

佐藤升一* 石田和行**
 新宅宏彰*
 小口和海**

100Gbps長距離伝送技術

100Gbps Long Distance Transmission Technology

Shoichi Sato, Hiroaki Shintaku, Kazuumi Koguchi, Kazuyuki Ishida

要旨

携帯型通信端末の普及に伴い、モバイルバックホールを中心に通信需要が急増し、100GbE(100ギガビットイーサネット)信号を収容可能なルータなどの導入が本格化している。その背景の中、基幹系メトロネットワークや海底ケーブルネットワークの波長多重伝送装置(Wavelength Division Multiplexing: WDM)では、ラインレート100Gbps超の長距離伝送技術が注目されている。

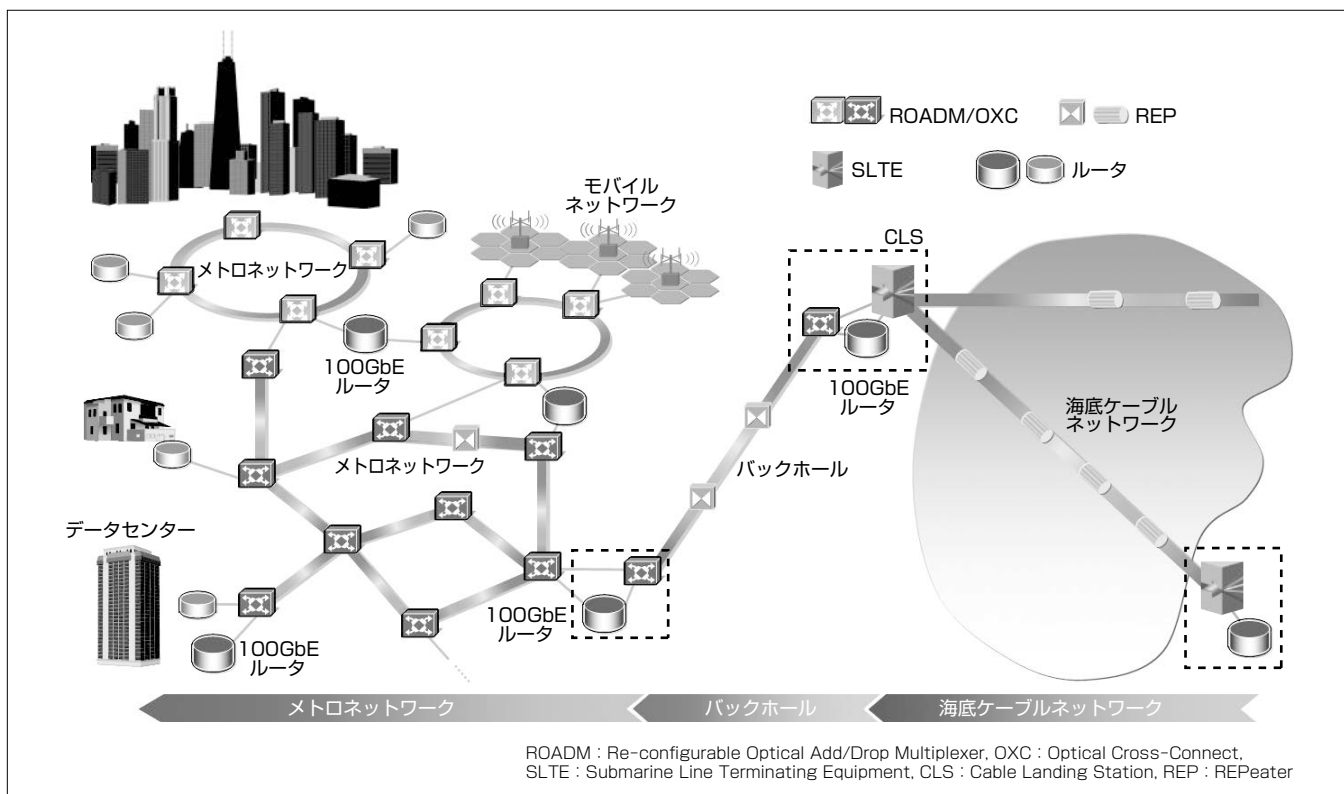
100Gbpsの長距離伝送実現には、電子回路の高速化技術やデバイス技術だけでなく、受信感度向上技術、伝送媒体である光ファイバ中で発生する非線形光学効果に代表される伝送性能劣化要因を補償・回避する新たな技術が必要である。従来の10Gbps/40Gbps伝送に比べ、達成すべき技術的課題の難易度は飛躍的に上がっている。

