

PSK音響信号の長距離伝達のための 信号補正法の検討

土屋 利雄^{*1} 中西 俊之^{*1} 鈴木 道也^{*2}

我々は、潜水船の調査効率の向上のために、潜水調査船で得たTV画像を、デジタル音響信号（PSK方式）により母船上に伝送するシステムの開発研究を続けてきた。そして、それらの研究成果を基に、「しんかい6500」に搭載するための実用機を製作することとなった。

しかし、その後の検討から、伝達距離の延伸に伴って、伝搬減衰の周波数特性により伝送帯域内での受信レベルの偏差が発生し、符号間干渉に起因する伝送歪が増大し、結果として伝送エラーが増加することがわかった。そのため、有効な信号の歪の補正方式について考察した。これは、予め伝搬減衰の逆特性を考えておく方法で、これについてシミュレーションを実施し、結果から有効性を確認し、実用機の目処をつけることができた。

キーワード：画像伝達、PSK、デジタル伝送、信号歪

Study on PSK Acoustic Signal Compensation for Long Distance Transmission

Toshio TSUCHIYA^{*3} Toshiyuki NAKANISHI^{*3}
Michiya SUZUKI^{*4}

We have been studying video picture long distance transmission by PSK digital acoustic signals. As the result of many studies, we have successfully carried out of an ocean experiment for acoustic transmission for color pictures at the depth of 3,500m. Thus, we decided to produce practical equipment for the deep submergence vehicle "SHINKAI 6500".

However, various technical problems were encountered with the production of a practical model, especially in the acoustic channel, because of deviation of that expands at longer distance and frequency which yielded increased data errors by intersymbol interference. To solve this problem, an effective method of compen-

* 1 深海開発技術部

* 2 日本電気（株）

* 3 Deep Sea Technology Department

* 4 NEC Corporation

sation is designed by simulation of longer distance transmission. In this method, the characteristics of reverse frequency deviation are presented beforehand by the transmission side.

As the result of simulation of this method, the effect of compensation is confirmed at the range of 6,800m for the "SHINKAI 6500" system.

Key word : Video Picture Transmission, PSK signal, Signal Deviation, Signal Compensation

1 研究の経緯

我々は、潜水船の調査効率の向上のために、潜水調査で出得たTV画像を、ディジタル音響信号(PSK方式)により母船上に伝送するシステムの開発を続けてきている。今までに、様々な信号の補正や、画像処理等の技術について検討し、さらに、実海域において最大3500mまで画像情報を伝送することを可能とした。

そして、それらの研究成果を基に、平成2年度から「しんかい6500」(6.5K)に搭載するための実用機を製作することとなった¹⁾。

しかし、その後の検討から、6.5K用の実用機では、伝送距離の延伸に伴って、伝送帯域内での受信レベルの偏差が発生し、それにより、伝送歪が増大し、従来から行ってきた補正方法だけでは完全にはエラーを除去できない恐れがでてきた。そのため、実用機を想定し、さらに有効な信号の歪の補正方式について考察し、シミュレーションを実施し、実用機の見処をつけることができたので、その手法と結果について報告する。

2 PSK方式での信号の歪補正

2.1 海中におけるPSK音響信号の伝送⁽²⁾

画像伝送システムで採用したPSK(Phase Shift Keying)伝送方式は、図1で示したように、搬送波の位相の変化を“0”または、“1”のデータ系列に対応させた変調方式である。他のディジタル伝送方式(ASK, FSK等)に比べ、伝送周波数帯域が同じ場合、最も高速のデータ伝送が可能である。

しかし、PSKの信号伝送においては、伝送路の周波数特性が、直線位相(定遅延)の理想特性から偏差を生じている場合、振幅や位相の歪により

信号の信頼性が劣化し誤りが生ずる。しかし、図2で示したように、海中におけるPSKの伝送は理想状態①からはほど遠いものであり、振幅や位相特性が伝送過程において、図中の音響送波器②・受波器④の感度特性、伝搬過程における吸収損失③、等の影響により変化しデータの信頼性が劣化する。実際の海中における音波の伝送路では、これらの影響は常に一定ではなく、船舶の動揺や信号の伝搬距離の変化に伴って時々刻々と変化する。

今までの試験装置を使った画像信号伝送試験においては、伝送周波数20k~30kHzで最大伝送距離3,500mであり、この場合、伝送路の歪補正と位相の補正を行う適応型等化器(Adaptive Equalizer)を受信側に設け、劣化した周波数特性の逆特性⑤を与えることによりほぼ実時間の変化に追従した補正(平坦化)⑥が可能であった。

