高速光通信における光ファイバ非線形問題の克服

清水 克宏, 水落 隆司, 石田 和行, 本島 邦明

三菱電機(株)情報技術総合研究所(〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船5-1-1)

Overcoming Fiber Nonlinear Effects in Large Capacity Optical Transmission Systems

Katsuhiro SHIMIZU, Takashi MIZUOCHI, Kazuyuki ISHIDA, and Kuniaki MOTOSHIMA

Information Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

(Received August 11, 2004)

We have tackled the technical challenge of how to mitigate fiber nonlinearity effects in our high-speed optical communication systems. Over the last decade, we have improved the tolerance to nonlinearity by 30 dB by developing numerous technologies that can be categorized into four types: (1) new design of optical fibers to reduce nonlinearity, (2) transmission and signal amplification technologies that reduce signal power level without optical SNR degradation, (3) dispersion management techniques to reduce the nonlinear interactions, and (4) new modulation formats and forward-error-correction techniques. We believe that a deeper understanding of fiber nonlinearity effects will make it possible to realize more cost effective and transparent optical networks in the near future.

Key Words: Fiber nonlinear effects, Raman amplifier, Dispersion management, Modulation formats, Forward error correction

1. はじめに

インターネットの普及に伴い90年代にネットワークの伝送容量需要が急増した。特に光海底ケーブルに代表される長距離幹線系では、光ファイバあたりの伝送容量は1年に2倍のペースで増え続け、10年間で1000倍の伸びとなった。光伝送システムの容量は受信感度と光ファイバ非線形現象によって制約されており、10年間でこれらの制約条件を30 dBも改善する技術革新がなされたことになる。Fig. 1に90年代半ば以降に達成された感度改善、非線形リミット改善の効果を示す。

Fig. 1 Technological progress in receiver sensitivity and non-linear tolerance improvement in the past decade.

光信号の高ビットレート化はシステムの大容量化・低コスト化をもたらすが、高い光SNRを必要とするために、光ファイバへの入射信号強度の上昇をも要求する。また、高速信号で用いる短パルスは波形歪みやチャープに敏感である。信号速度が高くなればなるほど光ファイバの非線形効果は深刻な問題となり、高度な抑圧技術が求められる。

非線形問題を克服するためのアプローチは大きく4つに分類される。すなわち、(1)屈折率プロファイルを工夫して光ファイバそのものの非線形耐力を向上する方法、(2)ラマン増幅などによって光ファイバ内ピークパワーを低減する方法、(3)光ファイバの分散マップによって非線形効果を低減する方法、(4)変調方式や信号処理による低減方法、である。本稿では著者らの取り組みを中心として、これらの4つのアプローチについて述べる。

2. 光ファイバ中の非線形効果

2.1 光ファイバ中の非線形効果

光通信で問題となる主なファイバ非線形効果をFig. 2に示す^{1,2)}。SBS(誘導ブリュアン散乱)は比較的しきい値が高く、無中継伝送システムを除く多くのシステムではあまり深刻ではない。SRS(誘導ラマン散乱)は短波側のエネルギーが長波側に移る現象であり、波長間のレベルシフト、短波側の光SNR不足を引き起こすが、利得等化によっ

て問題を回避できる場合が多い。

FWM(四光波混合)は波長分散が小さい領域の波長多重伝送で生ずるクロストークである。光ファイバの局所分散が零とならないように正分散と負分散の光ファイバを組み合わせる(分散マネージメント)ことで回避できる³⁾。

XPM(相互位相変調)は他波長のパルスが引き起こす光ファイバの屈折率変化に起因する位相揺らぎであり、多くの長距離10 Gb/s波長多重伝送システムにおいて最も問題となる非線形効果である。XPMは異なる波長間のパルスの衝突に伴う波形歪、周波数シフトであるので、波長によるパルス伝播時間差を決める光ファイバの分散値が重要なパラメータとなる。

SPM(自己位相変調)はパルスが自分自身の光強度によって位相歪を生ずる現象である。光ファイバの波長分散によって位相歪が強度歪や時間ジッタに変換されたり、分散による波形歪が複雑なSPMを引き起こしたりするため(SPM-GVD効果:SPM-Group Velocity Dispersion効果)、分散の値、分散マップの構成は大変に重要である⁴⁾。また、特に隣接パルス同士の相互作用はIXPM、IFWM⁵⁾として詳細に検討されており、40 Gb/s伝送を制限する非線形効果となる場合が多いことが知られている。SPMも変調方式に大きく左右される。

