

## 多重分岐バス伝送を可能とする 相関受信法の実験的検討

岸本英生                      杉田恵三

NTT 通信網総合研究所

LAN等に多数の端末が接続されようになり、端末の移動、増設の容易な柔軟な端末配線系が要求されている。比較的配線の柔軟性があるバス配線において、分岐先からの分岐、1分岐点での複数分岐等を許容できれば、非常に柔軟性のある配線が可能となる。このような多重分岐バスでは、分岐点での反射の影響により、波形の歪が大きくなり、受信が困難となる。この波形歪に強い受信方式として、予め歪んだ受信波形を記憶し、これと、受信波形を比較して復号する相関受信方式をすでに提案した。

本報告では、この復号アルゴリズム、トレーニング法、受信実験結果について述べ、トレーニング時間が非常に短く、短パケットの伝送に適用可能なことを示す。

### Study of a Correlation Receiver for Transmission on Bus with Multiple Bridge Taps

Hideo Kishimoto Keizo Sugita

NTT Telecommunication Networks Laboratories  
1-2356 Take Yokosuka-Shi Kanagawa 238-03 Japan

Flexible wiring ability is important to easily change terminal setting places. If bridge taps can be connected freely on a bus, terminal setting becomes very easy. However such a transmission system strongly distorts received waveform.

This paper describes the decode algorithm and training method of a correlation receiver. Decode experiments indicate that this correlation receiver can decode strongly distorted waveforms with a very short 19-to-36-bit training. Therefore, with this receiver, short packets on a LAN can be transmitted efficiently.

## 1. まえがき

半導体技術の進歩により、ワークステーション、パソコンが普及し、分散処理化が進んでいる。これに伴い、ネットワークも、ホスト対端末をスター状に1対nで接続する構成から、パソコン、ワークステーション間をn対nで接続するバス、リング構成に変化している。さらに、端末の低価格化により、1人1台を占有できる時代になりつつあり、ネットワークに接続する端末数が増加している。このような端末数の増加に従い、端末の設置、移動、増設時の配線問題が大きくなっている。

端末の設置、移動、増設の容易な配線系として、電力配線のように、分岐先からの分岐、1点からの複数分岐を許容する配線（以後、多重分岐バスと呼ぶ）が考えられる。しかし、この多重分岐バスでは、分岐点での波形の反射が大きくなり、受信波形の歪が増加するため受信が困難となる。受信波形の歪に強い受信法として、予め、歪んだ受信波形を記憶し、これと受信波形を比較して復号する相関受信方式をすでに提案した。<sup>1)</sup>

本報告では、この相関受信法の復号アルゴリズム、トレーニング法について述べ、受信実験により、本受信法がトレーニング時間が短く、短パケットの伝送に適することを示した。

## 2. 多重分岐バス

従来のLANでは、配線に関する制約が多く、端末の移動、増設等が不便であった。例えば、図1のように、メインバスから分岐する支線の長さ、支線接続間隔等の制約が厳しく、端末を移動、増設する場合、メインバスの敷設を変更する必要がある場合もあり、端末の移動、増設が容易でない。これに対し、図2のように、1分岐点での複数分岐、分岐先での分岐（多重分岐）ができれば、端末の設置、移動、増設が非常に容易になる。

しかし、多重分岐を許容すると、分岐点での波形の反射が大きくなり、受信波形の歪が増加する

ため、正常な受信が出来なくなる。受信波形の例を図3に示す。この図は、2ビット分の受信波形を重ね合わせて表示したものである。(a)は、分岐を制限した場合である。この場合、アイが開いており、×印の点をサンプリングし、波形がこれより上か下かを判別すれば、容易に送信情報を復号することができる。これに対し、(b)の多数の分岐がある場合、アイが開いていないため、(a)のような方法では復号できない。

