光ソリトン通信システム

岩月 勝美*

(1996年5月10日 受理)

Optical Soliton Transmission System

Katsumi IWATSUKI*

(Received May 10, 1996)

This paper describes the importance of distributed fiber dispersion and the waveform equalization with optical filtering technique in ultra-high speed and/or ultra-long distance optical soliton transmission.

Key Words: Optical soliton, Dispersion management, Optical filtering

1. はじめに

光ソリトンは、光ファイバの群速度分散 (GVD) と光非線形効果による自己位相変調 (SPM) との釣り合いにより、その波形形状を保ちながら光ファイバを伝搬する特殊な光パルスである。光ファイバを伝搬して、光ソリトンが受ける損失が大きくなると、光パルスの強度に比例して生じる SPM の効果が減少し、やがて光ソリトンが崩壊することになる。従って、光ソリトンを伝搬させるためには、Fig. 1(a)に示す光増幅器を用いた多中継 (1R) 伝送路が必要となる。

これまでに、Fig. 2(a)に示した光ファイバをループ状にした周回伝送路を用いて、光ソリトンの超長距離伝送への可能性が検討されてきた。周回ループでは、Fig. 2(b)に示すように周回長毎に同一の分散分布が繰り返しているため、周回

長での平均 GVD と全伝送距離での平均 GVD が完全に一致することになる。このような伝送路は、光ソリトンにとって理想的な均一伝送路と見なすことができる。光ソリトンがそのような均一伝送路においてその波形形状を保持して安定に長距離伝搬することは、すでに理論の教えるところであり、伝送距離 10000km を超える周回伝送実験の結果が多数の研究機関から報告されている¹⁻³⁾。

ところが、実際の 1R 伝送系における伝送路の GVD は、一般に、Fig. 1(b)に示すように長手方向に変動しているため、数中継区間にわたり平均化した GVD と全伝送距離にわたる平均 GVD とは異なっている。このような伝送路では、光ソリトンはさざ波を発生しながら伝送路を伝搬して崩壊するため、伝送距離が制限される。従って、実際に光ソリトン伝送をするには、伝送路の長

* NTT 光ネットワークシステム研究所 (〒238 横須賀市武 1-2356)

* NTT Optical Network System Laboratories (1-2356 Take, Yokosuka, Kanagawa 238)

手方向の分散分布に対する光ソリトンの耐力の把握とその波形保存性を生かすための分散分布が重要となる。つまり、光ソリトン伝送においても、IM-DD方式と同様に分散管理⁴⁾が必須となる。これは、光ソリトン伝送技術の実体が、分散管理をすることでSPMとGVDによる非線形な波形劣化を等化できる、いわば「非線形波形等化伝送技術」であることを意味している。そこで、本稿では、伝送路の分散分布の重要性と光フィルタリングによる光ソリトンの波形等化技術に関して、伝送距離の長距離化と伝送速度の超高速化という観点から述べてみたい。

2. 超長距離光ソリトン伝送

光ソリトンを用いて信号伝送を行う場合、上述した伝送路の分散分布による伝送距離制限に加えて、中継器であるEDFAから放出されるASEによる光ソリトンの中心周波数揺らぎ、いわゆるゴードン-ハウス効果⁵⁾や送信パルスの線幅⁶⁾で生じるタイミングジッタの累積という光ソリトン伝送特有の雑音要因と、ASEの累積によるSN劣化が伝送距離を制限することになる。これ以外にも、光ソリトン間の相互作用⁷⁾による光ソリトンの位置ずれが、光ソリトンの伝送距離制限を制限することになる。以下では、光ソリトン伝送における光フィルタリング技術であるソリトン周波数スライディング法を用いた場合の光

Fig. 2 Recirculating loop transmission system.

増幅器のASEと伝送路の分散分布による伝送距離制限について述べる。

2.1 光増幅器のASEで決まる伝送距離制限

タイミングジッタとASEの累積による伝送距離制限は、ASEの累積を低減するために光増幅中継器に設けられた光フィルタを狭帯域化し、その中心周波数を伝送距離に従って徐々にずらすこと⁸⁾により改善できる。このような伝送系を構成すると、光ソリトンだけが光フィルタの中心周波数シフトに従ってその中心周波数をスライドしながら、その波形形状を保ったまま伝搬

Fig. 1 Optical amplifier transmission system.

