

マルチフォーマット全光信号再生技術

賀川 昌俊 村井 仁

インターネットを流通する情報量は、1年当たり40%程度ずつ増え続けており、国内でもすでに2011年5月には、月単位の平均値で3.7Tb/sに達している¹⁾。また、スマートフォンが爆発的に普及し始めている現状を考慮すると、光ネットワークを流通する情報量の増加傾向もこれまで以上に高まってくると予想される。

こういった背景から、光ネットワークに用いる伝送装置の高速化、省電力化の要求が強くなっている。光信号は搬送波の周波数が極めて高いため、これまでは2値の信号を電界強度の有無に割り当てる単純なOOK(On-Off-Keying)を用いることで十分な高速化を図ることができた。しかし、信号生成を行う電気回路が速度限界に達してきている状況で上記要求に応えるため、現在はQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)等の多値変調やデジタルコヒーレント技術を用いることで100Gb/s級伝送システムが実用化されつつある。ところが、一般に100Gb/sを超える光ファイバ伝送では、1ビット当たりの電力が減少するため、雑音による信号劣化が激しくなる。加えて、分散、偏波モード分散(PMD; Polarization Mode Dispersion)等の光ファイバ固有の劣化要因の影響で信号が著しく劣化し、信号を受信することが困難になる。

このため、伝送距離が数千kmに及ぶ大規模光ネットワークでは、光信号劣化を取り除くため3R中継が必要になる。3Rとは中継器における3つの再生機能(増幅:Re-amplification、波形整形:Re-shaping、ビット間隔調整:Re-timing)を意味する。3Rを行うためには、光信号-電気信号変換、信号処理、電気信号-光信号変換を行う必要があるが、前述したように、電気回路にはその処理能力に速度的な限界があり、100Gb/sを超える領域での再生処理は難しい。

これに対して、もし、電気的な処理を介さない3R(光3R)を実現できれば、この課題を解決することが容易になるという観点から光処理技術による3R再生が注目されている。光ファイバ等の非線形効果を用いた光処理技術は、640Gb/sに及ぶスイッチング動作も可能であることが示されており、同様な技術を用いる光信号処理を、超高速光3Rへ応用することが期待できる。また、光3R再生では

電力損失を伴うO-E-O変換を行わないので、省電力化の観点からも有効であると考えられる。一方、将来の光ネットワークでは、サービスの多様化とともに、流通する光信号も多用化が進むことが予想され、異なる変調方式・伝送速度に柔軟に対応する光3R技術の実現が望まれる。

本稿では、100Gbit/sを超える超高速処理能力と、異なる変調方式に対応する柔軟性を併せ持つ、光信号処理による3R再生の実現を目指した取り組みについて紹介する。

光処理による超高速光信号再生の要素技術

図1にOOK及び(B)PSK((Binary) Phase Shift Keying)の両方式に適用可能な光3R再生器を実現する機能とその構成を示した。本構成では光クロック再生部と光論理ゲートによるOOK-光3R構成を基本とし、フロントエンドにPSK/OOK方式変換(復調)機能を実装することによりPSK信号再生への機能拡張を可能にする²⁾。なお、本研究では、再生動作を安定に保つために適応PMD補償³⁾や光信号モニタ⁴⁾等の技術開発も行っているが、ここでは以下のコア技術に絞って、その概要を紹介する。

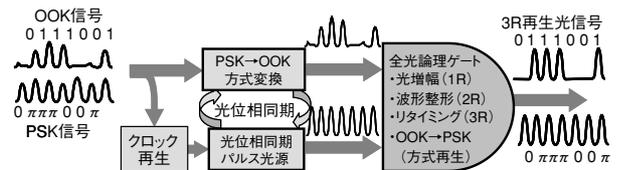


図1 マルチフォーマット全光3R再生器の構成

- ①強力な信号再生効果とOOK/PSK変換機能(方式再生機能)を有する100Gb/s超、光論理ゲート技術
- ②PSK/OOK変換を実現する光PLL(Phase-locked-loop)技術(コヒーレントホモダイン復調技術)