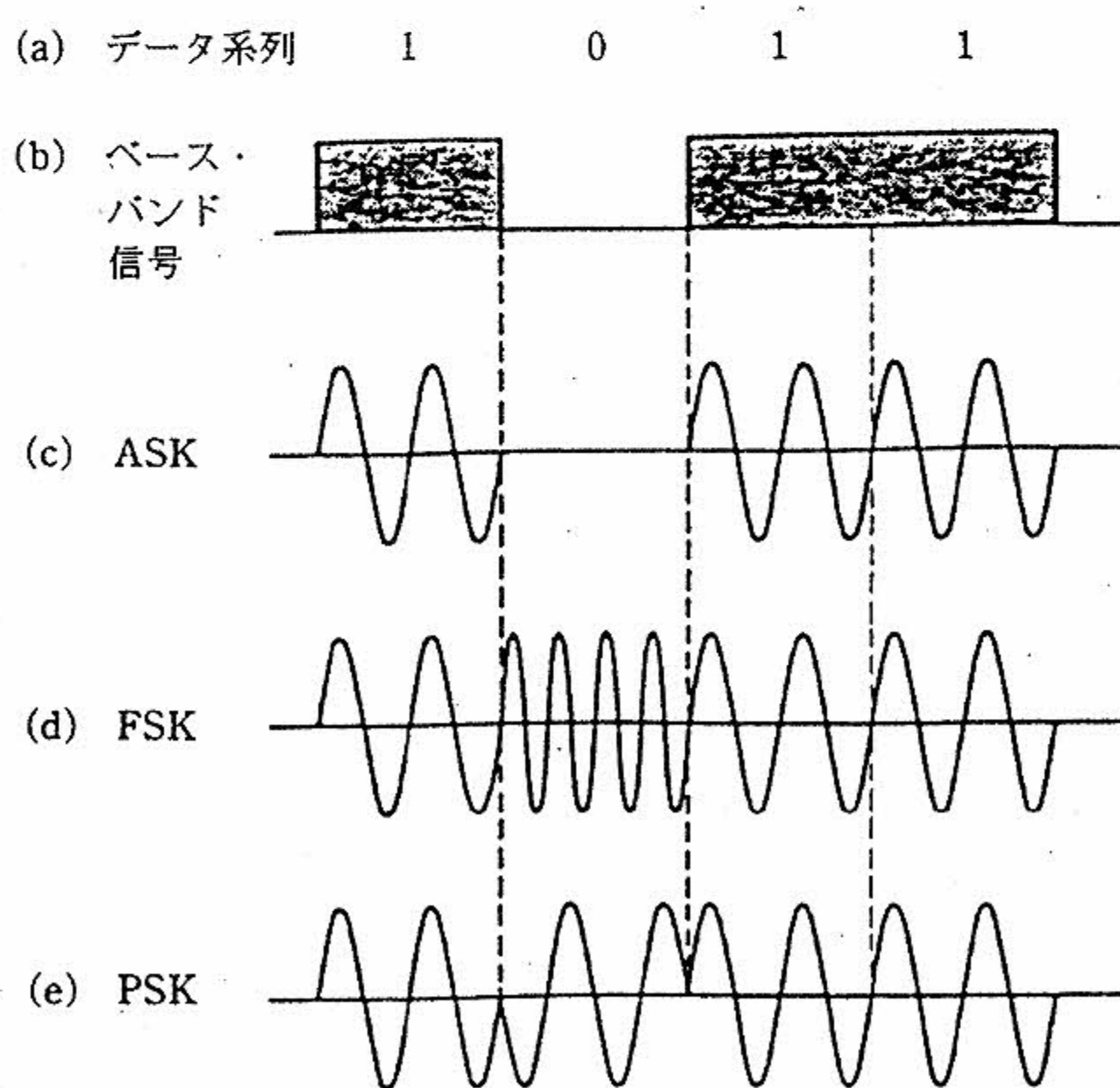


図1 デジタル変調方式

Fig.1 Schematic of Digital Modulation

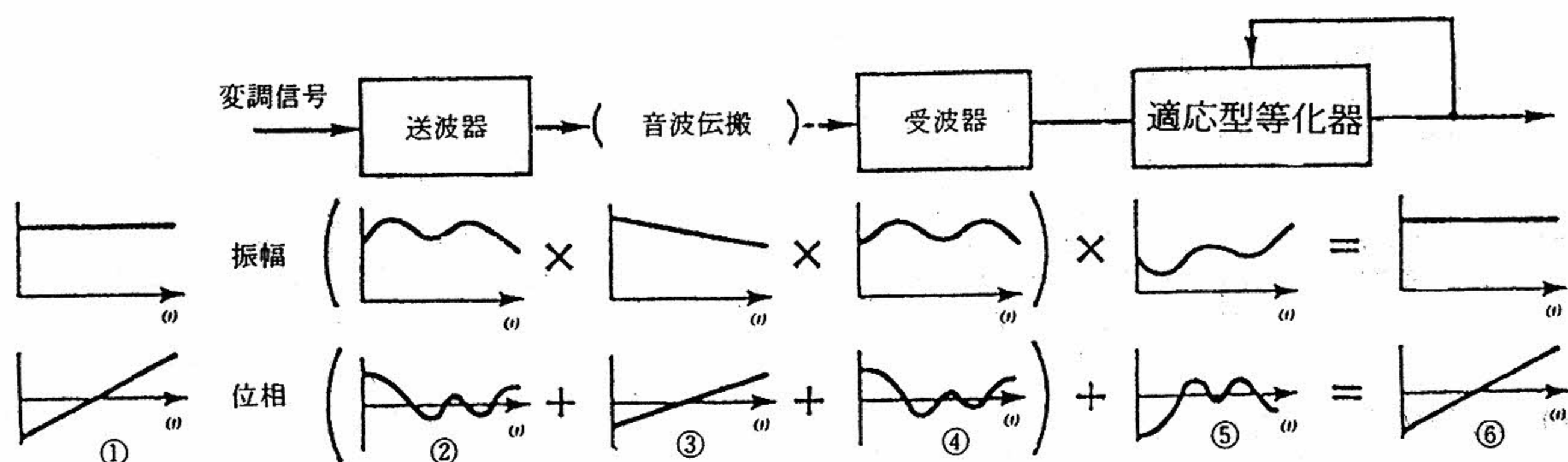


図2 海中でのPSK信号の伝送のモデル

Fig.2 Model of PSK acoustic signal transmission at sea water

しかし、6.5kシステムを想定し伝搬距離を最大6,800mまで延伸した場合、それに伴う符号間干渉により、現状の適応等化器の能力では、信号の補正ができない恐れが生じてきた。そこでこれに対応するため、更に有効な信号補正手法の検討を行った。

2.2 帯域内偏差による信号の歪

音響信号が海水中で距離 r (m) を伝搬する過程において、次式(1)のような減衰伝搬損失 T_L を受ける。

$$T_L = 20 \log r + \alpha r \times 10^{-3} \text{ dB} \quad (1)$$

伝搬損失 α を求める式は様々なものが知られているが、ここでは参考文献(3)の結果を基に、Thorpの式をもちいることとした。この場合、伝送周波数を f (kHz) とすると伝搬減衰 α は次のようになることが知られている。

$$\alpha = \left(\frac{0.1 \cdot f^2}{1 + f^2} + \frac{40 \cdot f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} \cdot f^2 \right) \times \frac{100}{91.4} \left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right)$$

この式により、算出した α を基に、伝搬距離との関係を求め、これを図3に示した。この図のように、 α は周波数が高くなるほど、かつ伝搬距離が大きくなるほど増大することが分かる。

このことから、海水を音響の伝送路として考えると、ある帯域すなわち最低周波数 F_L ~ 最高周波数 F_H を伝送する場合、伝搬過程での減衰量が変化し、信号の受信において、あたかもローパスフィルタを付加したことと同様に帯域内の振幅偏

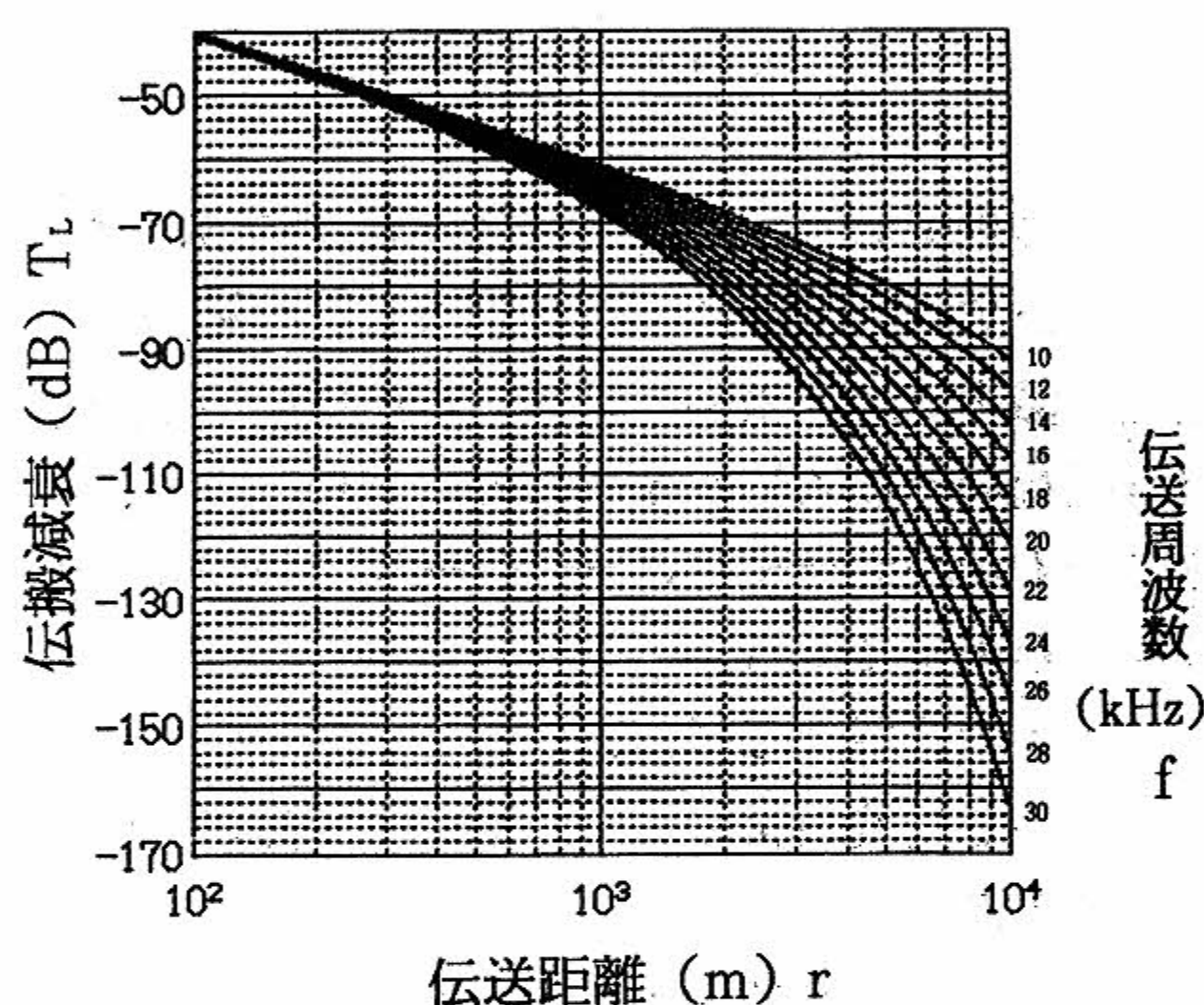


図3 伝送距離と伝搬減衰との関係

Fig.3 Transmission range vs Transmission Loss

差が発生し、PSKの伝送において信号歪を引き起こす。この歪の主な原因は符号間干渉と考えられ、これは、ローパスフィルタのように、帯域の制限された伝送路において、そこを通過する信号波形の高域成分が伝送されないため、符号の立ち上がりや、立ち下がりが鈍るために、符号を判別する場合、前の符号の鈍ったビットの残りが邪魔をして判定しにくくなる現象である。