Gordon-Haus効果⁶⁾、Gordon-Mollenauer効果⁷⁾はともに光増幅器の自然放光雑音(ASE)が信号パルスの振幅をランダムに変化させ、ランダムなSPMを引き起こすことで生ずる。Gordon-Haus効果は分散が長手方向に一定な光ファイバを使うソリトン伝送時には特性を制約するジッタとなるが、分散マネージメントを用いることで効果的に抑圧できる⁸⁾。Gordon-Mollenauer効果による位相雑音は、DPSK(Differential Phase Shift Keying)などの位相を用いた変調フォーマットに対する制約となる。

以上のように大部分の非線形現象は光ファイバの分散マップと変調方式、変調速度に大きく依存する。そこで、どのようなシステムでどの非線形現象の抑圧が課題となるかを把握することが重要となる。

2.2 光ファイバの非線形耐力向上

光ファイバ中の全ての非線形効果量は入射光強度に比例し、有効断面積(A_{eff})に反比例する。光伝送システムの光SNRは光受信機あるいは光増幅中継器への到達光強度によって決定されるため、光ファイバの伝送損失が小さければ

光SNRを犠牲にすることなく、光ファイバへの入射強度を低減することができる。一般的な光ファイバは0.18~0.20 dB/km程度の伝送路損失を有するが、伝送損失を僅か0.01 dB/km小さくできれば、100 kmのシステムでは1 dBもの入射強度低減の効果となる。これまでに、ゲルマニウム添加によるレーリー散乱損失増加を抑圧する純粋石英コアファイバによって、0.1484 dB/kmが達成されている⁹⁾。有効断面積拡大については屈折率プロファイルの最適化によって211 μm^2 の実現が報告されている¹⁰⁾。これは通常のSMFの2.6倍であり、4.2 dBもの非線形効果抑圧を達成するものである。

3. 光ファイバ内ピークパワー低減による非線形抑圧

3.1 ラマン増幅器

光SNRを損なうことなく光ファイバ内ピークパワーを落とすためには、低雑音な光増幅技術が必要である。そのためには集中定数的な光増幅器よりも分布定数的な構成が望ましい。ラマン増幅器¹¹⁾は伝送路を増幅媒体とする分布定数的な光増幅器であるが、励起光合波部の近傍に利得が集中しやすいため、利得領域の延伸には工夫が必要である。利得の集中を避ける方法として、ラマン励起光をさらに短波の光でラマン励起する高次ラマン増幅法¹²⁾が提案され、その効果が実証されている。

我々はラマン増幅器の低雑音化の方法として、ラマン励起光入力部近傍の伝送路有効断面積(A_{eff})を大きくし、 A_{eff} が小さいファイバを伝送路中段に接続する方法(A_{eff} マネージメント)を検討している^{13,14)}。Fig. 3に示す2つの伝送路を比較すると、(a)のマップではFig. 4に示すように利得領域が約9 km広がり、信号光強度の最小値が2.5 dB上昇する。この結果、等価雑音指数が約2 dB改善する。ラマン励起光強度と等価雑音指数の関係の計算値をFig. 5に示す。470 mW励起強度においては、(a)、(b)のマップにお

Fig. 3 Two fiber map configurations.

Fig. 4 Effective Raman gain profile and transmitted signal power level: (a) Fiber Map A, (b) Fiber Map B.

Fig. 2 Nonlinear effects in fiber optic communication systems.

Fig. 5 Equivalent noise figure and received OSNR for a range of Raman pump powers: (a) Fiber Map A, (b) Fiber Map B.

Fig. 6 Measured Q-values for 32 x 40 Gbit/s after 202 km transmission.

ける等価雑音指数はそれぞれ-4 dB, -6 dBであった。EDFAの雑音指数は4 dB程度であるので、従来構成のラマン増幅器によって8 dB, A_{eff} マネジメントを用いたラマン増幅によって10 dBのSNR改善, すなわち信号強度抑圧を達成できるといえる。

本手法を32波長40 Gb/s 202 km無中継伝送にて検証した結果をFig. 6に示す。光SNRの改善が受信特性の改善となっていることを確認できる。 A_{eff} マネジメントと高次ラマン増幅を併用することで更なる信号強度低減が可能である¹⁵⁾。

