

160Gbit/s 超高速光伝送技術の研究開発

森田逸郎、大黒将弘、田中英明、鈴木正敏
(株)KDDI 研究所

宮崎哲弥、久保田文人
独立行政法人 情報通信研究機構

1. はじめに

インターネットによるビデオコンテンツの配信等に代表されるようにユーザが取り扱う情報量は飛躍的な増大を続けている。インターネットサービスプロバイダ間で交換される情報を例にとると、図1に示すようにここ1年間でも約1.5倍も増えている[1]。そのような情報量の増大に対応するためには、インターネットを提供するインフラは1年間に1.5倍の処理能力の増強が必要とすることを意味する。そのインフラの主要部分の一つである伝送システムにおいても同様のことが圧力となって、伝送速度の高速化が必須の課題となっている。現在の基幹系ネットワークでは、伝送速度が10Gbit/sの光伝送システムまでが商用導入されており、次の世代である40Gbit/s光伝送システムも導入間近な状況である。さらに次の世代として伝送速度が100Gbit/sを超える光伝送システムの実現が必要となってきた段階でもある。筆者らは伝送速度を160Gbit/sまで高速化した光伝送システムを実現するための光伝送技術の研究開発を行った。

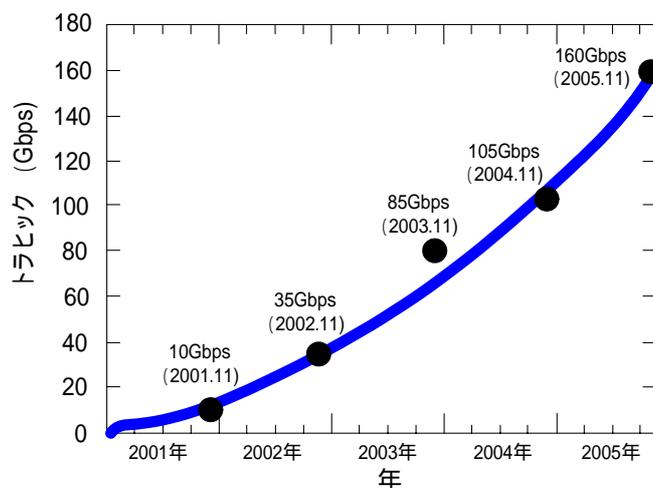


図1 国内主要インターネットエクスチェンジで交換されるトラフィックのトレンド
(1日のピークトラフィックの月平均)

2. 超高速化を実現するための課題

160Gbit/sのような超高速信号では、隣り合うビットの時間間隔が極めて狭くなり(1タイムスロット:6.25ps)光でさえ約1mmしか進まない時間間隔の信号の識別を行う必要があるために、伝送時にわずかな影響を受けても信号の識別ができなくなる。160Gbit/sの超高速光伝送システム実現へ向けての取り組みは行われているが、影響の少ない環境下での評価に限られており、実用化へ向けては大きな障壁を越す必要がある。

光信号が光伝送の際に受ける影響には、周波数(波長)の違いにより光信号の伝播速度が異なるために生じる波長分散や、光ファイバ断面の真円からのズレ等により発生した複

屈折が引き起こす光ファイバ断面上の方向に依存した伝播速度の違い（偏波モード分散（PMD））がある。両者とも光信号のパルス形状の変形を招き、信号品質が劣化する。波長分散については補償技術が確立しており、経路が確定している伝送路では光ファイバの温度変化が主要因のゆっくりとした時間変化であるため、補償は問題なく行うことができる。一方、PMDは温度だけでなく、光ファイバに加わる応力や振動等により変化し、光ファイバの断面上で伝播速度の差が一番大きくなる方向や大きさが、ランダムにかつ速く変化することが知られている。図2に、10分間隔で6時間測定した2種類の光ファイバ伝送路のPMDの変化を示す。図2(a)は実験室内の光ファイバ伝送路の特性、図2(b)は実際に敷設された光ファイバ伝送路の特性を示している。ここでは、PMDを偏波状態による伝播速度差（DGD：Differential Group Delay）で示し、両者のDGDの平均値が同一となるようにしている。実験室内の光ファイバ伝送路では6時間の測定でもPMDがあまり変化していないのに対し、敷設された光ファイバ伝送路では大きく不規則に変化していることが分かる。DGDの平均値が1.3ps程度に対し、敷設された光ファイバ伝送路ではDGDが3.5ps以上になることもあり、タイムスロットが6.25psしかない160Gbit/s伝送では大きく信号品質が劣化することになる。このように160Gbpsの光伝送システムでは実環境での動作を考慮するとPMD補償技術の適用が不可欠と考えられ、その技術の有効性を検証するために実際の敷設光ファイバ伝送路での評価が必須である。