PSKにおいては、ビットの判定のために、受信端で図4(C)のように位相の不連続点(位相のジャンプ)を検出しなければならず、このような不連続点では高次の周波数成分が含まれているため、伝送速度が大きくなるほど、広い伝送周波数帯域が必要となる。しかし、このような信号を海水中における音響伝送路のように、ローパスフィルタ

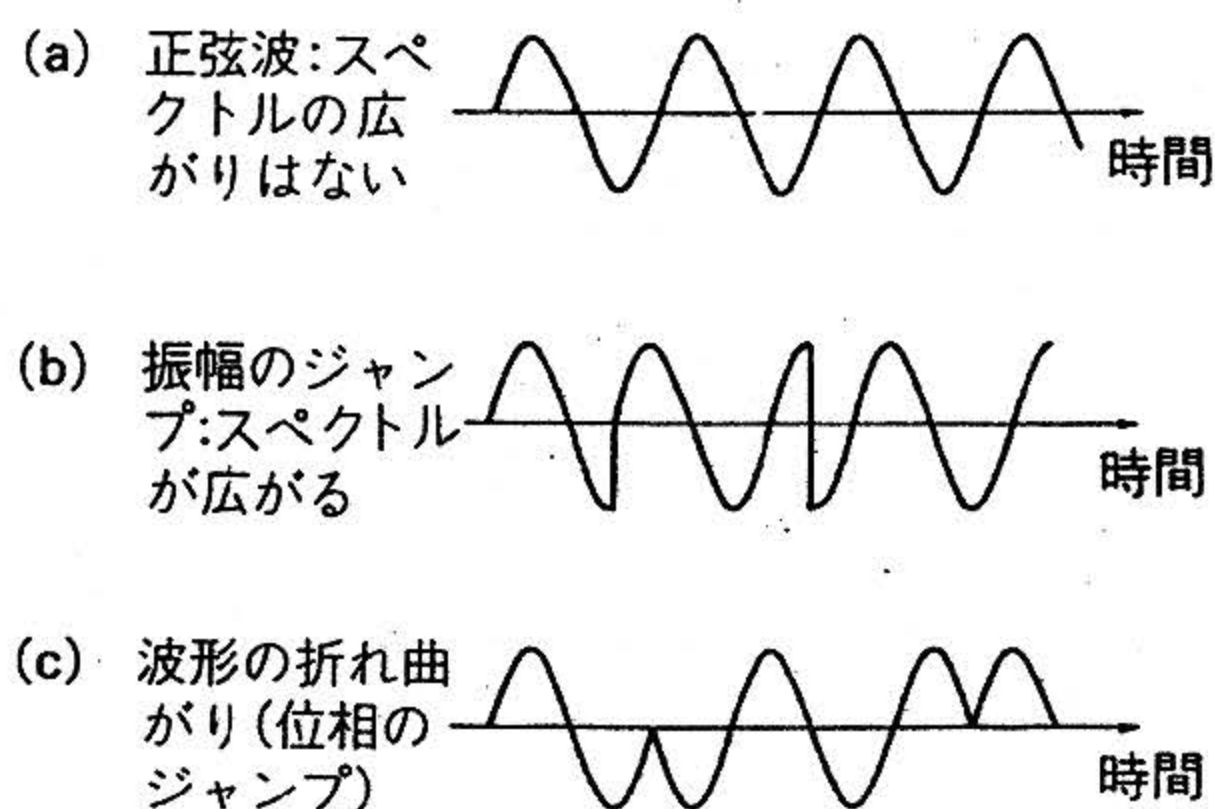


図4 スペクトルの広がる伝送波形
Fig.4 Spread of Spectrum by Transmissioin wave form

と同様の効果のある信号伝送路では、高域の周波数成分が欠落し、この不連続点において搬送波の振幅が減少し、本来図5(1)のように位相の変わり目(振幅のくびれ)がはっきりしていなければならないものが(2)のようになり、結果としてビットの判別が困難になる。

海水中の音響の伝送路において、やっかいなことは、同じ周波数帯の信号でも伝送距離によって振幅偏差量が増大する点であり、当然、データの伝送エラーもこれに伴って増大する。従って、伝送エラーを減らすためには、受信端で伝送路の周波数特性を見かけ上平坦化する技術が不可欠になる。

2.3 伝送路の歪補正

我々は、2.2項で述べた歪の補正のために、図6に示したような画像信号の伝送のために適応型等化器を利用してきた⁽²⁾。これは、未知の周波数特性をもつ伝送路の周波数特性の平坦化をおこなうもので次のような作動をする。

- ① 未知の伝送路の周波数特性を既知の入出力デジタルデータから推定する。(学習モード)
- ② この推定値から伝送路の逆特性を持つようなフィルタの値を演算し、それを伝送路の一部として構成する(追尾モード)

ただし、ここでいうフィルタは、いわゆる、アナログ的な周波数濾波器ではなく、未知のシステムのデジタル的(離散的)な入力信号データに対して任意に係数を書き換えることができるFIR