3.2 Pre-PMD伝送法

光ファイバの波長分散(CD: Chromatic Dispersion)によって伝送前にパルスを故意にストレッチし(Pre-CD), ピークパワーを低減することは非線形効果抑圧に有効である。同様に偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)によってピークパワーを抑圧することも可能である(Pre-PMD)^{16,17)}。光ファイバ中のパルス伝搬は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{y1}}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 A_{y1}}{\partial \tau^2} \\ = i\gamma\left(|A_{y1}|^2 + \frac{2}{3}|A_{x1}|^2\right)A_{y1} + 2i\gamma\left(|A_{y2}|^2 + |A_{y3}|^2\right)A_{y1} \\ + \frac{i\gamma}{3}\left(|A_{x2}|^2 + |A_{x3}|^2\right)A_{y1} + i\gamma A_{y2}^2 A_{y3}^* + \frac{i\gamma}{3}A_{y2}^2 A_{y3}^* \end{aligned} \quad (1)$$

A_1, A_2, A_3 はそれぞれ隣接するパルスの電界を, x, y はそれぞれ2つの直交する偏波成分を表す。右辺は非線形現

象による劣化要因を示しており, 第1項がパルスストレッチによって小さくなる成分である。他の項は隣接パルス間の重なりに起因する非線形効果でパルスストレッチによって増大してしまう。第1項を抑圧しつつ第2項以降の増大を避けることが重要である。CDによるパルスストレッチは同一偏波成分同士のパルスオーバーラップを, PMDは直交偏波成分同士のオーバーラップを引き起こす。上式は直交偏波成分同士の効果が同一偏波成分同士の効果よりも小さいことを示しており, Pre-PMDがPre-CDよりも非線形効果抑圧に効果的であることを示唆している。

Fig. 7に試験系の構成を示す¹⁶⁾。試験には10 Gb/s RZ信号を用い, 伝送路ファイバには25 kmのNZ-DSFを用いた。可変PMDエミュレータによりPre-PMDを与え, 受信機側で補償した。Pre-PMDの最適値は上式からの予測されたとおり30 psであった。Fig. 8に非線形しきい値の改善量を示す。本試験条件では3.4 dBもの改善が得られた。Pre-PMDの効果は40 Gb/s WDM無中継伝送試験においても確認されている¹⁸⁾。

4. 分散マネジメントによる非線形抑圧

4.1 分散マネジメント技術

FWM, SPMなどの非線形効果の観点からは, 位相整合条件を避けるために大きな波長分散が好ましい。一方で, システム全体としての総分散量が一定以下であることが光パルス伝送に不可欠である。このため, 局所的に分散値が正である光ファイバと負である光ファイバを組

Fig. 7 Experimental setup for pre-PMD transmission.

Fig. 8 Sensitivity penalty versus average input power to achieve BER = 10^{-9} for 0ps and 30 ps of pre-PMD.

み合わせる分散マネジメントが有効である。

1種類のファイバで全てのパラメータを最適化することは不可能であったが、分散マネジメントの考え方は光ファイバの設計に大きな自由度をもたらした。正分散ファイバの分散スロープと負分散ファイバの分散スロープは相殺することができるため、広い波長範囲にわたって、残留分散を小さくすることが可能となった^{19,20)}。また、正分散ファイバでは有効断面積を広げることが可能であり¹⁰⁾、光強度が強い光増幅器直前に正分散ファイバを配置することで非線形効果を大幅に抑圧できる。

最適な分散マネジメント周期はビットレート、変調方式によって異なる。40 Gb/sでは局所的な残留分散が大きいとIXPM/IFWMの効果が強くなるため、分散マップの短周期化²¹⁾、局所分散の適度な低減²²⁾が有効である。

4.2 XPMを低減する対称衝突法

WDMシステムにおけるXPM抑圧を目的とした分散マネジメント手法について述べる。XPMは衝突する他波長のパルス形状の時間微分に比例する位相変調を引き起こす。衝突の前半と後半では発生する位相変調の符号が異なるため、伝送中にパルス形状・強度が変化しなければ、衝突の前半と後半でXPMは打ち消しあう。しかし、現実には伝送路の損失や分散によって波形も形状も変化するため、衝突の前半と後半に生ずる位相変調の大きさは異なり、衝突後に位相変調が残留してしまう。衝突毎にXPMをキャンセルすることは難しいため、複数回の衝突の合計XPMを小さくする方法が提案されている²³⁾。この概念をラマン増幅器を用いるシステムに拡張すると、伝送路の損失を負とすることもできるため、残留する位相変調量の制御はより容易となる。この方法を我々は対称衝突伝送法として提案している²⁴⁾。

Fig. 9に示すように1スパンで正・負・正と符号が変化する伝送路を考える。隣接波長のパルスは1スパン中に3回衝突を繰り返す。3度目の衝突時にはラマン利得により伝送路の損失が負となっており、ラマン利得を最適化することで、3回の衝突の残留位相をゼロに近づけることがで

Fig. 9 Concept of symmetric collided transmission.

