

ファイバーの非線形光学効果を用いた高速光信号の再生技術

松 本 正 行

High-Speed Optical Signal Regeneration Using Fiber Nonlinearity

Masayuki MATSUMOTO

In-line all-optical signal regenerators enable high quality signal transmission over long distances, which is important in realizing large-scale and high-speed photonic networks. One of promising candidate for the nonlinear medium for high-speed signal regeneration processing is optical fibers. In this article, performance of in-line all-optical signal regenerators utilizing self-phase modulation (SPM) or four-wave mixing (FWM) in fibers is studied. First, two types of SPM-based regenerators consisting of a nonlinear fiber and an optical bandpass filter are analyzed and compared. Then the performance of FWM-based regenerators, which have ability of amplitude stabilization while maintaining phase information carried by the signal is discussed. It is also shown that return-to-zero differential phase-shift keying (RZ-DPSK) transmission performance can be improved by the FWM-based regenerator.

Key words: signal regeneration, fiber nonlinearity, optical communication, photonic network

現状の光ファイバー通信ネットワークにおいては、ネットワーク内での信号経路切り換え、信号の多重化および多重分離、信号再生などの処理は光/電気および電気/光変換を介した電気領域で行われる。電気領域で処理できる信号速度は、現状ではせいぜい数十 Gbps であり、また光/電気変換に伴って光信号の位相情報が失われる。このことは、ネットワーク内での電気信号処理が、光ファイバー通信ネットワークの潜在的な超高速性、トランスパレント性、および柔軟性を十分に生かすことを妨げる要因となっていることを意味している。この問題を解決するための方法として、電気信号処理を全光信号処理に置き換えることが注目されており、活発な研究が展開されている。

長距離伝送において重要な全光信号処理のひとつに光信号再生がある。光信号再生は、伝送ファイバーやネットワーク素子の種々の分散性や非線形性に起因する、信号波形歪みならびに増幅器雑音の累積の除去を光領域で行う方法であり、大規模な全光ネットワークを実現するために欠くことのできない信号処理である。光信号再生器は、振幅増

幅 (reamplification) と波形整形 (reshaping) 機能からなる 2R 型再生器と、それにタイミング再生 (retiming) 機能を付加した 3R 型再生器に分類できる。いずれの再生器においても、閾値処理を含む波形整形機能 (図 1 (a)) を光領域で実現するためには非線形光学効果の利用が必須である。また、ほとんどの 3R 型再生器におけるタイミング再生は、入力信号と同期させて生成したジッターのないクロックパルス列を入力信号パルスによってオン/オフすることで実現されており (図 1 (b)), そのスイッチング動作を実現するために光非線形性の利用が必要になる。光領域において非線形性を示す材料としては、半導体光増幅器をはじめとする半導体デバイスと光ファイバーが代表的である。そのうちの光ファイバーは、集積性に欠けるもののフェムト秒オーダーの非線形応答時間を持ち、数百 Gbps を超える速度の信号処理に応用できる。また、最近では、コアに高濃度の GeO_2 を添加した実効コア断面積が小さな高非線形シリカファイバー¹⁾ (非線形位相シフト係数 γ が 20/W/km 程度) に加えて、大きな非線形性を有するガラ

大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1) E-mail: matumoto@comm.eng.osaka-u.ac.jp

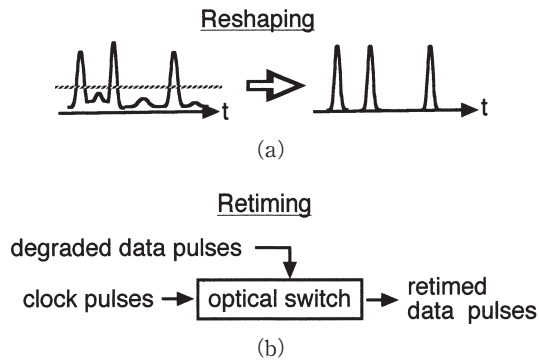


図1 全光信号再生における (a) 波形整形および (b) タイミング再生。

ス材料と空孔ファイバー構造を組み合わせた高非線形ファイバー (γ が数百/W/km 以上) も開発されており²⁾, 必要なファイバー長の縮小に向けた取り組みが精力的に行われている。

本解説では, ファイバーの非線形光学効果を利用した各種の信号再生器のうち, 自己位相変調効果を利用した再生器と四光波混合効果を利用した再生器を取り上げ, その特徴やこれまでの研究報告例, および動作特性の数値計算結果を紹介する。