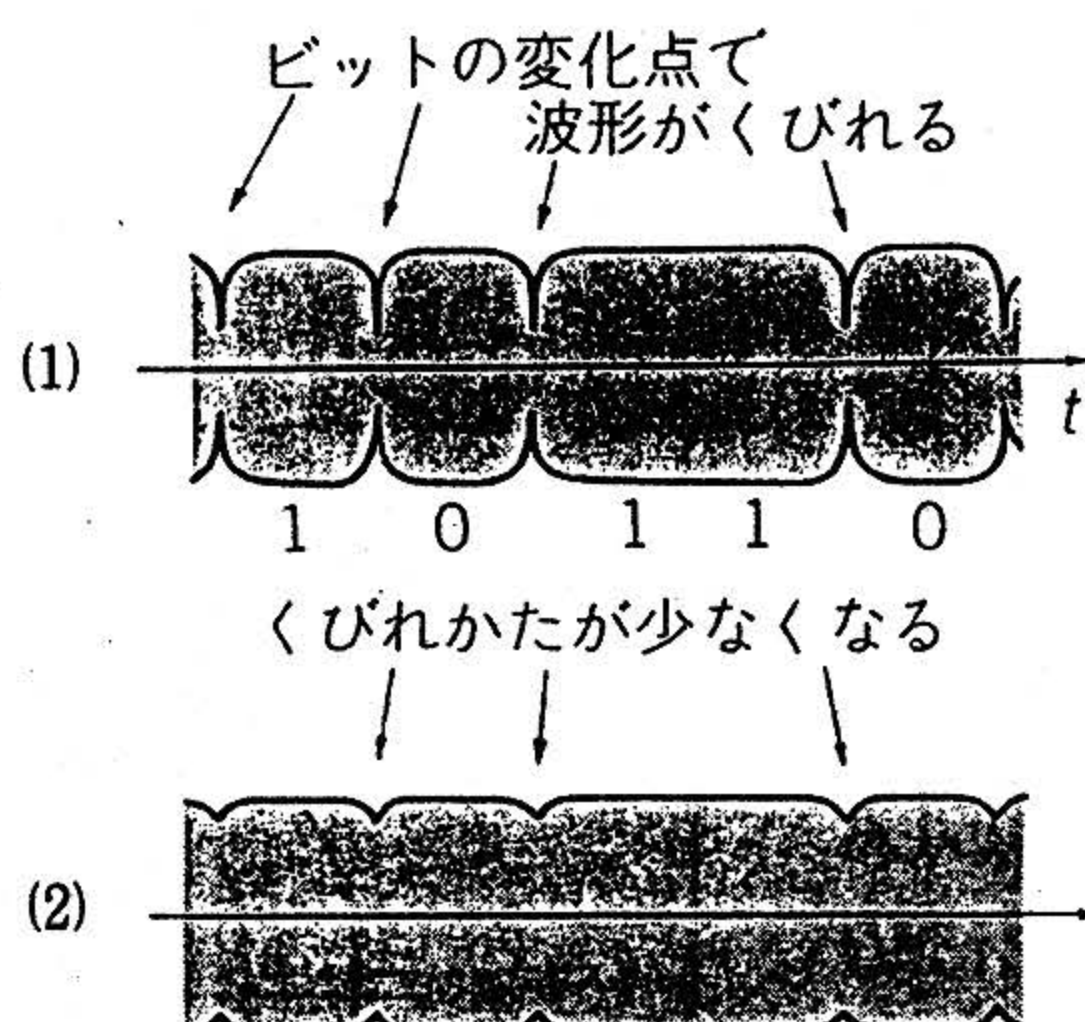


図5 フィルタ効果によるPSK信号の劣化
Fig.5 Trans formation of PSK Signal by filter effect

(Finite Impulse Response)型のデジタルフィルタである。このフィルタは、予め決められているデータと入力信号を比較し、その誤差が最小になるようなアルゴリズム(最小自乗平均誤差法:LMS)により補正係数を求め、高速乗算器により係数を高速で変更するものである。

実際の装置においては、できるだけ実時間処理が要求されるため、試験装置では、可能な限り高速で信号処理ができるように、約15MIPSの演算速度を持つ。DSP(Digital Signal Processor)を利用して100kHzで信号をサンプルし、これにより約50段のFIR型のデジタルフィルタを構成している。しかし、原理的に有限長の段数のFIR型フィルタの等化器では、最終的に等化誤差が残留してしまう。

海中における音響信号においては、多くの不確定な要素を考慮しなければならないため、総合的な等化器の能力を正確に測定することは困難である。我々が画像伝送の伝送試験を実施した試験装置で、 $F_L \sim F_H$ を20K~30kHzとして、最大3,500mまでの伝送試験を実施した結果を基に、等化能力が15dB程度あるものと判断していた。

しかし、さらに伝送距離を延伸すると、2項で述べたようなフィルタ効果により、図7に示したように、伝送帯域内のレベル差が大きくなり、信号の歪の増大に伴う伝送エラーの増大が懸念された。当然、更に等化能力の高い等化器があればこ