きる。対称衝突伝送の効果を確認するために、22.8 Gb/s Carrier suppressed RZ (CS-RZ) 65波伝送試験を実施した。

ラマン利得とEDF利得の比率を変えて6,422 km伝送後のQ値を測定した結果をFig. 10に示す。ラマン利得11 dB、EDF利得8 dB (ラマン利得比: $DRA\ gain\ ratio = 58\%$) にて最適となり、シミュレーション結果とほぼ一致した。この方法によって、約1 dBの非線形ペナルティの削減が可能となり、65波8,398 km伝送を実現した²⁴⁾。65波長の平均Q値は9.6 dB、最悪波長のQ値は9.0 dBであった。

5. 変復調方式と誤り訂正技術による非線形効果低減

5.1 RZとCS-RZ

CS-RZ変調方式²⁵⁾はスペクトル幅が狭く、かつ隣接パルスの位相が反転しているために分散耐力に優れており、SPM-GVD効果が小さい。非線形耐力の観点から、RZ、CS-RZ変調方式を比較した結果をFig. 12に示す¹⁴⁾。1波長伝送時の非線形耐力 (SPM耐力) においては、CS-RZがRZよりも明らかに優れていることがわかる。XPM耐力に関しては分散耐力の差があまり重要ではないためビットレートが低い場合や長距離伝送ではCS-RZの優位性が小さくなる傾向があるが²⁶⁾、SPMがドミナントとなる40 Gb/sではCS-RZが優位となる場合が多い。

Fig. 10 Measured Q values versus DRA gain ratio for 65 x 22.8 Gb/s transmission over 6,422 km for different OSNR conditions. The OSNR was varied by adjusting the output power of the DRA/EDFA repeaters.

Fig. 11 Measured (dots) and calculated (solid line) Q values as a function of transmission distance.

Fig. 12 Comparison of nonlinearity effects for single channel transmission between RZ and CS-RZ.

5.2 OOKとDPSK

バランストレーサバを適用できるDPSK (Differential Phase Shift Keying) 変調方式は、OOKよりも3 dB優れた受信感度を有していることに加え、全てのパルスが同一振幅をもつためSPM, XPMに対する耐力も高い²⁷⁻²⁹⁾。DPSKと従来のOn Off keying (OOK)との比較を10 Gb/s 100波伝送系を用いて実施した³⁰⁾。Fig. 13に示すとおり、DPSKは短距離では圧倒的に優れた伝送特性を示した。しかし、長距離伝送においては、DPSKの非線形ペナルティはOOKのそれを上回る結果となった。ここで注目すべきは、伝送に伴うQ値劣化の傾きがDPSKとOOKで異なる点である。Gordon - Mollenauer効果⁷⁾は距離の3乗に比例することが知られており、DPSKの急峻な特性劣化はこの効果によって説明できる。波長間隔が比較的広い10 Gb/s波長多重長距離システムではGordon - Mollenauer効果が支配的となるためにDPSKのメリットが出しにくくなるといえる。一方、40 Gb/sシステムにおいては、常にDPSKがOOKよりも有利となることが確認されつつある³¹⁾。

5.3 誤り訂正技術(FEC)

誤り訂正技術(FEC: Forward Error Correction)はビット誤り率をその発生原因にかかわらず改善できるため、低光SNRや波形歪に対して強力な効果を発揮する。ITU-TG.975に標準化されたリードソロモン符号RS(255, 239)では5.8 dBの光SNR改善相当の効果が得られる。非線形抑

Fig. 13 Comparison of transmission performance between DPSK and OOK formats in 10 Gb/s x 100 channel transmission.

Fig. 14 Measured error correction capability of 3-bit soft-decision FEC.