1. 自己位相変調効果を利用した全光信号再生器

ファイバーを構成する媒質 (主としてシリカガラス) はカー効果と呼ばれる非線形性を有しており, その屈折率が媒質中の光強度に応じて変化する³⁾. 媒質の屈折率変化は, ファイバーを伝わる信号光の位相変化をもたらす. 信号光自身の電力による位相変化 (自己位相変調 (self-phase modulation: SPM)) の大きさ $\Delta\phi$ は, γ を非線形係数, P を信号光電力, L をファイバー長として, $\Delta\phi = \gamma PL$ で与えられる. 非線形係数が $\gamma = 20/\text{W}/\text{km}$ の高非線形ファイバーの場合, ファイバー長を例えば $L = 1 \text{ km}$ に選べば, 160 mW 程度の光電力に対しておよそ π の位相変化が生じ, 電力制御スイッチング動作などが実現される. SPM を利用する信号再生器では, 入力信号の強度に依存した非線形効果を用い, 入力信号の一部を出力信号として用いるため, 再生器内にプローブ光源やポンプ光源を備える必要がなく, 装置の構成が簡単になる。

SPM を利用した信号再生器は, 非線形干渉計の入出力特性を利用するものと⁴⁻⁷⁾, ファイバー中の非線形的なスペクトル幅の変動と光バンドパスフィルタリングを組み合わせたもの⁸⁻¹⁸⁾, に大別できる. それらの構成の概略を図2に示す. 図2 (a) に示す非線形光ループミラーは, ループに沿う時計まわりの経路と反時計まわりの経路を2つのア

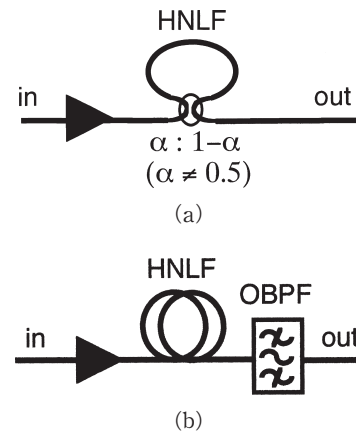


図2 自己位相変調効果を用いた全光信号再生器. (a) 非線形光ループミラー (右回り光と左回り光の電力に差をつけるために, 結合器の分岐比を 50:50 からずらす必要がある), (b) スペクトル広がり と 狭帯域光フィルタリングの組み合わせ。

ームとする干渉計である. 方向性結合器によって分岐され, 2つの経路に沿って別々に伝搬する光信号は, SPM 効果によってそれぞれの電力に比例する位相シフトを受ける. その位相シフトの差が非線形ループミラーへの入力信号電力の大きさに比例する. したがって, 干渉の結果として得られる信号電力透過率は, 入力電力に対して正弦波的に変化する. 非線形光ループミラー型信号再生器は, この特性を利用して波形整形動作を行うものである. この種の信号再生器は, 干渉計型のデバイスであるため, 非線形性の利用効率が高く, 比較的低い入力信号電力に対して再生器機能が得られる. その一方で, 動作点の設定に高い精度が要求され, また特性が周囲環境の変化に比較的敏感に反応するなどの問題がある. 最近では, 非線形光ループミラー型 2R 信号再生器を用いた 80 Gbps, 3000 km 周回伝送実験や⁶⁾, 320 Gbps の速度における雑音除去動作の検証実験⁷⁾ が報告されている。

図2 (b) の信号再生器は, 光増幅器, 高非線形ファイバー (highly nonlinear fiber: HNLF) および狭帯域光バンドパスフィルタ (optical bandpass filter: OBPF) から構成される. HNLF 中の SPM 効果は信号電力に依存したスペクトル広がりをもたらすため, 中心波長や帯域幅を固定した OBPF を介して出力を取り出すことによって, 入力信号電力と出力信号電力の間に非線形関係をもたせることができる. この構成は光の干渉効果を利用するものではないため, 安定で入力偏波依存性が小さい動作が可能であり, また構成素子のパラメーター設定の許容範囲が比較的広いという利点をもつ. 図2 (b) の信号再生器は, 動作原理の違いにより, 正常分散性の HNLF を用いるスペクトル幅拡大/スペクトル切り出し型再生器⁸⁻¹²⁾ (以下, スペク