これらの課題に対し、コヒーレント技術、高利得誤り訂正技術、伝送設計技術を組み合わせることで克服し、100Gbps長距離伝送を実現した。

コヒーレント技術では、新たな検波方式と、強力な波形等化機能を持つ超高速LSI(Large Scale Integration)の採用によって受信感度向上、伝送性能劣化要因の補償を実現した。高利得誤り訂正技術では、デジタルコヒーレント方式と親和性の高い軟判定誤り訂正符号と硬判定符号を組み合わせた3重連接符号を適用し、従来の誤り訂正技術に比べ受信感度を約2dB向上させた。伝送設計技術では、実回線を高精度に模擬できる計算機シミュレーション手法や、伝送評価技術によって、長距離伝送するための伝送条件をチューニングすることで伝送性能劣化要因を事前に回避できるようにした。

これらの技術を適用し、海底ケーブル/メトロネットワーク向け100Gbps WDM光通信装置を開発した。

今後高速大容量伝送技術を継続強化し、より柔軟かつ省電力なネットワーク構築に貢献していく。



WDMシステム

1本の光ファイバに複数の異なる波長の光信号を多重して伝送する方式である。1本のファイバを複数の波長で共有するため、大容量通信を低コストで実現することができる。また、通信需要に応じて波長数を増減することもできる。

1. ま え が き

メトロネットワークや海底ケーブルネットワークの波長多重伝送(WDM)装置は、近年の急激な通信需要の増加に対応するため、1波長あたりの伝送速度の高速化要求が高まっている。これらの要求にこたえるために、10Gbps、40Gbpsの伝送速度を更に高速化し、100Gbps以上とする高速化技術と長距離伝送技術の実用化が不可欠である。100Gbps化では、電子回路や光電子デバイスの高速化だけでなく、高速化に伴って厳しくなる光信号/雑音比(Optical Signal to Noise Ratio : OSNR)耐性の強化、伝送路ファイバ中の波形歪(ひず)みの補償技術等が必要となる。これに対し、コヒーレント変復調技術、誤り訂正技術及び伝送設計技術の改良によって、これらの課題に取り組み、海底ケーブル向け/メトロネットワーク向け100Gbps WDM光通信装置を開発した。

2. 長距離伝送技術

有線光通信システムの信号光は、光送信器から高いOSNRで送信され、中継する光増幅器で光雑音が足し合わされることで徐々に劣化しながら、最終的に光受信器で受信される。受信したOSNRが低いほど正しく信号再生できず、誤り率が大きくなる。長距離伝送するには、このOSNRと伝送路ファイバ中で発生する信号劣化要因の劣化量を適切に管理することが重要となる。OSNRは光レベルダイヤ設計と光増幅器の接続段数や、光利得によって決定される。100Gbps長距離伝送システムでは、従来の10Gbps/40Gbps伝送に比べ、伝送速度に応じた高いOSNRが必要となる。しかし、10Gbps用に整備されたネットワークでは光増幅器の種類や数は決まっており、OSNRの改善は困難である。そのため、OSNR耐性の強化や伝送路ファイバ中で発生する信号劣化量を低減させる技術も必須であり、コヒーレント技術、高利得誤り訂正技術及び伝送設計技術が重要となる。

2.1 コヒーレント技術

コヒーレント光通信方式は、光通信用送受信器に超高速デジタル信号処理技術を導入することで、光ファイバ伝送性能を飛躍的に向上させる技術である。コヒーレント方式の基本をなすコヒーレント受信方式は、従来の直接検波方式と比較して高い受信感度の実現が可能であることから、光ファイバ増幅器がなかった1980年代に盛んに研究されていた。特に、近年、超高速LSIによって実装可能となったデジタル信号処理を取り入れることによって、これから述べるようなメリットが得られることから注目され、デジタルコヒーレント伝送方式として実用化されることとなった。