## 3. 波形等化技術

図3(b)のようなアイの開いていない波形から送信情報を復号する方法は波形等化とよばれ、各種等化器が、伝送装置、モデム等で使用されている。これは、例えば、伝送系の周波数特性と逆特性のフィルタを通し全体の伝送特性をフラットすることにより、アイの開いた受信波形を再生するものである。

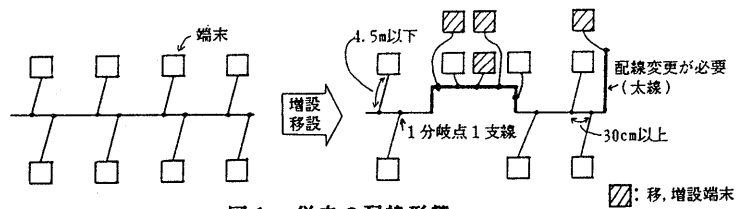


図1 従来の配線形態

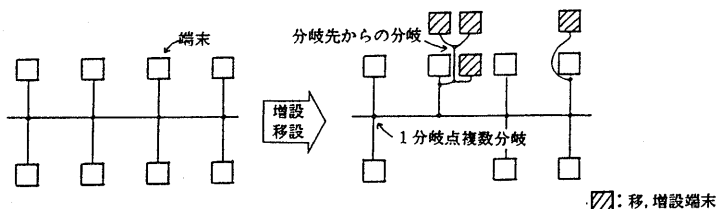
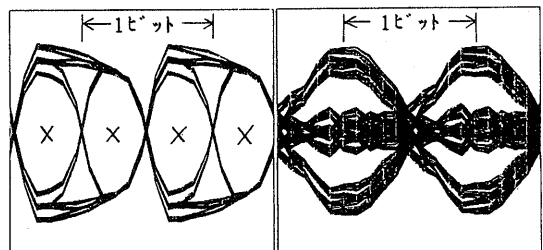


図2 多重分岐の配線形態



(a)分岐を制限した場合 (b)多数の分岐がある場合  
(アイが開いている) (アイが閉じている)

図3 受信波形のアイパターン

このような、波形等化器は、その受信特性を伝送系の伝送特性に合わせるために情報の伝送に先だて、ある特定のビットパターン(トレーニング信号)を送信する。通常このトレーニング信号は、1kビット程度以上必要である。<sup>(1)</sup>これは、長時間情報を伝送する場合には、全く問題とならないが、LANのように、数十~数百ビット程度の非常に短い情報を伝送する場合には、伝送効率を著しく劣化させる。従って、LANでは、トレーニング時間の短い等化技術が必要である。

#### 4. 相関受信方式

トレーニング時間の短い相関受信方式について以下に説明する。

##### 4.1 相関受信方式の原理

相関受信方式は、

- (1)伝送系でどのように波形が歪んでも、送信波形と受信波形の間にはある関係が有るはずである。
  - (2)従って、送信情報に対応する歪んだ受信波形を予め記憶しておき、これと受信波形を比較することにより送信情報を再生する。
- という考えかたである。

実際には、直前の波形が反射等により遅延して次の波形に重なり、符号間干渉が生ずるため、1つの送信情報に対して、複数の比較用波形を用意する必要がある。

図4は、この符号間干渉の様子を示す例である。同じ"0"または"1"の波形でも符号間干渉により、様々な波形として受信される。これを直前のnビットにより分類すると、nが増加するに従い収束する。この収束した波形を基準波形としてもてば、送信情報を復号できることになる。

##### 4.2 相関受信器のトレーニング

相関受信器のトレーニングは、前節で述べた複数の基準波形を記憶することである。送信情報が"1","0"の2値のとき、直前のnビットの符号間干渉があるとすれば、基準波形の数は、 $2 \times 2^n$ 個である。さらに、最初の基準波形を作るために、その前にnビット必要であるから、最短のトレーニング信号長Lは、

$$L = 2 \times 2^n + n \dots [1] \text{ となる。}$$

この符号間干渉を生ずる直前のビット数nとトレーニング長Lの関係を図5に示す。nが5以下であれば、トレーニング信号長は69ビット以下と短く、短い電文を効率良く伝送できる。