100Gb/s超、光論理ゲート技術

図2は、高速性に優れた光ファイバの非線形効果を用いた光論理ゲートの構成図であり、自己位相変調(SPM:

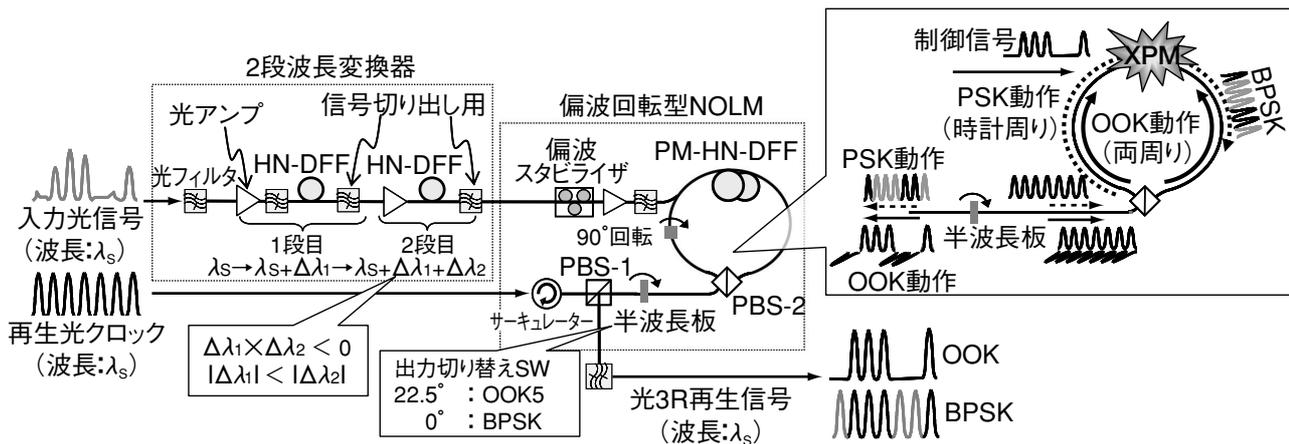


図2 自己位相変調を利用した波長変換器と非線形光ループミラーを適用したタイミング再生/方式再生器

Self-phase-modulation)を利用した波長変換器⁵⁾と非線形光ループミラー(NOLM: Nonlinear Optical Loop Mirror)を用いたタイミング再生/方式再生器⁶⁾のハイブリッド構成となっている。前段の波長変換器は、入力OOK光信号(BPSKの場合は復調信号に相当)に所望の波長シフト(8~9nm)を与える。続くタイミング再生/方式再生器では、波長変換信号を制御信号として、入力光信号と同じ中心波長を有する再生光クロックに全光学的なOOK変調、もしくは(B)PSK変調を施し、再生信号として出力する。

波長変換器の動作について説明する。光ファイバへ強い光信号を入力すると、光ファイバの材料である石英の屈折率が変化し、自己位相変調といわれる非線形現象が生じる。この自己位相変調により、光信号には新たな周波数成分が生じる。この周波数軸上で広がった信号を元の搬送波とは異なる周波数を中心として切り取ることで、信号の中心周波数を変換することができる(よく知られているように周波数と波長は媒体中の光速 c/n (n は屈折率)を定数として反比例の関係にあるため、周波数を変換することは波長を変換することと同義であり、以後は波長変換という語を用いる)。また、特に周波数変化が線形に近い領域を切り出すと、良好な波形整形効果が得られることが知られている。本波長変換器は高い非線形を利用するため、ファイバには特別に設計された高非線形平坦分散ファイバ(HN-DFF: Highly Non-linear Dispersion Flattened Fiber)が用いられている。また、ここでは変換効率を考慮し、2段構成の波長変換器となっている⁷⁾。