トルスライス型と呼ぶ) と、異常分散性の HNLF を用いるソリトン圧縮/フィルタリング型再生器¹³⁻¹⁸⁾ (以下、ソリトン型と呼ぶ) の2種に分類できる。スペクトルスライス型の再生器では、入力パルスは増幅された後、正常分散の HNLF に入力され、スペクトル幅が大きく広げられる。入力パルスの振幅の変動は、出力においては主としてスペクトル幅の変動となって現れ、スペクトルの電力密度は大きくは変動しない。そのため、広がったスペクトルの一部を OBPF によって切り出せば、エネルギーが安定化された出力パルスを取り出すことができる。また、入力パルスの振幅が小さい場合は、スペクトル広がりが生じないため、OBPF の中心波長を入力信号波長からずらしておく、低電力の入力信号は出力されずに再生器によって除去される。したがって、この信号再生器は、信号パルスの振幅を安定化すると同時に、ゼロ状態の雑音を除去する働きも備えることになる。

ソリトン型の再生器の場合、入力パルスのピーク電力が HNLF 中の基本ソリトンピーク電力 P_p よりも大きいときは、パルス圧縮が生じファイバー出力におけるスペクトル幅が広がる。入力パルスのピーク電力が P_p よりも小さいときは、ファイバー出力に現れるソリトンのパルス幅が広がるため、分散波を除いた信号のスペクトル幅は狭くなる。したがって、ファイバー出力に置かれた OBPF は、ファイバー入力パルス電力に依存する損失 (入力電力が大きいほど損失が大) をパルスに与えることになり、パルス振幅が安定化される。この再生器では、OBPF の中心波長が入力信号の波長と同一である点が、スペクトルスライス型の再生器と異なる。この信号再生器の問題点は、非線形ファイバーと OBPF の組み合わせだけではゼロ状態の雑音 (OBPF の帯域内の雑音) が除去されず、逆にゆるやかに増幅される点である。再生器を伝送路中に多数個挿入し、信号再生を繰り返し行う場合は、ゼロ状態の安定化も必要である。そのためには、再生器内に可飽和吸収特性をもつ素子を追加して挿入する必要がある^{17,18)}。

図2 (b) の構造をもつ、上述の2種の信号再生器の出力パルスエネルギー対入力パルスエネルギー特性 (エネルギー伝達特性) の計算例を図3に示す¹⁹⁾。どちらの再生器においても、HNLF の長さ、損失、非線形係数は 3 km, 0.5 dB/km, 16.2/W/km である。スペクトルスライス型再生器の場合は、HNLF の分散は -0.5 ps/nm/km, OBPF の帯域幅および中心波長のずれは 80 GHz および 1.5 nm である。ソリトン型再生器の場合は、HNLF の分散は 5 ps/nm/km, OBPF の帯域幅は 120 GHz である。入力パルス幅は両者の場合とも 5.5 ps である。なお、ここでの計算

