

超高速光信号処理技術の開発

～160Gbit/s光通信システムの実用化に向けて～

藤井 浩三

2005年3月末時点で、高速インターネットサービスとしてADSL（非対称デジタル加入者線）回線が1,367万回線、FTTH（Fiber to the Home）回線も285万回線と、集計の度に回線数は増加しており、今後の通信の大容量化は、確実に進んでいくものと考えられる。このような、大容量光通信の要求に応える形で、光ファイバ1本当たりの伝送容量を増やすために、光信号の高速化技術、高密度波長多重（DWDM：（Dense Wavelength Division Multiplexing））技術、および、光増幅器の帯域拡大技術の開発が進められている¹⁾。大容量化の観点で言えば、2001年に、10.92Tbit/s（テラビット/秒：1Tbit/sは、映画25本分に相当）の報告²⁾が行われている。この時の伝送速度は、40Gbit/s、WDM波長数は273波長、光増幅器帯域は、3つの波長帯を合わせて100nmであった。

本稿では、これら大容量化技術の中で、超高速光通信技術に焦点を絞り、まず、当社の160Gbit/s光送受信装置について概観する。次に、最近の世界規模での研究開発の方向性を示し、その中での、当社の超高速光信号処理技術への取組みを紹介する。

160Gbit/s光送受信装置開発概観

沖テクニカルレビュー197号¹⁾で述べたように、平成8年度の2多重による20Gbit/s光信号生成を皮切りに、平成14年度には、互いに独立な40Gbit/sデータ系列から160Gbit/s光データ信号を生成し、伝送後40Gbit/sの光データ信号に分離する、光時分割多重・分離（光TDM：Time Division Multiplex）技術^{3) 4)}を確立した。光TDM技術は、電子回路の動作速度限界を超えた超高速光通信を実現するための技術である。図1に、160Gbit/s光TDM方式の概念図を示す。この方式では、短パルス発生、データ変調、および光ゲーティングにEA変調器（EAM：Electro Absorption Modulator）を使用している。送信側では、40GHzの電気クロック信号を用いて生成した光短パルスを4分岐し、40Gbit/sの電気信号で個別にデータ変調する。この光データ信号を時間軸上で光の状態のまま、ビットインターリーブして160Gbit/sの光信号

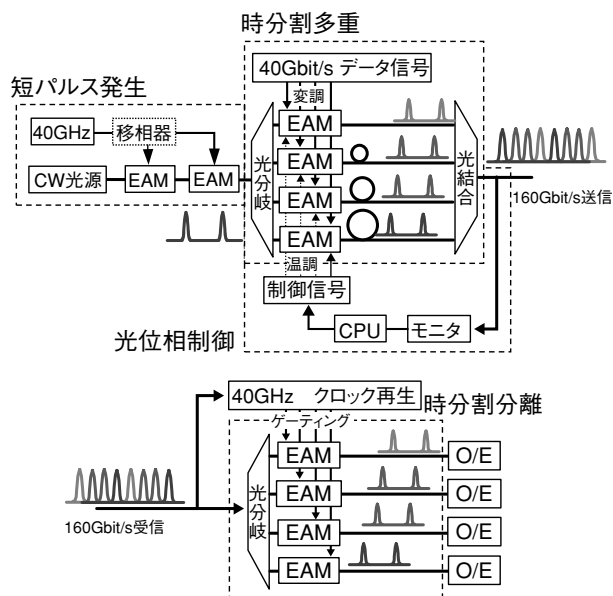


図1 160Gbit/s光TDM方式の概念図

を生成する。受信側では、160Gbit/sの光データ信号から40GHzの電気クロック信号を再生し、その信号を用いて光の状態にてゲーティングし、40Gbit/sの光信号にしてから、光/電気変換（O/E）を行って40Gbit/sの電気データ信号を得ている。また、この装置は、図示するように、送信側で、送信信号をモニタし、4チャネルの搬送波位相差を任意に設定・保持できるようにした。この方式を適用した160Gbit/s光送受信装置を開発して、4波のWDM伝送の実証や、640kmにおよぶ長距離伝送の実証⁵⁾を行ってきた。

