

## 研 究 解 説

## 位相共役を用いたソリトン伝送

Phase-Conjugated Optical Soliton Transmission

吉 岡 秀 樹\*・藤 井 陽 一\*\*

Hideki YOSHIOKA and Yoichi FUJII

光ソリトン通信において、短パルス化によって不要な非線形効果が顕著に現れ、伝送波形劣化につながる。また集中定数型光増幅器による多段中継伝送システムでは中継間隔が短くなり、また増幅時に発生する雑音成分が符号誤り率の劣化の原因となる。

本論文では、位相共役器を用いたソリトン伝送を提案し、まず増幅間隔の拡大について検討する。次に非線形効果と雑音成分による伝送劣化の抑圧について検討する。

## 1. ま え が き

光ファイバ通信は現在、高速大容量化の時代を迎えようとしている。そのなかで、光ソリトン通信の研究が盛んに行われている。光ソリトンを用いて高速通信を行う一つの方法に、パルス幅を短くする方法がある。それには大きなパルス振幅を必要とし、これまで影響の小さかった非線形効果が顕著になるため、様々な問題が生ずる。そのなかにはソリトン自己周波数シフト (SSFS: Soliton Self-Frequency Shift)<sup>1)</sup>や、ソリトンパルス間相互作用<sup>2)</sup>といった現象があり、これらはパルスの位置ずれにつながる。またそれらの非線形効果は自然放出光 (ASE) 雑音によってランダムに変化し、タイミングジッタを生み出す。そのため、光ソリトンを長距離伝搬させるためには、これらの非線形効果によるパルスの位置ずれを補償する必要がある。

そこで、線形伝送での群速度分散補償に利用するために研究されている光位相共役器に着目した<sup>3)</sup>。光位相共役器は、群速度分散だけでなく非線形効果による歪み補償も期待されるため、光ソリトン伝送において不必要な非線形効果を抑圧できると考えられる。また非線形媒質中での四光波混合を利用する光位相共役器は、高速な全光伝送システムの構築を可能とする。

そこで本論文では、まずダイナミックソリトン伝送法をベースとし、位相共役器を応用して増幅間隔を拡大した伝送システムを提案し、検討を行う。次に、伝送速度 80Gbit/s での安定した伝搬を目標にし、光位相共役器を用いて ASE 雑音と非線形効果によるタイミングジッタの抑圧を行う位相共役ソリトンを提案、検討を行う。

## 2. ソリトン伝送における中継器間隔の延長

## 2.1 はじめに

ダイナミックソリトン伝送法を用いた伝送システムを構築するとき、中継器間隔が問題となる。その間隔は、入射パルス幅を短くすると、極端に短くなる。そこで位相共役器の時間反転性に着目し、中継器の間に位相共役器を挿入した伝送システムを提案、中継器間隔を拡大したときの安定したパルス伝搬の可能性を調べる。

## 2.2 位相共役器を用いた伝送システム

位相共役器を挿入した伝送システムを図 1 に示す。EDFA 間に、位相共役器 (OPC: Optical Phase Conjugator) を挿入している。入射端から見て、EDFA と OPC の間隔を  $L_1$ 、その後の EDFA までの間隔を  $L_2$  とし、 $L_1 + L_2$  を 1 セクションとして扱う。長さ  $L_1$  の伝送路では非線形効果が支配的であるためパルスが圧縮し、ある距離からパルスの広がりに転ずる。長さ  $L_2$  の伝送路では、位相共役器を通過することによりパルス幅が狭くなる。

この伝送システムを用いて 1 セクション分の伝搬シミュレーションを行った。ここで  $L_1$  を 20 km に固定し、 $N$  を 1.1 から 1.6 まで変化させて、パルス幅の変動を調べた。た