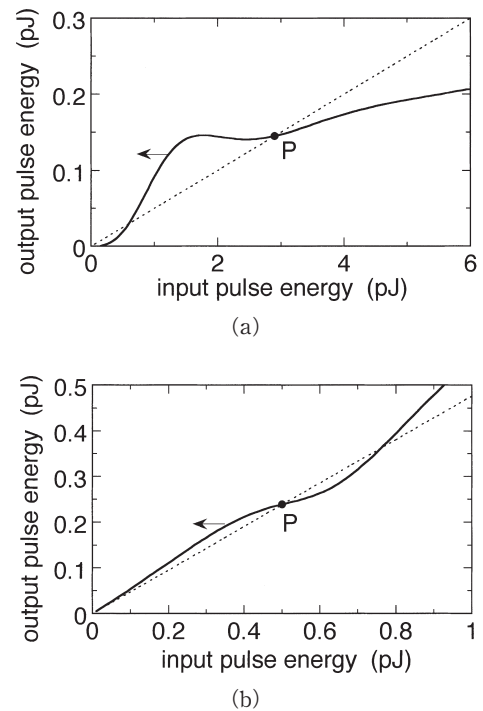


図3 エネルギー伝達関数。(a) スペクトルスライス型再生器、(b) ソリトン型再生器。点 P は縦続接続時の動作点を示す。

は、図2 (b) に示す 2R 型構成の直前に同期振幅変調器を付加した構成の再生器に対して行った。同期振幅変調器はパルス列のタイミングを再生する機能をもち、簡易な構成で 3R 動作を実現できる²⁰⁾。また、同期振幅変調は雑音などの低振幅の線形波に対しては損失を与える効果があるので、ソリトン型再生器において、可飽和吸収素子を用いずにゼロ状態を安定化させることができる²¹⁾。図3 (a) より、スペクトルスライス型再生器のほうがよりデジタル的な入出力特性をもち、強い振幅再生効果を有することがわかる。しかしながら、スペクトルスライス型再生器において、スペクトル幅を十分に広げるためには大きな入力パルスエネルギーが必要であり、かつスペクトル切り出し時の信号エネルギー損失が大きい。ソリトン型再生器の場合は、図3 (b) に示されるように入出力特性における非線形性が小さく、再生器1回あたりの振幅再生効果は弱い。しかし、多数個の再生器を伝送路中に配置することによって、高品質で安定な信号伝送を実現できる¹⁹⁾。また、HNLF に入力する信号のエネルギーは、スペクトルスライス型再生器の場合の数分の1でよい。なお、図3 (a, b) 中の点 P は、多数の再生器を縦続接続した場合の動作点である。点 P と原点を結ぶ点線の傾きの逆数 (E_{in}/E_{out}) が、信号再生器による信号エネルギーの損失を補うために再生器間に挿入すべき増幅器の利得を与える。

これらの信号再生器の有効性は長距離伝送実験によって

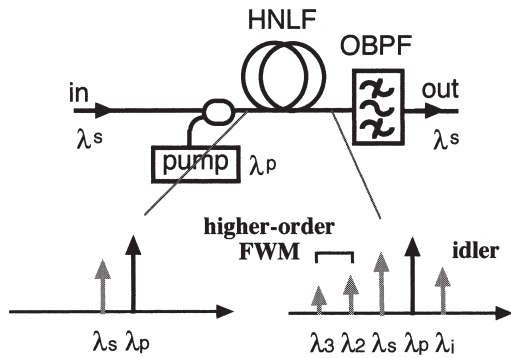


図4 四光波混合効果を用いた全光信号再生器とファイバー入出力スペクトル。

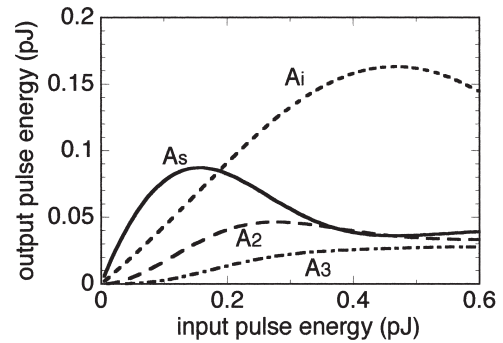


図5 四光波混合効果を用いた全光信号再生器のエネルギー伝達関数。

確認されている。スペクトルスライス型再生器については、同期振幅変調によるタイミング再生を併用した 40 Gbps, 100 万 km 周回伝送実験 (信号の Q 値は 19 dB 以上, 再生器間隔は 400 km) が報告されている¹²⁾。なお, この実験では, 再生器ごとの波長変換を避けるため, 図 2 (b) に示す構成を 2 段直列に接続し, いったん波長変換された信号を 2 段目のファイバーおよび OBPF でもとの波長に戻している。ソリトン型再生器については, InGaAs/InAlAs 多重量子井戸垂直入射/反射型の可飽和吸収素子を併用した 40 Gbps, 7600 km 周回伝送実験 (信号の Q 値 13 dB 以上, 再生器間隔 240 km) が報告されている¹⁷⁾。また, 両者の構成とも, 160 Gbps の高速信号処理が可能であることが確かめられている^{22,23)}。さらに, ソリトン型再生器に関しては, 多波長一括動作 (4 チャンネル \times 40 Gbps) の実験も報告されている²⁴⁾。

2. 四光波混合効果を利用した全光信号再生

光ファイバーに波長が異なるポンプ光と信号光を同時に入力すると, ポンプ光と信号光の差の周波数 (ビート) で振動する動的な屈折率変調が生じ, それによる光の散乱によって, 入力光とは別の周波数の光が発生する。この現象を四光波混合 (FWM) 効果と呼ぶ。FWM は, 前章で述べた SPM 効果と同じく, 媒質のカー非線形性に起因する非線形現象のひとつである。FWM 効果は波長変換, 位相共役光発生, パラメトリック増幅, 超高速スイッチングなどに応用できることが知られているが, 振幅制限器や信号再生器に応用することもできる²⁵⁻²⁹⁾。SPM に基づく信号再生器と異なり, 再生器内にポンプ光源を備える必要があり, ポンプ, 入力信号, 出力信号の波長配置を適切に設定する必要もあるが, ポンプ光電力が十分大きい場合は信号変換利得が得られるという利点や, 入力信号の位相情報が振幅再生を行った後にも保持されるという特徴がある。信号再