この160Gbit/s光送受信装置を広く公表するために、平成16年7月に640km伝送実証をプレスリリース⁶⁾し、同月、インターオプト2004にて、光ファイバ120km伝送の動態展示を行った。図2は、その動態展示の様子である。アンリツ株式会社協力を得て、160Gbit/s光信号波形と符号誤り率の測定を行った。この動態展示により、最新計測機器の性能とともに、160Gbit/s光信号の送受信が実環境でも安定に実現できていることを、広く一般に公開することができた。160Gbit/s光信号の光ファイバ

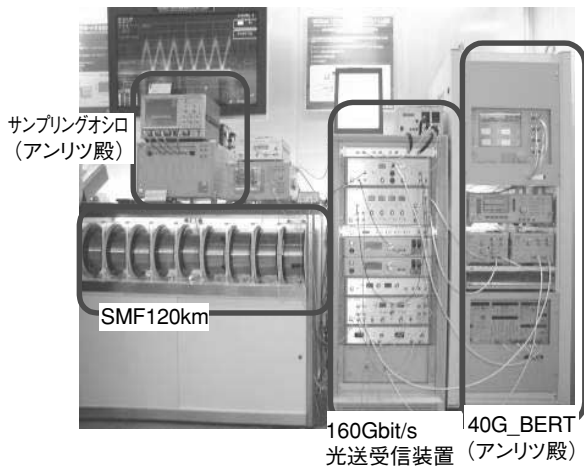


図2 インターオプト2004：160Gbit/s-120km伝送デモ

120km伝送を展示会で実演したのは、当社の160Gbit/s光送受信装置のみであり、このEA変調器ベースの光TDM方式で生成した光信号の安定性は、世界最高水準のレベルにあるといえる。

超高速光通信技術の研究開発動向

海外においても、光TDM技術を用いた超高速光通信に係る取組みは盛んである。主要な光通信関連の国際学会に着目すると、2000年以降、160Gbit/s関連の発表件数は、増加を続け、ECOC (European Conference on Optical Communications) 2004では、160Gbit/sの発表セッションが設けられるに至った。一方で、近年の超高速光通信に係る研究開発は、高速化・大容量化という視点から、以下に示すような新たな視点へ展開し始めている。

- 既存インフラを利用した、廉価で安定・高性能な大容量光ネットワークを構築するための技術開発。

この視点から、40Gbit/sのみならず、160Gbit/s級のフィールド試験^{7) 8) 9)}も多数報告されており、可変の分散補償技術や偏波分散補償技術が発表されている。

- 光3R (Reshaping, Retiming, Reamplifying) 信号再生に代表される波形整形技術。

80Gbit/s以上の超高速信号に対応する光3R信号再生技術や、DPSK (Differential Phase Shift Keying) などの新たな信号方式に対する波形整形技術の検討^{10) 11)}も広がりを見せている。

このように、最近の超高速光通信技術は、伝送速度として160Gbit/sを対象とした、既存ネットワーク適用の

ための補償技術、長距離伝送を目指した波形整形技術など、超高速光信号処理技術に基軸が移ってきている。

当社の超高速光信号処理技術の開発

160Gbit/s光送受信装置の開発以降、この装置を実用システムに適用していくために、以下に示すような、超高速光信号処理技術を開発している。

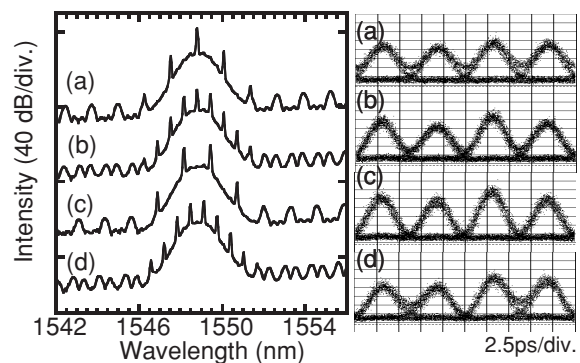
- (1) 光TDM信号分離時のチャネルスロット識別技術
- (2) マルチビットレート対応のクロック抽出技術
- (3) 80Gbit/s, 160Gbit/s光信号の光3R信号再生技術

以下に、それぞれの技術開発について目的を含め、現状の開発状況を述べる。

(1) 光TDM信号のチャネルスロット識別

当社の160Gbit/s光送受信装置の特徴である、光TDM信号のチャネル間搬送波位相差（以後、光位相と記す）制御技術を用いて、光TDM信号のチャネルスロット識別技術を開発した。この技術は、図1に示す受信器での時分割分離チャネルを光の状態で（O/E変換することなく）識別する技術であり、高速のネットワークに適用する際のインタフェースに必須の技術である。

