

超高速超長距離光伝送方式の動向

池田 正宏*

Trend of Ultra-high Speed and Ultra-long Span Optical Transmission Systems

Masahiro IKEDA

ABSTRACT

Ultra-high speed and ultra-long span optical transmission systems which are required for the future large capacity information transmission systems are surveyed. There are three optical transmission systems which are situated as next systems followed by the intensity modulation-direct detection systems. These three systems are, (1)optical fiber amplification transmission systems, (2)coherent optical transmission systems and (3)optical soliton transmission systems. Progress on erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) and integrated planar lightwave circuits have enabled to develop these new optical transmission systems. These new age optical transmission systems successfully overcome the two main problems which limit transmission distance and information capacity.

Keywords : 光伝送方式、光ファイバ伝送方式、コヒーレント光伝送方式、ソリトン光伝送方式

1. まえがき

1970年に20dB/kmのシングルモード光ファイバがアメリカのコーニング社によって製造、発表されて以来今

年で25年足らずであるが、既に北海道から沖縄までの4200kmの日本縦貫伝送方式は言うに及ばず海外との主要な伝送路も光伝送方式で構成されている。これは以下の三つの主要な技術の発展によって達成されたものと考えられる。

- (1) 石英系光ファイバが最低損失を示す1.55 μm 帯で使用できる光ファイバの開拓、
- (2) 1.55 μm 帯で高速動作する半導体レーザーの開発、
- (3) 電子回路の高速化技術。

図1は現在NTTによって商用に供されている基幹光伝送方式を示している。1981年にF-32M方式と、F-100M

方式が初めて商用に供されている。この100Mb/sまでの中容量伝送方式が最初に提供されたのは、小容量領域ではまだメタルの伝送方式に採算的に勝てず、大容量領域

光伝送方式 Fiber-Optic Trunk Transmission Systems

Item \ System	F-6M	F-32M	F-100M	F-400M	F-1.6G
Information Bit Rate	6.312Mb/s	32.06Mb/s	97.728Mb/s	397.200Mb/s	397.2x4Mb/s
Capacity (TP Channel)	96x2ch 96ch	480ch	1,440ch	5,760ch	23,040ch
Wavelength	1.2/1.3 μm	1.3 μm		1.55 μm	
Optical Fiber	GI	SM (1.3 μm , Zero Dispersion)		SM (1.55 μm Zero Dispersion)	
Optical Source	InGaAsP/InP-FP-LD			InGaAsP/InP-DFB-LD	
Optical Detector	Ge-APD			InGaAs-APD	
Repeater Spacing	20km 50km	40km (1.3 μm)		80km (1.55 μm)	
Service In	1984.7	1981.12	1981.12	1983.12	1987.12

120km in Submarine Section

図1 基幹光伝送方式の開発経緯

* 電子・電気工学科

では技術的に不可能であった事によるものである。それから5年足らずで、光ファイバは1.55 μm 帯の最低損失波長で零分散、光源は1.3 μm 帯のファブリペロ型半導体レーザから1.55 μm 帯のDFBレーザへと進展する事によって1.6Gb/sの大容量光伝送方式の実用化が達成されている。これらの技術によって、無中継伝送距離の増大、伝送路の大容量化が図られ、距離やビットレートにほとんど依存しない通信網が構築されるようになってきた。

しかしこれらの光伝送方式は光ファイバとレーザ光を使うとは言え、強度変調-直接検波方式 (IM-DD方式) を採用しているため電気のPCM-3R中継方式と同じ理由からビットレートと中継間隔は1.6G-120km程度が限界である。これからのマルチメディア時代における通信網としては完全な無中継伝送と完全にトランスペアレントな伝送路が要求されてくる事は当然のなりゆきである。ここではこの要求に答える新伝送方式として最近脚光を浴びている以下の三つの光伝送方式について概観することとする。

(1)光ファイバ増幅伝送方式：これまで商用に供されてきた光伝送方式では、減衰した光信号を増幅するために、いったん電気信号に変換して電子回路で増幅し、さらに光信号に変換して送り出す方式を採っている。これは光信号そのものを直接増幅する実用的な手段が無かったためである。ところが最近光ファイバのコアにエルビウム (Er) をドープした光ファイバを用いる事によって、容易に光信号を増幅出来る事が実証され⁽¹⁾、超大容量の光伝送方式の実現も可能な事が明らかとなってきた。

(2)コヒーレント光伝送方式：電気信号による伝送方式ではキャリア周波数が10GHz程度のマイクロ波領域でもキャリアの位相や周波数を変調するコヒーレント変調方式が採られているが、光のキャリア周波数は約200THz (テラヘルツ、1THz=1000GHz) と非常に高い為、このコヒーレント光変調方式を採る事が困難であった。最近の半導体レーザ光源の進歩により安定で、発振線幅の狭い光源が実現されるようになりこの方式による大容量伝送方式の実現も可能な事が実証されるようになってきた。