するのに対し、各中継器で発生する ASE は、光フィルタの中心周波数シフトにより、その累積効果が打ち消されるため、光ソリトンの振幅方向の雑音が抑圧される。時間軸方向の雑音であるタイミングジッタは、ASE により光ソリトンの中心周波数が揺らぐことにより生じるため、光フィルタを狭帯域化することでその揺らぎが抑圧でき、タイミングジッタの累積が緩和されることになる。このような方法以外にも、周波数シフタと狭帯域光フィルタを組み合わせるソリトン周波数スライディング法^{9, 10)}や、可飽和吸収体等の入射パワーに対し非線形応答を持つデバイスと狭帯域光フィルタを組み合わせた方法¹¹⁾を用いてもタイミングジッタと ASE の累積による伝送距離制限を改善できることが指摘されている。

ソリトン周波数スライディング法では、狭帯域光フィルタの中心周波数を固定し、光増幅中継器中に設けられた周波数シフタを用いることで、狭帯域光フィルタの中心周波数をスライドしたのと同様の効果を実現することができる。Fig. 3 に、ソリトン周波数スライディング法を用いた 10Gb/s の周回伝送実験の誤り率対伝送距離の関係を示す。図中に実験パラメータもあわせて示されている。これらのパラメータは、10Gb/s で最大の伝送距離が得られるように最適化されており、30000km の伝送距離（誤り率 10^{-9} 以下）が達成できていることが分かる¹²⁾。この時、タイミングジッタで決まる理論的な伝送距離限界（誤り率 10^{-9} ）は、40000km 程度と見積もられる。同一の伝送パラメータで NRZ 信号を IM-DD 方式で伝送した場合、光増幅器の ASE で決まる理論的な伝送距離限界は、約 20000km（誤り率 10^{-9} ）と見積もられる。ただし、受信器の等化フィルタのカットオフ周波数を 5.0GHz とした。従って、ASE で決まる伝送距離の理論限界は、光ソリトンの方が若干有利であるものの、ソリトン周波数スライディング法を用いたことで ASE による理論的な伝送距離限界の劇的な改善効果はなく、基本的に NRZ 信号の理論的伝送距離限界と同程度であると考えられる。

2.2 伝送路の分散分布の影響

Fig. 3 BER vs. Transmission distance with signal frequency sliding.

1995 年夏に鹿児島—沖縄間でサービスを開始した海底超高速光伝送システム (FSA) では、伝送路の分散管理が厳密に行われているので、光ソリトン伝送における伝送路の分散分布の影響を実験的に考察するには好都合である。具体的には、光ファイバの非線形効果で生じる過剰雑音及び SPM と GVD による波形劣化を抑圧するため、90km の中継区間での零分散波長が NRZ 信号波長に一致するように、入力端と出力端でそれぞれの分散が正常分散及び異常分散となるように管理している。

伝送実験では、集積化 MQW-EA 変調器光源を用いてパルス幅 20ps の光パルスを発生させ、この光パルスを 10Gb/s の伝送速度で FSA のあき伝送路に送出した。また、光パルスの中心波長は、FSA 伝送路の平均 GVD が 0.2ps/km/nm となるように設定した¹³⁾。

Fig. 4 は、平均光増幅器出力を -2.0dBm に設定した時の信号対雑音比 (SNR) 対伝送距離の関係を示している。実験値と数値計算結果を表わすシンボルは図中に示した。数値計算では、FSA 伝送路と分散が長手方向に均一である伝送路について検討を行った。また、破線と実線はそれぞれ ASE とタイミングジッタで決まる理論的な SNR を示している。実験結果と FSA 伝送路における数値計算結果はよく一致している。FSA 伝送路と均一伝送路との数値計算結果には、若干の差があるものの良く一致しており、ASE で決まる理論的な SNR とも良く一致している。これは、中継間隔 L_{amp} が大きいため、ASE で決まる SNR 劣化が支配的であることに起因している。

そこで、FSA 伝送路の分散分布を保ったまま、

Fig. 4 SNR vs. transmission distance.