2.1.1 受信感度の改善

従来、コヒーレント検波方式は直接検波方式に比べて高

い受信感度が得られることは知られていた。しかし、その実現には局部発振光を受信信号光の位相・偏波変動に追従させるための光位相同期ループや偏波制御が必要であり、この実用化が容易ではなかった。デジタルコヒーレント方式では、位相/偏波ダイバーシチ・ホモダイン受信器出力を高速A/D(Analog to Digital)コンバータによってデジタルデータに変換し、デジタル信号処理によって信号光のキャリア位相推定及び偏波分離を行う。このため、局部発振光は信号光の位相・偏波を追従する必要がなくなり、システムとしては光位相同期ループや偏波制御器が不要となるなど、システムの安定度が格段に向上した。これによって高感度受信が可能なコヒーレント検波方式を安定して運用することが可能となり、従来の直接検波方式に比べて3 dB低いOSNRでも同一の信号品質を得ることができる。

2.1.2 強力な波形等化機能

超高速デジタル信号処理技術によって、従来では受信器内では困難であった強力な波形等化機能を実現する。この波形等化機能によって、伝送速度100Gbps化によって顕著となる波長分散、偏波モード分散による波形歪みが原因で生じる伝送距離制限を飛躍的に緩和することができる。また、すべての波長分散補償を送受信器内で行えるため、従来のシステムでは必要であった分散補償ファイバ及びそのファイバ損失を補う光増幅器を削減することができる。

2.1.3 周波数利用効率の向上

光学的アナログ処理では安定動作が困難であった偏波多重分離を実現できることから、従来の波長多重システムの周波数利用効率を2倍に向上させることができ、大容量化が可能となる。また、超高速のA/Dコンバータを用いるため、多値信号変復調技術との親和性が高く、周波数利用効率の向上にも資する。

これらのメリットのあるデジタルコヒーレント方式ではあるが、実用化に際しては長距離伝送向け回線設計技術の併用が重要となっている。

デジタルコヒーレント方式では、受信器内で電子回路による波長分散補償が可能であるが、光ファイバの非線形性による信号劣化の補償は困難である。そのため、光ファイバの非線形効果を抑圧するための信号レベル設計や分散マップの最適化は、依然として重要な技術課題である。また、コヒーレント技術を用いることで4値位相変調といった多値信号が扱えるため、1波長当たりの伝送容量を拡大することが可能であるが、多値変調方式自体は従来の強度変調方式に比べて高いOSNRが要求される。これらの課題を、2.2節の高利得誤り訂正技術、2.3節の伝送設計技術によって克服した。

2.2 高利得誤り訂正技術

軟判定誤り訂正方式は、受信信号を複数のしきい値で識別し、より確からしい1(又は0)か、不確かな1(又は0)

かを表す尤度(ゆうど)情報を得ることによって、硬判定誤り訂正方式よりも誤り訂正性能を高めることが可能な方式である。コヒーレント方式では、受信側でのデジタル信号処理の際にA/Dコンバータが必須であることから、誤り訂正で軟判定方式を採用することが容易である。三菱電機は、硬判定接続符号(Enhanced Forward Error Correction: EFEC)に、軟判定符号の一種である低密度パリティ検査(Low Density Parity Check: LDPC)符号を更に接続させた三重接続符号を提案している⁽¹⁾。また、LDPC符号のアルゴリズムについては、最先端の微細加工技術を駆使したLSIへの実装に適したものとなるように改善し、訂正性能と回路規模の最適化を図っている。表1に三重接続符号の主要諸元を示す。

三重接続符号に関する100Gbpsでの誤り訂正性能のシミュレーション結果と実機測定結果を図1に示す。誤り訂正後のビット誤り率が 10^{-15} でのQリミットは6.2dBであり、シミュレーションと実測が一致することを確認でき、三重接続符号の有用性を実証した。100Gbpsシステムでもこの方式を適用し、長距離伝送を実現している。