光位相は、時分割多重のビットインタリーブ時にEA変調器の駆動温度を変化させ、搬送波位相差を調整することにより制御される。図3には、この技術を用いて生成した種々の光位相状態の光スペクトルと光信号波形を示している。光位相は、第1のチャネル（‘0’ と表記）との位相差によって示されている。光位相状態が変化することで、光スペクトル輝線の波長や間隔が変化することがわかる。たとえば、‘0, 0, π , π ’ の状態（図3- (d)）では、80GHz間隔（0.64nm間隔）で輝線が発生していることがわかる。この事実を発展させ、光位相が ‘0, π , 0, 0’ の状態のとき、40GHz（0.32nm間隔の輝線）の成分が



(a) ‘0, 0, 0, 0’ (b) ‘0, $\pi/2$, 0, $\pi/2$ ’ (c) ‘0, π , 0, π ’ (d) ‘0, 0, π , π ’

図3 各位相状態での光スペクトルと光信号波形

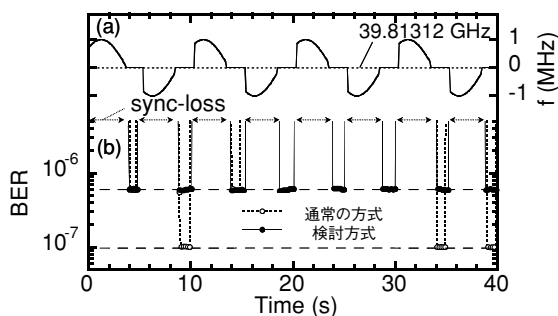


図4 40GHz干渉信号によるスロット抽出

最も大きくなることを見出した。

ここで得られた40GHz成分は、第2のチャンネルの搬送波位相が反転（ π ）しているために生じているので、40GHzクロック信号の中で、第2のチャンネルの時間位置は常に一定となる。すなわち、この40GHzクロック信号を用いれば、すべての光TDM信号のチャンネルスロットを識別できることとなる。図4は、チャンネルスロットを識別できていることを示した実験結果であり、比較対象として通常的方式（光位相が「0, 0, 0, 0」）での結果も示している。図4上段には、VCO（Voltage Controlled Oscillator）の電圧を周期的に変化させた時の周波数変化を示しており、クロック抽出器の引き込み範囲、保持範囲を超える振幅で変化させることにより、部分的にクロックを抽出できる状況を作り出している。すなわち、39.81312GHzで一定となっている状態が、40GHzのクロックを抽出できている状態である。一方で、時分割多重の4つの光信号品質を調整することで、受信時の符号誤り率（BER: Bit Error Rate）測定から、時分割分離チャンネルを識別できるようにした。図4中段は、BERの測定結果を示しており、クロックが抽出できているときにBERが測定されていることがわかる。通常的方式では、場合により分離チャンネルのBERが異なった値となっているのに対し、本方式では、すべての分離チャンネルのBERが 6×10^{-7} と一定になっている。したがって、本方式により、光TDM信号のチャンネルスロットを識別できていることが確認できた。また、この光位相状態での伝送距離、分散耐力等をシミュレーションから評価し、極端に劣化しないことも確認している。

しかし、EA変調器の駆動温度が変わると、光TDM信号のチャンネル間で波高値ばらつきが生じるといった課題がある。これは、EA変調器の光吸収特性に温度依存性があることに起因する。この課題を解決するために、2つの方式から検討を行っている。1つめの方式は、光位相制御時に生じる波高値変動をモニタし、可変の減衰器（VOA: Variable Optical Attenuator）を用いて、ばらつきを補

