1. はじめに

各家庭及びオフィスへの光ファイバ接続が世界に先駆けて進みつつあり、延び続けるトラフィック需要を効率的に収容する光伝送技術の実現が要請される。その技術候補として1波長あたりのビットレートが160Gb/sの超高速光通信方式¹⁻³⁾は、現在商用化されている10Gb/s 或いは導入目前の40Gb/s 波長多重(WDM)システムに比べ、少ない波長数でトラフィックの収容が可能となるためネットワーク運用管理の大幅な簡便化が将来期待できる。100Gb/sを超えるビットレートにおいては電気信号処理のスピード限界のため、短光パルス光源を用いた光時分割多重分離(OTDM)技術は、超高速160Gb/s 光信号と40Gb/s 或いは10Gb/s 低速電気信号とのインターフェイスを提供する意義がある。しかし160Gb/s 伝送の実現には、安定な光パルス信号の生成、伝送路で被る分散及び偏波分散に対する対処、受信系の簡便化などの挑戦すべき多くの技術課題が依然残されている。本稿では160Gb/s 伝送方式についてのこれらの課題に関する最近の内外の研究成果の紹介と技術動向を概説する。

2. 160Gb/s 伝送サブシステム

図1に160Gb/s OTDM 光伝送システムの概念図を多重前のビットレートが40Gb/s の場合について示す。送信側(図1(a))はパルス光源及び時分割多重部から構成され、受信側(図1(b))は分散及び偏波分散に対する波形歪み補償部、クロック抽出部、時分割分離部(DEMUX)、受光器(DET 1~4)から構成される。

2.1 160Gb/s 送信部

パルス光源には分散耐力の点から適度に短いパルス幅、さらに低ジッタ性、高消光比(コントラスト)が要求され、160Gb/s に用いるためのパルス幅の目安はビットスロット(パルス間隔)の1/3(約2 ps)以下となる¹⁾。その他に波長可変性能さらに長期信頼性が要求される。パルス光源としては優れた性能を持ち且つ小型のモード同期レーザ(MLLD)が開発されている⁴⁾。また連続光源と電界吸収型変調器(EAM) 或いはLDの直接変調のゲインスイッチ動作で得られるための光パルスを高非線形光ファイバ(HNLF)を用いてパルス圧縮することにより上記要求条件を十分に満足するパルス光源を構成できることが報告されている⁵⁾。パルス光源の長波長側への波長可変範囲の拡張する手段としてPhotonic Crystal Fiber(PCF)を用いたRaman-Soliton Self-Frequency Shift効果により、10GHz 繰り返し光パルスの1550nm~1680nmまでの連続波長可変動作が報告されている⁶⁾。光時分割多重部においては多重される元光信号(トリビュタリチャネル)を光パルスが重ならぬように一定のパルス間隔となるように多重する。4個の電界吸収型光変調器(EAM)とバルク光学系を用いた40Gb/s、4チャンネル多重用OTDMモジュールにより160Gb/s、OTDM光信号を生成し、EAMの温度設定により多重される光パルスの相対位相を調整して対分散特性に優れた搬送波抑圧方式(CS-RZ)型に160Gb/s 光信号スペクトルを整形して送信できることが報告されている⁷⁾。また小型化の観点から多重部にPPLN(擬似位相整合LiNbO₃)導波路を用いて40Gb/s、4チャンネル光

図1 160Gb/s OTDM 光伝送システムの概念図

信号を一括多重する方式も報告されている⁷⁾。実験の簡略化のため1つの変調器により生成された単一のベースレート光信号のコピーを多段遅延合成光回路により時分割多重して160Gb/s 光信号を模擬的に生成する方式も多用されている¹⁾¹⁷⁾。

2.2 波形歪み補償

超高速光伝送システムでは占有帯域幅が広がるため分散、偏波分散さらに非線形性による波形歪みがより深刻となり、敷設光ファイバでは温度変動などによりパルス波形歪み特性が変動する。従って如何に所望の信号品質(符号誤り率(BER: Bit Error Rate))を維持するかが実現にあたっての主要技術課題となる。分散に関しては累積分散を±1 ps程度の精度で調整する必要がある¹⁻³⁾、分散変動を他の劣化要因(偏波分散及び非線形)と切り分けて高精度に検出して可変分散デバイスを制御する適応分散制御機構に関する研究が行われている。特に超高速システムでは電気信号処理が困難であるため、非線形受光素子を用いた非同期チャープモニタなどの光信号処理による分散変動検出方法が提案されている⁸⁾。また信号品質モニタ法として低速電気信号処理が可能なAM 或いはFM トーン検出法も適用可能であると考えられる。160Gb/s 用可変分散デバイスとしては信号帯域幅(約3nm)において群遅延リップルが少なく大きな分散可変量が低損失で得られることが要求される。中心波長の分散に加え信号帯域内の分散スロープも制御する必要があり、光ファイバグレーティングを用いて印加する温度分布設定により160Gb/s 帯域内の分散スロープの補償が可能な可変分散スロープ補償器が開発されている⁹⁾。偏波分散(PMD)は図2に示すように光ファイバ伝送路の復屈折により光パルスの進み方が偏波によって時間差が出ることに起因する。要求される時間差の値(DGD: Differential Group Delay)はビットスロットの1/10以下であるため、160Gb/s 伝送においては0.625ps以下と極めて厳しい。PMDは波長ごとに異なる経時変動を呈しパースト的な符号誤りを引き起こすため、最も深刻な信号品質劣化及び変動