このような、最短のトレーニング信号は、図6の状態遷移図から求めることが出来る。この図は、n=3の場合を示す。図中の○は、その中の数値を直前に受信した状態である。矢印は、その横に

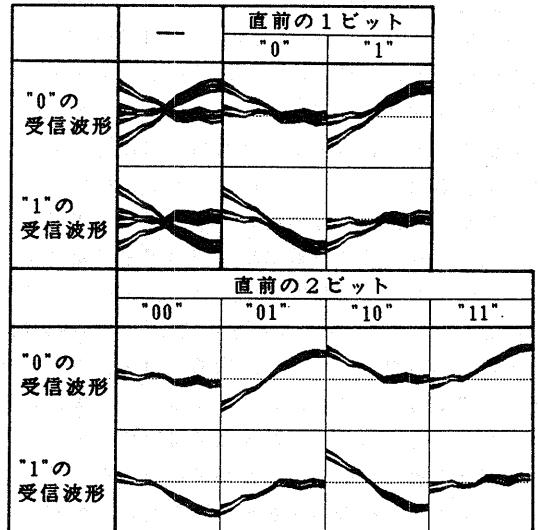


図4 直前のnビットで分類した"0","1"の受信波形

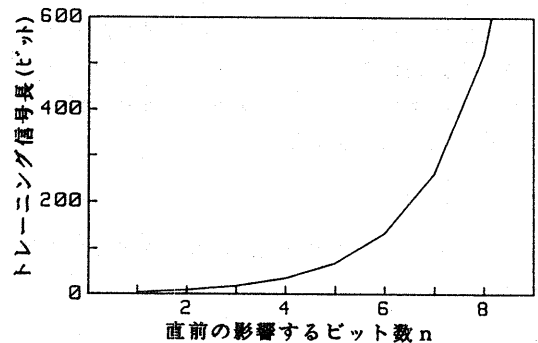


図5 トレーニング信号長

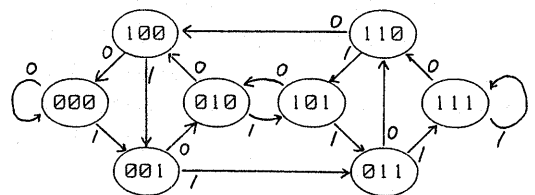


図6 状態遷移図

書かれた情報を受信したときの状態の遷移を示す。最短のトレーニング信号は、この図で、すべての矢印を1度だけ通る場合の受信情報列を求め、その先頭に最初の状態のビット列を加えればよい。例えば、状態000から始まる場合、000+0111101100101000のパターンを得ることができる。このようなパターンは複数存在する。

#### 4.4 相関受信器の構成と動作

相関受信器の構成を図7に示す。19ビットのトレーニング信号(n=3)の場合について説明する。

A/D変換部では、受信信号を伝送ビットレートのm倍のサンプリング速度でサンプリングする。信号の到達を入力レベルにより検知すると、トレーニング制御部では、情報の前に付加された19ビットのトレーニング信号の最初の3ビットを無視し、次の16ビットを基準波形部に所定の順序で記憶する。記憶が終ると、比較部で、次の情報部分の受信波形と"0","1"の基準波形を比較しその結果を出力する。判定部で、2つの比較部出力を比較し、受信波形に近い基準波形に対応するものを受信情報として出力する。2つの遅延部は直前の2ビットの受信情報を記憶し、判定部の出力とあわせて3ビットで、8組の基準波形のうち次に比較すべき1組の基準波形を選択する。