(2)ソリトン光伝送方式：通常の光ファイバを通常の伝送方式によって利用する限り光ファイバの分散特性(波長による群速度に差があるため光パルスが広がる現象)による伝送速度と、中継間隔の限界から逃れる事は不可能である。そこでこの限界を突破する新しい光伝送方式として光ファイバにおける非線形光学効果を

利用したソリトン光伝送方式が提案され、実用的には無限距離の無中継大容量伝送方式の実現も可能な事が実証されるようになってきた。

以下にこれらの新しい光伝送方式について概観することとしたい。

2. 光ファイバ増幅伝送方式

2.1 光ファイバ増幅器の特徴と応用

光信号の直接増幅は光信号を扱う者にとっての当初からの夢であったが、原理的にはレーザの利得媒質を用いる事によって可能である事は周知の事実であった。ところが実用的な技術として利用できるようになったのはここ数年のことで、その直接的な契機はエルビウム (Er) 元素をドープした光ファイバを用いれば、1.55 μm 帯で光信号を増幅出来る事が実証された事にある。図2は光ファイバ増幅器の構成を示したものである。構成は非常

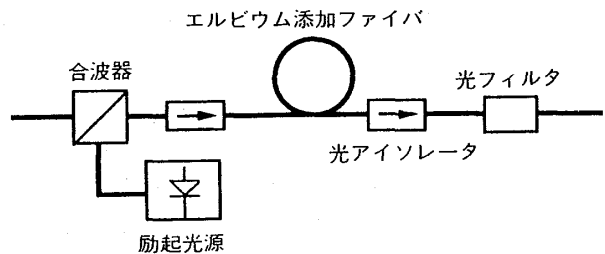


図2 光ファイバ増幅器の構成

に簡単で、エルビウム元素を数十ppm程度ドープしたファイバ (EDF) を利得媒質として、信号光は石英系光ファイバの最低損失波長である1.55 μm 帯の波長を使用する。合波器を通して励起用の光源から1.48 μm の光を注入する。信号光が増幅される原理はレーザにおける誘導放出と同じである。この光アンプ (EDFA) は利得媒質が光ファイバであることと励起用光源が半導体レーザを使用することが出来る事から非常に小さく構成できる特長がある。例えば、全長が120mのEDFAでは約20mWのポンピングパワーで約30dBのゲインを稼ぐ事が出来る。ま

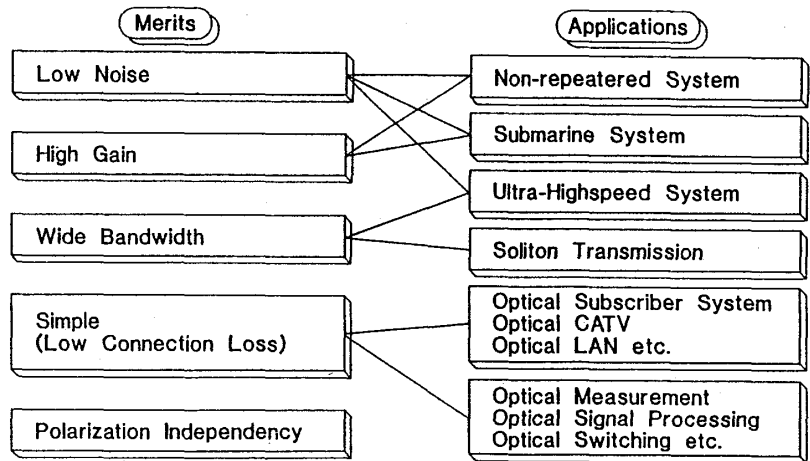


図3 光ファイバ増幅器 (EDFA) の特長とその応用分野

た1.55 μm帯での3dBダウンの帯域幅は約500GHz以上の広帯域性を有している。図3は光ファイバ増幅器(EDFA)の特長とその応用分野についてまとめたものである。この図から分かるように、高出力、低雑音で高いゲインが得られる事から、無中継システムや海底光伝送システムに適用されるのは当然の事であるが、構成が光ファイバのみで構成できる簡便さから光加入者系システムや光計測の分野、さらには光交換システムの分野にもその応用が期待されている。また結晶性の媒質を利用する半導体光アンプや固体光アンプ等では信号光の偏波に依存してそのゲイン特性が異なる偏波依存特性が生じるが、この光ファイバアンプでは偏波依存性が無い特長があるため使いやすい。