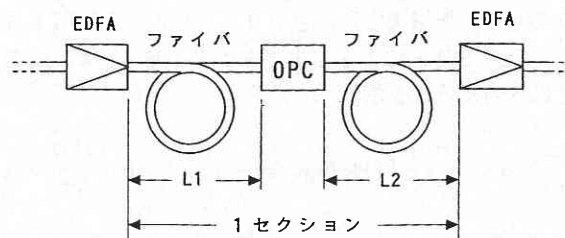


図 1 位相共役器を用いた伝送システム

\* 日本放送協会

\*\* 東京大学名誉教授・日本大学理工学部

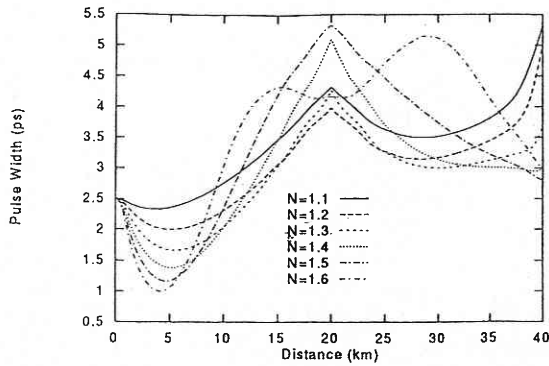


図2 図1における伝搬パルス幅変動

だし、ファイバのパラメータとして、分散： $0.5 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 、非線形屈折率： $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 、損失： $0.2 \text{ dB/km}$ を仮定し、位相共役器は理想的であるとし、位相共役光の中心波長は入射パルスの中心波長と同じであるとした。計算結果を図2に示す。この図より、 $N=1.5$ のとき、 $40 \text{ km}$ 地点においてパルス幅が $2.8 \text{ ps}$ にまで回復しているのがわかる。

この結果より  $L_1=L_2=20 \text{ km}$  とし、入射強度は  $N=1.48$  に設定し、 $2000 \text{ km}$  のパルス伝搬シミュレーションを行った。この計算において、EDFA および位相共役器は理想的であるとし雑音は考慮していない。EDFA はファイバの損失を完全に補償するものと仮定する。また、高次の群速度分散、非線形効果は無視している。計算結果より、 $200 \text{ km}$  ごとの EDFA 直後のパルス波形の変化の様子を図3(a)に、入力波形と $2000 \text{ km}$ での増幅後の出力波形の比較を図3(b)に示す。 $2000 \text{ km}$ に渡って伝搬中の波形歪みはほとんど見られずかなり安定した伝搬が可能であることが確認できる。

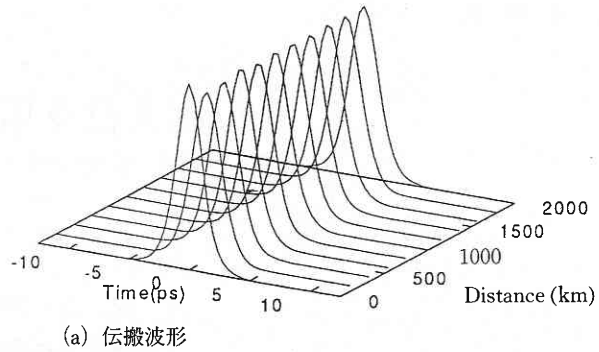
また、通常のダイナミックソリトン伝送の場合と比較するため、EDFA の間隔が  $5, 10, 20 \text{ km}$  の場合の伝搬パルスのパルス幅の変化を加えて、図4に示す。パルス波形の安定度は、増幅間隔がソリトン周期である  $5 \text{ km}$  の場合には及ばないものの、中継間隔が同じ  $20 \text{ km}$  の場合だけでなく、短い  $10 \text{ km}$  の場合と比較しても、優れていることがわかる。

### 2.3 ソリトン自己周波数シフト抑圧

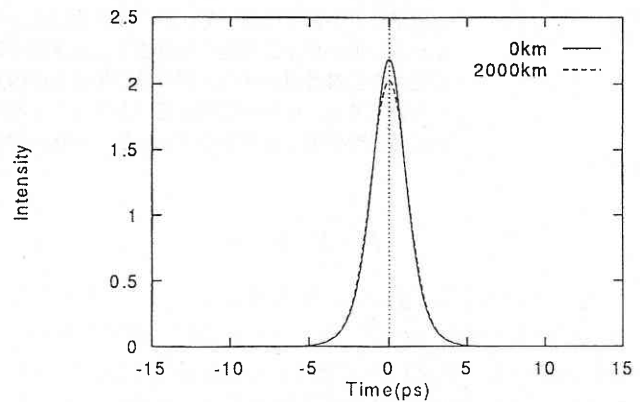
SSFS は非線形光学効果の一種で、低周波数側へのパワーのシフトが分散によってソリトンパルスの遅れとなる現象である。無損失伝送路をソリトンパルスが伝搬する場合に、その SSFS によって生ずるシフト量  $\nu_0$  は、式で表すと以下ようになる<sup>4)</sup>。