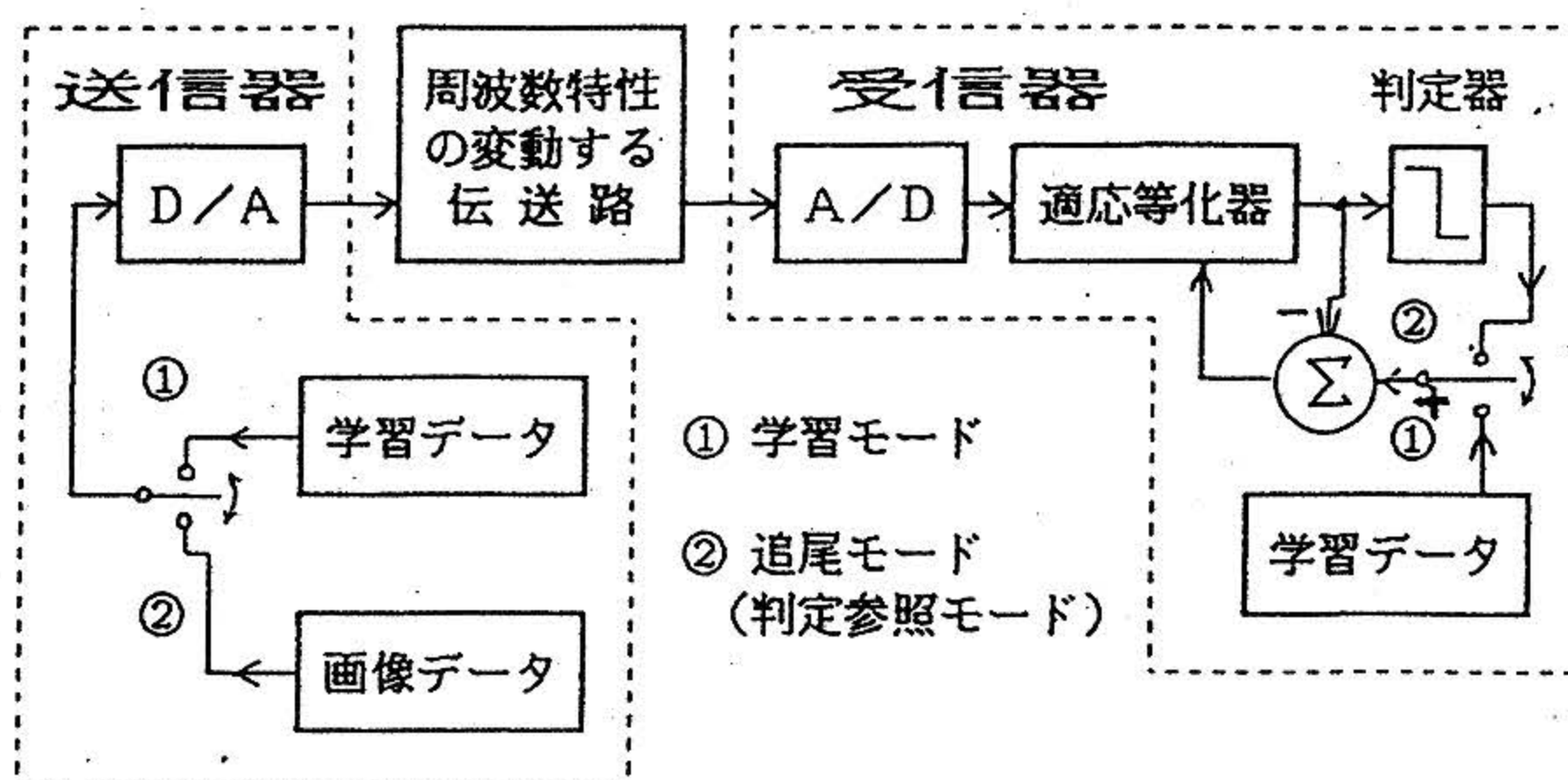


図6 適応等化器によるデータの伝送

Fig.6 Schematic of data transmission system by Adaptive Equalizer

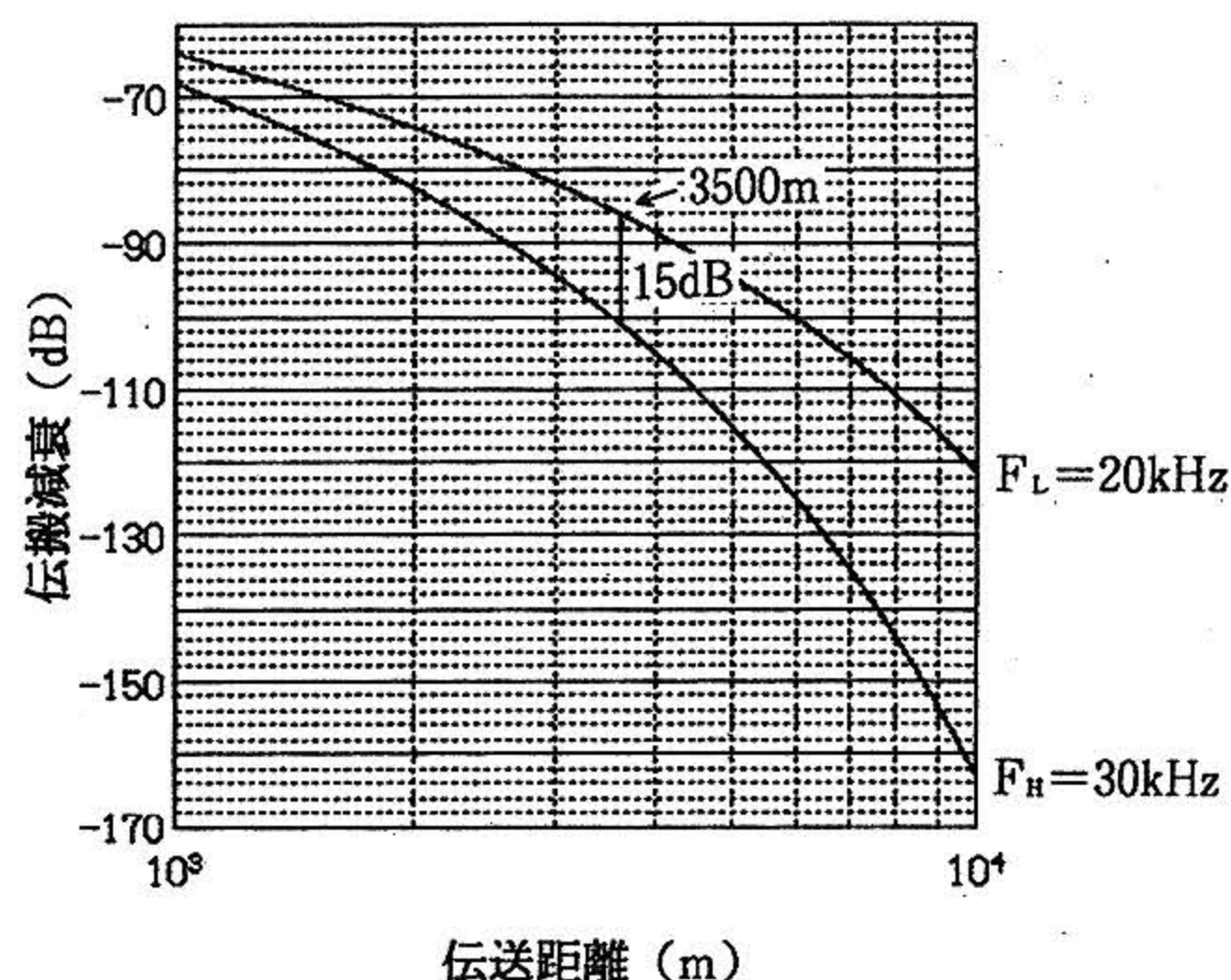


図7 20k~30kHzにおける帯域内偏差

Fig.7 Amplitude deviation at 20~30kHz

これらの補正は可能であるが、それには高速の大型計算機を利用する必要性が生じ、船上に搭載するハードウェアの規模を考えると、現実的ではない。

このために現状の処理能力のままで十分なエラー率を確保するために検討を行った。

3 「しんかい 6500」システムのための検討

3.1 伝送周波数の選定

2項で述べてきた伝送帯域内でのレベル差を小さくする最も簡単な対策は、伝送（搬送波）周波数を下げ、更に伝送帯域幅を削減することである。しかし、潜水船に搭載する電子装置や音響送波器の容積及び搭載重量は、周波数を下げることにより大幅に増加するので、実用上は得策ではない。また、データの伝送速度を確保する必要性から、

伝送帯域幅の削減にも限度がある。それらのことを考慮し、6.5Kシステムに搭載できる実用機の伝送周波数域を検討した。

まず、母船での信号の受波は「よこすか」の音響測位装置の受波器を利用することを考え、ここから信号受信範囲を直下から35°以内と想定し、最大伝送距離を約6,800mとした。

また、「しんかい 6500」に搭載可能なペイロード（200kg）を考慮し、全体の重量を50kg程度と想定し、更に、他の音響機器との周波数関係も考え併せ、画像伝送システムの中心周波数を20kHzと決めた。また、この場合、伝送帯域幅は音響送波器の比帯域と伝送速度を考慮し、16k~24kHzに設定した。

図8にこの周波数における伝送距離と減衰量との関係を示した。この図から伝送距離6,800mにおいて伝送帯域内 $F_L \sim F_H$ （16k~24kHz）の間で、受信レベルの振幅偏差が最大約20dB生じることが分かった。

そこで、受信（復調）側で振幅偏差を現状の等化能力の範囲である15dB以下になるように、送信（変調）側にもFIRフィルタを装備し、送信側で生成するPSK信号に予め固定的に伝送路の逆の周波数特性を与えるイコライザを装備することにした。これは、図9で示したように、周波数の高い成分を送信するときはレベルを高くし、逆の場合は低くする方法を行うことであり、この方法を実施すると、ある特定の伝搬距離でのレベルの振幅偏差を吸収できる。しかし、逆にそれ以外の距離ではむしろ偏差が増加する恐れがある。このた

