分散マネージメントを用いた光ソリトン伝送

戸田 裕之*

(1996年4月15日 受理)

Dispersion Managed Optical Soliton Transmission

Hiroyuki TODA*

(Received April 15, 1996)

Optical soliton transmission in a cascaded fiber link is one of the most attractive methods for future optical communications. However, to achieve stable soliton transmission, the amplifier spacing has to be much smaller than the dispersion length, which limits the bit rate for certain amplifier spacing. To overcome this problem, changing dispersion of the fiber in proportion to the local power between the optical amplifiers is effective. This paper introduces the basic idea of the dispersion management in soliton transmission and its application to TDM and WDM soliton transmission.

Key Words: Optical soliton, Optical communication, Nonlinear optics

1. はじめに

ファイバの3次の非線形光学効果と群速度分散とが釣り合うことで発生する光ソリトンを情報媒体とした光ソリトン通信¹⁾は、IM/DD方式のような線形システムで問題となっている、高次の項を含む分散や非線形光学効果によって発生する伝送波の歪みが、時間領域においても周波数領域においても本質的に起こらない。非線形シュレーディンガー方程式の解として記述される光ソリトンは、損失のない伝送路だけではなく、伝送路損失をエルビウム添加光ファイバ増

幅器のような集中定数型光増幅器で補償する伝送路においても、光増幅器間隔が後述する分散距離よりも十分短ければ、安定に伝搬することができる²⁾。また、群速度分散の小さい波長領域であれば、幅10ps程度の光ソリトンならピーク電力わずか数mW以下という低電力で発生する。近年、分散シフトファイバや波長1.55 μm 帯のエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)の研究が発展し実用化されたことで、光ソリトン通信は次世代の光通信方式として注目され、その研究が盛んに行われている。

線形通信にはない光ソリトン通信のもう一つ

* 大阪大学工学部通信工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

* Department of Communications Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University (2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565)

の大きな特長は、伝送するソリトンの振幅や速度などのパラメータを自由に制御できることである^{3,4)}。この性質をうまく利用すると、たとえば光増幅器雑音のような非ソリトン(分散波)成分とソリトンとを伝送中に分離し、Gordon-Haus効果⁵⁾を抑圧しながらソリトンのみが伝送する伝送路を構成することができる。このようなソリトン制御として、Nakazawaらによる伝送ソリトンに同期した振幅変調を施す方法^{6,7)}や、Mollenauerらによる伝送路中に挿入した光帯域通過フィルタの中心周波数をゆるやかに変化させるスライディングフィルタ^{8,9)}などが提案され、その有効性が実験で確認されている。このことは、ソリトンは連続波に比べて数少ない有限個のパラメータで記述できるからである。

最近、光ソリトン通信の伝送容量をさらに拡大するために、EDFA間の伝送ファイバの分散値を伝送光ソリトンのパワーに比例して増減させる方法が提案されている¹⁰⁾。本稿では、これを分散マネージメント光ソリトン伝送と呼んでその原理を述べ、高速化、波長多重化^{11,12)}をめざした研究状況を概観する。

2. 分散マネージメントソリトン伝送の概念

2.1 光ソリトン伝送の基礎

3次の非線形光学効果と群速度分散、損失を有する伝送路を伝搬する光波電界の包絡線 $q(T, Z)$ は、誘電体中のMaxwellの方程式より、その包絡線の時間および距離に対する変化がキャリアの振動に比べて十分おそい時、3次以上の高次の微分項を無視すると次式によって記述される。

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q \quad (2.1)$$

(2.1)式の左辺第二項は伝送路の群速度分散、第三項は非線形光学効果、右辺は損失に対応する。 T および Z は、それぞれ群速度で進行する座標系での任意時間 t_0 、分散距離 z_0 で規格化された時間および距離である。分散距離 z_0 は、

$$z_0 = -\frac{2\pi c t_0^2}{D\lambda^2} \quad (2.2)$$

で与えられ、その絶対値は、パルス幅 t_0 のガウス

形光パルスが伝搬したとき、パルス幅が $\sqrt{2}$ 倍になるまでの距離に等しい。ここで、 c は真空中の光速、 D は伝送路の分散パラメータ、 λ は真空中での波長である。また、 Γ は、伝送路の振幅減衰定数を γ とすると、

$$\Gamma = \gamma z_0 \quad (2.3)$$

で表される。

(2.1)式で、右辺を0とした式を非線形シュレーディンガー方程式という。非線形シュレーディンガー方程式のソリトン解は、振幅 η と速度(周波数) κ の二つのパラメータを用い、

$$q(T, Z) = \eta \operatorname{sech} \eta(T + \kappa Z) \exp \left[-i\kappa T + \frac{1}{2}(\eta^2 - \kappa^2)Z \right] \quad (2.4)$$