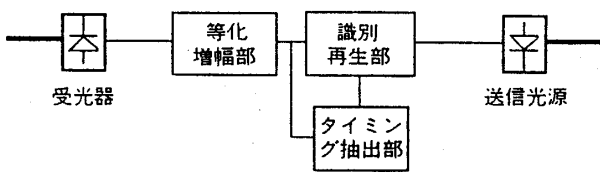
2.2 海底光増幅中継伝送システム

光ファイバ増幅器を用いた光伝送方式は種々のものがあるが、ここでは中継間隔が大幅に延びる事によるメリットが最も顕著に現れる海底光伝送方式について述べる事とする。図4に従来の再生型光中継伝送方式と光直接増幅伝送方式の構成について示す。再生型中継の場合には各中継器において光信号を電気信号に変換し、等化増幅(Re-shape)、タイミング抽出(Re-timing)した後、

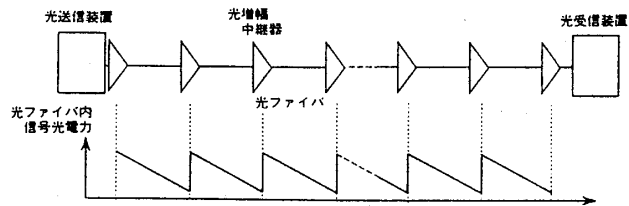
識別再生(Re-generate)して再び光信号に変換して送出する、いわゆる3R中継伝送方式となる。したがってこの方式による伝送方式の大容量化には、各中継器毎に高信頼度な、広帯域光受信回路、等化、識別、再生を行う高速電子回路、高速変調時にもシングルモードで発振するDFB(分布帰還型)半導体レーザ、等の各種回路を開発する必要がある。

一方、光直接増幅伝送方式では図(b)に示すように3R中継は必要なく、光ファイバ増幅器(EDFA)で光信号のレベルを回復するだけで送出する。光増幅中継器においては、中継器内に必要とされる回路はエルビウムドープファイバを励起する為の半導体レーザ以外は受動光部品だけであり、中継器の信頼性確保が容易である。また太平洋横断伝送時に必要となる、1個以上の光中継器を連続接続するときにも、全体での伝送帯域は20GHz以上の広帯域性が確保出来るため、高速の伝送システムの開発が容易となる。さらに同一の中継伝送路で種々のビットレートの情報を送る事も可能であり、且つ送受信端の装置のみのグレードアップで方式の更改拡張も可能である。

表に、1993年に最終試作と総合評価が行われた海底光増幅中継伝送システム(FSAシステム)の主要諸元を



(a) 再生型光中継伝送方式図



(b) 光直接増幅伝送方式

図4 光中継伝送方式の構成

表 海底光増幅中継伝送システムの主要諸元

表 FSAシステムの主要諸元

項目	内容	
システム構成	伝送速度	600Mbit/s, 2.4Gbit/s, 10Gbit/s (SDH)
	中継間隔	100km (伝送距離 1,000km)
	信号波長	1,552nm
	中継系レベル制御方式	励起光パワー制御による平均出力一定方式
	中継系帯域制御方式	中継器内蔵フィルタによる帯域整形
海底中継器	励起方式	前方励起
	光出力	+ 6 dBm (励起光パワー制御による平均出力一定値制御)
	収容システム数	最大6サブシステム
海底ケーブル	構造および波長分散	OSF (海底光) 統一ケーブル (12心) ファイバの長手方向波長分散配置
監視制御方式	監視信号	制御信号: 100bit/s. 送信信号光をサブキャリアASK変調 応答信号: 励起光変調により, 伝送信号光をサブキャリアFM変調
	中継器動作状態モニタ	入力レベル, 出力レベル, 励起レーザ電流, 温度を, 応答信号により遠隔モニタ
	ファイバ破断点標定	高感度コヒーレントOTDR 破断点分解能 1km

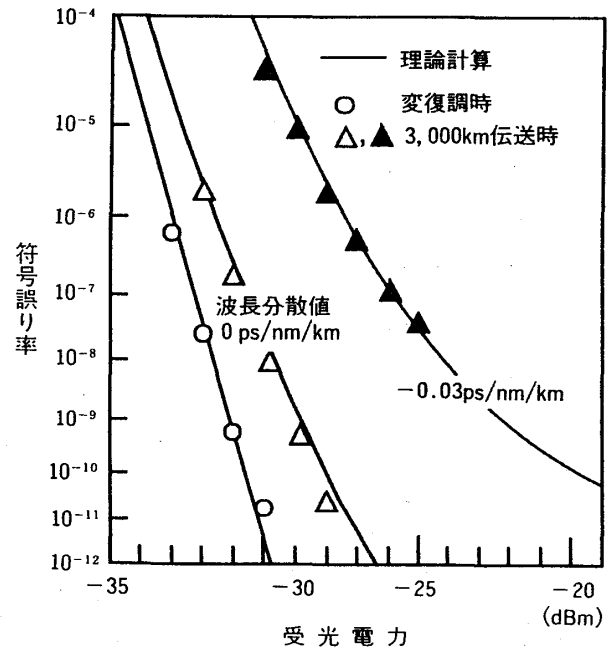
示す⁽²⁾。伝送速度は600Mb/s、2.4Gb/s、10Gb/sの多様な伝送速度に対応している。中継間隔は100kmの10中継により伝送距離1000kmにわたって 10^{-9} 以下の誤り率で伝送出来る事が確認されている。使われている信号光の波長は、システムの経済性の観点から選択されている。すなわち、①光ファイバの最低損失波長帯であること、②EDFAによって高利得が得られる波長帯であること、③修理ケーブルとして既存の海底システム用と共用できること、の3点から1.552 μ mに設定されている。また、設計値通りの伝送特性を得るためには中継器の出力光電力の制御が重要である。本伝送方式では簡単な中継器構成で高性能な光中継器を実現するという観点から平均出力光電力を一定とする方式が採用されている。また光ファイバ増幅器は広帯域であるがために発生するASE（自然放光）による累積雑音光電力が無視できない大きな問題となる。この雑音電力を低減化するために、本方式では信号光波長帯域外の中継器利得をバンドパス光フィルタを用いて低減させ、所期の特性を得ている。

