

最近の技術から

光ソリトン伝送技術の展望

猿 渡 正 俊

NTT 伝送システム研究所 〒238-03 横須賀市武 1-2356

1. ま え が き

光ファイバ中のソリトンは長距離伝播しても波形が保存される光パルスであり、超高速・長距離光ファイバ伝送方式への適用が期待されている。これは、異常分散領域における光ファイバ中の光カー効果によるパルス圧縮現象を利用して、群速度分散によるパルス広がりや相殺するものであり、1973年、長谷川らにより最初に提案¹⁾された。これまで、光ファイバ中のソリトンの振舞いについて理論的検討が精力的になされ、その伝播特性、安定性、損失の影響と補償法等について、多くの興味ある知見²⁾が得られている。また、F中心レーザー (FCL)、半導体レーザー (LD) 等の光源や光増幅系の進展に伴い、長距離光ファイバ伝播の実験もなされ、光伝送システムへの適用が具体的に検討されつつある。さらに、光ソリトンは、光ファイバ伝送だけでなく、ソリトンレーザー、光非線形導波路中のソリトンスイッチ³⁾、変調不安定性による THz パルスの発生等の新しい展開を見せ、理論的・実験的研究も進展している。

本稿では、光ソリトンの光ファイバ伝送への適用を主眼にして、最近の研究状況と展望について述べる。

2. 光ソリトン伝送の基本構成要素

2.1 光ソリトン伝送の特徴

光ソリトンの特徴を光ファイバ伝送の観点からまとめると以下ようになる。(1)基本ソリトン条件(規格化ピーク強度: $A=1$)で光パルス波形が不変となる。ただし、 $0.5^2 < A < 1.5^2$ の範囲であれば伝播により基本ソリトンに収束する。(2)基本ソリトンのピーク強度は光の分散値に比例し、パルス幅の2乗に反比例する。そして、ピークパワーはファイバのコア径の2乗に比例する。(3)パルスのピーク値がファイバ伝播により減衰するとソリトンの性質が失われて波形が広がる。(4)ソリトンパルスの間隔は相互作用を避けるためパルス幅の5~10倍程度必要となる。

2.2 光ソリトン伝送系の基本構成要素

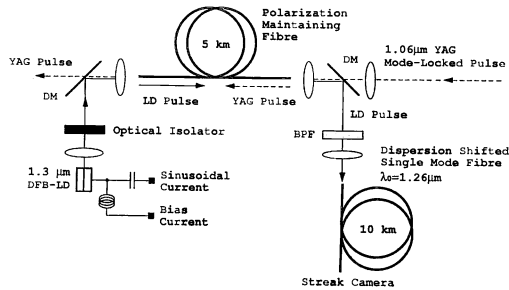
前記の光ソリトンの特徴を考慮して、伝送システムを

実現するうえで重要となる課題を要素別に示すと、(1)光送信部:ソリトンの短パルス性を生かすため、高速のソリトンパルス列の発生と変調、(2)光ファイバ:異種ファイバ間のソリトン条件の偏差をなくすため、分散値、モードフィールド径等のパラメータの高精度な制御、(3)光増幅中継部:ファイバ損失によるソリトンの破壊を防止するため、全長にわたって増幅機能のある光直接増幅技術、(4)光受信部:超高速の光検出系とその高速性を軽減する光多重・分離技術、等が不可欠と考えられる。

(1)に関しては、異常分散領域の波長でチャープのない TL (transform-limited) パルス列が不可欠である。パルス幅を 10 ps とすると、必要なピークパワーは約 50 mW になる(ただし、ファイバの分散値: 5 ps/nm/km, コア直径: 5 μ m と仮定)。現在、モード同期 FCL やこれを励起光源としたソリトンレーザーを用いて、1.55 μ m 帯の波長で 1 ps 幅以下のソリトンパルスが得られている。ただし、これらの光源は大形で繰返し周波数も 100 MHz 程度と遅いので実験用としては有用であるが実用性に乏しいといえる。

伝送システムを実現するうえでは LD による光ソリトン発生が鍵となる。LD は出力パワーが制限され、キャリア変動によるチャーピングが発生するのでこれを解決する必要がある。DFB (分布帰還形)-LD の利得スイッチとファイバの正常分散によるチャープ補償を用いると、12 GHz で 10 ps 以下にパルス圧縮された TL パルスが発生できる⁴⁾。現在、これに YAG レーザー励起のファイバラマン増幅を併用して、基本ソリトンレベルまで増幅させた例が報告⁵⁾されている(図1参照)。利得スイッチは直接変調も可能であるので、今後、ソリトン用光源として期待される。最近、変調器部を一体化した LD を用いて 4.4 ps 幅の 40 GHz モード同期パルスも得られている。この場合、チャーピングにより TL パルスの4倍にスペクトル幅が広がっており、この改善が必要である。