後段のタイミング再生/方式再生器には、二つの偏波面分離器(PBS: Polarization Beam Splitter)と、偏波保持系高非線形平坦分散ファイバ(PM-HN-DFF:

Polarization Maintaining Highly Nonlinear Dispersion Flattened Fiber)、および半波長板から構成されており、1つの偏波分離器(PBS-2)を入出力として環状に接続されたループ内にPM-HN-DFFを配置する非線形光ループミラーを用いることを特徴としている。ループに入射する信号光の偏光面は半波長板を通過する時に回転し、その角度は半波長板の光軸の角度に依存する。半波長板の光軸は容易に回転させることができるため、この光クロックの偏光面の回転角の違いを利用して、全光学的なPSK変調、OOK変調の切り替えが可能となっている⁶⁾。

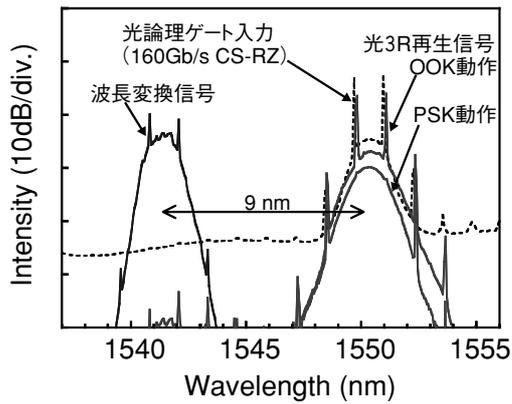
OOK動作の場合、再生光クロックがファイバループ内を時計回り、及び反時計回りに伝搬するように、半波長板の光学軸を調整する(ループ中には偏波面が90°回転する箇所を設け、両伝播成分の光路長は常に等しくなっている)。PSK動作の場合には、半波長板の光軸を光クロック偏波面に合致させ、時計周り方向だけに伝搬させる。

非線形光ループミラーには制御信号として、波長変換されたOOK信号が時計回りに入力される。制御信号パルスは比較的強度が強いため、制御信号パルスがある場合にはファイバの屈折率が変化し、相互位相変調と呼ばれる非線形現象が生じる。この結果、入力された右回りの光クロックには位相変調が付与される。これに対して、制御信号パルスがない場合には、位相変調は付与されない。

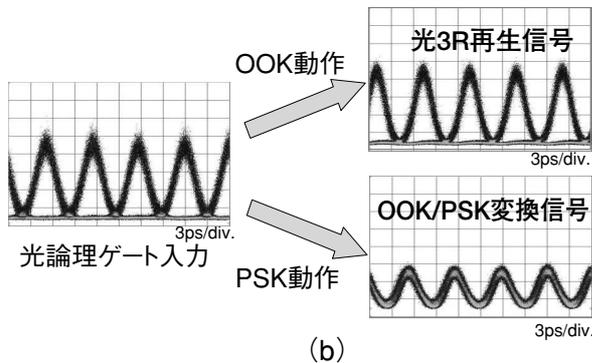
OOK動作の場合、二つの方向で伝播してきた光クロックがループ出力で偏波合成されることで偏波変調信号となる。この信号はPBS-1で偏波分離されるため、一方の偏波成分だけを取り出すことができ、OOK光3R信号が得られる。また、PSK動作の場合は、相互位相変調によるBPSK信号がそのまま出力される。以上のように、波長変換器とタイミング再生/方式再生器を組み合わせるこ

とで、光3R機能を得ることができる。

図3は、図2の光論理ゲートに、雑音を付与した160Gb/s CS-RZ(Carrier-suppressed Return-to-zero)信号を入力したときの、OOK-光3R再生(OOK動作)、及びOOK-PSK変換(PSK動作)の一例であり、所望の動作が得られていることがわかる。また、ビットエラー率(BER:Bit-error-rate)測定から信号の品質を示すQ値を算出した結果、OOK動作で約7dB、PSK動作では3dB以上の改善効果が得られており、良好な再生動作が実現できている。



(a)