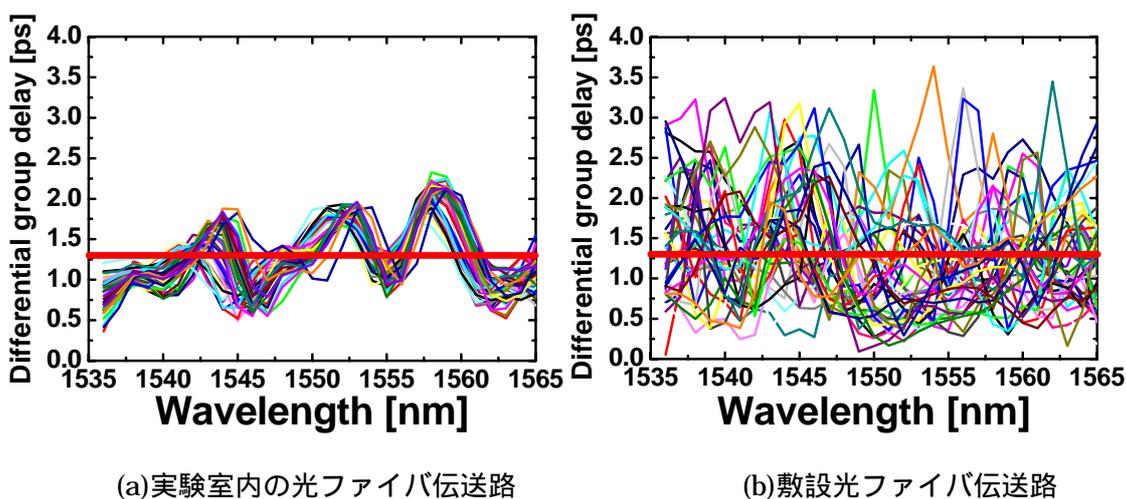


図2 PMD 特性の変化（10分間隔で6時間測定）

また、信号品質を劣化させずに伝送速度を高速化するためには、光信号雑音比（OSNR：Optical Signal-to-Noise Ratio）を伝送速度に応じて増加させなければならない。例えば、伝送速度を40Gbit/sから160Gbit/sに高速化するためには、OSNRを4倍（6dB）向上させる必要がある。この時、光ファイバに入力する信号光パワーを4倍に増加させれば、十分なOSNRを確保することが可能であるが、光ファイバ中の信号光パワーを大きくすると、信号光パワーに依存して光ファイバの屈折率がわずかに変化する影響（非線形光学効果）による信号品質劣化も大きくなる。さらに、伝送速度が高速化するほど、光ファイバ中の非線形光学効果の影響を大きく受けるようになるため、光ファイバに入力できる信号光パワーは制限され、信号光パワーを大きくしてOSNRを増加させるアプローチは困難となる。そのため、OSNRによる伝送特性劣化を低減するためには、必要なOSNRを低減するための技術が必要となる。

3 . 研究開発技術

伝送速度を 160Gbit/s まで高速化した光信号を安定に長距離伝送するための技術として、光ファイバ伝送路の PMD の影響を緩和するための PMD 補償技術と、所要 OSNR を低減するための高受信感度変復調技術の検討を行った。