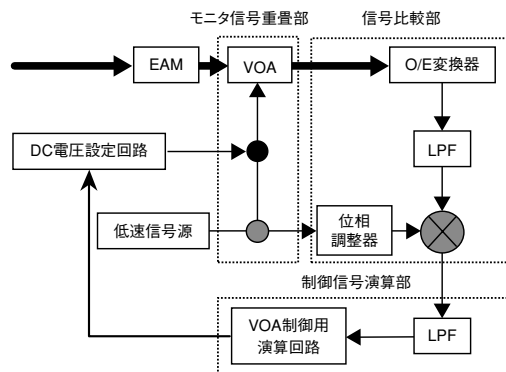


図5 波高値制御の概略図

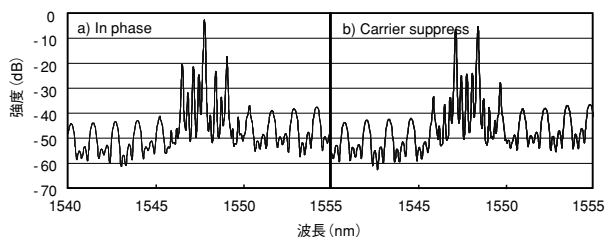


図6 40GHz光短パルス入力による160GHz出力光の光スペクトル

正する方式である。図5は、この方式の回路構成を示している。それぞれのチャンネルに周波数の異なる低周波のトーン信号を重畳し、光TDMチャンネルをこのトーン信号から識別する。これら識別された4つの光強度をVOA演算回路に入力し、波高値が一定となるようにVOA印加電圧を調整するという方式である。現在、実際に装置を試作し、光位相制御器との連携動作について評価中である。2つめの方式は、光TDMモジュールの各光路中に液晶を配置し、交流の印加電圧を変化させることで、光位相を制御する方式である。図6は、実際に4多重のモジュールを試作し、40GHzの光短パルスを用いて、液晶による光位相制御を実施したときの光スペクトルである。(a)は、通常の160GHzパルス列（データ信号としたときの図3-(a)に相当）とした時の光スペクトルであり、(b)は、搬送波抑圧時（図3-(c)に相当）の光スペクトルである。両方のスペクトルとも約20dBのサイドモード抑圧比を実現しており、液晶を用いた光位相制御が良好に実現できていることがわかる。今後、これら2つの方式を比較検討し、光位相制御技術を用いた最適なチャンネルスロット識別技術を確立していく。

(2) マルチビットレート対応のクロック抽出技術

160Gbit/sの光通信を光のADM（Add Drop Multiplex）やXC（Cross Connect）を介した低速（OC-N（N=768, 192, 48, 16 など）のネットワークと

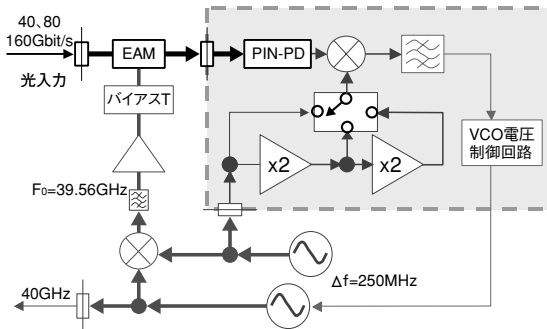


図7 マルチビットレート対応のクロック抽出器、回路構成図

接続するためには、同期のためのクロック生成が重要な役割を担う。そのために、160Gbit/s光受信装置用に開発してきた、クロック抽出技術を発展させて、マルチビットレート対応のクロック抽出器を開発した。

マルチビットレート対応のクロック抽出器の回路構成図を図7に示す。40, 80, および160Gbit/sの光信号をEA変調器の光入力部に入力し、位相差比較に用いる差周波成分 (Δf) と40GHzクロックとをミキシングした電気信号をEA変調器の高周波端子に入力すると、PIN-PD出力は、それぞれ Δf , $2 \times \Delta f$, $4 \times \Delta f$ となる。そこで、位相差比較信号をスイッチで切替え、 Δf , $2 \times \Delta f$, $4 \times \Delta f$ とすることで、上記3種のビットレートの光信号から40GHzの電気クロック信号を抽出することができる。実際に装置を試作し、初期評価として、160Gbit/s光信号と160Gbit/s光信号から生成した80Gbit/s, 40Gbit/s光信号（パルス幅が3ps）の3種のビットレートで独立してクロックが抽出できることを確認した。

試作したマルチビットレート対応のクロック抽出器の性能を従来（160Gbit/s専用）のクロック抽出器との比較から評価した。引込み範囲、保持範囲は、160Gbit/s光信号を入力した場合、それぞれ0.7MHz, 8MHzであり、従来のクロック抽出器の性能（引込み範囲：1.2MHz, 保持範囲：11.5MHz）よりも狭い範囲となった。これは、お互いの周波数成分が、位相差成分に対してノイズとして作用してしまうことなどが原因と考えられる。また、位相ジッタは、逓倍による変動以外のジッタ重畳はみられず、160Gbit/s光信号の1周期のタイムスロットに対して1%以下（0.06ps以下）で、従来と同等であった。今後、引き込み範囲、保持範囲の拡大化を検討するとともに、パルス幅を調整した40Gbit/s や80Gbit/sの光信号入力に対しても評価を進めていく予定である。

