネルで、ビット毎の復号を行う場合について述べた。次に、ビタビ復号を行う場合について考

察する。図6上段にPRとビタビ復号器を組合せた構成例を示す。ビタビ復号を採用する場合には、

- (1) 符号間干渉が整数比をなすこと
- (2) プリコーダを使用するという制約は原理的に必要でない。

これにもかかわらず、磁気ディスクで、整数係数を持つPRを使用するのは、ビタビ復号回路の構成が容易になるからである。PRチャンネルとビタビ復号器の組合せで、データの復号動作ができる。このため、プリコーダは、ビタビ復号時には、誤り伝搬の改善よりは、むしろ極性情報を有するNRZ信号を極性反転位置に情報を有するNRZI(あるいはインタリーブドNRZI)信号に変換するために用いられる。すなわち、プリコーダに $1/(1+D^2)$ の特性を持たせ、復号時にこれと対をなすポストコーダと呼ばれる $(1+D^2)$ なる逆回路を挿入する。これにより、ヘッド巻き線の方向や信号処理過程での信号極性を気にすることなく、チャンネルLSIを構成できる。

さらに、磁気ディスクの同じ記録跡を周波数特性の劣化に応じて、いずれのPRでも復号できる。ビタビ復号器の誤り率は実質的に最小ユークリッド距離と、その誤り長さの発生確率により求められる。PRMLについては、プリコーダの有無でビット誤り率は変わらない²⁾。また、EPRMLやEEPRMLについても、その主たる誤りは1ビットか3ビット誤り³⁾であり、図6上段に示すプリコーダ構成により、ビット誤り率はファクタの範囲(数倍)で増減

図6 パルシャルレスポンスチャンネルの実際
プリコーダの役割：エラー伝搬の抑制とPRチャンネルの畳込み特性の解消

があるのみである。

最近、誤り訂正技術の分野で、畳込み符号を使用するTurbo codingが訂正能力の高さの点で注目されている。図6下段に、畳込み符号とPRを併用する例を示す。本来、自然の畳込み符号を構成しているPRチャンネルに従来の畳込み符号を適用すると、ビタビ復号をする際の状態数が両者の積になり、極端に増加する。このため、プリコーダをPRチャンネルに適用し、PRチャンネルの畳込み特性を解消(平坦化)する。すなわち、入力1ビット信号と波形上の1点を1対1に対応させる。これはビット毎の復号が可能になることから容易に理解される。このようにして畳込み符号をPRチャンネルに適用することが試みられている。

(2000年2月27日受付)

【文 献】

- 1) E. R. Kretzmer: "Generalization of a Technique for Binary Data Transmission", IEEE Trans. Commu., 14, 1, pp. 67-68 (1966)
- 2) H. Kobayashi: "Application of Probabilistic Decoding to Digital Magnetic Recording Systems", IBM J. Res. & Dev., 15, 1, pp. 65-74 (Jan. 1971)
- 3) S. Mita, H. Sawaguchi, T. Nishiya and N. Kobayashi: "Modified EEPRL with 16/17 (3; 11) MTR Code and Cyclic Redundancy Check Code for High Density Magnetic Recording Channels", IEICE, E82-C, 12, pp. 2201-2208 (Dec. 1999)

三田 誠一

1971年、京都大学大学院修士課程修了。同年、日立製作所中央研究所入所。1991年、ストレージシステム事業部勤務。1999年、豊田工業大学情報通信研究室勤務、現在に至る。これまで主に記録装置の信号処理の研究および開発に従事。