L_{amp} を 50km にして、FSA 伝送路と均一伝送路について SNR の数値計算を行った。Fig. 4 に示す結果から、均一伝送路に比べ FSA 伝送路の方が SNR の劣化が大きいことが分かる。これは、分散分布が均一でないために生じた光ソリトンの波形劣化によるものであり、このような劣化を抑圧するには、光ソリトン伝送に適した分散管理が必要となる¹⁴⁾。ASE で決まる理論的な SNR と均一伝送路の数値計算結果の差は、数値計算の back-to-back の SNR が 30dB に制約されているために生じたものである。

Fig. 5 に、ソリトン周波数スライディング法を FSA 伝送路と均一伝送路とに適用した場合の結果を示す。数値計算に用いたパラメータは、 $L_{amp}=50\text{km}$ 、平均 GVD $=0.3\text{ps/km/nm}$ 、パルス幅 $=13\text{ps}$ 、光増幅器の反転分布パラメータ $=1.8$ 、ローレンツ型光フィルタのバンド幅 $=2.0\text{nm}$ 、一中継当たりの周波数スライド量 $=600\text{MHz}$ である。ソリトン周波数スライディング法を適用することにより、分散分布による波形劣化で生じる SNR の劣化が改善され、FSA 伝送路と均一伝送路との SNR に差が生じてないことが分かる。

以上のことから、ソリトン周波数スライディング法は、伝送路で生じる光ソリトンの波形劣化を等化し、光増幅器の ASE で決まる理論的伝送距離限界を達成する光フィルタリング技術であると言える。

3. 超高速光ソリトン伝送

3.1 多中継伝送

光ソリトンの特徴である波形の保存性は、伝

Fig. 5 SNR vs. transmission distance with signal frequency sliding.

送距離の長距離化のみならず伝送速度の超高速化にも有効である。しかしながら、安定な光ソリトンの伝搬には中継間隔 L_{amp} をソリトン周期 Z_0 に対して十分短く設定する必要があるため、伝送速度の高速化は、 Z_0 の急速な減少を引き起こし、実用的な許容 L_{amp} の確保を困難にする。許容 L_{amp} を長くするには、光ソリトンのパルス幅を広くすることが考えられるが、パルス幅が広がると光ソリトン間の相互作用により伝送距離が制限されることになる。そこで、 L_{amp} を保ったまま、伝送速度を増大する手法として、光時分割多重¹⁵⁾に偏波多重^{16, 17)}を併用することが提案されている。

しかし、さらに伝送速度が高速化すると、上記方法を用いても L_{amp} を確保することが難しくなることに加えて、高次の GVD による波形劣化と上述したゴードン-ハウス効果によるタイミングジッタが伝送距離を制限するようになる。これを解決するひとつのアプローチとして、狭帯域光フィルタによる光フィルタリングと分散管理を巧みに用いて、波形等化とタイミングジッタの低減を実現することが提案されている¹⁸⁾。Fig. 6 にその原理を示す。中継区間内で光ファイバの GVD がそのエネルギー損失よりはやく減少するように伝送路 (DDF) の分散管理を行う。このような分散管理のもとでは、光ソリトンはその性質を失うことなくパルス圧縮される、いわゆる断熱圧縮が生じる。光増幅器と狭帯域光フィルタにより、断熱圧縮で広がった光ソリト

Fig. 6 Adiabatic compressed soliton transmission using narrow-band sliding-frequency filter.