で与えられる。

η と κ は、 $q(T, Z)$ が非線形シュレーディンガー方程式の解であるかぎり、距離 Z に依存しない定数となる¹³⁾。したがって、(2.4)式からわかるように、光ソリトンはその振幅とパルス幅の積が一定となるように伝搬する。石英系光ファイバでは、ソリトンのピークパワー P_0 は、ソリトンパルスの半値全幅を $t_s=1.76t_0$ 、光ファイバの断面積を S とすると、次式で求められる¹⁾。

$$P_0[\text{mW}] = \frac{7.76\lambda^3[\mu\text{m}^2]S[\mu\text{m}^2]D[\text{ps/nm/km}]}{t_s^2[\text{ps}]} \quad (2.5)$$

例えば、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 、 $D=0.5\text{ps/nm/km}$ 、 $S=50\mu\text{m}^2$ 、 $t_s=10\text{ps}$ とすると、 $P_0=7.2\text{mW}$ 、 $z_0=50.5\text{km}$ である。

実際に光ソリトン通信を行う際に、仮にガウス型パルスを入射したり、入射パワーがある程度計算値からずれたとしても、入射光パルスの波形、パワーに応じたソリトンが伝送中に自動的に生成される。残りのエネルギー(非ソリトン成分)は、分散波としてソリトンパルスから放射され、伝送路を伝搬する。

伝送路に損失がある場合の光パルスの伝搬は、 Γ の大きさによってその性質が異なる。 $\Gamma \ll 1$ の場合、(2.1)式は非線形シュレーディンガー方程式と近似できるから、(2.4)式で示したソリトンパルスが伝搬する。この時、損失によって振幅が徐々に減少するとそれに応じてパルス幅が広がりな

Fig. 1 A conceptual view of optical soliton propagation in a transmission line with loss (a) $\Gamma \ll 1$ (adiabatic transmission) and (b) $\Gamma > 1$ (non-adiabatic transmission).

から伝搬する。このような変化は断熱変化 (Fig. 1(a)) と呼ばれる。一方 $\Gamma > 1$ の場合、すなわち損失距離 $\gamma^{-1} \ll z_0$ の時には、増幅器を用いない限り (2.4) 式のソリトン解は存在しない。この時、光パルスは分散によって幅が広がる前に減衰してしまう。このような変化は非断熱変化 (Fig. 1(b)) と呼ばれる。

2.2 EDFA を用いた光ソリトン伝送

現在行われている長距離光ソリトン伝送実験では、主にエルビウム添加光ファイバ増幅器 (Erbium Doped Fiber Amplifier: EDFA) を数10kmの間隔で伝送路に周期的に配置し、伝送路の損失を補償している。EDFは、通常数m~数十mという分散距離と比べると非常に短く、局所的に振幅を増大させる。したがって、ソリトンパルスを増幅したとしても、パルス幅がそれに応じて断熱的に減少するわけではないために、増幅後のパルスは、もとのソリトンパルスではなくなってしまう。

HasegawaとKodamaは、このような短い間隔で大きな擾乱 (光増幅) を受けた場合においても、光増幅器間隔 z_a が $z_a \ll z_0$ ならば、リー変換という手法を用いて、擾乱のない非線形シュレーディンガー方程式に変換できることを証明した²⁾。先の実験例のように、分散距離に比べて

短い周期で損失や増幅を繰り返す伝送路でも、伝送路全体を平均して考えれば、ソリトンが伝送していると考えられる。このようなソリトン はガイディングセンターソリトン、あるいはアベレージソリトンと呼ばれている。

2.3 超高速光ソリトン伝送の問題点

さて、光ソリトン通信において伝送容量をさらに拡大する一つの方法は、ソリトンパルスの幅をより短くして、時分割多重 (Time Division Multiplexing: TDM) 技術を用いることである。ところが分散距離は、(2.2) 式で示したようにパルス幅の2乗に反比例して小さくなる。したがって、前述の $z_a \ll z_0$ の条件を満足させるためには、光増幅器間隔をパルス幅の2乗に比例して小さくしなければならない。