(3) 光3R信号再生技術

光信号を高速化すると伝送距離は、速度の2乗に反比例

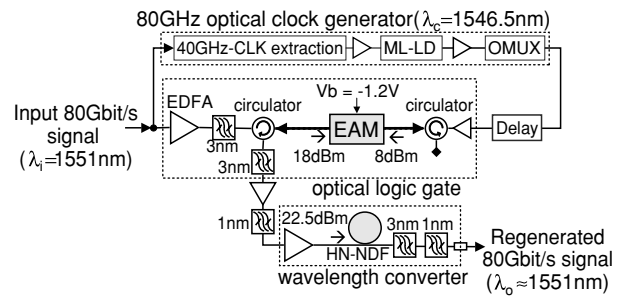


図8 80Gbit/s-光3R再生中継器の回路構成

して短くなる。これまで160Gbit/s 光信号の640kmエラーフリー伝送を実証してきたが、国内に留まらず、基幹伝送網へ160Gbit/s光通信を適用していくためには、更なる伝送距離の長距離化が必要である。また、基本伝送レートを超高速化したWDMシステム（同じ総伝送容量に対して波長チャンネル数を低減）では、光3R信号再生器の台数も少なく済み、経済的な制限は緩和される。そこで、80Gbit/sと160Gbit/sの光3R信号再生技術に取り組んでいる。当初、EA変調器の相互吸収変調（XAM：Cross Absorption Modulation）効果を利用した光3R信号再生技術を検討してきたが、80Gbit/sであっても再生光信号の性能が十分でない、この方式を160Gbit/sの光信号再生に適用しようとしてもEA変調器の動作速度が160Gbit/sに対応しないといった課題があった。これらの課題に対して、現在の取り組み状況を以下に述べる。

図8は、80Gbit/s光3R信号再生器の回路構成図である。ブロックとして、入力の80Gbit/s光信号に同期した80GHz光クロック生成部、EA変調器のXAMによる光論理ゲート部、および正常分散ファイバ（HN-NDF：Highly Non-linear Normal Dispersion Fiber）の自己位相変調（SPM：Self-Phase Modulation）とスペクトルスライスによる波形整形・波長変換部により構成されている。図9は、80Gbit/sの光3R信号再生の過程を光スペクトル

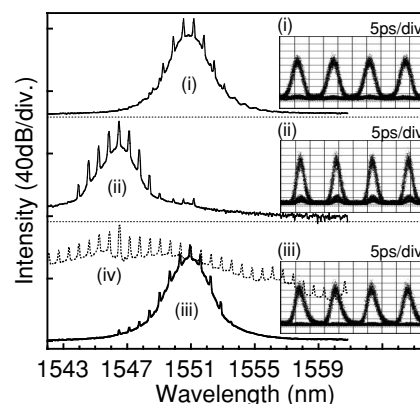


図9 80Gbit/s信号再生過程

と光信号波形から示したものである。まず、信号波長1551nmの80Gbit/s入力信号 (i) と、波長1546.5nmの80GHzクロック信号を、EA変調器内部で衝突させ、EA変調器のXAM論理ゲートにより、波長1546.5nmの再生信号 (ii) に変換する。つぎに、この再生信号を、DFFのSPMによるスペクトル拡散により、スペクトル (iv) のように広げ、光フィルタで、入力信号と同じ波長の光スペクトルを切り出すことで、光3R再生信号 (iii) を出力している。図9の光スペクトルから、波長変換のオフセットを5nm程度としても、良好な波形整形効果が得られていることがわかる。この波形整形効果は、光信号波形との比較から、特にゼロレベル（スペース）の雑音除去に寄与していることが確認できる。