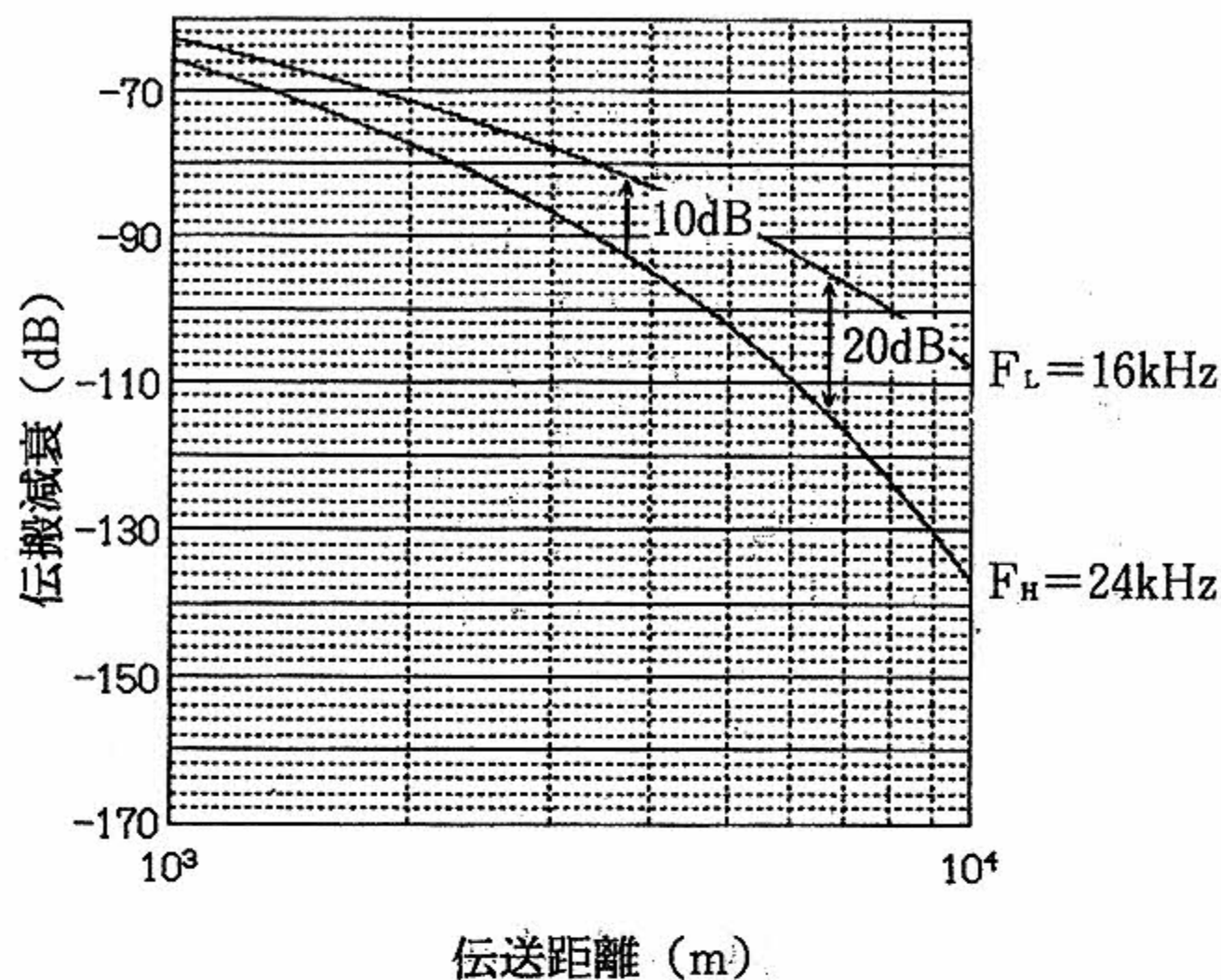


図8 16k~24kHzにおける帯域内偏差
Fig.8 Amplitude deviation at 16~24kHz

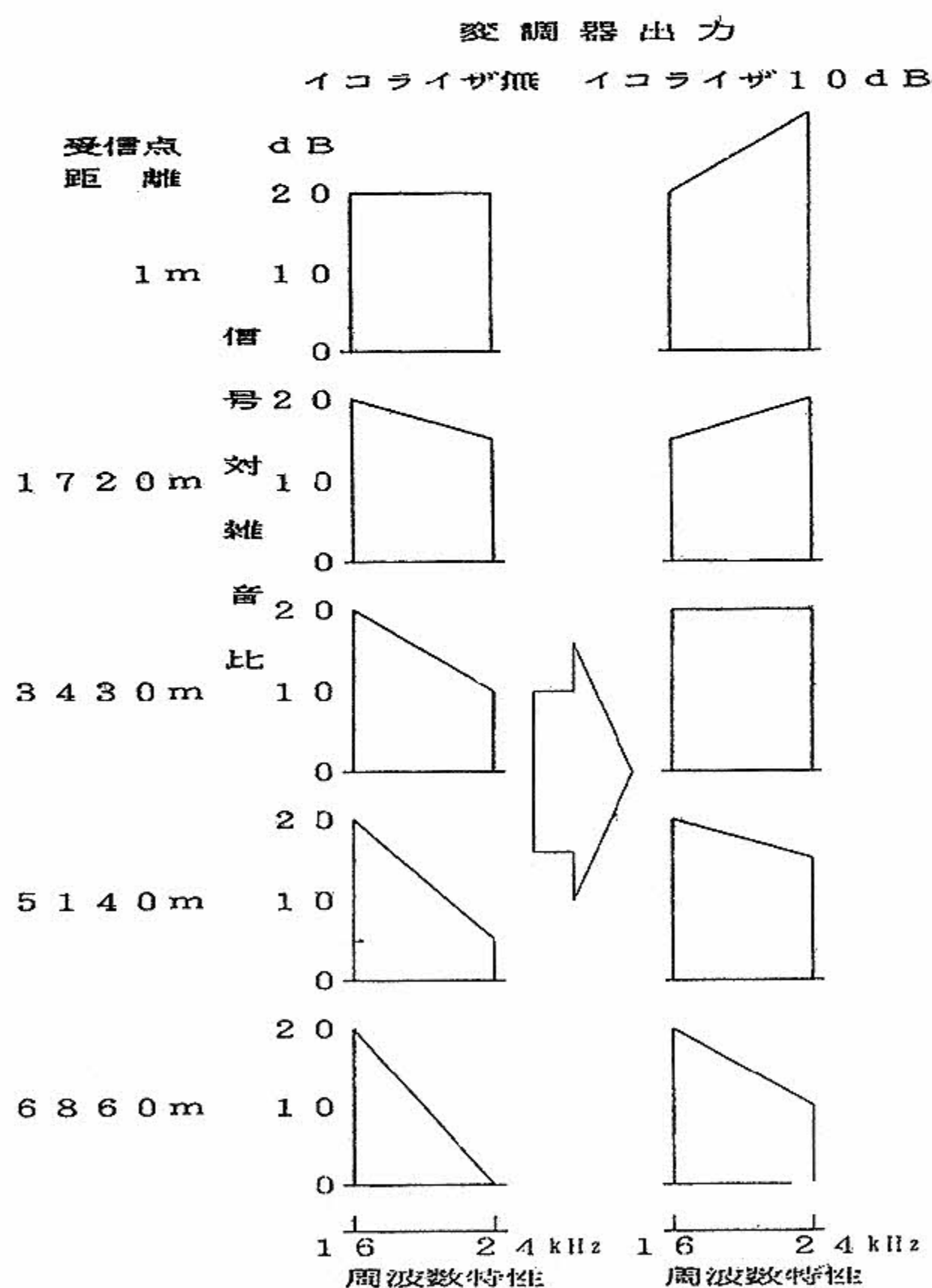


図9 イコライザの周波数特性
Fig.9 Frequency Characteristics of Equalizer

め、シミュレーションを実施し効果を検証した。

3.2 シミュレーション手法

シミュレーションの概念図を図10に示す。まず、図8から最大伝搬距離6,800mの半分の距離3,400mでの振幅偏差(約10dB)を求め、これを模擬

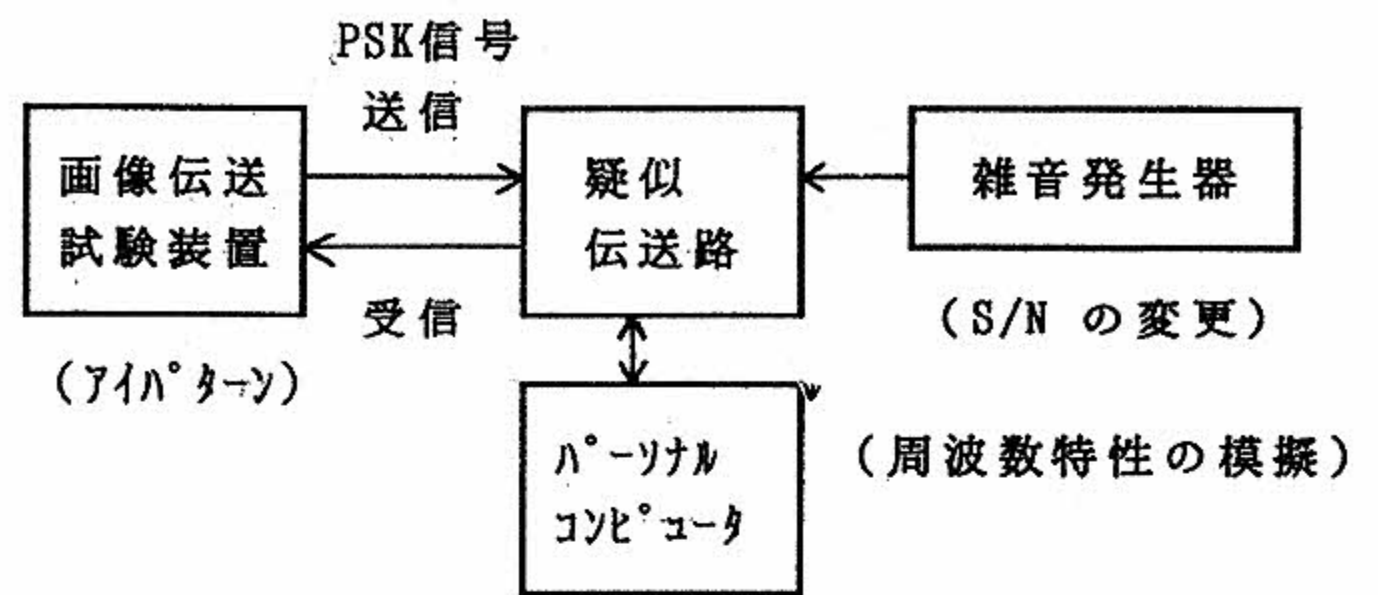


図10 PSK信号伝送シミュレーション系統図
Fig.10 Schematic of simulation for PSK signal transmission