Fig. 2は、パルス幅が短くなった時に、伝送特性にどのような変化が生じるのかを示すために、伝送シミュレーションを行った結果である。

Fig. 2 Simulation results of optical soliton propagation over 5,000 km with loss periodically compensated by EDFA's. $\lambda=1.55\mu\text{m}$, $D=0.5\text{ps/nm/km}$, $z_a=80\text{km}$, fiber loss = 0.2 dB/km. (a) $t_s=30\text{ps}$ ($z_0=454\text{km}$) and (b) $t_s=10\text{ps}$ ($z_0=50.5\text{km}$).

$\lambda=1.55\mu\text{m}$, $D=0.5\text{ps/nm/km}$, $z_a=80\text{km}$, ファイバ損失 0.2 dB/km , 伝送距離 5000km とした。パルス幅は, (a)が 30ps ($z_0=454\text{km}$), (b)が 10ps ($z_0=50.5\text{km}$) である。光増幅器で発生する雑音は考慮していない。分散波は光増幅器を通過するごとに発生するので, 伝搬距離が長くなるほどソリトンの振幅は減少し, 分散波が増大する。実際の光ソリトン通信ではビットレートを高めるために, 隣接ソリトンの時間間隔をこのシミュレーション($T=40$)より小さくするので, 分散波はより増大する。分散距離が小さくなるのを避けるために D を必要以上に小さくするのは, ソリトンエネルギーが減少してSN比が劣化するので問題である。そのため, 一般のEDFAなどによる非断熱的光増幅を行う限り, 実用的な光増幅器間隔(おおむね $> 30\text{ km}$) で, 長距離にわたるソリトン伝送を行うには伝送容量に限界がある。断熱伝送を行うために, 分布利得エルビウム添加ファイバ光増幅^{14, 15)}や, 誘導ラマン効果を利用した光増幅¹⁶⁻¹⁸⁾を用いる方法が検討されているが, 実用的なシステムの実現は容易ではない。

2.4 分散マネージメント光ソリトン伝送

これまでの, 伝送路の分散値が距離に対して一定と仮定した場合について述べてきた。ここで, 伝送路の分散値を伝送距離に対して変化させた場合を考える¹⁹⁾。いま, (2.2)式の D で規格化した伝送路の分散パラメータを $d(Z)$ とし, 周期的に光増幅器を配した伝送系を考えると, 光波の包絡線 q の満たす方程式は次式のようになる²⁰⁾。

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = -i\Gamma q + \alpha \sum_{n=0}^N \delta(Z - nZ_a) q(Z) \quad (2.6)$$

右辺第二項は, 規格化増幅器間隔 $Z_a(=z_a/z_0)$ ごとの非断熱増幅を表す項である。 α は規格化増幅器利得で, 次式で与えられる。

$$\alpha = \exp(\Gamma Z_a) - 1 \quad (2.7)$$

ここで, 減衰と増幅による振動項を消去するために, q を (2.8)~(2.10)式を用いて u に変換すると, (2.11)式が得られる。

$$q = a_1(Z)u \quad (2.8)$$

$$a_1(Z) = a_1(0) \exp[-\Gamma(Z - nZ_a)], \\ \text{for } nZ_a < Z < (n+1)Z_a \quad (2.9)$$

$$a_1(0) = \sqrt{\frac{2\Gamma Z_a}{1 - \exp(-2\Gamma Z_a)}} \quad (2.10)$$

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + \frac{a_1^2(Z)}{d(Z)} |u|^2 u = 0 \quad (2.11)$$

ここで, Z は次式のようにおいた。

$$Z = \int_0^Z d(Z) dZ \quad (2.12)$$

(2.11)式は, 伝送路の分散を $d(Z) \propto a_1^2(Z)$, すなわち伝送光ソリトンのパワーに比例するように変化させれば, $u(Z, T)$ の非線形シュレーディンガー方程式となる。このとき, 光ソリトンパルスは, 光ファイバの損失によって振幅が減少するが, パルス幅は一定に保ったまま断熱的に伝送する。光増幅器で非断熱的に増幅された直後は, それに応じて分散値も大きくなっているため, 増幅前と同じソリトンが伝送する。したがって, このような伝送路を用いれば, 非断熱光増幅を行っても $z_a \ll z_0$ である必要はなく, 分散波発生による伝送容量の制限はなくなる。これが分散マネージメント光ソリトン伝送である。