光直接増幅伝送方式の中継間隔を制限する主な伝送特性劣化要因としては以下の項目が挙げられる。

- (1)EDFAにおけるASE雑音の累積、
- (2)信号光とASEの間の光ファイバでの四光波混合（非線形現象によって新しい光周波数の光が発生する現象）により発生する過剰雑音の累積、
- (3)光ファイバの自己位相変調（非線形現象によって光信号自身の位相が変化する現象）と、波長分散に起因する波形劣化、
- (4)光ファイバの偏波分散（信号光の偏波によって群速度が異なる現象）による波形劣化、
- (5)中継系の利得や損失の偏波依存性によるASE雑音の累積。

これらの要因による伝送特性の劣化量は、中継器出力電力、光ファイバの波長分散、光非線形定数、中継間隔、伝送距離等の多くのパラメータに依存している。本伝送方式の各パラメータは、計算機によるシミュレーション、周回実験、多中継伝送系による伝送実験等によって最適化されている。これらの劣化要因の中で本方式に特有の要因である(2)の四波混合による過剰雑音の低減方法について述べる事とする。この現象は信号光と雑音光(ASE)が光ファイバの非線形効果により、信号光をポンプ光として雑音光成分が増幅される現象であるが、この増幅度が光ファイバの波長分散値に大きく依存している。すなわち、分散値が正の領域では信号光、雑音光間の四光波混合効果の相互作用長が長い為、大きな過剰雑音増幅が起こるが、負の分散値を持つ光ファイバではそれほどではないことが分かっている。したがって、信号光電力が大きい中継器直後の光ファイバには負の分散値を

持った光ファイバを用いる必要がある事が分かる。また全体としては光ファイバの分散値は零にすることが望ましいため、信号光パワーが弱まった段階では正の分散値を持った光ファイバを接続して伝送信号の波形劣化も抑圧する長手方向波長分散管理方法を採用している。この方法による有効性を3000kmの伝送実験によって検証した結果を図5に示している。伝送速度10Gb/s、中継間隔100kmで受光電力に対するPCM符号誤り率をプロット



(伝送速度：10Gbit/s、中継間隔：100km、
中継器出力信号光電力：8 dBm)

図5 3000km伝送時の符号誤り率特性

したものである⁽³⁾。実線は、ASEによる雑音と自己位相変調による波形劣化を考慮したモデルによる符号誤り率特性の計算結果である。負の分散値を持つファイバのみを用いた場合には 10^{-9} の誤り率を確保するためのパワーペナルティが10dB以上となる。これに対して平均の波長分散値が零の場合には大幅に波形劣化が改善されてパワーペナルティは3dB以内の増加におさまっている。これはASEによる雑音の累積が伝送特性を決定する主要因である事を示している。

これらの技術開発によって従来の識別、再生中継伝送方式では困難であった10Gb/s \times 6サブシステムという世界最大の伝送容量を有し、且つ中継間隔100km、全長1000kmの経済的な海底光増幅中継伝送方式が実現された。

3. コヒーレント光伝送方式

3.1 コヒーレント光伝送技術

光も無線通信で使われている電磁波の一種であるが、周波数が格段に高い。すなわち光通信に用いる1 μ m帯の周波数は約200 THz (2×10^{14} Hz)と100 GHz以下の電

波と比べると3桁も異なっている。したがって光を波として、その位相や周波数を取り扱う技術は格段に難しくなると言う事が出来る。ここで光の周波数や位相が時間的にも空間的にも長いスケールで保たれている光をコヒーレント光と呼んでいる。電気通信方式で、この周波数や位相を変調して情報伝送を行うコヒーレント伝送方式が一般的に使われている理由は発振器の安定性が優れている事に他ならない。したがって光伝送方式においても光源の線幅（発振スペクトル）が狭くなり、かつ安定化することによってコヒーレント伝送方式が可能となるのである。また現在実用になっているPCMの光強度変調—直接検波方式では光パルスの強度のみを検出するため、受信端では受光素子のみで構成される。一方コヒーレント光伝送方式では光の周波数や位相まで検出するため、受信端では局部発振光源が必要となる。図6はコヒーレント検波方式の一種である光ヘテロダイン検波回路の基本構成例を示したものである。信号光の電界の変化を検出する