3.1 PMD 補償技術

PMD 補償方式としては種々の方式がこれまでに提案されているが、構成が複雑であったり、高速の電子回路が必要であったり等、超高速光信号伝送への適用が難しいものが多かった [2]。そこで、光信号の伝送速度に依存しない簡単な構成の PMD 方式を考案した [3]。考案した方式の動作原理を図 3 に示す。PMD による信号波形劣化は、直交する偏波成分間の伝播時間差に起因することに着目し、偏光子を用いて一方の偏波成分のみを選択することで、PMD による波形劣化を抑制するというのが本方式の簡単な原理である。本方式を用いた PMD 補償器の構成を図 4 に示す。光信号の偏波状態は光ファイバ伝送中に変化するため、偏光子により適切な成分を選択するためには、偏波変動に追従するための機構が必要となる。そのため、開発した PMD 補償器では、偏光子として偏光ビームスプリッタ (PBS) を用い、PBS で分離された 2 つの偏波成分の光パワー差が最大となるように、PBS への入力段に設けた偏波コントローラを制御した。本方式では、偏光子に入力する光信号の偏波状態によって、PMD 補償器から出力される信号光パワーが変化するが、このパワー変動は後段に設けた光増幅器により吸収可能である。その際、光増幅器への入力光パワーの変化は OSNR 変動の原因となるが、光増幅器の動作状態を適切に設定することで、長距離伝送システムではその影響を無視できる程小さくすることが可能である。

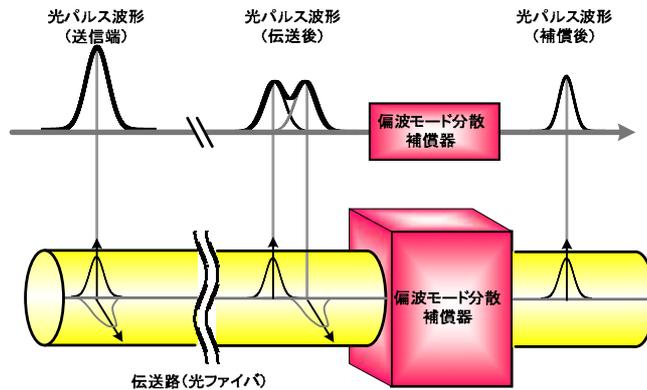


図 3 考案した PMD 補償方式の動作原理

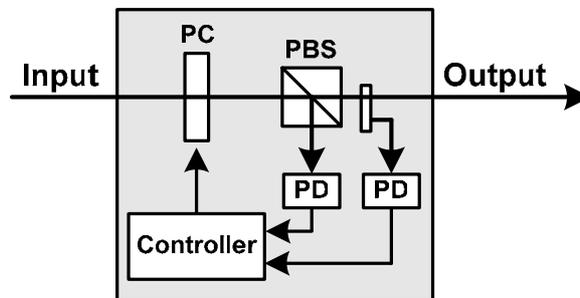


図 4 PMD 補償器の構成

3.2 高感度変復調技術

現在の商用光通信システムでは、光搬送波の強度を変調する強度変調（OOK：On-Off Keying）方式が使用されているが、40Gbit/s への高速化の検討の中で、1 ビット前の光信号との位相差（0 または π ）により、情報ビット（“0” または “1”）を伝送する差動位相変調（DPSK：Differential Phase Shift Keying）方式が注目されるようになった[4]。DPSK 方式では、1 ビット分の遅延差のある干渉系（遅延干渉系）を用いて位相変調信号を強度変調信号に変換することで、光強度のみを検出する通常の光受信器が使用できるだけでなく、遅延干渉系からの 2 つの出力を差動受信することにより、従来の強度変調方式と比較して約 3dB の受光感度改善が得られる。

そこで、本検討では所要 OSNR を低減するための技術として DPSK 方式を採用した。図 5 に検討した 160Gbit/s DPSK 光送信器の構成を示す。現状の電子回路技術では 160Gbit/s 光信号を直接生成することができないため、40Gbit/s の電気信号により生成した 40Gbit/s 光信号を光領域で時間多重する光時分割多重（OTDM）技術を用いた。OTDM 多重器では、入力した 40Gbit/s 光信号を分岐し、適当な遅延量を与えた後に合波する過程を 2 度行うことで、160Gbit/s の擬似ランダム信号を生成した。そのため、生成した 160Gbit/s DPSK 光信号では、4 ビット前の光信号との位相差によりデータ信号が伝送される。受信器では、受信した 160Gbit/s 光信号より 40GHz のクロック信号（正弦波）を抽出し、抽出したクロック信号を用いて光ゲーティングを行うことで、160Gbit/s 信号から 40Gbit/s 信号を分離した。分離した後の 40Gbit/s 光信号は 1 ビット前の信号との位相差によりデータ信号が搬送されている DPSK 光信号となっているため、1 ビット分の遅延差を有する遅延干渉系を用いた通常の構成の DPSK 受信器により受信できる。