3. 分散マネージメント光ソリトン伝送の応用

3.1 超高速光ソリトン通信

分散パラメータの値が伝送光パワーに比例して指数関数的に減少する光ファイバを作製する試みは行われてはいるが, このようなファイバを歩留まりよく設計通りに作製するのは, 現状では極めて困難である。そこで, 分散値を階段状あるいは楕形に変化させて近似的に分散マネージメントを実現する方法^{21, 22)}が検討されている。

Forysiakらははじめて, 周期的に光増幅器を配した光伝送系において, Fig. 3のように光増幅器間の分散値を階段状に減少させた時の光ソリトンの伝搬特性を検討した¹⁰⁾。数値シミュレーションを行い, 分散値を M 分割として適切に設計した場合は, 増幅器間隔を $1/M$ にすることとほ

Fig. 3 An example of dispersion profile of dispersion managed soliton transmission fiber. Broken line shows soliton power along the transmission distance.

は同程度の効果があることを示した。増幅器間隔を一定とすれば、パルス幅を $M^{-1/2}$ 倍に小さくできることになる。

Fig. 4 は、 $M=4$ としたときの伝送シミュレーション結果である。パルス幅は 10ps, 残りのパラメータは Fig. 2 と同一である。Fig. 2(b) と比較すると、分散波の発生量が低く抑えられていることがわかる。

Kumar らは、階段状の分散マネージメントを行う際に、 Z で等分割した場合と、 Z で等分割した場合とについて、ソリトンから放出される分散波成分の大きさを摂動法を用いて解析的に導出した²³⁾。 Z で等分割するとは、各分割セクションファイバの長さで分散値の積が一定となるように分割することである。Fig. 5 は分割数 M に対する分散波エネルギーの割合 $W(Z)$ を計算した結

Fig. 4 Simulation results of optical soliton propagation with stepwise dispersion managed fiber with step number $M = 4$. $t_s=10$ ps. Other parameters are the same as of Fig. 2.

Fig. 5 Dispersive wave energy $W(L)$ at $Z = 49.2$ versus step number M in stepwise dispersion managed soliton transmission. Fiber sections were equally divided in Z . $\Gamma=0.185$, $Z_a=2.46$.

果 ($\Gamma=0.185$, $Z_a=2.46$, $Z=49.2$) である。分割数 M を大きくするにしたがって分散波エネルギーが小さくなる様子がわかる。

3.2 波長多重光ソリトン通信

伝送容量を拡大する他の方法に、波長多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) がある。WDM 光ソリトン伝送では、伝送路に群速度分散が存在するために、各波長のソリトンはそれぞれ異なる速度で伝搬し、ソリトン間の追い越し (衝突と呼ぶ) が生じる。断熱伝送では、ソリトンは衝突の前後でそのパラメータ (振幅や周波数) はほとんど変化しない。しかし、非断熱的光増幅による伝送系では、ソリトンが衝突しはじめてから衝突が終わるまでに伝搬する距離 (衝突距離) が増幅器間隔の 2 倍程度以下の距離だと、衝突の前後でソリトンの周波数が変化する²⁴⁾。衝突距離 z_c は、波長差を $\Delta\lambda$ とすると、次式で与えられる。

$$z_c = \frac{2t_s}{D\Delta\lambda} \quad (3.1)$$

情報を伝送するために光源の光ソリトンパルス列を符号化すると、ソリトン衝突はランダムに発生し、伝送路の群遅延分散とあいまって、受信端での到着時間のジッタとなるので符号誤り率増加の大きな原因となる。このことは、WDM 光ソリトン伝送の利用波長帯域幅を制限することになる。また、最近になって Mollenauer らは、周

Fig. 6 Mean position of the faster soliton versus distance Z . Fiber sections were equally divided in Z . $\Gamma=0.185$, $Z_a=2.45$, normalized frequency separation $\Delta B=5$.