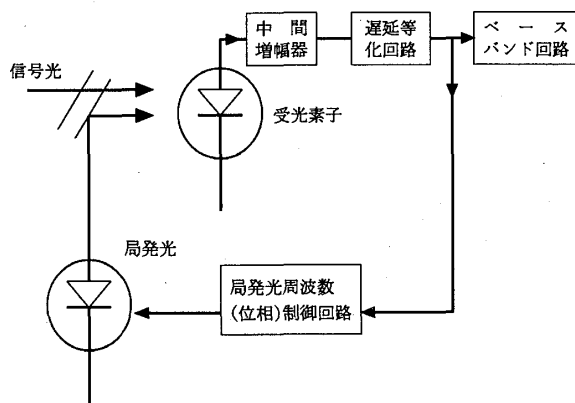


図6 光ヘテロダイン検波回路の基本構成

ため局部発振光の偏波特性を信号光のものと合わせて受光素子へ入射させている。ここではヘテロダイン方式を示したため信号光と局部発振光の発振周波数は異なり、その差が中間周波数として電気信号に変換されるが、ホモダイン方式の場合には信号光と局発光の発振周波数が同じとなるため受光素子の出力はベースバンドの電気信号となる。デジタル伝送では振幅変調、周波数変調、位相変調に対応して、それぞれASK (Amplitude Shift Keying)、FSK (Frequency Shift Keying)、PSK (Phase Shift Keying) と呼ばれるが、コヒーレント変調方式では光の電磁界の振幅、周波数、位相をシフトする事に対応する。受信感度は光変調方式と光検波、復調方式の組み合わせで異なるが、理論的にはPSK変調—光ホモダイン検波方式が一番受信感度が良くなる。この方式の受信感度は、光強度変調—直接検波方式に較べると6 dBの改善がはかれる。これは局部発振光の光パワーが強いことによって熱雑音を抑圧出来る事による効果

で、局発光利得と呼ばれている。しかしながらこの方式が実現するためには光源の発振スペクトル（線幅）が狭い必要がある。例えば10Gb/sのPSK—ホモダイン検波方式では要求される半導体レーザの発振線幅は約400kHz以下となる。これは通常ファブリペロ型半導体レーザの線幅が数十MHz以上であることを考えると非常に厳しい要求条件となるが、共振器長の長いDBR（分布反射型）レーザ（コヒーレント伝送用半導体レーザ）で達成可能である。高速の伝送になるにつれて光ファイバ伝搬中での波形劣化が中継間隔の制限を与える。直接検波方式ではそのまま伝送距離の制限となるが、光ヘテロダイン方式では、中間周波数帯の電気信号の段階で遅延等化という波形処理によって光ファイバの分散の影響を補正する事が可能となる⁽⁴⁾。図7は、1.3 μ m帯零分散ファイバを用いた1.55 μ m帯半導体レーザでの8 Gb/s位相

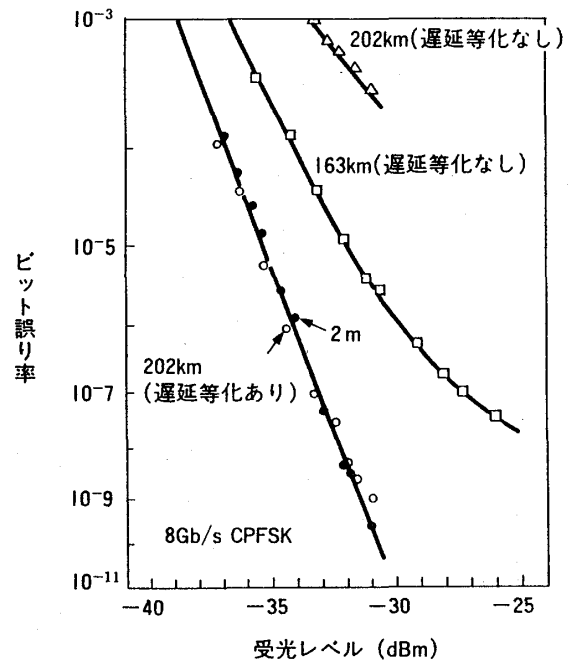


図7 8 Gb/s CPFSK変調—ヘテロダイン検波方式の誤り率特性

連続FSK (CPFSK) を用いた伝送実験における誤り率特性を示したものである。遅延等化による分散補償を行わない場合には202km伝搬した段階では誤り率が大きくなりすぎて 10^{-9} 以下の誤り率確保が不可能であるが、中間周波における分散補償によって202km伝搬後でも光信号を送出した直後の誤り率と遜色無いところまで改善される事が分かる。