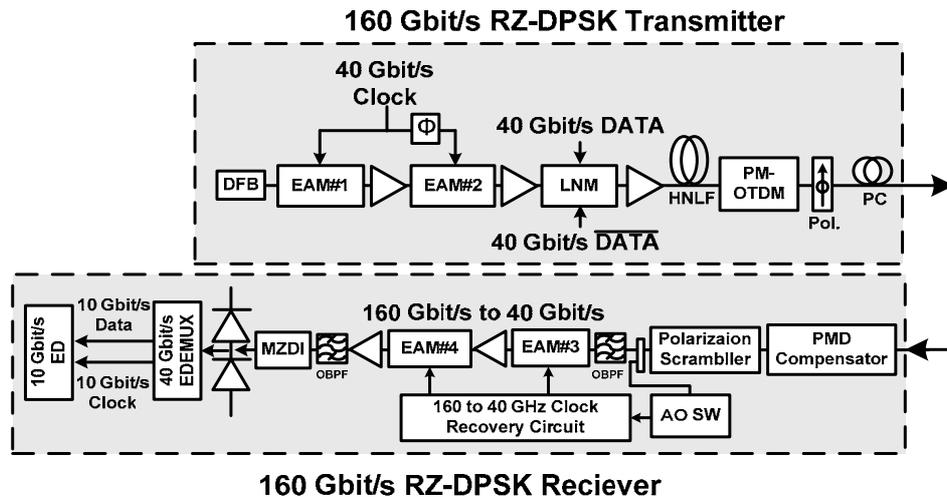


図 5 160Gbit/s DPSK 光送受信器の構成

4 敷設光ファイバ伝送路を用いた検証実験

検討した PMD 補償方式、および、変復調方式の有効性を検証するために既設光ファイバ伝送路を用いた検証実験を行った。

4.1 伝送実験に用いた既設光ファイバ伝送路の構成および特性

既設光ファイバ伝送路としては、NICT が運用する JGNII 光テストベッド[5]を用いた。本テストベッドは、図 6 に示すように、大手町局、柏局、つくば局の 3 局に光増幅中継器が設置され、各局間を約 50km の ITU-T G.652 準拠のシングルモードファイバ（SMF）で接

続した 4 スパン構成となっている。光ファイバスパンの敷設状態は、高速道路沿いの管路またはラックに敷設されている区間が大部分であるが、スパン 2 とスパン 3 の一部に架空ファイバ区間を含んでいる。各局に設置された光増幅中継器は、波長多重伝送を考慮した 1535nm ~ 1565nm の利得帯域を有する広帯域光増幅器を用いており、光増幅中継器の段間には各スパンの累積波長分散を補償するための分散補償ファイバ (DCF) が設置されている。また、柏局の光増幅中継器には、光増幅器利得の波長依存性を平坦化するための動的利得等化器 (DGE) も設置されている。伝送実験では、大手町局から入力した光信号をつくば局で折り返し、大手町局で受信する総長 200km の構成を用いた。

図 7 に、本構成で測定した PMD 特性を示す。PMD 特性は、JME (Jones Matrix Eigenanalysis) 法[6]により、1535nm ~ 1565nm までの測定波長帯域を、分解能 1nm にて、約 90 秒間隔で 10 時間連続測定を行った DGD をヒストグラムで示した。図 7 より、本テストベッドの DGD 発生分布は、わずか 10 時間の連続測定であっても、図 7 中に示す理論的発生分布 (マクスウェル分布) [2] に非常に即した振る舞いを示すことを確認した。これは、テストベッドの一部に含まれる架空区間では、温度や振動により光ファイバの状態が変化しやすいためと考えられる。PMD 特性がこのように大きく変化する環境は、PMD 補償器の有効性を検証するためには適していると考えられる。