(2)については、現状の分散値制御技術は ± 0.5 ps/nm/km 程度であり、分散の小さな(低パワー)領域で

図1 LDによる光ソリトンの発生と伝播実験⁵⁾

使用するには、コア径等のパラメータも含めて、より厳しい制御が必要となる。今後、ソリトン用として上記パラメータの制御性を具体的に検討する必要がある。

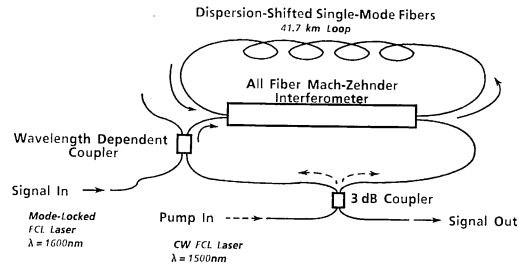
(3)に関しては、ファイバラマン増幅用の $1.48 \mu\text{m}$ 波長の高出力 LD が開発された。偏波多重と波長多重を併用した4個のLDを合波するモジュール(ファイバ内入力: 240 mW)も試作され、4 dBの利得を得ている⁶⁾。また、Erドープファイバを用いた光増幅器の研究も活発化し、最近、 $1.48 \mu\text{m}$ 波長のLD励起で25 dB以上の利得が報告されている。これを従来の光システムに適用して送信出力と受光感度の大きな改善が確認⁷⁾されている。また、FCLを用いたソリトンの増幅も確認^{7,8)}されており、今後、実用的見地からも有用となろう。

(4)に関しては、三元APD、PD等の受光素子の改良が進み、10 GHz以上の帯域が得られているが、電気系(増幅、識別・再生回路)の高速化が待たれる。また、光ファイバのカー効果を使用した全光形の時分割多重・分離の実験も報告され、繰返しは100 MHzであるものの100 ps程度のゲート幅が達成されている⁴⁾。

3. 光ソリトンのファイバ伝播実験

Mollenauerら⁹⁾は、図2の実験系を用いて光ソリトンの長距離伝播特性を評価した。2台のFCLレーザーを55 ps幅のソリトン光源およびラマン増幅用励起光源として用い、単長42 km(全損失9.2 dB)のファイバを周回させることでソリトン波形の伝播距離に対する広がりを測定した。理論から予測されるように、6000 km以上でもほとんどパルス歪のない伝播特性が示された。本実験は光ソリトンが長距離伝播できることを初めて実証したものである。

Iwatsukiら⁵⁾は、図1に示したLDの利得スイッチパルスの圧縮・増幅系を用いて、光ソリトンの伝播特性を評価した。ファイバ損失の補償を行っていないので10 km程度の伝播であるが、3 GHzの繰返しパルスで

図2 光ソリトンのファイバ周回伝播実験⁹⁾

明らかなソリトン効果を観測し、LDパルスによるソリトン伝送の可能性を示した。現在、送信系や中継系の増幅も含めて全LD化(それぞれLD励起のErファイバ増幅器およびファイバラマン増幅器)の見通しを得ている。今後は、実際の構成条件での伝送特性の評価ならびにシステム化技術の検討を進める必要がある。

4. あとがき

光ソリトンの伝送システムへの応用は始まったばかりであるが、半導体レーザーの高速化・高出力化やErファイバ増幅器等の新しいデバイスの出現で、今後、より具体的な研究が進展すると思われる。残された課題も多々あるが、近い将来、ソリトンを生かした超高速・長スパン伝送システムが実現することを念じて筆を置きたい。

文 献

- 1) A. Hasegawa and F. Tappert: "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers," *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973) 142-144.
- 2) たとえば解説記事として、中沢正隆: "光ファイバ中の非線形光学", *応用物理*, **56** (1987) 1265-1288.
- 3) K. J. Blow, N. J. Dran and B. K. Nayer: "Observation of optical soliton switching in an all-fibre-nonlinear sagnac interferometer," *Tech. Dig., Nonlinear Waveguides '89*, PD7 (1989).
- 4) たとえば解説記事として、猿渡正俊: "超高速光パルスの発生・処理技術", *信学技報*, OQE 88-69 (1988) 37-44.
- 5) K. Iwatsuki, A. Takada and M. Saruwatari: "Optical soliton propagation using 3 GHz gain-switched $1.3 \mu\text{m}$ laser diodes," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1572-1574.
- 6) 式井 滋, 田村安昭: "240 mW 出力半導体レーザーポンプモジュール", 平成元年度信学春全大, C-623 (1989).
- 7) 島田禎晋: "Erドープファイバ増幅器が光通信システムに与えるインパクト", *O plus E*, 4月号 (1989) 75-82.
- 8) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki: "Soliton amplification and transmission with an Er^{3+} -doped fiber repeater pumped by InGaAsP laser diodes," *Tech. Dig., OFC '89*, PD2 (1989).
- 9) L. F. Mollenauer and K. Smith: "Ultralong-range soliton transmission," *Tech. Dig., OFC '89*, WO 1 (1989).