圧の観点からは伝送速度は低い方が好ましいが、訂正能力はFEC符号の冗長率に依存する。強力な符号を適用すれば25 %以下の範囲では冗長率が高いほどシステムのメリットが大きい。Fig. 14に示すとおり、我々が開発した3ビット軟判定ブロックターボ符号は約25 %の冗長度によって10.1 dBの光SNR改善相当の効果を達成することができた³²⁾。この結果、10.1 dBの光ファイバ内パワー低減が可能となり、非線形効果は大幅に緩和される。

3ビット軟判定FECにRZ-DPSK方式を組み合わせたところ、10 Gb/sにおいてビット誤り率 10^{-9} を達成するための光強度は-50.5 dBmまで低減可能であった³³⁾。

6. むすび

光ファイバ中の非線形効果を抑圧する様々な技術の開発が進んでいる。有効断面積拡大などによる光ファイバの非線形耐力向上、ラマン増幅器による光ファイバ内パワーの低減、誤り訂正技術はビットレート、変調方式、伝送距離に係わりなく有効である。一方、光ファイバの分散マネジメントや変調方式の選択は、ビットレート、波長密度、伝送距離などによって異なるべきものである。多様化した技術を効果的に活用するには、技術のポートフォリオを明確化することが今後ますます重要となっていくであろう。非線形効果とそれを抑圧する技術への理解の深まりが、光伝送システムのさらなる大容量化とトランスパレント化に寄与するものと期待する。

謝 辞

本研究の一部は、(独)情報通信研究機構の民間基盤技術研究促進制度における委託研究「既設光ファイバ網に適する超高速・長距離光伝送技術の開発」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) Govind P. Agrawal: Nonlinear Fiber Optics (Academic Press, San Diego, 1999).
- 2) R. -J. Essiambre, G. Raybon, and B. Mikkelsen: in Optical Fiber Telecommunication IVB ed. Ivan Kaminow and Tingye Li