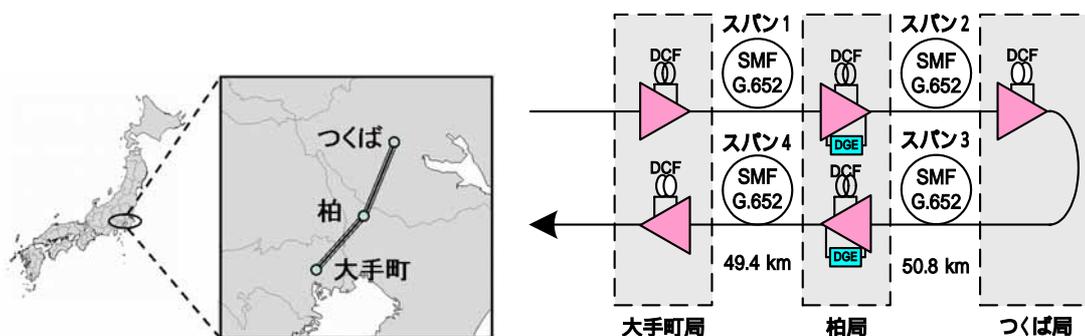


図 6 160Gbit/s DPSK 光送受信器の構成

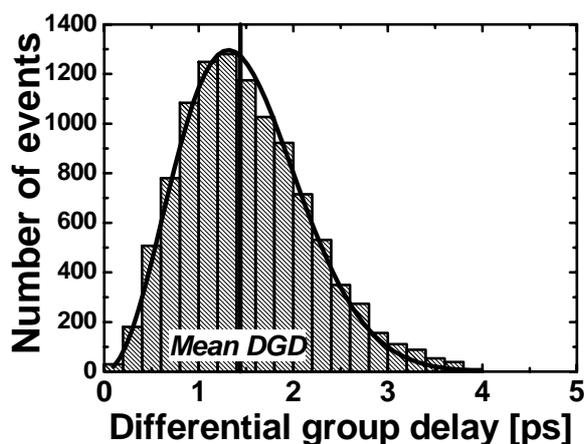


図 7 160Gbit/s DPSK 光送受信器の構成

4.2 単一波長伝送実験結果

(a) DPSK 方式の有効性検証

DPSK 方式の有効性を検証するために、OOK 方式を用いた場合と DPSK 方式を用いた 160Gbit/s 単一波長伝送実験を行った。この時、各変調方式について、伝送特性が最良となるように SMF、および、DCF への入力光パワー、残留波長分散値を最適化した。図 8 に各変調方式を用いた場合の、200km 伝送後の信号特性を示す。ここでは、信号品質の指標として、電気信号の信号対雑音比に相当する Q 値を用いた[7]。Q 値を用いた場合、値が大きい程信号品質は良好となり、15.6dB の Q 値が 1.0×10^{-9} の符号誤り率に相当する。また、本テストベッドでは、PMD 特性が時間と共に変化するため、伝送特性の評価直後に伝送路の PMD 測定を行った。図 8 に示す伝送特性と DGD の関係は、光ファイバ伝送路の PMD の影響が最大 (Q 値が最小) となるように、伝送路への入力信号の偏波状態を調整して評価した結果である。図 8 より、OOK 方式を用いた場合、DGD が約 1.8ps 以上の範囲ではエラーフリー (符号誤り率 $< 1.0 \times 10^{-9}$) 特性が得られなかったのに対し、DPSK 方式を用いた場合、200km 伝送後の Q 値は OOK 方式と比較して約 1.5dB 向上し、DPSK 方式の有効性を確認した。