表1. 三重接続符号の主要諸元

項目	諸元
内符号	イレギュラーQC-LDPC(4,608, 4,080)
外符号	Unequal Error Protection BCH
復号アルゴリズム	可変オフセットBelief Propagation
繰返し復号回数	16
冗長度	20.5%(内符号 13%, 外符号 7%)
ネット符号化利得	11.0dB@ 10^{-15}
Qリミット	6.2dB

QC : Quasi-Cyclic
BCH : Bose-Chaudhuri-Hocquenghem

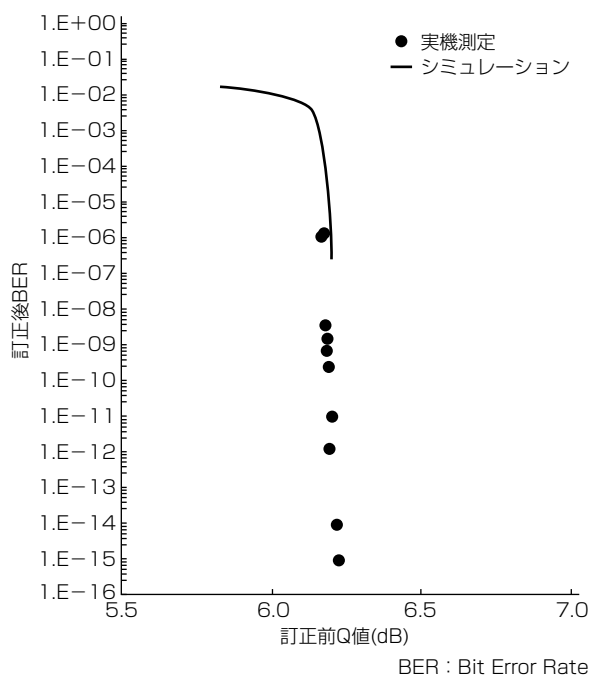


図1. 三重接続符号の誤り訂正性能のシミュレーションと実験結果⁽²⁾

2.3 伝送設計技術

長距離伝送の実現には、ファイバ種別、伝送距離、光変復調方式、光レベルダイヤ、波長配置間隔、分散補償方式等の各諸元の最適化を行う伝送設計技術が必要となる。そこで、長距離伝送特性を検証する計算機シミュレーション設備、伝送評価設備を高精度化した。実サービス環境を想定して、各種条件の模擬が可能で、設計段階における高精度な伝送性能評価を可能とした。図2に計算機シミュレーション設備を用いて、100GHzの波長間隔で100Gbps信号(DP-QPSK方式: Dual-Polarized Quadrature Phase Shift Keying)と10Gbps信号(OOK(On-Off Keying)方式)を配置した際の伝送特性例を示す。一般的に光変調方式が異なる信号を隣接して波長多重した場合に信号劣化量が大きくなり、ガードバンドを設ける必要性があった。しかし、伝送路へ入力する光パワーを十分低く(-2dBm)管理することで、両信号間のガードバンドを不要とし、100Gbps信号を既存10Gbpsシステムに混在収容可能にした。図3に100Gbpsの波長多重信号を3,000km伝送したときの光スペクトル波形及び偏波多重4値位相変調信号(DP-QPSK)のコンステレーションマップを示す。それぞれの偏波に対して信号復調できており、3,000km伝送が可能であることを示している。