$$-\alpha = \frac{\partial \nu_0}{\partial z} [\text{THz/km}] = -1.20 \times 10^3 \frac{\lambda^2 D}{n^3 c \tau^4} \quad (1)$$

ここで、 $D$  は波長分散 [ $\text{ps}/\text{cm}^2$ ] で  $c$  は光速 [ $\text{cm}/\text{ps}$ ]、 $\tau$  はパルス幅 [ $\text{ps}$ ] を表す。この式の周波数シフト量  $\alpha$  を用いて



(a) 伝搬波形



(b) 入射、出射パルス波形

図3 2000 km 伝搬シミュレーション結果

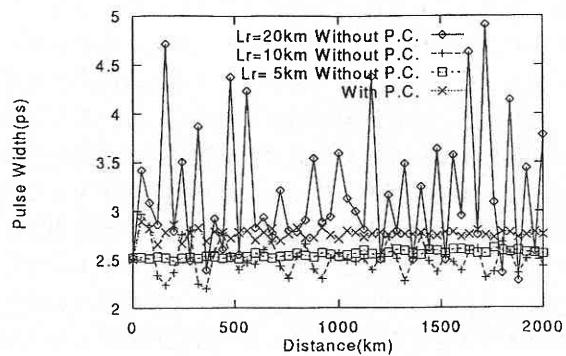


図4 伝搬パルス幅の変動

距離  $L$  [km] 伝搬した場合のパルスの位置ずれ  $T_d$  [ps] を求めると以下ようになる。

$$\begin{aligned} T_d &= \int_0^L (-\alpha z + \nu_0(0)) D_f dz \\ &= -\frac{1}{2} \alpha D_f L^2 + \nu_0(0) D_f L \end{aligned} \quad (2)$$

ただし  $D_f$  は分散を表し、その単位は [ $\text{ps}/\text{THz} \cdot \text{km}$ ] であ

る。また  $\nu_0(0)$  は中心周波数ずれの初期値である。幅が 2.5 ps のソリトンパルスが波長分散が  $0.5 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$  の無損失ファイバを伝搬した場合、2000 km で  $\nu_0 = -0.08 \text{ THz}$ ,  $T_d = 317 \text{ ps}$  になる。

SSFS による周波数シフトやパルスの位置ズレは、式 (1) (2) をみると同一強度のパルスではパルスの相対的な位置関係は変化しないことになる。しかし、入射時のパルスの幅にばらつきが存在する場合は位置のずれを生ずる。隣接パルスとのパルス幅の差が  $\Delta\tau$  であるとき、相対的なパルス位置のずれ  $\Delta T_d [\text{ps}]$  は以下のようになる。

$$\Delta T_d = \frac{1}{2} \alpha D_f L^2 \times 4 \frac{\Delta\tau}{\tau} \quad (3)$$

パルス幅に、2.5 ps の 2 % に相当する  $\Delta\tau = 0.05 \text{ ps}$  の違いが存在すると、2000 km の無損失伝搬で周波数シフト量の差は  $\Delta\nu_0 = 6 \text{ GHz}$ 、相対位置ズレは  $\Delta T_d = -25 \text{ ps}$  にもなる。