表1 種々の FWM 成分を出力光として用いた信号再生の特徴。

出力波長	出力信号振幅	2 値位相情報の保持特性	ゼロ状態安定化特性	波長保持/変換
λ_s	$\propto E_{in}$	○	×	保持
λ_1	$\propto E_{in}^*$	○	×	変換
λ_2	$\propto E_{in}^2$	×	○	変換
λ_3	$\propto E_{in}^3$	△	○	変換
データ駆動ポンプ動作		×	○	変換

生はこれまでオン・オフ変調 (on-off keying: OOK) された信号のみを対象にしてきたが, 位相変調された信号の波形整形が可能になれば, 信号再生器の適用範囲が増えネットワークの柔軟性も増すと考えられる。本章では, FWM を利用した全光 2R 再生器の原理と, FWM 型全光 2R 信号再生器による return-to-zero 差分位相変調 (RZ-DPSK) 信号伝送の特性改善効果について述べる³⁰⁾。

図 4 に, FWM を利用した全光 2R 信号再生器の構成と, 非線形ファイバー入出力におけるスペクトルの略図を示す。ファイバー出力における FWM 成分のいずれかを OBPF によって取り出し, 出力光として用いる。図 5 は, 入力信号として単一光パルスを再生器に入力し, 入力信号と同じ波長成分 (波長 λ_s , 振幅 A_s), アイドラー成分 (波長 λ_1 , 振幅 A_1), 二次の FWM 成分 (波長 λ_2 , 振幅 A_2), および三次の FWM 成分 (波長 λ_3 , 振幅 A_3) のいずれかを出力光として取り出した場合のエネルギー伝達関数の例である。いずれの波長成分を出力光として用いる場合も, 入力パルスエネルギーが大きくなると, ポンプデプレッションおよびより高次の FWM 成分への電力の移行のために出力エネルギーが飽和し, 振幅制限効果が得られる。

どの FWM 成分を出力光として用いるかによる信号再生効果の違いを表 1 にまとめる。入力信号と同じ波長成分およびアイドラー成分を用いる場合, 出力信号の複素振幅は入力信号の複素振幅 E_{in} およびその複素共役 E_{in}^* にそ

それぞれほぼ比例する。この場合、入力信号に含まれる位相情報はほぼ保持（アイドラー成分を用いる場合は共役）される。二次の高次 FWM 成分を出力信号として用いる場合は、出力の複素振幅は E_{in}^2 に比例するため、入力信号に含まれるバイナリーの位相情報は失われる。三次の FWM 成分の場合は、バイナリー位相情報はほぼ保持されるが、入力信号に含まれる位相のゆらぎが出力では 3 倍に拡大されるため、位相保持を目的とする信号再生には不向きである。また、高次の FWM 成分を出力として利用する場合は、図 5 にも示されているようにゼロ状態も安定化される²⁸⁾。増幅した信号光をポンプ光として用いる構成でも 2R 再生機能を得ることができる（マーク状態とスペース状態の両者がともに安定化される）が²⁹⁾、信号の位相情報は失われる。なお、入力信号と同じ波長成分を出力光として用いるパラメトリック増幅型以外の場合は、信号再生に波長変換が伴う。波長変換を避けるためには、2 段構成としていったん波長変換された信号をもとの波長に再変換する必要がある。以下では、入力信号と同じ波長成分を出力光として用いる場合の信号再生機能について、数値計算例を示す。なお、以下のシミュレーションでは、ゼロ状態を安定化し、RZ パルスの伝送が安定となるように、可飽和吸収素子を図 4 の構成の入力部に付加している^{18,30)}。

図 6 (a) は、FWM 型再生器を多数個縦続接続した系を伝搬する 1 個の光パルスのエネルギーの変化を示したものである。初期パルス幅を固定し初期エネルギーを変化させてパルス伝搬の振る舞いを計算した。HNLF の長さ、損失、非線形係数、および分散スロープの値は、1.5 km, 0.5 dB/km, 16.2/W/km, および 0.03 ps/nm²/km, 信号光およびポンプ光の波長配置は $\lambda_p - \lambda_s = \lambda_s - \lambda_0 = 3$ nm (λ_0 はゼロ分散波長), ポンプ光電力は 30 mW, 出力光を取り出すための OBPF の帯域幅は 150 GHz である。また、縦続接続された信号再生器間に、信号再生に伴う損失を補償するための増幅器 (増幅率 $G=3.2$) が挿入されている。図 6 (a) より、入力パルスエネルギーがある閾値よりも大きければ、パルスエネルギーはおおよそ 0.19 pJ に安定化されることがわかる。安定化された後のパルス幅は 7.2 ps である。また、可飽和吸収素子の効果により、入力パルスエネルギーが閾値よりも低い場合はパルス振幅はだいにゼロに近づく。図 6 (b) は、エネルギーの変化に伴ってパルスの位相がどのように変化するかを示したものである。初期振幅が異なるパルスは、振幅安定化の過程で異なる大きさの SPM を経験するため、初期振幅の違いに応じてパルスの位相がばらつくことがわかる。