要因である。受信側に簡便なPMD補償制御器を適用した敷設光ファイバ上での160Gb/s単一波長伝送実験が報告されている¹⁰⁾。DGDには波長依存性があるため、160Gb/sのWDM伝送を行う場合は現状では光学的PMD補償制御を波長ごとに行う必要があり小型低コスト化が課題となる。PMDの対処方針としてCS-RZ-DPSKなどの帯域効率に優れた変調方式やバースト耐力のある誤り訂正との組み合わせも技術候補として考慮すべきであろう¹¹⁾。伝送路途中において160Gb/s光信号を光電変換せずに波形歪み及び雑音を解消し再生中継することが可能な光3R (Reamplifying, Retiming, Reshaping) 中継器に関する研究も行われている¹²⁾。クロック抽出技術(2.3節)とDEMUX技術(2.4節)における光制御光スイッチを用いて全光学的光識別再生動作が可能となる。

2.3 クロック抽出

クロック抽出は受信系においてはDEMUX(パルス分離)を行うために必須であり、図3に示すように160Gb/sから到来光パルスに同期したベースレート分周成分のクロック(40GHz或いは10GHzなど)を抽出する方法として注入同期などによる全光学的手法(図3(a))と光スイッチと電気PLL(Phase-locked Loop)を組み合わせた光電気ハイブリッドPLL方式(図3(b))がある。前者のMLLDへの注入同期による分周成分クロック抽出においては、ランダムデータ光パルスの注入に起因する同期位相スリップを防ぐため初段MLLDでビット同期光クロックを生成させ次段MLLDにて分周光クロックを生成させる2段構成が提案されており¹³⁾、最近報告されている160Gb/sから160GHz光クロックを生成可能なMLLDを初段MLLDに適用することで実現できるであろう¹⁴⁾。注入同期によるクロック抽出は小型構成であるが入力光パルスの偏波変動により動作が不安定となるため、160Gb/s光ファイバ伝送よりはノード或いは装置内における集積光信号処理回路への適用が期待できる。160Gb/sフィールド伝送実験に於けるクロック抽出法として採用実績があるのは後者のハイブリッドPLL方式であり、電界吸収型変調器(EAM)を160Gb/s光信号と低速ゲートRF信号との位相比較器として用いゲートRF信号周波数で動作するVCO(Voltage Controlled Oscillator)にPLL制御する構成となっている^{2, 10)}。

2.4 DEMUX

超高速DEMUX用デバイスとしては制御光パルス(ポンプ光パルス)によりゲートされる様々な光制御光スイッチがFESTAプロジェクトにより開発されている¹⁵⁾。半導体光アンプ(SOA)を石英導波路基板上に並列集積し外部制御光パルスを導入して四波混合(FWM)による160Gb/s光信号の20Gb/s、4チャンネルへのシリアルパラレル変換が報告されている⁷⁾。160Gb/sを超えるビットレートではSOAを用いた対称マハゼンダ光スイッチ(SMZ)が336Gb/sにおいて¹⁶⁾、高非線形光ファイバを用いた非線形ループミラー(NOLM)光スイッチが640Gb/sにおいてDEMUX動作しており¹⁷⁾、今後より少ないスイッチングエネルギーで安定に動作する光制御光スイッチの開発が期待される。2段のEAMを抽出したRFクロック信号により駆動する方式は簡便に1つのトリビュタリチャネルを選択することができる²⁻³⁾。

図2 偏波分散(PMD)によるパルス波形歪み

図3 クロック抽出

3. まとめ

160Gb/s光伝送は依然先端的研究テーマであるが、今後はサブシステムごとの集積化により送受信系及び光3Rなどの信号処理系の小型低消費電力化が期待できる。また敷設光ファイバテストベッド¹⁸⁾を用いたフィールド伝送実験により実環境下でのサブシステム要素技術の完成度を評価することにより研究開発を加速させることも期待できる。

参考文献

- 1) R.Ludwig, et al., OFC'02, TuA1, pp.1-2, (2002)
- 2) H. Murai, et al., ECOC'03, Mo3.6.4, (2003)
- 3) M.Daikoku, et al., Photon. Technol. Lett., pp.1165-1167, (2003)
- 4) Y.Hashimoto, et al., OFC'02, WV5, pp.342-343 (2002)
- 5) K.Taira, et al., Photon. Technol. Lett., pp.1288-1290, (2003)
- 6) K.S.Abedin, et al., Photon. Technol. Lett., pp.1119-1121, (2004)
- 7) T. Ohara, et al., Photon. Technol. Lett., pp.650-652, (2004)
- 8) T. Inui, et al., ECOC'03, Tu3.6.3, (2003)
- 9) S. Matsumoto, Photon. Technol. Lett., pp.1095-1097, (2004)
- 10) T. Miyazaki, OECC'04, PD1-3, (2004)
- 11) A. Hirano, et al., Electron.Lett., pp.957- 958, (2004)
- 12) S.Watanabe, et al., ECOC'04, Tu4.1.2, pp.62-65,(2004)
- 13) H.Yokoyama, et al., Electron.Lett., pp.1577- 1578, (2000)
- 14) S. Arahira, et al, Photon. Technol. Lett., 1558-1560 (2004)
- 15) H.Ishikawa, et al, ECOC'03, We.1.5.1, (2003)
- 16) S.Nakamura, et al, OFC'02,FD3, (2002)
- 17) M.Nakazawa, et al, Electron.Lett., pp,2027- 2029, (2000)
- 18) <http://www.jgn.nict.go.jp/>