そこで位相共役器を用いて SSFS による周波数ずれを補正する方法を提案する。図 5 に示すように、中心周波数  $f_0$  のソリトンパルスが長さ  $L$  のファイバを伝搬すると、SSFS によってパルスの幅、強度に応じた周波数ダウンシフト  $\nu_0$  をうけ、出射パルスは中心周波数は  $f_0 - \nu_0$  となる。ここでポンプ光の周波数が  $f_0$  である位相共役器を通過すると、入射パルスのスペクトルは  $f_0$  を中心に反転され、中心周波数が  $f_0 + \nu_0$  の位相共役パルスが出射される。このパルスが最初のファイバと同じパラメータをもつ長さ  $L$  のファイバを伝搬すると、中継伝送によるパルス歪みが微小であり、SSFS の周波数依存性がわずかであれば、SSFS によって周波数シフト  $\nu_0$  をうけることになり、出射パルスの中心周波数は  $f_0$  に戻る。

図 1 に示した伝送システムの場合で、位相共役器による SSFS 抑圧効果を 2000 km の伝搬シミュレーションを行い検討した。ここでは以下の Hasegawa 方程式をもとにしている<sup>5)</sup>。

$$i \frac{\partial Q}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 Q}{\partial T^2} + |Q|^2 Q - \frac{Tr}{\tau_0} Q \frac{\partial |Q|^2}{\partial T} = i\Gamma Q \quad (4)$$

SSFS を表す項の係数  $Tr$  は  $3.0 \text{ fs}$  とし、他の条件は前節と同様であると仮定した。入射パルス幅に 2 % に相当する  $0.05 \text{ ps}$  のばらつきが存在する場合のパルスの相対的位置のズレを位相共役器を使用しない場合 (増幅間隔  $5 \text{ km}$ ) と比較して図 6 に示す。群遅延差が大幅に抑圧されていることが確認できる。

## 2.4 本章のまとめ

本章では位相共役器を用いたソリトン伝送システムを提案し、中継器間隔の拡大、SSFS の抑圧効果について検討した。ここで提案した伝送システムでは SSFS の影響を抑

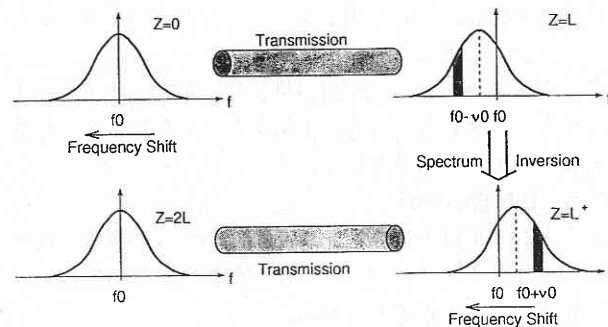
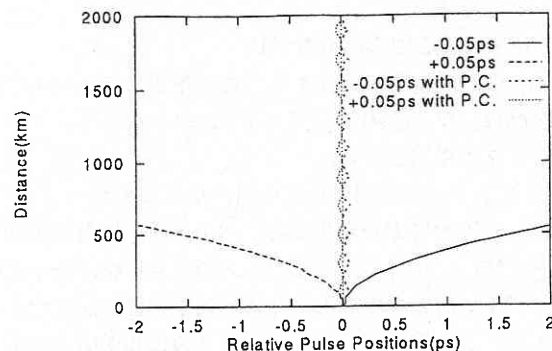
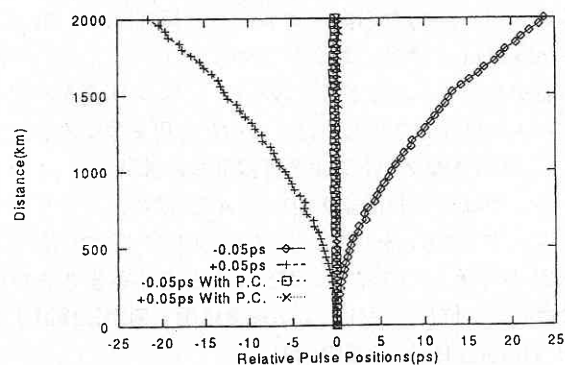


図 5 位相共役器による SSFS 抑圧の原理



入射パルス幅に 2% のばらつきがある場合の位相共役器によるパルス位置ずれ抑圧 (無損失ファイバのとき)



入射パルス幅に 2% のばらつきがある場合の位相共役器によるパルス位置ずれ抑圧 (損失  $0.21 \text{ dB/km}$  ファイバ,  $L_r = 5 \text{ km}$  のとき)