した伝送路を電氣的に構成した。この伝送路において、実際に4相のPSK信号に相当するデータの伝送を行い、受信側で復調信号がほぼ収束した際の適応等化器のFIRフィルタの係数の値を記録した。次にこの係数を基に10dBの偏差を付加し、伝送路と逆の振幅特性を持つフィルタを送信側で形成し、この状態で伝送路の振幅偏差を5~20dBまで変化させて、受信側でPSK復調信号のアイパターンの収束状態を調査した。なお、信号には疑似的に白色雑音を付加し、従来の試験結果⁽²⁾を基に、雑音条件を想定しS/Nを20dBとした。

3.3 シミュレーション結果

シミュレーションの結果得られたアイパターンを図11に示す。ここでは、逆特性をかけた場合(2)とそうでない場合(1)とを比較して示している。

アイパターンは、復調されたPSK受信データ(1つ1つの点)の状態を示したものである。これは、図12のように各位相の象元の実部と虚数部の状態を複素平面座標に表したもので、位相変動がある場合は回転方向に動き、振幅の変化は対角方向に対応して動く。従って、伝送路が平坦でデータの信頼性が高ければ、アイ(データの塊)は、中心の1点に収束し、逆の場合はデータは乱雑になりアイは大きくなり、更に大きくなって他のデータのエリアに入るとエラーが発生する。

図11(1)のように、変調側で逆特性をかけない場合は、伝送距離が延伸するほどアイが広がって、この場合受信側で適応等化器を付加しても、伝送距離が5,000m以上では、データのエラーが大きくなることを示している。

しかし、変調側に10dBの逆特性を付加した場合は、図11(2)のように受信側で、どの伝搬距離にお

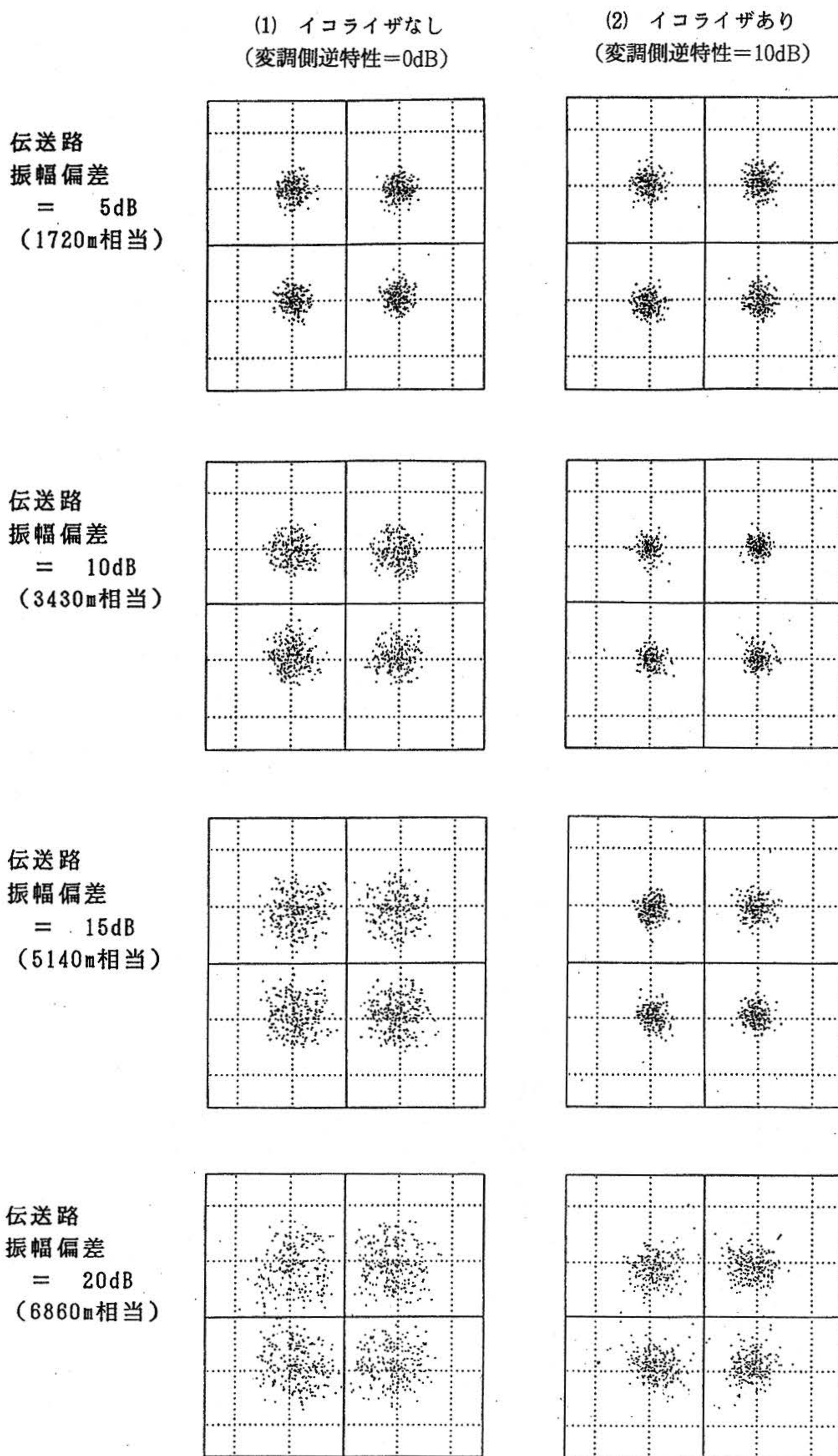


図11 復調信号アイパターンの比較 (SNR 20dB)

Fig.11 Comparison of demoduted signal at Simulation (SNR 20dB)