(b)

図3 160Gb/sにおける光論理ゲート動作
(a) 光信号スペクトル、(b) 光信号波形

OOK信号に対する光3R再生については、JGNII(Japan Gigabit Network II)光テストベッドを利用した実証実験により実フィールド環境での有効性を検証している⁷⁾。図4は、381km伝送後(63.5km×6スパン)の160Gb/s信号に適用した光3R再生の性能検証結果である。光信号再生により伝送前と遜色ないレベルまで信号品質が回復しているため、光3R再生中継を多段で行うことで、100Gb/s超における超長距離伝送が可能であると考えられることができる。

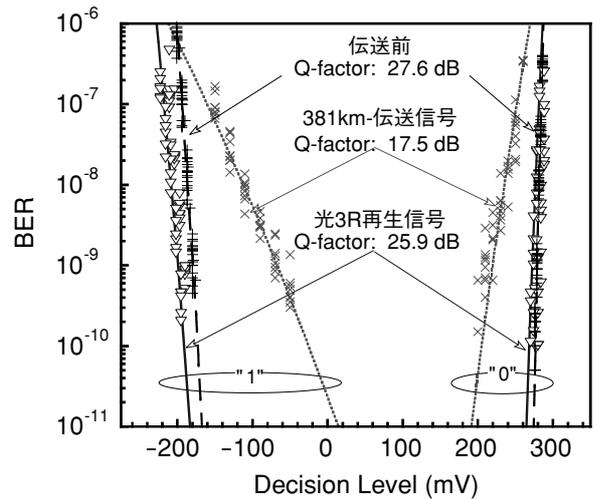
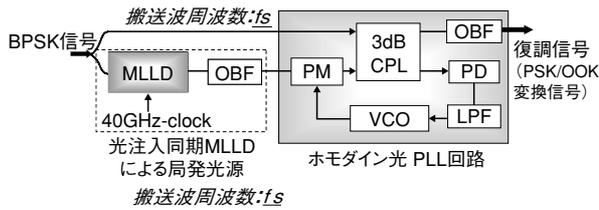


図4 JGNII光テストベッドを用いた
160Gb/s-OOK光3R再生の実証実験結果

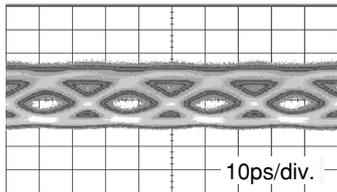
光PLL方式によるBPSK/OOK変換

BPSK変調信号に対する光3R再生を実現するためには、まえがきで述べたように、BPSK信号の位相情報を直接光強度情報に変換する方式変換、すなわち光領域での復調技術が必須となる。ここでは、図5に示す光PLL回路を用いたコヒーレントホモダイン方式による復調技術について述べる。光PLLによるコヒーレントホモダイン復調では、BPSK光信号の有する位相雑音(搬送波位相の飛び)や搬送波周波数の変動を、負帰還制御により精度良く追尾する局発光を発生し、これと信号光を干渉させることにより復調処理を行う。

一般に、局発光発生には信号光源と独立した光源を用いるため、両者の位相雑音には相関がない。このため、位相雑音の小さい狭スペクトル線幅(<100kHz)の局発光源を用いたとしても負帰還制御への負担が大きく、特に位相変位となって現れる両光源の搬送波周波数のずれ(周波数離調)が、位同期動作の安定性を阻害する大きな要因となる。図5に示した光PLL回路では、これを回避するため、光注入同期型のMLLD(Mode-locked Laser-diode)⁸⁾を局発光源に採用した。光注入同期MLLDは、外部より入力した光信号と同一の搬送波周波数を有する光信号を出力する特性があり、これを利用することで、周波数離調の問題が解消し、復調処理の安定性が各段に向上した⁹⁾。本方式による40Gb/s NRZ-BPSK信号の復調実験では、安定なエラーフリー復調動作が確認されている。ただし、MLLDで光注入同期を安定動作させるためには、BPSK信号の変調度を90%以下にして、搬送波成分を確保する必要があり、変調度100%での安定な