図 6 相対的なパルス位置のずれ

圧でき、中継間隔が  $20 \text{ km}$  で安定に伝送できることが、計算によって確認された。

## 3. 位相共役ソリトンによる非線形歪み補償

### 3.1 はじめに

隣接パルスとの時間間隔が短い場合には、非線形効果であるソリトンパルスの間に相互作用がはたらく。この相互作用による引力、斥力はパルスの衝突やパルス位置の大幅な変動を生みだし、受信側での符号誤り率の劣化につながる。また、EDFA で発生するランダムな雑音は信号パル

スの強度を変化させる一因となり、非線形効果をランダムに変化させることになる。

そこで、隣接パルス間が短い場合に、雑音と非線形効果がソリトン伝送に与える影響を考慮し、その抑圧を位相共役器によって行う方法を提案、検討する。

### 3.2 ASE 雑音の影響

雑音が非線形効果に与える影響は、パルスの到着時間のずれ、つまりタイミングジッタにつながる。その過程として、以下の3通りが考えられる。

#### (i) Gordon-Haus 効果

中心周波数のランダムなずれが群遅延分散によりタイミングジッタとなる。

#### (ii) SSFS による中心周波数ずれ

SSFS はパルス強度に依存するため、雑音によるパルス振幅の変動はシフト量のランダムなずれにつながり、タイミングジッタの原因となる。

#### (iii) ソリトンパルス間の相互作用に与える影響

雑音は、直接的にまたは間接的にパルス間力に影響を与える。まず第一に雑音によってパルスの電界振幅が微小に変動し、パルス間力を生み出す非線形効果の強さが変化すると考えられる。第二に、前後のパルスの振幅が微小に変化すると、非線形効果による位相変化速度の差から前後のパルスに位相差が生じることが考えられる。パルス間の位相差は、パルス間力の向きや大きさに関係する。第三に、Gordon-Haus 効果、および SSFS ジッタによってパルス間隔が変化することが考えられる。パルス間隔が変化し、パルスが接近した場合にはその相互作用を強くする。

### 3.3 位相共役ソリトンによる非線形歪み補償

ここでは位相共役器を用いて ASE 雑音によるタイミングジッタの抑圧を提案し、その効果について述べる。ASE が作用してタイミングジッタとなるさまざまな現象に対して、位相共役光による補償に関し個別に検討する。

#### (i) Gordon-Haus 効果の補償

Gordon-Haus 効果は位相共役器を用いることで低減できることが期待されている<sup>6)</sup>。

#### (ii) SSFS によるタイミングジッタの低減

SSFS によるタイミングジッタについても、(i) と同様に考えることができる。

#### (iii) ソリトンパルス間相互作用への影響低減

雑音による振幅変動が微小であり、ある程度蓄積されてパルス間力に影響を与えたと考える。3.2 で述べた第一、第二の場合であるが、位相共役器通過後は非線形効果が逆向きの力となってはたらくため、一度の増幅で蓄積される雑音が微小であれば、元のパルス間隔へと近づくことが考えられる。第三の場合は、Gordon-Haus 効果や SSFS によるジッタ自体が低減されれば、相互作用への影響は小さくなると考えられる。

### 3.4 2 パルス間相互作用

ソリトンパルス間相互作用が最も単純な場合として、2 パルス列の場合について調べる。パルスの接近を極力抑えるために、パルス間に位相差  $\phi = 0.37\pi$  与えている。

まず、位相共役光による補償を行わない場合に、非線形効果および ASE 雑音によるランダムジッタを調べた。ファイバのパラメータ、およびパルス列の条件は前章に示したものと同様とし、2000 km の伝搬シミュレーションを行った。ASE 雑音は各増幅段階でランダムな値を信号成分に加算して、過度に蓄積しないように 200 km ごとの増幅直後に帯域幅 4.8 nm (600 GHz) の帯域通過フィルタを挿入し、高域の雑音を除去することを仮定した。このシミュレーションで仮定した伝送システムの概略を図 7 に示す。ランダムジッタの大きさを調べるために、同様の計算を 15 回行っている。