ンの光スペクトルを切り出すことで、光ファイバ入力時と同様の光強度とパルス幅を持つ光パルスとして波形等化を行うことができる。光増幅器の入力端付近での伝送路のGVDは極めて小さくなるため、高次のGVDによる波形劣化が生じる。この波形劣化成分は、次項で記述するように光ソリトン成分とは波長軸上で区別できるため、狭帯域光フィルタの中心周波数を長手方向に減少させることで除去することができる。

Fig. 6中に、3.0psの光パルスを中継間隔30kmで300km伝搬した時の波形形状が示してある。バンド幅1.5nmのローレンツ型光フィルタの中心周波数を中継する毎に10GHzずつ減少させた場合は、波形形状にほとんど変化はないが、狭帯域光フィルタの中心波長を固定した場合には波形が崩れており、本手法の有効性が分かる。

波形等化のために用いた狭帯域光フィルタは、タイミングジッタの低減にも効果を発揮する。Fig. 7は、数値計算により求めた、伝送速度80 Gb/sでの本手法のSNR対伝送距離の関係である。数値計算に用いたパルス幅、中継間隔、光増幅器の反転分布パラメータ、受信器の等化フィルタの帯域は、それぞれ4.0ps、30km、1.8、56.0GHzである。また、使用した狭帯域光フィルタはバンド幅1.7nmのローレンツ型光フィルタで、その中心

波長を中継する毎に7.0GHzずつ減少させた。●は、256ビットのランダムパターンのQファクタから求めたSNRである。また、○は、受信器のウインドタイムを4.2psとして、{|1,0|}の固定パターンのタイミングジッタをSNRに換算したものである。波形劣化とタイミングジッタが効果的に抑圧され、伝送距離3000kmで21.5dBのSNRが確保されていることが分かる。図中に示した2760km伝送後の等化アイパターンから、良好なアイ開口が得られていることが分かる。伝送距離が3000kmを越えた時点で、SNRが急速に劣化している原因は、ソリトン相互作用による符号間干渉のためと考えられる。

3.2 超高速無中継伝送

無中継伝送で伝送距離の改善をはかるには、送信器の高出力化と受信器の高感度化に加え、伝送路での波形劣化の抑圧が重要な技術課題となり、技術的な対策が必要となる。特に、送信器出力の上昇は、光ファイバのSPMとGVDによる波形劣化を引き起こすこととなる。これを解決するアプローチとして、伝送路の零分散波長 λ_0 付近で光パルスの中心波長が伝送後に異常分散領域にシフトする、自己スライディング効果ともいえる現象と光フィルタリングを利用する方法

Fig. 7 SNR vs. transmission distance.

が提案されている^{19,20)}。自己スライディング効果は、 λ_0 より長波長側の異常分散領域では光ソリトンが発生するのに対し、 λ_0 より短波長側の正常分散領域では、GVDと高次のGVDにより入射光パルスがさざ波として散逸することにより生じるものである。この効果により異常分散領域で生じた光ソリトンだけを伝送後に光フィルタで切り出すことで、SPMとGVD及び高次のGVDによる波形劣化を等化することができる。

Fig. 8は、自己スライディング効果を用いた160Gb/s無中継伝送実験系である¹⁹⁾。10GHzの繰り返しで利得スイッチされたDFB-LDから発生した光パルスのチャープングを補償後、10Gb/sで変調し、分散減少ファイバ(DDF)でパルス幅を2psまで断熱圧縮した後、マッハツェンダ型の光多重器(光MUX)で160Gb/sの光パルス信号に多重することで、送信信号を作り出している。送信信号は、伝送路である75kmの分散シフトファイバを伝送された後、受信器に導かれる。伝送路の零分散波長は1553nmである。受信器で

Fig. 9 Optical spectra of transmitted pulses for input average powers.

は、10GHzのタイミング抽出信号で制御されたTOAD²¹⁾と呼ばれる光分離器(光DMUX)により、160Gb/sの受信パルス信号を10Gb/sの光パルス信号に分離し電気信号に変換後、誤り率を測定する。

Fig. 9は、伝送路への入力平均光パワー P_m に対する伝送後の光パルスのスペクトルである。光パルスのスペクトルは P_m の上昇に従って広がると同時に、その中心波長が零分散波長より長波長側の異常分散領域にシフトしていることが分かる。Fig. 10は、伝送前後の光パルス信号のストリーク像と光スペクトルである。Fig. 10(c)は、

Fig. 8 160Gb/s non-repeated transmission experiment using self-sliding effect.

Fig. 10 Optical spectra and streak images. Transmission distances are 0km (a), 75km without filter (b) and 75km with filter (c).