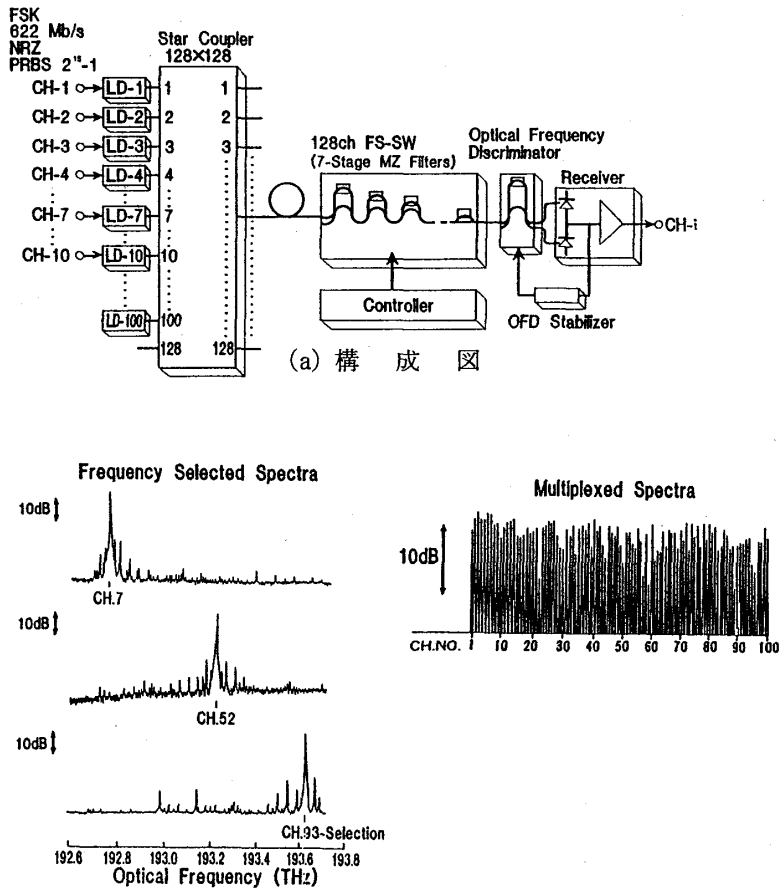
3.2 光周波数分割多重（光FDM）技術

回線とかチャンネルとかの情報伝達の単位が複数個束ねられてより大きな通信路を構成する事を多重化といい、通信網を経済的に実現したり、柔軟な運用には欠く事の出来ない技術である。通常PCM光伝送方式では、時間軸を分割して複数の情報単位が一つの通信路を共有す

る時分割多重（光TDM）方式が採られているが、この方式では多重数を飛躍的に増やすためには超高速の光パルス技術および超高速の電子回路技術の進展が不可欠である。超高速の光パルス発生技術に比較して超高速の電子回路の開発は伝搬遅延の問題と雑音の問題で上限が見えているのが現状である。しかるに双方向の画像通信を普及させるためには、1 Tb/s以上の基幹伝送路が必要であると言われている。そこでコヒーレント光の特性を利用した、光周波数を多重化する光周波数分割多重技術が脚光を浴びてくるようになった。光ファイバ通信で使用される光は、周波数が200THzであると同時に、光ファイバの伝送損失が2 dB/km以下の低損失な周波数帯域幅が200THz以上あり、非常に大きな多重数が期待出来る。例えば、ファイバの最低損失波長帯域である1.5～1.6 μm帯の周波数帯域12500GHzを10GHz間隔に分割すると1000波以上の多重数が得られる。この1波あたり1 Gb/sの伝送速度とすると光ファイバ1本あたり1 Tb/sの伝送容量が確保出来る事になる。このように光周波数多重技術は電子回路側に負担をかける事無く伝送容量を増大させることが可能となることから今後の実用的な光伝送方式には必須の技術である。

光FDMの基本技術としては、①発振周波数の安定な

光源、②多チャンネル狭帯域光フィルタ、③多チャンネルの光を同時に増幅する多チャンネル増幅器、が挙げられる。周波数安定化光源は、隣接チャンネルへの漏話を防ぐために狭い発振線幅を持ち、かつ周波数が安定している必要がある。このような光源としてコヒーレント伝送用半導体レーザがあるが、光FDM用光源としてはまだ不十分である。すなわち、各チャンネルの光周波数が周波数基準に各々ロックしていないと受信端で漏話が生じる事になる。この要求を満たすために周波数特性を校正した光フィルタを基準に各コヒーレント伝送用半導体レーザをロックして用いている。また周波数間隔の狭い光信号を分波、合波するためには安定で、かつ急峻な波長特性を持った光合分波器が必要となる。図8はこれらの光回路部品を用いて行った100波光FDMの伝送実験の構成を示している⁽⁶⁾。622 Mb/sのFSK信号を100波、128×128の石英系スターカップラを用いて合波し、多チャンネル型光増幅器を通して多中継伝送実験を行っている。受信端では100波の信号の中から1波を分離するために7段のマッハチェンダ型光分波器（FS-SW）⁽⁶⁾を用いている。この光分波器は10GHz間隔の信号を128チャンネル分波する事が出来る。図(b)に100波多重したスペクトルと任意の1波を分波したスペクトルを示している。