このようなパルス位相の拡散は、RZ-DPSK などの位相

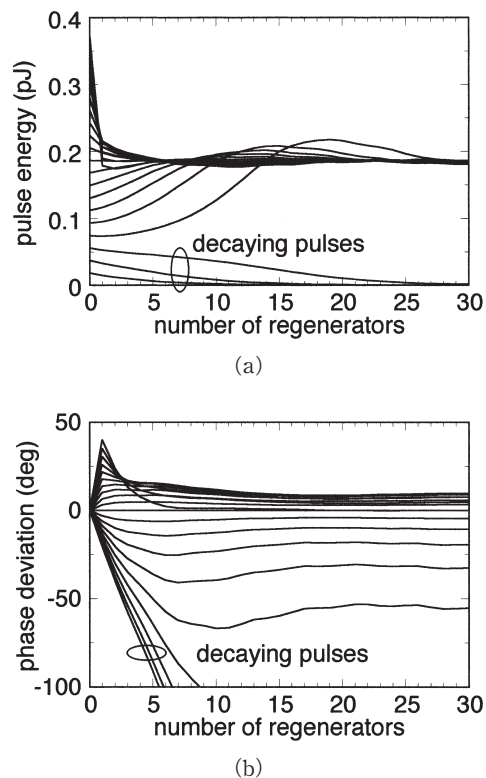


図 6 縦続接続された FWM 型信号再生器を伝搬する単一パルスの (a) エネルギーと (b) 位相。

が情報を担う信号の振幅を再生する際の問題となる。しかしながら、位相の拡散の程度が小さければ、再生器によって振幅雑音は抑圧されるので、位相雑音ではなく振幅雑音が伝送特性を決定する主要因である系において再生器が効果をもつ。また、非線形性が強い伝送系において、インラインの増幅器の自然放出雑音 (amplified spontaneous emission: ASE) による信号振幅のゆらぎが信号の位相雑音に変換され、伝送特性を劣化させる場合 (この効果は Gordon-Mollenauer 効果と呼ばれる³¹⁾) にも、伝送途中で信号振幅を安定化することは伝送品質の向上をもたらす。

そこで、図 4 に示す FWM 型信号再生器が、RZ-DPSK 40 Gb/s 長距離信号伝送特性を改善する効果があるかどうかを数値計算によって確かめた。想定した伝送系は、増幅器間隔が 80 km で、標準単一モードファイバーと逆分散ファイバーによって伝送路が構成された準線形伝送系であり、256 ビットパルス列の伝送シミュレーションを行った。図 7 に、1440 km 伝送後の 256 個のパルスの複素振幅の分布 (コンスタレーション) を示す。インライン増幅器の出力信号電力は 0 dBm, 雑音指数は 5 dB である。図 7 (a) は、再生器を用いない場合のコンスタレーション図である。インライン増幅器からの ASE 雑音のために、信号振幅が振幅方向および位相方向の両方向に大きくゆらいで

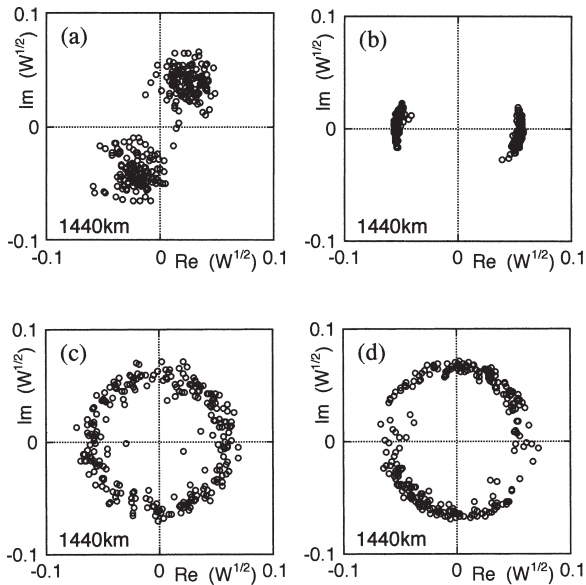


図7 40 Gb/s準線形伝送における信号パルスの複素振幅の分布 (コンスタレーション)。(a) 信号再生器を用いない場合、(b) FWM型信号再生器を用いた場合、(c) スペクトルスライス型信号再生器を用いた場合、(d) ソリトン型信号再生器を用いた場合。