伝搬シミュレーションの結果から、2000 km の 2 パルス伝搬の様子を図 8 に示す。パルス間隔にはかなりの変動が見られ、2000 km ではその間隔が 20 ps と入射時の 1.8 倍に拡大している。

ここで、OPC を利用した位相共役ソリトン伝送を提案する。伝送システムの概略を図 9 に示す。位相共役器は理想的であるとする。最初の位相共役器の挿入距離を変えて

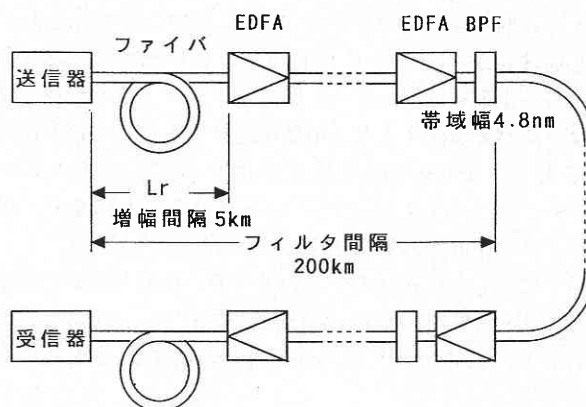


図 7 ソリトン伝送システムの概略図

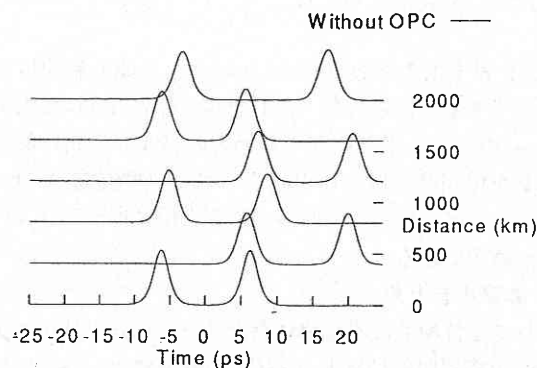


図 8 2パルス伝搬波形

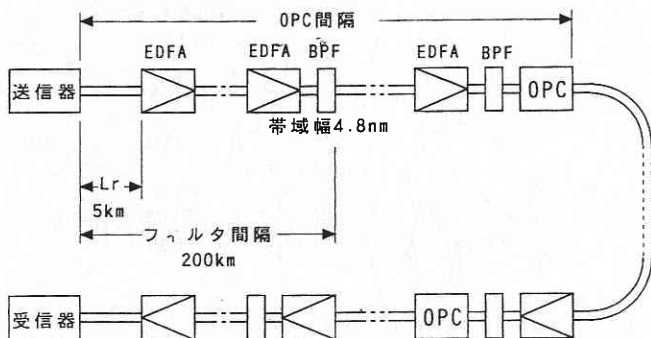


図9 位相共役ソリトン伝送システムの概略図

表1 位相共役器の挿入位置と位相共役器間の間隔

	最初の OPC の位置 [km]	2つめ以降の OPC の間隔 [km]
Type 1	400	400
Type 2	800	400
Type 3	1200	400

抑圧効果を調べた (表1)。

Type 1 は400 km ごとに位相共役器を挿入した場合である。図10にパルス列の伝搬波形を示す。位相共役器を用いない場合と比較すると、2000 km でのパルス間隔のひらきが見られない。パルス到着時間のばらつきが正規分布であると仮定し、図11に200 km ごとのタイミングジッタの大きさを標準偏差で示す。位相共役器の挿入地点はこの図では800, 1200, 1600 km で、その後にタイミングジッタが低減されている。Type 3では、各 OPC 後に一時的にジッタの抑圧が見られるものの、その後は急激にジッタが大きくなり、全体的にはジッタの抑圧が見られない結果になっている。

以上の結果より、位相共役ソリトン伝送で、ASE 雑音によるジッタの抑圧効果が確認できた。ジッタの抑圧効果を期待するのであれば Type 1, 2 のように、ジッタが大きくなる前に位相共役器を挿入する必要があることがわかった。