(b) 10GHz間隔の100CH選択および多重スペクトル

図8 100波光FDM伝送実験

挿入損失5 dB以下、クロストーク-25dB以下の良好な特性が得られている。

これらの光FDM技術は将来の通信網にたいして次のような効果を持っている。

- (1)大容量化：Tb/s以上の大容量化が容易に達成される、
 - (2)柔軟性：送る情報の伝送形式や、伝送速度によらずに多重化出来る、
 - (3)拡張性：新しい周波数の光信号を追加することで、容易に通信路を拡張出来る、
 - (4)運用の容易性：光周波数のみを管理すれば良いので運用が楽である、
- 等の大きなメリットを持っている。

4. 光ソリトン伝送方式

4.1 光ソリトンの特徴

ソリトンという孤立波自体は1964年に発表されて以来、その特異な振る舞いから通信への応用が考えられてきた。すなわち、孤立した波がお互いに衝突を繰り返してもその波形を変える事無く通り過ぎるというもので、そのパルスが粒子的な振る舞いをする事からソリトンと名付けられた。しかしながら、このソリトン波を光ファイバ通信に用いる事を最初に提案したのはベル研究所のHasegawa⁽⁷⁾である。このパルスは光ファイバの群速度分散と自己位相変調効果と呼ばれる3次の非線形光学効果とが釣り合うことによって発生するものである。図9はソリトン波の原理を示したものである。今光パルスが光ファイバ内

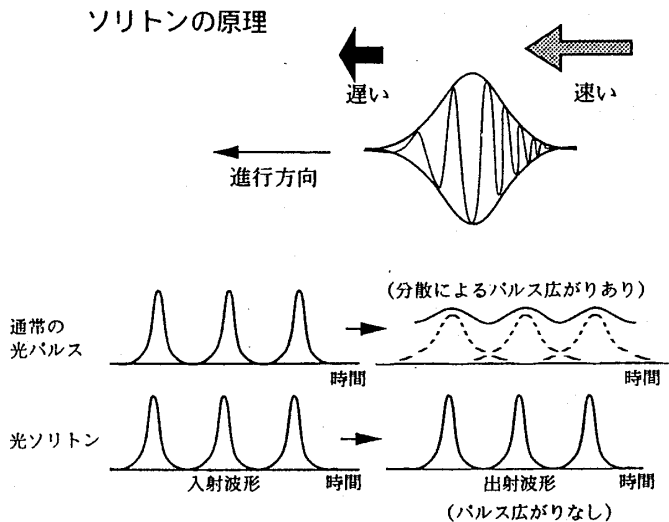


図9 ソリトン波の原理と伝搬波形

を伝搬する場合について考える。光パルスのパワーがある程度強くなると光の電界によって光ファイバの非線形光学効果が大きくなって自己位相変調効果が見えるようになってくる。すなわち図に示したようにパルスの進行方向に対して前方の光は長波長側に、後方の光は短波長側

に変化するようになってくる。ところが、光ファイバの異常分散領域（通常の光ファイバにおいては1.3μmより長波長側）では長波長の光に較べて短波長の光の群速度が速くなるため、パルスは細くなり、最終的には光ファイバの群速度分散によるパルスの広がりや釣りあう条件があるのである。これが光ソリトンと呼ばれるもので、図に示したように通常の光パルスの伝搬ではパルス広がりによって長距離伝搬した後ではパルスがくっついて識別不可能となるのに対して、光ソリトンではパルス波形が変化しない。従ってこの光ソリトンを光ファイバ伝送に利用すると次のような利点がある。

- (1)石英系光ファイバの損失が最小となる波長1.55μm帯で光ソリトンを発生させる事ができるため長距離伝送が有利となる、
 - (2)超短パルスを伝送できるため大容量伝送が可能となる、
 - (3)波形歪が無いため超長距離伝送が可能となる、
 - (4)光ファイバの分散によるシステムの制限条件を考慮しなくても良い、
- 等が挙げられる。