実際に周回伝送実験系を構築し、80Gbit/s光3R信号再生中継による伝送実験を行った。周回伝送実験系は、非ゼロ分散シフトファイバ（NZ-DSF: Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber）80kmが2スパンと、光増幅器、分散補償ファイバ（DCF: Dispersion Compensation Fiber）で構成されている。図10左に、光3R信号再生の有無による、周回ごとの受信感度（BER=10⁻⁹で規定）、右上にBER、右下に11,200km伝送後のアイダイアグラムを示す。光3R信号再生中継を行わない場合、伝送距離800kmで約10dBの受信感度劣化が生じているのに対して、光3R信号再生中継を行うと、伝送距離の増大に伴って受信感度の劣化幅は減少し、伝送距離1,000km以上で、ほぼ一定の受信感度（-22dBm）になるという結果を得た。符号誤り率の測定結果からは、光3R信号再生中継を行わないと800kmですでに顕著なエラーフロアが発生しているが、光3R再生中継伝送では、5,600km伝送後でもエラーフリーになることが確認できる。また、11,200km伝送後のアイダイアグラムにも顕著な波形劣化が見られておらず、80Gbit/sの伝送速度では、世界最高水準の成果を創出している。

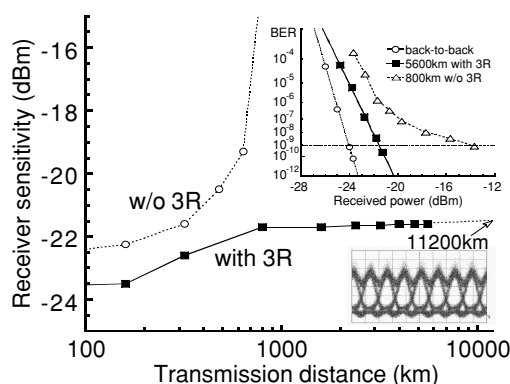


図10 80Gbit/s 全光3R伝送評価結果

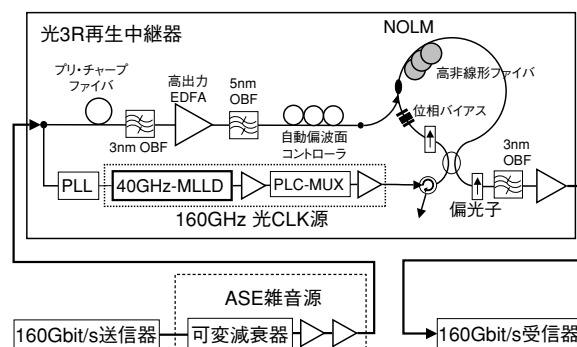


図11 非線形ループミラー（NOLM）を用いた160Gbit/s信号再生実験系

一方、160Gbit/s光3R信号再生については、EA変調器のXAM効果の代わりに、高速応答性能に優れ、160Gbit/s信号再生にも応用が可能であることが知られている、非線形型ループミラー（NOLM）の非線形効果を適用した、ファイバベース光論理ゲートによる光信号再生技術の初期検討を行っている。図11は、160Gbit/s光3R信号再生の実験系である。NOLMでは、光カプラを介して高非線形ファイバがループ状に接続されており、160GHz光クロック信号が左右両回りで伝搬している。160Gbit/s伝送信号は、ループ途中に配置された光カプラを介して右回りで伝搬するように入力され、信号パターンに応じて、同じ方向に伝搬する160GHz光クロックの位相を180°変化させる。このように光位相が変化した光クロックは、光カプラの出力ポートから再生信号として出力されるようになる。図12は、光SNR（Signal-to-Noise Ratio）を劣化させた信号に対して光3R信号再生を適用し、信号品質（Q factor）の変化を評価した結果である。光3R信号再生後、最大で2.5dBのQ factorの改善が得られたことから、論理ゲートとしてNOLMが有効に機能する見通しを得た。今後、NOLMの挿入損失の低減、構成の最適化等により、光3R信号再生の性能をさらに向上できるものと考えられる。

このように、光3R信号再生技術は、クロック再生、波

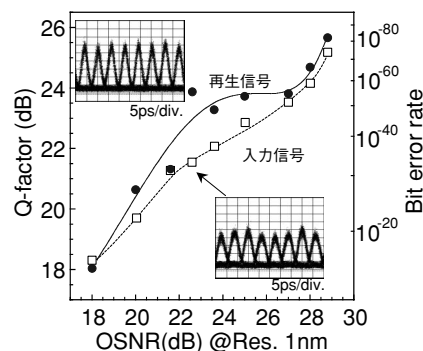


図12 NOLMによる160Gbit/s信号再生性能

形整形、波長変換など、幾つもの高速光信号処理技術が含まれている。これらの要素技術を開発していくことで、光3R信号再生のみならず、光TDM信号を低速のWDM信号へ変換するといった、全光の信号処理技術へ展開していきたいと考えている。