比較部では、各サンプル点における差の絶対値をm回加算した値、即ち、2つの波形で囲まれる面積、を比較値Dとして出力する。ここで、ある1ビットの受信波形と基準波形のi番目の値をそれぞれ $R_i$ 、 $r_i$ とすると、

$$D = \sum_{i=1}^m |R_i - r_i| \quad \dots \dots [2]$$

で表される。図8に受信波形と基準波形の比較例を示す。

#### 4.5 ビット同期

図7の相関受信器で、A/D変換器のサンプリングクロックとして、送信ビットレートのm倍のクロックを必要とする。通常、PLL, LC回路等で受信信号から送信クロックを再生する方法が用いられる。しかし、この方法では同期をとるために、トレーニング信号の前にさらに信号(プリアンプル)を付ける必要があり、伝送効率が低下する。そこで、

波形の相関により同期をとることとした。これは、受信器で独立にサンプリングクロックを発生し、ビット同期のずれを検出してクロックを修正する方法である。ビット同期のずれは、受信波形と基準波形の相関で検出する。図9に受信波形と基準波形の例を示す。横軸は時間(サンプル番号)であり、実線は受信波形、点線は受信波形に近いと判定された基準波形である。(5サンプル/ビット)点線の基準波形および、これを左右に1サンプルずらせたものと受信波形を比較すると、ビット同期がとれている場合は、1サンプルずらせたものより、ずらせないものが受信波形に近くなる。ビット同期がはずれてくると、どちらかに1サンプルずらせたものが受信波形に近くなる。これを検出して、サンプリングクロックを追加あるいは間引きすればビット同期をとることができる。

図9では、8ビット(サンプル番号5~44)にお

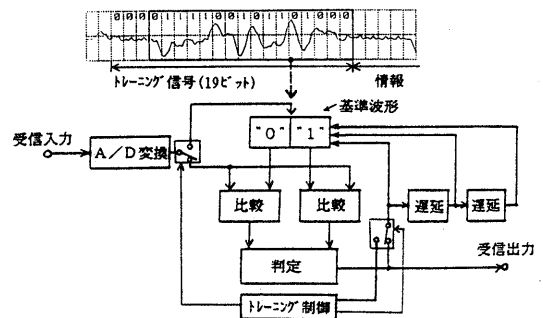


図7 相関受信器の構成

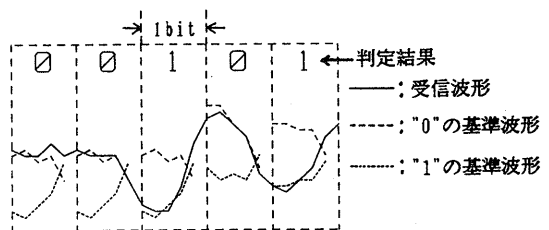


図8 受信波形と基準波形の比較例

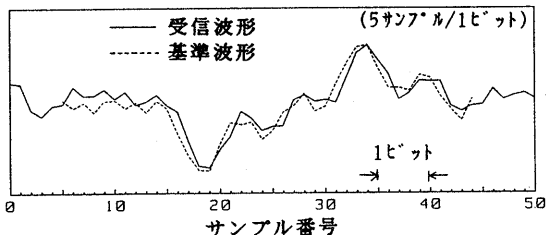


図9 受信波形と基準波形の相関によるビット同期

たり比較している。これは、例えば、図のサンプル番号5~15のように、1ビットの間で波形の変化が少ない場合、1ビット区間で比較すると誤る場合があるためである。

#### 4.6 受信レベル

相関受信器の特長の1つとして伝送系に非線形の要素を許容できることがあげられる。これは、予め、歪んだ受信波形を基準波形として記憶し、これと受信波形を比較するためである。このため、受信入力A/D変換器の入力範囲をこえても、情報"0","1"の波形が異なれば復号できることとなり、受信入力レベルの調整を省略できる。従って、情報の伝送に先立ちレベル調整を行う時間を省略でき、伝送効率が低下しない。