いる。図7(b)は、FWM型の信号再生器を6スパンごと(480 km 間隔)に挿入した場合である。振幅方向のゆらぎが強く抑制され、位相方向のゆらぎは信号再生器を用いない場合とほぼ同じ程度に保たれていることがわかる。図7(c)および(d)に、前章で述べたSPMに基づく2R信号再生器を6スパンごとに挿入した場合の信号のコンスタレーション図を、参考のために示す。SPMに基づく信号再生器では、非線形ファイバーに入力される信号電力がFWM型の信号再生器の場合よりも大きく、振幅安定化に伴う位相変化量が大きくなる。その結果、信号位相が大きく拡散し、位相情報がほとんど失われることがわかる³²⁾。

光ファイバーの非線形効果を利用した信号再生技術について、自己位相変調 (SPM) と四光波混合 (FWM) のそれぞれに基づく信号再生器の原理と最近の研究報告例を紹介した。ファイバー中のSPMを利用すると、きわめて単純な構造で高速の信号再生器を実現できる。また、FWMを利用した信号再生器は入力信号に含まれる位相情報をかなりの程度保持することができ、オン・オフ変調および位相変調された2種の信号に関してトランスペアレントな信号波形整形器として働く。

キャリア波長が異なる複数の信号が多重化された波長分割多重システムにおいて信号再生を行う場合、現状では、波長分離した後にチャンネルごとに信号再生処理を施し再び多重化することになる。再生装置の大規模化を防ぐた

めには、チャンネルあたりの信号速度を上げると同時に高速の信号再生器を用い、チャンネル数を減らすことが有効であるが、その一方で、比較的低速の波長チャンネルの信号を一括して再生することができれば、現状の長距離伝送システムなどの親和性の点からもきわめて有効である。多波長一括処理や、種々の変調形式・速度の信号処理を可能にするような、より高機能で柔軟性に富む再生器の開発に向けた今後の研究が期待される。

なお、本稿に関連する研究は、情報通信研究機構委託研究「トータル光通信技術の研究開発」ならびに日本学術振興会科学研究費補助金 S13852010 の援助のもとに行われた。

文 献

- 1) M. Onishi, T. Okuno, T. Kashiwada, S. Ishikawa, N. Akasaka and M. Nishimura: "Highly nonlinear dispersion shifted fiber and its application to broadband wavelength converter," *23rd European Conference on Optical Communications (ECOC 1997)* (1997) Vol. 2, pp. 115-118.
- 2) P. Petropoulos, H. Ebendorff-Heidepriem, V. Finazzi, R. C. Moore, K. Frampton, D. J. Richardson and T. M. Monro: "Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers," *Opt. Express*, **11** (2003) 3568-3573.
- 3) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. (Academic Press, San Diego, 2001).
- 4) N. J. Doran and D. Wood: "Nonlinear-optical loop mirror," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 56-58.
- 5) N. J. Smith and N. J. Doran: "Picosecond soliton propagation using nonlinear optical loop mirrors as intensity filters," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 1084-1085.
- 6) A. Gray, Z. Huang, I. Khrushchev and I. Bennion: "Autosoliton propagation at 80 Gbit/s using concatenated nonlinear loop switches in standard fibre," *Electron. Lett.*, **40** (2004) 498-500.
- 7) P. Ghelfi, A. Bogoni, M. Scaffardi, F. Ponzini, C. Porzi and L. Poti: "320 Gbit/s all-optical regeneration for OTDM signals," *30th European Conference on Optical Communications (ECOC 2004)* (2004) Vol. 3, pp. 648-649.
- 8) P. V. Mamyshev: "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," *1998 European Conference on Optical Communication (ECOC 1998)* (1998) pp. 475-476.
- 9) S. Taccheo and K. Ennser: "Investigation of amplitude noise and timing jitter of supercontinuum spectrum-sliced pulses," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (2002) 1100-1102.
- 10) N. Yoshikane, I. Morita and N. Edagawa: "Improvement of dispersion tolerance by SPM-based all-optical reshaping in receiver," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (2003) 111-113.
- 11) Y. Su, G. Raybon, R.-J. Essiambre and T.-H. Her: "All-optical 2R regeneration of 40-Gb/s signal impaired by intra-channel four-wave mixing," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (2002) 350-352.
- 12) G. Raybon, Y. Su, J. Leuthold, R.-J. Essiambre, T. Her, C. Joergensen, P. Steinvurzed, K. Dreyer and K. Feder: "40 Gbit/s pseudo-linear transmission over one million kilo-