(a)



(b)

図5 (a) 光注入同期MLLDを局発光源に用いたホモダイナ光PLL回路
(b) 40-Gb/s NRZ-BPSK信号の復調波形

復調動作の実現は今後の課題となっている。また、目標とする100Gb/s超での復調動作は光PLL回路のループ遅延時間を極小化することで確認している。

まとめ

光処理技術は電気処理が介在しないため、超高速・省電力な処理動作が可能な技術として長く有望視されてきた。しかし、多種・多様なサービスが展開される将来の光ネットワーク実現に向け、光処理技術が十分に貢献するためには、多様な光信号への適用を可能にする汎用化技術の開発が必要であろう。本稿では、その一環として取り組んでいる、OOK、BPSK両変調方式に適用可能な100Gb/s超、光3R再生技術の開発について紹介した。

本研究の一部は、情報通信研究機構からの委託研究「ユーザーリテリ技術の研究開発」の成果である。関係者各位に感謝する。◆◆

参考文献

- 1) 総務省(2011年9月), 我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算, 2011年5月時点の集計結果の公表
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_01000026.html(2012年2月14日)
- 2) H. Murai *et al.*: "Regenerative SPM-based Wavelength Conversion and Field Demonstration of 160-Gb/s All-optical 3R Operation," IEEE J. Lightw. Technol., vol.28, no.6, 2010
- 3) Y. Kanda *et al.*: "Highly Stable 160-Gb/s Field Transmission Employing Adaptive PMD Compensator with Ultra High Time-Resolution Variable DGD Generator,"

ECOC '08, We.3.E.6.

4) M. Kagawa *et al.*: "Waveform Distortion Monitor for 160 Gbit/s Signal by Prescaled-Clock Measurement Using EA Modulator," OFC/NFOFC '08, paper OThW7.

5) P. V. Mamyshev: "All-optical data regeneration based on self-phase-modulation effect", ECOC '98, vol.1, 1998

6) S. Arahira *et al.*: "All-Optical Modulation-Format Converter Employing Polarization-Rotation-Type Nonlinear Optical Fiber Loop Mirror," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.20, no.18, 2008

7) M. Matsumoto: "A Fiber-Based All-Optical 3R Regenerator for DPSK Signals," Photon. Technol. Lett., vol.19, 2007

8) S. Arahira *et al.*: "Chirp control and broadband wavelength-tuning of 40-GHz monolithic actively mode-locked laser diode module with an external CW light injection," IEEE J. Sel. Topics. Quantum Electron., vol.11, no.5, 2005

9) OKIプレスリリース2010(2010年8月), 世界初, 毎秒40ギガビットの光位相同期型コヒーレント光通信技術を開発
<http://www.oki.com/jp/press/2010/08/z10055.html>(2012年2月14日)

● 筆者紹介

賀川昌俊: Masatoshi Kagawa. 研究開発センタ 機器技術研究開発部

村井仁: Hitoshi Murai. 研究開発センタ 機器技術研究開発部

TiPO 【基本用語解説】

光3R

ネットワークノードにおける3つの再生機能(増幅:Re-amplification、波形整形:Re-shaping、ビット間隔調整:Retiming)を光信号処理によって行う技術。

自己位相変調

光ファイバに強い光が入力されたときにみられる非線形現象の一つで、ファイバ中の石英の屈折率が変化することで、伝播する光の位相が変化する。

相互位相変調

二波長以上の光の入力により、一方の光によって起こされた屈折率変化が、他方の位相変化に与える影響。

分散

光信号の波長による屈折率の違いにより生じる速度差で、伝播するファイバの長さによっては光信号のチャンネル内というわずかな帯域でも影響が生じる。

MLLD (Mode Locked Laser Diode)

半導体レーザの一つで変調器領域を有し、入力される電気信号、または光信号に同期したパルスを出力する。