### 5. 相関受信の実験

#### 5.1 実験系の構成

実験系の構成を図10に、実験条件を表1に示す。データ発生部では、乱数により作成した送信パターンの先頭にトレーニング信号を付加して送信する。これをドライバで±1.3V p-pのマンチェスタ符号に変換し平衡-不平衡変換用トランスを介して送信する。受信側では、送信された1電文を波形メモリでデジタル化して記憶し、パソコンで前節の相関受信アルゴリズムを実行する。

伝送系の構成を図11に示す。sの送信点から送信し、①~⑥の受信点で受信を行った。ケーブルは、全て長さ10mのメタリックペアケーブルであり、各接続点には5本のケーブルを接続した。この伝送特性を図12に示す。約4.5MHzを中心にして減衰が大きくなっている。この減衰は、送信点より離れる程大きくなっている。

#### 5.2 符号間干渉の影響

まず、符号間干渉を生ずる直前のビット数nを調べるため、n=1~4(基準波形の数:4~32個)、伝送ビットレート1~5Mbps、受信点①~⑥、で伝送実験を行った。この実験では、ビット同期ずれの影響をなくすため、1つのクロック発生器の出力を分周して、送信、受信側のクロックとした。

図13(a)~(d)に基準波形数が4~32の場合の送信ビットレートと識別余裕度(最悪値)の実験結果を示す。各図は受信点をパラメータとして描いている。ここで、x番目の受信ビットの識別余裕度Dcxは、以下のように定義した。

$$D_{cx} = \left( \sum_{i=1}^m (|R_{xi} - R_{ci}| - |R_{xi} - R_{ei}|) \right) / S \quad [3]$$

Rxi: 受信波形のxビット目、i番目のサンプル

Rci: 受信波形Rxと比較すべき2つの基準波形のうち正しい情報に対応するもののi番目のサンプル

Rei: 受信波形Rxと比較すべき2つの基準波形のうち正しい情報に対応するもののi番目のサンプル

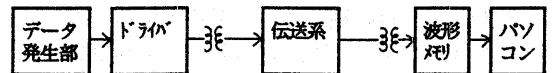


図10 実験系の構成

表1 実験条件

項目	内容
符号	マンチェスタ符号
送信電圧	±1.3Vp-p
電文長(情報部)	506~510バイト
サンプル数	5サンプル/1ビット
A/D変換分解能	8ビット

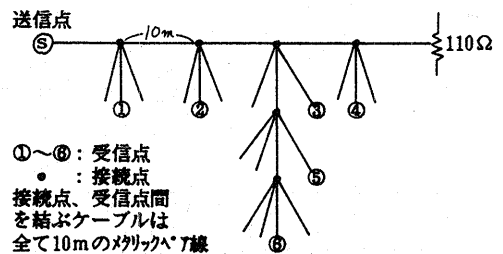


図11 伝送系の構成

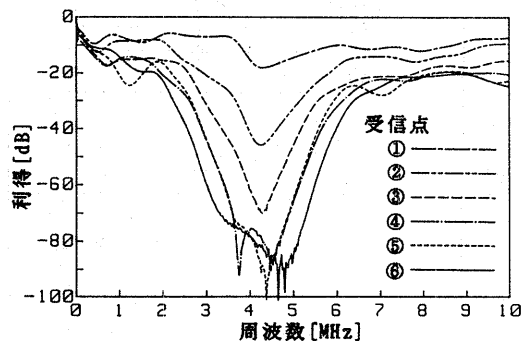


図12 伝送特性

うち誤った情報に対応するもののi番目のサンプル

$$S = (2 \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m |R_{ij}|) / k \dots \dots \dots [4]$$

R<sub>ij</sub>: トレーニング信号のうち、基準波形として記憶するiビット目、j番目のサンプル

k: 基準波形の数

[4]式のSはトレーニング信号のうち基準波形となる部分の平均面積(1ビットあたりの)の2倍である。これは、"0","1"の基準波形のそれぞれのサンプル値が逆の符号をもつとした場合の"0","1"の基準波形の面積の差であり、これを"0","1"の識別期待値と考えた。[5]式のD<sub>cx</sub>は、実際の受信波形と2つの基準波形を比較したときに得られる識別値を上記識別期待値で正規化したものである。この値が1であれば平均的な識別余裕度であり、0では識別不可能、マイナスでは誤って識別することを意味する。