### 3.5 ランダムビットパルス列伝搬

ランダムパルス列の場合、ソリトンパルス間相互作用によるパルス間力は各パルスで異なる。そのため、ASE 雑音が無視できる場合でもビットパターンがランダムであれば、各パルスの到着時間にはランダムなジッタが生ずることになる。位相共役ソリトン伝送による補償は、ダイナミックソリトン伝送法がベースとなっているため不完全ではあるものの、増幅間隔が短ければ、ある程度の期待はできる。

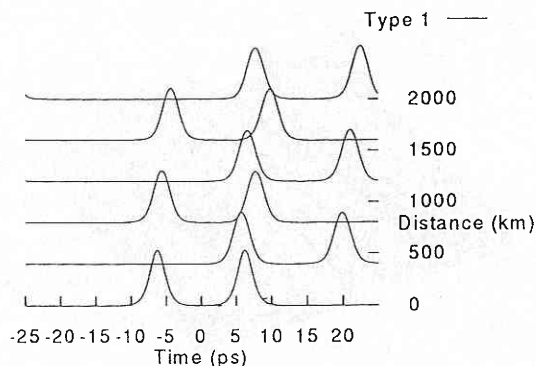


図10 位相共役ソリトン伝送による2パルス伝搬

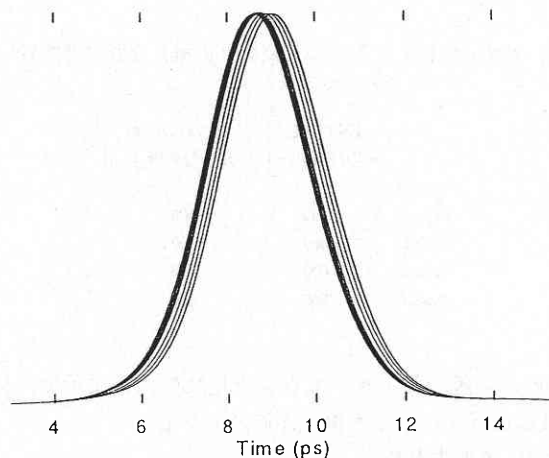


図11 パルス到着時間の標準偏差

前章、前節と同様のファイバパラメータ、パルス幅、間隔を用いて、8 ビットのパルス列 (10111010) のダイナミックソリトン伝送での伝搬シミュレーションを行った。伝搬波形の様子を図12に示すが、600 km 地点で既にビットパターンを正確に読むことはできないことがわかる。

次に、位相共役ソリトン伝送の場合について検討する。3.3で示した伝送システムをそのまま用いるのであるが、パルスの位置関係が大幅に変化する距離が600~800 km であることから、位相共役器の挿入位置に関して4 Type を仮定し、ジッタの抑圧効果を調べた (表2)。

図13に Type 1 の場合でのパルス列伝搬波形を示す。位相共役器を使用しない場合と比較すると、長距離伝搬した後も位置のズレは小さく抑えられている。多少の位置のずれは、ASE 雑音によるジッタと、集中定数型増幅による伝搬パルス強度分布の非対称性による不完全な補償が原因である。Type 4 は位相共役器がパルスの位置ズレがかなり大きくなっている800 km 地点から使用されるため入射時のビットパターンとは大幅に変化し、位相共役器による補償は期待できない結果が得られた。図14に各 Type でのジッタの大きさと、ダイナミックソリトン伝送における

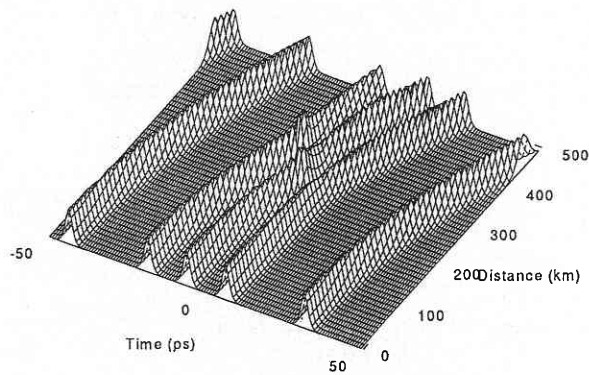


図12 ランダムパルス列伝搬波形

表 2 位相共役器の挿入位置と位相共役器間の間隔  
(ランダムパルス列)