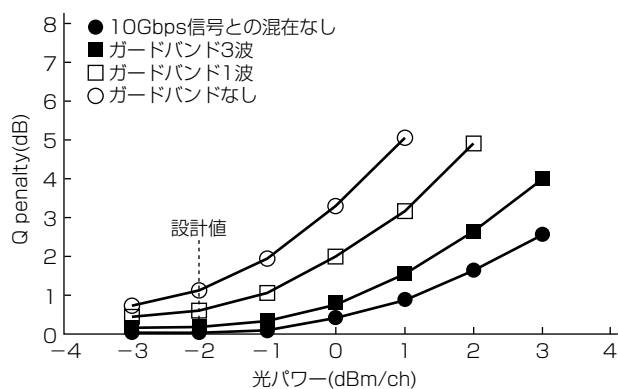


図2. 10Gbps信号の有無による100Gbps信号の伝送特性(計算機シミュレーション)⁽³⁾

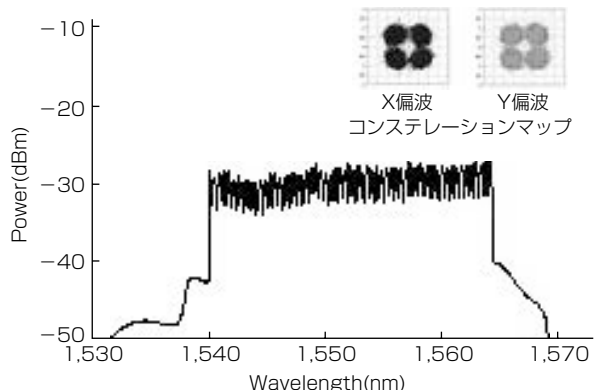


図3. 3,000km伝送後の100Gbps信号の波長多重スペクトルとコンステレーションマップ



図4. 100Gbpsトランスポンダカード

3. 100Gbps WDM光通信装置

これまでに述べた技術を用いて、長距離伝送可能な海底ケーブル／メトロネットワーク向けWDM光通信装置に適用可能な100Gbpsトランスポンダ／マックスポンダを開発した。

100Gbpsトランスポンダ／マックスポンダは、クライアント装置からの信号を受信し、長距離伝送に適した信号フォーマットへのマッピングや、任意の波長に変換しライン側に送信する機能と、ライン側で受信した信号をコヒーレント技術によって自動的に波形等化し、高利得誤り訂正を行った後、クライアント装置へ送信する機能を持つ。

図4に100Gbpsトランスポンダカードの外観を示す。従来の直接検波方式に比べ、コヒーレント光送受信器は複雑な構成をとるため、送信用光源、多値光変調器、90度光ハイブリッド、バランス型フォトダイオード、局部発振光源等の光デバイスの集積化を図っている。表2に主要諸元を示す。

メトロネットワークでは、2章で述べた長距離伝送技術によって、10Gbps／40Gbps用に設計したネットワークで、10Gbps／40Gbpsトランスポンダカードとほぼ同等の長距離伝送を実現した。これによって、3R再生中継用品の削減、ネットワーク全体の低消費電力化、システムコスト低減が期待できる。

表2. 100Gbpsトランス／マックスポンダカードの主要諸元

項目		諸元
ライン側 インタフェース	伝送速度	OTU4v (127.156Gbps)
	変調方式	DP-QPSK
	誤り訂正機能	表1記載
	分散補償耐力	±40,000ps/nm
クライアント側 インタフェース	収容信号	100GbE×1ch
		OC-192/STM-64, 10GbE, OTU2×10ch
		OC-768/STM-256, 40GbE×2ch

4. むすび

100Gbps伝送を実現するコヒーレント技術、長距離伝送技術と、この技術を適用した100Gbps WDM光通信装置について述べた。これらが、光通信ネットワークの大容量化と長距離伝送性能向上による設備削減、ネットワーク全体の低消費電力化に寄与することを期待する。

この研究開発の一部は、平成21年度から平成23年度に実施した総務省の委託研究“超高速光伝送システム技術の研究開発(デジタルコヒーレント光送受信技術)”及び“超高速光エッジノード技術の研究開発”の成果である。

参考文献

- (1) Miyata, Y., et al.: A triple-concatenated FEC using soft-decision decoding for 100Gb/s optical transmission, Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest, OThL3 (2010)
- (2) Onohara, K., et al.: Experimental demonstration of triple-concatenated FEC for digital coherent systems and future FEC technology, SubOptic 2013, to be appeared
- (3) 別所浩資, ほか: 100Gbpsデジタルコヒーレント信号のファイバ種別に対する伝送特性の検討, 電子情報通信学会総合大会講演論文2012_通信(2), B-10-56 (2012)