図13は、約500バイト(約4kbit)の電文にトレーニング信号を付加したものを、10回受信したときの最悪(最小)のD<sub>cx</sub>を描いたものである。

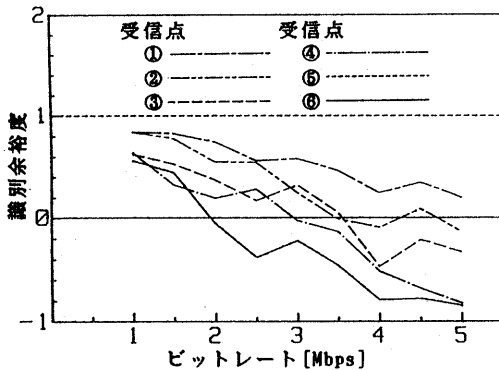


図13(a) 識別余裕度(基準波形数:4, n=1)

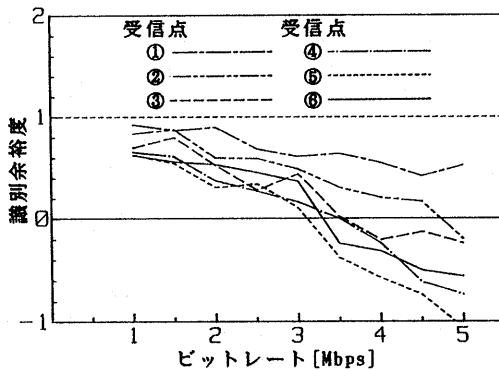


図13(b) 識別余裕度(基準波形数:8, n=2)

図13より、基準波形の数を増やすと、識別余裕度が上がり、より早いビットレートで伝送できることがわかる。①~⑥の受信点のうち、①の受信点の識別余裕度が大きく、④~⑥の識別余裕度が小さい。これは、図12の伝送特性からわかるように、①の受信点では反射等の影響による伝送特性の劣化が少ないためである。

図13(c), (d)より、この伝送系では、19~36ビットのトレーニングで3.5Mbpsまで識別できることがわかる。これより、相関受信によって、非常に短いトレーニングで、歪の多い受信波形から送信情報を復号できることがわかる。

### 5.3 ビット同期

次に、4.5節で説明したビット同期方法の有効性を調べるため、送信ビットレートに対し、受信器のサンプリングクロックを所定の値より1%早めて実験を行った。なお、同期検出は、16ビットにわたり相関をとることにより検出した。ビット誤り率および電文誤り率とビットレートの関係

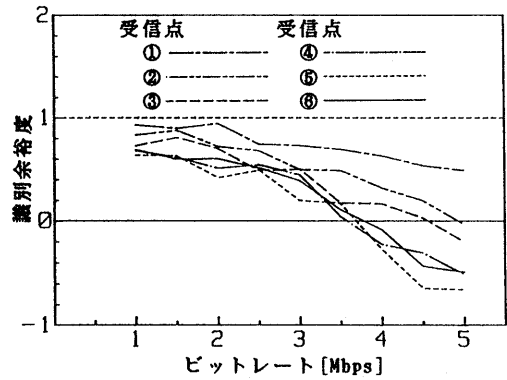


図13(c) 識別余裕度(基準波形数:16, n=3)