4.2 ソリトン伝送技術

理想的なソリトン伝送は無歪であるため、伝送距離に無関係となるが実際の光ファイバ伝送ではそうはいかない。光ファイバには本質的にレイリー散乱という光損失があるため、入射光パルスの強度を維持する事が出来ない。従来はそれを防ぐために、誘導ラマン散乱という3次の非線形光学効果によって得られる光増幅作用によって光損失を補償する方法を採っていたが、実用に供するレベルには達しなかった。しかしながら最近光ファイバ増幅器（EDFA）が開発されるに至って一気に実用的な光ソリトン伝送方式が脚光を浴びるようになってきた。この光ソリトン伝送方式はダイナミックソリトン伝送方式と名付けられ⁽⁸⁾、今日の光ソリトン伝送の中心的な技術となっている。図10はダイナミックソリトン伝送方式の構成と特性を示している。ここでは光ファイバによる

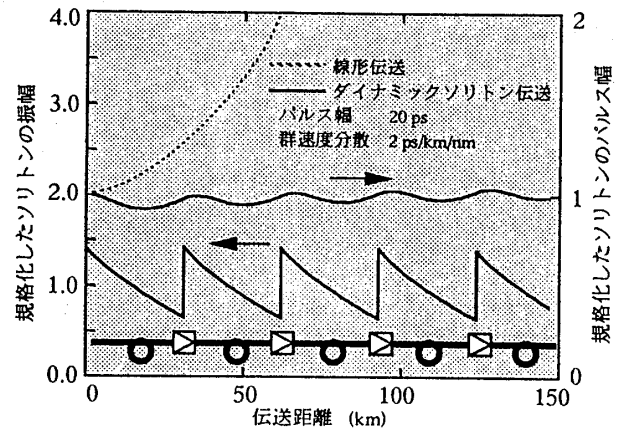


図10 ダイナミックソリトン伝送方式

光伝搬損を光ファイバ増幅器（EDFA）で集中定数的に

で、リシウムナイオベートの光変調器でコーディング（変調）されている。長距離伝送実験用の光ファイバは520kmのループ状とし、光ファイバ増幅器は50km毎に挿入されている。この実験では光パルスの波形を時間と周波数の両領域で制御する事によって、実に1億8千万km伝搬後の光パルス波形を歪無く検出する事に成功している。この距離は地球を4500回周回する距離である事を思えば伝送可能距離としては無限であると言っても過言ではない。また10Gb/sの符号誤り率は100万km伝搬後と入射時とでほとんど劣化しない事が確認されている。このように光ソリトン伝送方式では伝送距離の制限は克服されている。

5. あとがき

1970年に光ファイバが実用の光伝送方式に使用可能である事が示されて以来ちょうど25年であるが、今や光ファイバ伝送方式以外には超大容量、超長距離伝送方式は考えられない状況にある。本論文で紹介した三つの光伝送方式はまだ実用方式として商用に供されていないが、今後の必要とされる情報伝達容量と高速性を考慮するとこれらの方式が導入される事は必至である。しかしながらこれらの光伝送技術の発展速度に較べて電子回路の高速化技術の進展は頭打ちの傾向にある。一方電子回路の高速化には誘導の問題とクロックスキューの問題があり、この問題は容易に解決の目処が立たない事から、オール光技術によるパルス処理によってこの問題を回避する研究が活発化している。例えば光ファイバのカー効果を利用した全光TDM多重をもちいた100Gb/s、200kmの伝送実験が成功している。しかしながら、将来必要とされるトランスペアレントな伝送方式を考えると、伝送路のみならず交換方式、端末の処理までもが高速化、光多重化される必要があるものと思われる。

参考文献

- (1) “特集 光ファイバ増幅器と応用システム”、NTT R&D, Vol.40, No.2, 1991.
- (2) 今井、雨宮、深田、高橋、“海底光増幅中継伝送システム”、NTT R&D, vol.43, No.11, pp.1181-1190, 1994.
- (3) T.Imai, M.Murakami and A.Naka, “Optimum parameter guidelines for 10 Gb/s multi-megameter transmission systems considering the nonlinear effect”, Electron. Lett., vol.29, No.16, pp.1409-1410, 1993.
- (4) 野須、伊藤、“光波通信技術の研究進む”、NTT技術ジャーナル、Vol.2, No.9, pp.50-54, 1990.
- (5) 野須、“光多重技術とその伝送システムへの適用”、NTT技術ジャーナル、Vol.4, No.9, pp.18-21, 1992.
- (6) 小林、“コヒーレント光通信用光部品”、平成3年電気・情報関連学会連合大会予稿集、S24-6, 1991.
- (7) A.Hasegawa and F.Tappert, “Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers I, Anomalous dispersion,” Appl. Phys. Lett., Vol.23, No.3, pp.142-144, 1973.
- (8) M.Nakazawa, K.Suzuki, H.Kubota, E.Yamada and Y.Kimura, “Dynamic optical soliton communications,” IEEE J.Quantum Electron., Vol.QE-26, No.12, pp.2095-2102, 1990.
- (9) M.Nakazawa, “Soliton transmission in telecommunication networks,” IEEE Communications Magazine, Vol.32, No.3, pp.34-41, 1994.