期的に光増幅器を配した伝送系ではソリトン衝突の際の4光波混合の影響によってソリトンの時間ジッタと振幅ジッタが生じることを示した²⁵⁾。

Hasegawaらは、伝送路に分散マネージメントを施すことで、ソリトン衝突の際の周波数シフトを減少できることを初めて示し、解析的に周波数シフトの大きさを導出した¹¹⁾。Fig. 6に Z で等分割した場合の分割数 M に対するソリトンパルスの位置を示す($\Gamma=0.185$, $Z_a=2.45$, $\Delta B=2\pi c\Delta\lambda t_s/(1.763\lambda^2)=5$)。分割数を増やすことで周波数シフトが減少する。 $M=4$ で著しく改善されることがわかる。

WDM光ソリトン伝送については、つい最近、Mollenauerらは、分割数を3ないし4個とした階段状分散マネージメント周回伝送路を用い、スライディングフィルタ制御を併用して、10 Gbit/s $\times$ 7波長多重光ソリトンを符号誤り率 10^{-9} 以下で、9,400km伝送することにはじめて成功した¹²⁾。

4. まとめ

分散マネージメントを用いたソリトン伝送について、超高速光ソリトン伝送と波長多重ソリトン伝送への応用をめざした研究の現状を述べた。分散マネージメントの効果をあげるためには、光ファイバ分散値の精密な制御が必要であ

り、ファイバ製造技術のさらなる発展が求められる。また、種々のソリトン制御技術と併用することで、さらに伝送距離、および容量を拡大することができると考えられる。

謝 辞

日頃ご指導頂く長谷川晃本学教授、ご討論頂いた Shiva Kumar 博士に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Y. Kodama and A. Hasegawa: *Solitons in optical communications* (Oxford University Press, 1995).
- 2) A. Hasegawa and Y. Kodama: *Opt. Lett.* **15** (1990) 1443.
- 3) A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus and Y. Lai: *Opt. Lett.* **16** (1991) 1841.
- 4) A. Hasegawa and Y. Kodama: *Opt. Lett.* **17** (1992) 31.
- 5) J. P. Gordon and H. A. Haus: *Opt. Lett.* **11** (1986) 665.
- 6) H. Kubota and M. Nakazawa: *IEEE J. Quantum Electron.* **29** (1993) 2189.
- 7) M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada, H. Kubota, Y. Kimura and M. Takaya: *Electron. Lett.* **29** (1993) 729.
- 8) L. F. Mollenauer, J. P. Gordon and S. G. Evangelides: *Opt. Lett.* **17** (1992) 1575.
- 9) L. F. Mollenauer, E. Lichtman, M. Neubelt and G. T. Harvey: *Electron. Lett.* **29** (1993) 910.
- 10) W. Forsyth, F. M. Knox and N. J. Doran: *J. of Lightwave Technol.* **12** (1994) 1330.
- 11) A. Hasegawa, S. Kumar and Y. Kodama: *Opt. Lett.* **21** (1996) 39.
- 12) L. F. Mollenauer, P. V. Mamyshev and M. J. Neubelt: *Electron. Lett.* **32**, (1996) 471.
- 13) V. E. Zakharov and A. B. Shabat: *Sov. Phys. JETP* **34** (1972) 62.
- 14) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki: *IEEE J. of Quantum Electron.* **26** (1990) 2103.
- 15) C. Lester, K. Bertilsson, K. Rottwitt, P. A. Andrekson, M. A. Newhouse and A. J. Antos:

- Electron. Lett. **31** (1995) 219.
- 16) A. Hasegawa: Opt. Lett. **8** (1983) 650.
- 17) L. F. Mollenauer, R. H. Stolen and M. N. Islam: Opt. Lett. **10** (1985) 229.
- 18) K. Iwatsuki, S. Nishi, M. Saruwatari and K. Nakagawa: IEEE Photon. Tech. Lett. **2** (1990) 507.
- 19) K. Tajima: Opt. Lett. **12** (1987) 54 .
- 20) A. Hasegawa and Y. Kodama: Opt. Lett. **16** (1991) 1385.
- 21) S. Chi and M-C. Lin: Electron. Lett. **27** (1991) 237 .
- 22) S. V. Chernikov, J. R. Taylor and R. Kashyap: Electron. Lett. **29** (1993) 1788.
- 23) S. Kumar, A. Hasegawa and Y. Kodama: submitted to JOSA B.
- 24) L. F. Mollenauer, S. G. Evangelides and J. P. Gordon: J. Lightwave Technol. **9** (1991) 362.
- 25) P. V. Mamyshev and L. F. Mollenauer: Opt. Lett. **21** (1996) 396.