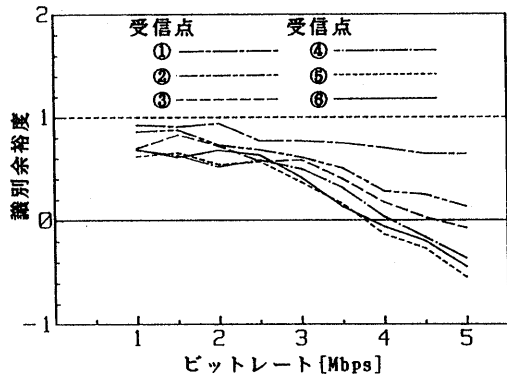


図13(d) 識別余裕度(基準波形数:32, n=4)

を図14に示す。受信点は⑥である。19ビットのトレーニング信号を508バイト(4064ビット)の電文に付加したものを100回受信し、ビット誤り率、電文誤り率を測定した。図より、3.2Mbpsまで誤りなく受信できることがわかる。先の図13(c)の3.5Mbpsより悪いのは、1サンプル単位で同期を修正しているため、余裕度が劣化しているものと思われる。

このように、波形の相関によりビット同期をとり正常に受信できることが確認できた。

#### 5.4 受信レベル

最後に、受信波形が飽和した場合の実験結果について述べる。図15(a)(b)は、受信点①における受信波形例(A/D変換器出力)である。(a)はA/D変換器が飽和していない場合。(b)は、飽和した場合である。(b)の受信レベルは受信点⑥においてA/D変換器の入力が飽和しない設定値とした場合である。⑥の受信点に比べて、①の受信点は、伝送損失が小さいため、A/D変換器の変換範囲をこえた振幅の信号が入力され、飽和した波形となっている。

この2つの状態で受信実験を行った結果、どちらも、正常に送信情報を復号でき、伝送系に非線形要素がある場合も受信可能なことがわかった。

#### 6. まとめ

LAN等の端末系の配線に要求される、端末の移動、増設の容易な配線形態として、1分岐点からの多分岐、分岐先からの分岐を許容する多重分岐バスを提案し、多重分岐バスで問題となる受信波形の歪に強い受信方式である相関受信法の、復号アルゴリズム、トレーニング法、ビット同期法、受信レベル設定について説明した。さらに、実験により、この受信法が19~36ビット程度の非常に短いトレーニング信号で動作可能であることを示した。

今後は、この方式の、伝送特性と受信限界等の関係を検討を進めるとともに、ハード化の検討を行う予定である。

[謝辞] 日頃、御指導頂く、柏村部長、木下リッダに深謝します。

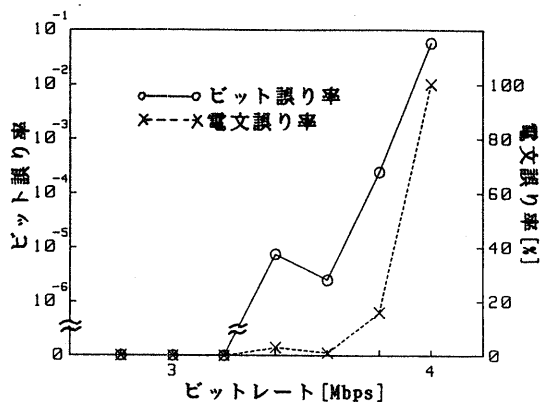
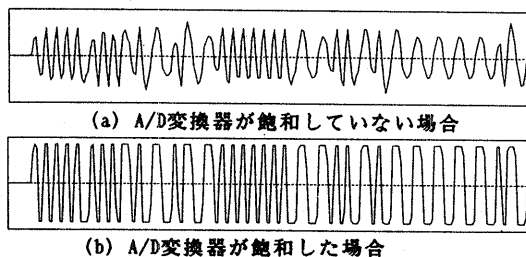


図14 受信誤り率



(a) A/D変換器が飽和していない場合

(b) A/D変換器が飽和した場合

図15 A/D変換器出力波形例(受信点: ①)

#### [参考文献]

- [1] 杉田、岸本「波形劣化が著しい系に適用可能な相関受信法の検討」昭和62信学会 情報システム部門 全大272
- [2] 宮川他「デジタル信号処理」電子通信学会編 p240