- (Academic Press San Diego, 2002) Chap. 6.
- 3) A.R. Chraplyvy, A. H. Gnauck, R. W. Tkach, and R. M. Derosier: IEEE Photon. Tech. Lett. **5** (1993) 1233.
 - 4) 菊池 和朗, 多久島 裕一: 電子情報通信学会誌 **83** (2000) 743.
 - 5) P. V. Mamyshev and N. A. Mamysheva: Opt. Lett. **24** (1999) 1454.
 - 6) J. P. Gordon and H. A. Haus: Opt. Lett. **11** (1986) 665.
 - 7) J. P. Gordon and L. F. Mollenauer: Opt. Lett. **15** (1990) 1351.
 - 8) M. Suzuki, I. Morita, N. Edagawa, S. Yamamoto, H. Taga, and S. Akiba: Electron. Lett. **3** (1995) 2027.
 - 9) N. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saithoh, and Y. Chigusa: Electron. Lett. **38** (2002) 1168.
 - 10) M. Tsukitani, M. Matusi, K. Nagayama, and E. Sasaoka: Technical Digest of ECOC2002, Copenhagen, October, 2002, paper 3.2.2.
 - 11) K. Rottwitz and A. J. Stentz: in Optical Fiber Telecommunication IVA ed. Ivan Kaminow and Tingye Li: (Accademic Press, San Diego, 2002) Chapter 5.
 - 12) K. Rottwitz, A. Stentz, T. Nielsen, P. Hansen, K. Feder, and K. Walker: Technical Digest of ECOC1999, Nice, October, 1999, paper II-144.
 - 13) K. Shimizu, K. Kinjo, N. Suzuki, K. Ishida, S. Kajiya, K. Motoshima, and Y. Kobayashi: Technical Digest of OFC2001, Anaheim, March, 2001, paper TuU2.
 - 14) K. Shimizu, N. Suzuki, K. Kinjo, K. Ishida, S. Kajiya, T. Mizuochoi, K. Motoshima, Y. Kobayashi, and K. Kasahara: IEICE Trans. Commun. **E85-B** (2002) 446.
 - 15) N. Suzuki, S. Kajiya, K. Shimizu, K. Motoshima, Y. Kobayashi, and K. Kasahara: Technical Digest of SubOptic 2001, Kyoto, June, 2001, paper T3.4.2.
 - 16) D. L. Harris, K. Shimizu, and M. E. Marhic: Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference (OFC2003), Atlanta, March, 2003, paper ThJ6.
 - 17) L. Moller, Y. Su, G. Raybon, S. Chandrasekhar, and L. L. Buhl: Technical Digest of CLEO 2002, Log Beach, May, 2002, p. 461.
 - 18) D. L. Harris, K. Shimizu, M. E. Marhic, J. Pan, and L. G. Kazovsky: Technical Digest of CLEO 2003, Baltimore, June, 2003, paper CThD1.
 - 19) Y. Akasaka, R. Sugizaki, and T. Kamiya: Technical Digest of European Conference on ECOC1995, Brussels, September, 1995, paper We.B.2.4.
 - 20) M. Fukui, K. Oda and H. Toba: Technical digest of OECC96, Makuhari, July, 1996, p. 330.
 - 21) Y. Inada, H. Sugahara, K. Fukuchi, T. Ogata, and Y. Aoki: IEEE Photon. Tech. Lett. **14** (2002) 1366.
 - 22) K. Akikawa, T. Suzuki, K. Himeno, and A. Wada: Technical Digest of OFC2001, Anaheim, March, 2001, paper TuH6.
 - 23) T. Tanaka, T. Naito, N. Shimojoh, H. Nakamoto, T. Ueki, and M. Suyama: Proceeding of OECC2000, Makuhari, July, 2000, paper 11A1-5.
 - 24) K. Shimizu, K. Ishida, K. Kinjo, T. Kobayashi, S. Kajiya, T. Tokura, T. Kogure, K. Motoshima, and T. Mizuochoi: Technical Digest of OFC2002, Anaheim, March, 2002, paper WX4.
 - 25) Y. Miyamoto, A. Hirano, K. Yonenaga, A. Sano, H. Toba, K. Murata, and O. Mitomi: Electron. Lett. **35** (1999) 2041.
 - 26) Y. Kobayashi, K. Kinjo, K. Ishida, T. Sugihara, S. Kajiya, N. Suzuki, and K. Shimizu: Technical Digest of ECOC2000, Munich, September, 2000, paper PD1.7.
 - 27) T. Miyano, M. Fukutoku, K. Hattori, and H. Ono: Proceeding of OECC 2000, Makuhari, July, 2000, paper 14D3-3.
 - 28) A. H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, C. Doerr, L. Stulz, A. Agarwal, S. Banerjee, D. Grosz, S. Hunsche, A. Kung, A. Marhelyuk, D. Maywar, M. Movassaghi, X. Liu, C. Xu, X. Wei, and D. M. Gill: Proceeding of OFC 2002, Anaheim, March, 2002, paper PD-FC2.
 - 29) T. Hoshida, O. Vassilieva, K. Yamada, S. Choudhary, R. Pecqueur, and H. Kuwahara: IEEE J. Lightwave Technol. **20** (2002), 1989.
 - 30) T. Mizuochoi, K. Ishida, T. Kobayashi, J. Abe, K. Kinjo, K. Motoshima, and K. Kasahara: IEEE J. Lightwave Technol. **21** (2003) 1933.
 - 31) T. Tsuritani, K. Ishida, A. Agata, K. Shimomura, I. Morita, T. Tokura, H. Taga, T. Mizuochoi, and N. Edagawa: Technical Digest of OFC2003, Alranta, March, 2003, paper PD23.
 - 32) T. Mizuochoi, K. Ouchi, T. Kobayashi, Y. Miyata, K. Kuno, H. Tagami, K. Kubo, H. Yoshida, M. Akita, and K. Motoshima: Technical Digest of OFC2003, Atlanta, March, 2003, paper PD21.
 - 33) T. Kobayashi, K. Shimizu, K. Ouchi, K. Ishida, Y. Miyata, T. Tokura, J. Abe, T. Mizuochoi, and K. Motoshima: Technical Digest of ECOC2003, Remini, September, 2003, paper Tu1.6.6.

レーザーワード

光ファイバの非線形効果 (fiber nonlinear effects)

光ファイバの屈折率が光強度に依存性して変化する効果や、光ファイバを構成するガラスの振動モードが励起されて散乱が生ずる効果の総称。一般に石英系ガラスの非線形効果は小さいが、光ファイバは長距離にわたって光を効率よく閉じ込める性質があるため、光ファイバ中で発生する非線形効果の蓄積が無視できなくなることがある。特に長距離伝送システムや複数の波長を伝送する

波長多重伝送システムでは、非線形効果に伴う伝送波形の歪み、波長多重信号間のクロストークの抑圧が課題となる。一方で、光ファイバの非線形効果を利用してパルス波形の整形、波長変換などを実現できることも知られており、光ファイバの非線形効果を積極的に活用する研究も進んでいる。

(清水 克宏)