P_{in} を15dBmに設定し、伝送後にバンド幅3nmの光フィルタで異常分散領域にある光スペクトル成分つまり光ソリトン成分を切り出した時のストリーク像と光スペクトルである。この時のパ

Fig. 12 BER vs. average received power.

ルス幅は2.5psである。光フィルタを用いなかった Fig. 10(b)のストリーク像と比較すると、波形の劣化が改善されていることが分かる。

Fig. 11は、Fig. 10で得られた実験結果を確認するために、数値計算により求めた伝送後の光パルスの時間分解分光波形である。正常分散領域では波形劣化が生じているが、異常分散領域では光ソリトン効果により波形劣化が回避されていることが分かる。Fig. 12は、光フィルタの中心波長を最適に設定した場合の誤り率対平均受信パワーである。エラーフロアもなく、良好な誤り率特性が得られている。

Fig. 11 Numerical time-resolved spectra after 75km propagation.

4. まとめ

光ソリトン伝送における、伝送路の分散分布の重要性和光フィルタリングによる光ソリトンの波形等化技術について述べた。今後、WDMに代表される他の有力な伝送技術との技術的得失の明確化と実用化に向けた着実な技術開発の進展が期待される。

参 考 文 献

- 1) L. F. Mollenauer, P. V. Mamyshev and M. J. Neubelt: Opt.Lett. 19 (1994) 704.
- 2) S. Kawai, K. Iwatsuki and S. Nishi: Electron. Lett. 31 (1995) 1463.
- 3) M. Suzuki, H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, S. Yamamoto and S. Akiba: OAA'93, Post-deadline paper PD1 (1993).
- 4) F. W. Kerfoot and S. M. Abbott: 2nd International Conference on Optical Fiber Submarine Telecommunication Systems.
- 5) J. P. Gordon and H. A. Haus: Opt. Lett. 11 (1986) 665.
- 6) K. Iwatsuki, S. Kawai, S. Nishi and M. Saruwatari: to be published in IEEE J. Lightwave Technol.
- 7) J. P. Gordon: Opt. Lett. 8 (1983) 596.
- 8) L. F. Mollenauer, J. P. Gordon and S. G. Evangelides: Opt. Lett. 17 (1992) 1575.
- 9) Y. Kodama, M. Romagnoli and S. Wabnitz: Electron. Lett. 30 (1994) 261.
- 10) G. Aubin, T. Montalant, J. Moulu, B. Nortier, F. Pirio and J. B. Thomine: Electron. Lett. 31 (1995) 52.
- 11) M. Matsumoto and A. Hasegawa: Opt. Lett. 18 (1993) 897.
- 12) K. Iwatsuki, S. Kawai and S. Nishi: ECOC'95, Tu.L.1.5 (1995).
- 13) K. Iwatsuki, S. Saito, K. Suzuki, A. Naka, S. Kawai, T. Matsuda and S. Nishi: ECOC 95, Post deadline paper Th.A. 3.6 (1995).
- 14) K. Iwatsuki, K. Suzuki and S. Kawai: to be presented in OAA'96.
- 15) M. Nakazawa, E. Yoshida, E. Yamada, K. Suzuki, T. Kitoh and M. Kawachi: Electron. Lett. 30 (1994) 1777.
- 16) S. G. Evangelides, Jr., L. F. Mollenauer, J. P. Gordon and N. S. Bergano: IEEE J. Lightwave Technol. 10 (1992) 28.
- 17) K. Iwatsuki, K. Suzuki, S. Nishi and M. Saruwatari: IEEE Photon. Technol. Lett. 6 (1994) 1377.
- 18) S. Kawai, K. Suzuki and K. Iwatsuki: to be presented in OECC'96.
- 19) K. Suzuki, K. Iwatsuki and S. Nishi: OAA'95, FB3 (1995).
- 20) 鈴木, 岩月: 1996年電子情報通信学会総合大会 B-1110.
- 21) J. P. Sokoloff, P. R. Prucnal, I. Glesk and M. Kane: IEEE Photon. Technol. Lett. 5 (1993) 787.