いても復調データのアイが収縮し，画像伝送においては十分小さいエラー率を得ることができることが分かった。

これらのシミュレーション結果を図13で実際の

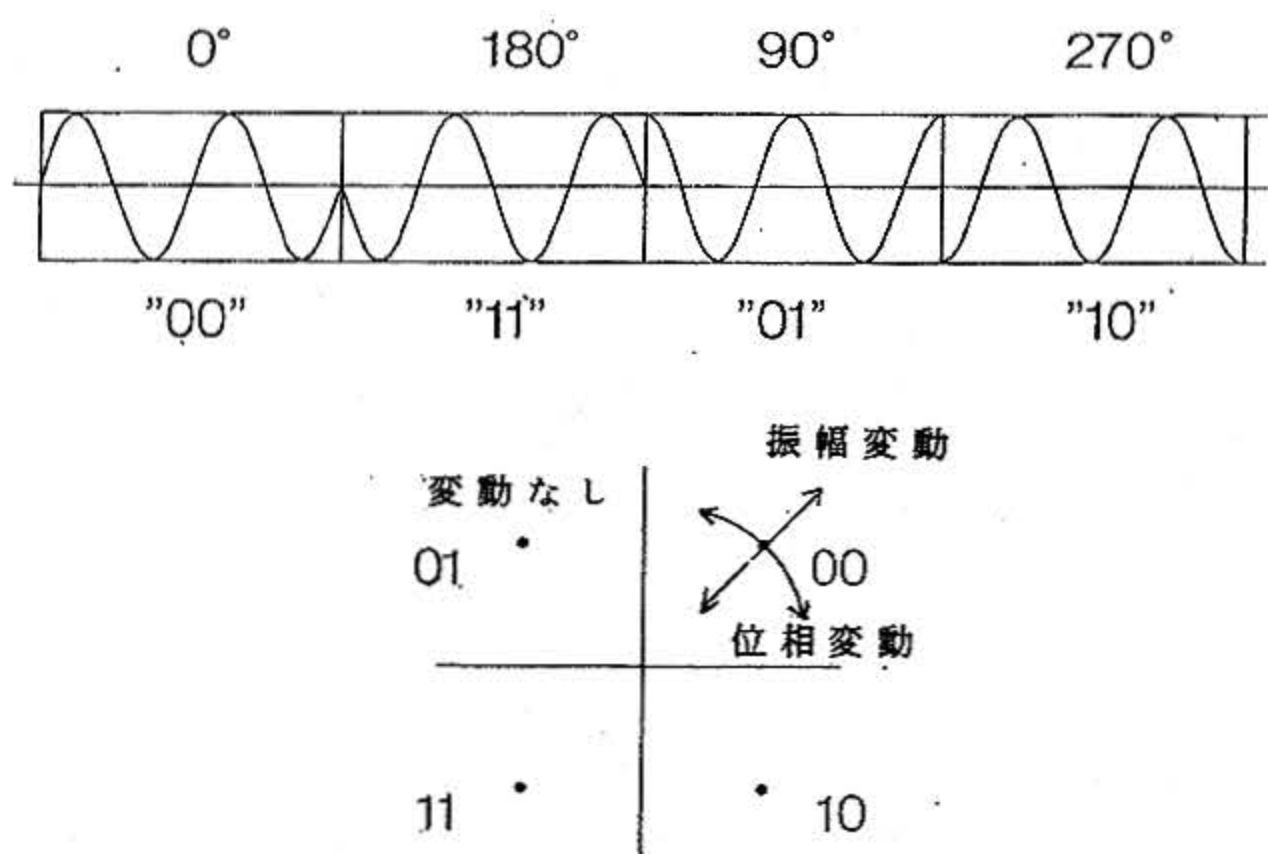
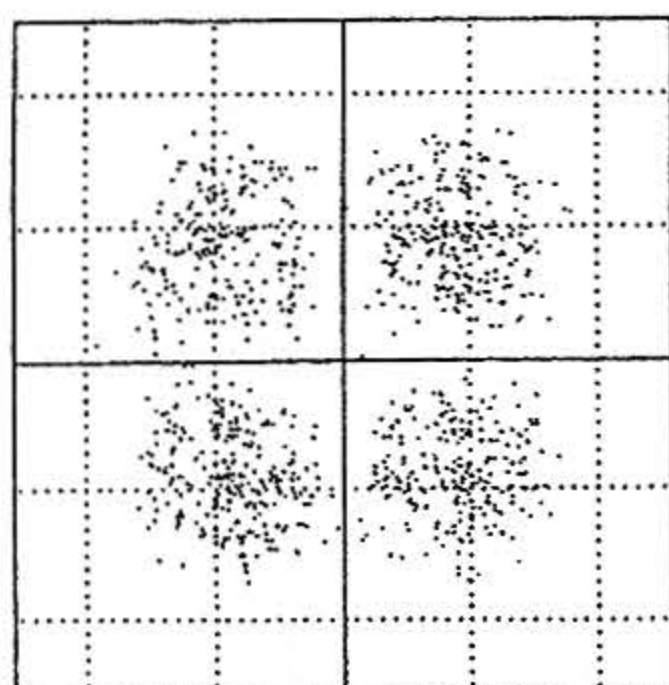


図12 PSK信号波形（上）とそのアイパターン（下）

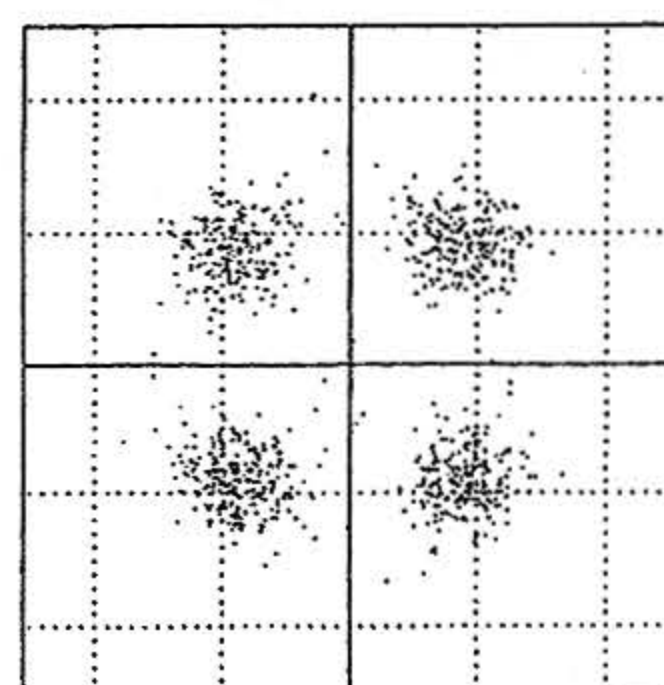
Fig.12 PSK Signal wave parttern and Eye-Parttern

(1) イコライザなし
(変調側逆特性=0dB)



エラー率 1×10^{-3}

(2) イコライザあり
(変調側逆特性=10dB)



エラー率 1×10^{-4}

図13 最大伝送距離(6800m)における伝送画像の比較(SNR 20dB)

Fig.13 Comparison of Simalated Received' Image at the Range of 6800m (SNR 20dB)

伝送画像で示した。この図のように最大伝送距離6,800mで，逆特性を付加しない場合は，エラー率は 10^{-3} 程度であり，この場合は画像上にかなりのデータ化けや欠落がみられる。しかし，逆特性を付加し補正を行った場合は，エラー率を 1×10^{-4} にでき，実用上十分な画像を得ることが可能となることが分かった⁽⁴⁾。

4 結 論

これらの検討の結果，6.5kシステム用の画像伝送システムで最も問題となる伝送帯域内のフィルタ効果（振幅偏差）に起因する伝送歪については，伝送周波数を下げ（16k～24kHz）更に，送信側の補正を併用することで，実用上充分な程度まで除去できることが分かった。

この結果から，従来の画像伝送試験装置のハードとソフトをそのまま利用することができる見通しが得られた。そのため，現在は「しんかい 6500」用の実用機の製作を進めており，平成3年度

中にはこの実用機により海域試験を実施する予定である。

実用機においては、実海域で実際に潜水調査船に搭載し、画像情報のデータを伝送して、受信側でこの復調信号が収束したときの適応等化器のフィルタの係数を基に、更に正確な逆特性の値を決定する機能を付加することができる。それにより、実際の運用に当たっては、更にエラー率の少ない伝送が可能となると考えられる。

参考文献

- 1) 土屋ほか：PSK音響信号による画像情報の海中伝送について，海洋音響研究会 研究発表会講演論文集，第5回，P. 37～40（1989）
- 2) 土屋ほか：音響による画像伝送，深海開発シンポジウム予稿集，関西造船協会，P. 80～94（1989）
- 3) 許 ほか：海中における鉛直方向の音波の減衰について，JAMSTECTR 23号，P. 31～41（1990）
- 4) 土屋：音響による画像情報のデジタル伝送，JAMSTEC 第2巻第2号 P. 9～18（1990）
（原稿受理：1990年11月26日）