	最初の OPC の位置 [km]	2つめ以降の OPCの間隔 [km]
Type 1	400	400
Type 2	600	400
Type 3	600	600
Type 4	800	800

2パルス伝搬のジッタの大きさを比較のために示す。位相共役器通過後のジッタ抑圧が確認できる。

### 3.6 本章のまとめ

位相共役ソリトン伝送を提案し、ジッタ抑圧効果について検討した。ランダムパルス列ではソリトンパルス間相互作用が大きな問題となり、位相共役ソリトンによる補償は長距離伝送の際に大きな効果が期待できることがわかった。ASE 雑音によるジッタの抑圧も確認できた。

## 4. む す び

光ソリトン伝送に位相共役器を応用することで、まず増幅間隔を拡大した伝送システムの構築を検討した。位相共役器によってパルスの広がりを抑え、中継間隔を20 km にすることができた。また SSFS による波形歪みおよびパルス到着時間のジッタの補償が可能であることがわかった。次に位相共役器を用いた位相共役ソリトン伝送システムによって、パルス間にはたらく非線形効果や ASE 雑音によって引き起こされるタイミングジッタの抑圧を提案した。これによって、様々な非線形効果と ASE 雑音との複雑な絡み合いから生じるタイミングジッタを大幅に抑圧できることがわかった。

(1996年5月28日受理)

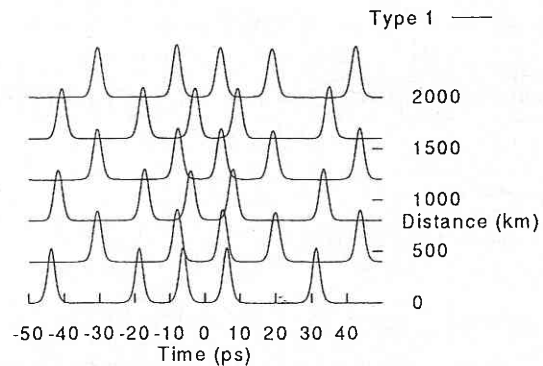


図13 位相共役ソリトン伝送によるランダムパルス列伝搬

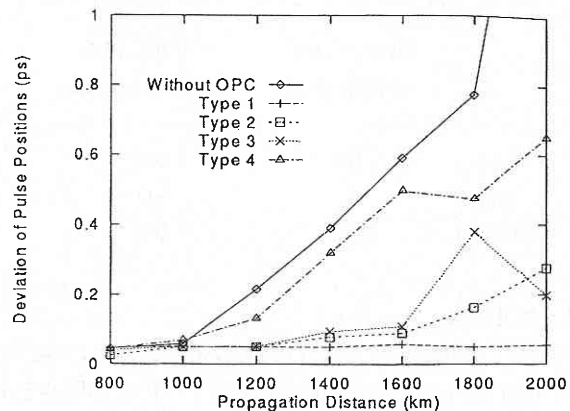


図14 ランダムパルス列の場合のパルス到着時間の標準偏差

## 参 考 文 献

- 1) Mitschke F.M. and Mollenauer L.F.: "Discovery of the soliton self-frequency shift", Opt. Lett., 11, 10, pp. 659-661 (October 1986).
- 2) Gordon J.P.: "Interaction forces among solitons in optical fibers", Opt. Lett., 8, 11, pp. 596-598 (November 1983).
- 3) Yariv A., Fekete D., and Pepper D.M.: "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugator", Opt. Lett., 4, 2, pp. 52-54 (February 1979).
- 4) Gordon J.P.: "Theory of the soliton self-frequency shift", Opt. Lett., 11, 10, pp. 662-664 (October 1986).
- 5) Agrawal G.P.: "NONLINEAR FIBER OPTICS", pp. 34-44, ACADEMIC PRESS, INC. (1989).
- 6) Forsyia W. and Doran N.J.: "Conjugate solitons in amplified optical fibre transmission systems", Electron. Lett., 30, 2, pp. 154-155 (January 1994).