- meters," *2002 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2002)*, FD10 (2002).
- 13) Y. Kodama and A. Hasegawa: "Generation of asymptotically stable optical solitons and suppression of the Gordon-Haus effect," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 31-33.
 - 14) M. Asobe, A. Hirano, Y. Miyamoto, K. Sato, K. Hagimoto and Y. Yamabayashi: "Noise reduction of 20 Gbit/s pulse train using spectrally filtered optical solitons," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 1135-1136.
 - 15) B. Dany, P. Brindel, O. Leclerc and E. Desurvire: "Transoceanic 4×40 Gbit/s system combining dispersion-managed soliton transmission and new 'black-box' in-line optical regeneration," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 418-419.
 - 16) A. Sahara, T. Inui, T. Komukai, H. Kubota and M. Nakazawa: "40-Gb/s RZ transmission over transoceanic distance in a dispersion managed standard fiber using a new inline synchronous modulation method," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 720-722.
 - 17) D. Rouvillain, F. Segueineau, L. Pierre, P. Brindel, H. Choumane, G. Aubin, J.-L. Oudar and O. Leclerc: "40 Gbit/s optical 2R regenerator based on passive saturable absorber for WDM long-haul transmissions," *2002 Optical Fiber Communications Conference (OFC 2002)*, FD11 (2002).
 - 18) M. Matsumoto and O. Leclerc: "Analysis of a 2R optical regenerator utilizing self-phase modulation in a highly nonlinear fiber," *Electron. Lett.*, **38** (2002) 576-577.
 - 19) M. Matsumoto: "Performance analysis and comparison of optical 3R regenerators utilizing self-phase modulation in fibers," *J. Lightwave Technol.*, **22** (2004) 1472-1482.
 - 20) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota and K. Suzuki: "10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometers," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 1270-1272.
 - 21) H. Kubota and M. Nakazawa: "Soliton transmission control in time and frequency domains," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2189-2197.
 - 22) S. Watanabe, F. Futami, R. Okabe, Y. Takita, S. Feber, R. Ludwig, C. Schubert, C. Schmidt and H. G. Weber: "160 Gbit/s optical 3R regenerator in a fiber transmission experiment," *2003 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2003)*, PD16 (2003).
 - 23) T. Ohara, H. Takara, S. Kawanishi, T. Yamada and M. M. Fejer: "160-Gb/s all-optical limiter based on spectrally filtered optical solitons," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 2311-2313.
 - 24) T. Ohara, H. Takara, A. Hirano, K. Mori and S. Kawanishi: "40-Gb/s $\times 3$ -channel all-optical multichannel limiter utilizing spectrally filtered optical solitons," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15** (2003) 763-765.
 - 25) A. Hirano, T. Kataoka, S. Kuwahara, M. Asobe and Y. Yamabayashi: "All-optical limiter circuit based on four-wave mixing in optical fibres," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 1410-1411.
 - 26) A. Takada and W. Imajuku: "Amplitude noise suppression using a high gain phase sensitive amplifier as a limiting amplifier," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 677-679.
 - 27) K. Inoue: "Optical level equalisation based on gain saturation in fibre optical parametric amplifier," *Electron. Lett.*, **36** (2000) 1016-1017.
 - 28) E. Ciaramella and S. Trillo: "All-optical signal reshaping via four-wave mixing in optical fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 849-851.
 - 29) Y. Li, K. Croussore, C. Kim and G. Li: "All-optical 2R regeneration using data-pumped fibre parametric amplification," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1263-1264.
 - 30) M. Matsumoto: "In-line regeneration of RZ-DPSK signals using four-wave mixing in a fiber," *2004 Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting (OAA 2004)*, OTuC2 (2004).
 - 31) J. P. Gordon and L. F. Mollenauer: "Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 1351-1353.
 - 32) A. Striegler and B. Schmauss: "All-optical DPSK signal regeneration based on cross-phase modulation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 1083-1085.

(2004年11月4日受理)