ま と め

世界規模の超高速大容量通信ネットワークを目指した超高速光通信技術は、伝送速度として160Gbit/sが多くの機関で報告され、伝送速度の競争から、実ネットワーク適用のための技術開発へと基軸を移してきている。この実ネットワーク適用のためには、伝送線路の波長分散や偏波分散の補償技術、ビットレートや波長の変換技術など、超高速光信号処理技術が非常に重要となる。本稿では、平成14年に開発した160Gbit/s光送受信装置を用いた、光TDM信号のチャネルスロット識別、マルチビットレート対応のクロック抽出、および光3R信号再生技術について、現在の開発状況を述べた。

これからも多くの機関で、実用化に向けた超高速光信号処理技術が開発され、近い将来、160Gbit/sの超高速光通信が実フィールドに適用されていくものと考えられる。これらの技術が、ユビキタスネットワーク社会の到来に大きく貢献し、生活がより豊かになることを期待したい。

謝 辞

本報告で述べた研究成果の一部は、平成8年度～平成16年度、情報通信研究機構「トータル光通信技術の研究開発」によって行われた。関係者各位に感謝する。◆◆

参考文献

1) 藤井浩三：“大容量ネットワークを支える基幹光通信技術”，沖テクニカルレビュー197号，Vol.171 No.1，pp.76-81，

2004年

- 2) K. Fukuchi *et al.*: “10.92-Tbit/s (273 × 40Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeatered transmission experiment”, OFC2001, PD, 2001
- 3) 賀川他：“40 Gbit/s×4 OTDMモジュールを用いた160 Gbit/s信号のSMF 640 km伝送実験”，2003年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会，B-10-116，2003年9月
- 4) 辻他：“160Gb/sクロック抽出装置の開発”，2003年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会，B-10-115，2003年9月
- 5) H. Murai *et al.*: “Single Channel 160 Gbit/s Carrier-Suppressed RZ Transmission over 640 km with EA Modulator based OTDM Module”, ECOC2003, 2003
- 6) <http://www.oki.com/jp/Home/JIS/New/OKI-News/2004/07/z0403b.html>
- 7) M. Schmidt *et al.*: “8×170 Gbit/s DWDM field transmission experiment over 430 km SSMF using adaptive PMD compensation”, ECOC2004, PD TH4.1.2, 2004
- 8) G. Lehmann *et al.*: “160 Gbit/s OTDM Transmission Field Trial over 550 km of Legacy SSMF”, ECOC2004, We1.5.2, 2004
- 9) T. Miyazaki *et al.*: “Stable 160-Gb/s DPSK transmission using a simple PMD compensator on the field photonic network testbed of JGN II”, OECC'04, PD1-3, 2004
- 10) M. Matsumoto: “Signal-Phase Diffusion by Fiber-Based All-Optical 2R Regenerators”, OFC'05, OWA7, 2005
- 11) P. Devgan *et al.*: “SOA-based regenerative amplification of phase noise degraded DPSK signals”, OFC'05, PDP34, 2005
- 12) L. Möller *et al.*: “Generation of 160 Gb/s carrier-suppressed return-to-zero signals”, ECOC2003, Mo3.6.3, 2003

●筆者紹介

藤井浩三：Kozo Fujii. 研究開発本部 技術探索チーム

TIPS

【基本用語解説】

ゲーティング

時間軸で部分的に光を透過させること。160Gbit/s光信号から、40Gbit/s信号をゲーティングする場合、25ps間隔で6.25psの間だけ透過させている。

ビットインタリーブ

時間軸上で、光パルスの間に光パルスを挿入し、光信号の高速化を図ること。

ECOC

米国のOFCと並ぶ、光関連の世界の2大国際学会。

DPSK

光のON/OFFでデータの1/0を表すのに対し、光位相の0/πでデータの1/0を表すデータ変調方式。

XAM

パルス同士が衝突したときのみ、光が透過するので、論理回路としては、AND回路となる。

Q factor

信号品質を表す指標のひとつで、図12に示されているように、符号誤り率と1対1の関係が成り立つ。