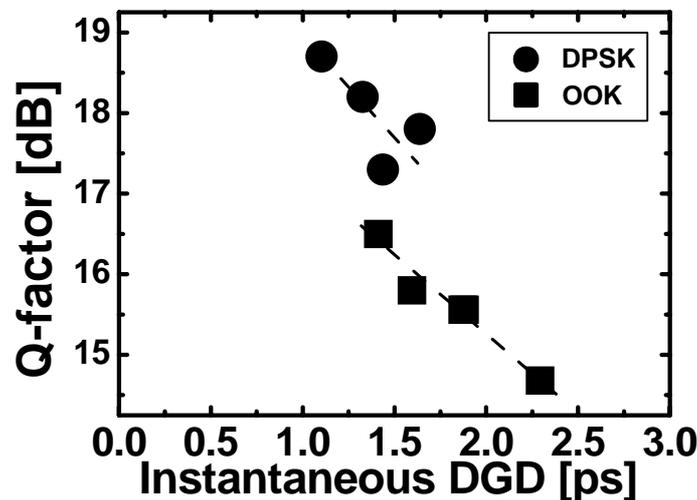


図 8 160Gbit/s 光信号 (OOK および DPSK) の 200km 伝送後の伝送特性

(a) PMD 補償方式の有効性検証

DPSK 方式を用いた 160Gbit/s 単一波長伝送実験を行い、PMD 補償方式の有効性の検証を行った。図 8 の場合と同様に、PMD の影響が最大となるように伝送路への入力信号の偏波状態を調整した状態で、PMD 補償器を用いた場合と用いない場合の、200km 伝送後 Q 値と DGD 値の相関を測定した結果を図 9 に示す。図 9 より、PMD 補償器を用いることで、約 1.3dB の Q 値の向上が得られることが分かり、提案した PMD 補償方式の 160Gbit/s 伝送における有効性を確認した。

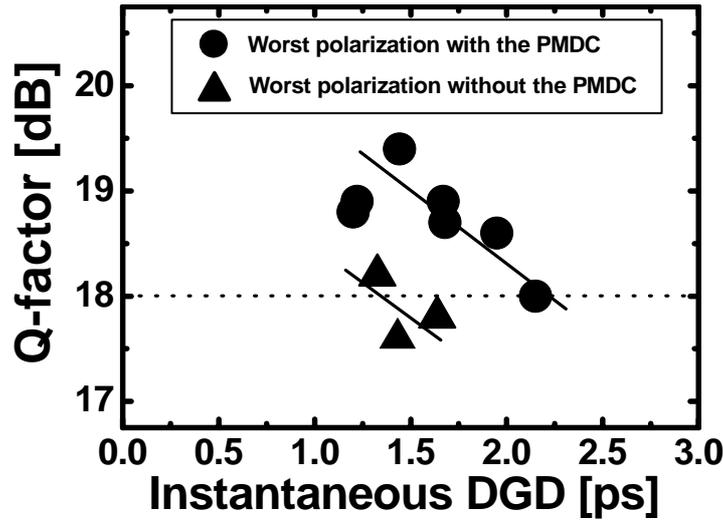


図9 160Gbit/s DPSK 光信号を 200km 伝送した時の PMD 補償器の効果

4.3 波長多重伝送実験結果

前節までの検討結果より、DPSK 方式と PMD 補償器の適用により、160Gbit/s 光信号の 200km 伝送において 3dB 程度の特性改善が得られることを確認した。さらに伝送容量を拡大する可能性を検証するため、160Gbit/s x 8 波長多重伝送実験(総伝送容量：1.3Tbit/s)を行った。

図 10 に、波長多重伝送実験用に改良した送信器構成を示す。光源として、周波数間隔が 300GHz の 8 波の半導体レーザ光源を用い、合波器で合波した後、光変調系に入力し、8 チャンネルの 160Gbit/s DPSK 光信号を一括生成した。受信系では、半値幅 2nm の光バンドパスフィルタで測定チャンネルを選択した後、図 5 に示した単一チャンネル伝送用と同一の受信器を用いた。

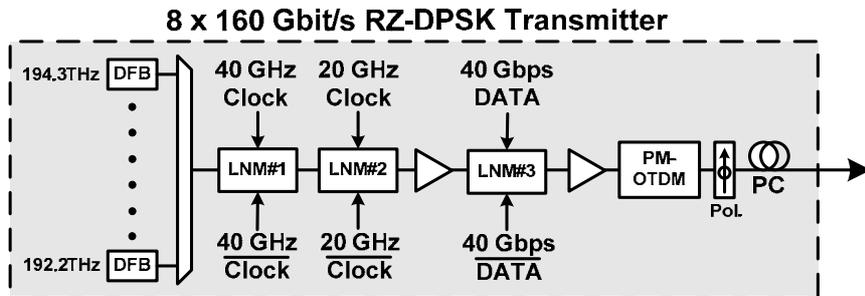


図 10 8 x 160Gbit/s DPSK 送信器構成

図 11 に、波長分解能を 0.1nm に設定して測定した 200km 伝送前後の光スペクトルと、伝送後の OSNR を示す。OSNR の測定の際には、送信器内の変調器を損失が同一の光減衰器に置換して、データ変調によるスペクトル拡がりの影響を無くした状態で評価した。200km 伝送後の OSNR はチャンネル間でほぼ同じであり、全チャンネルの平均 OSNR は 29.8dB/0.1nm であった。

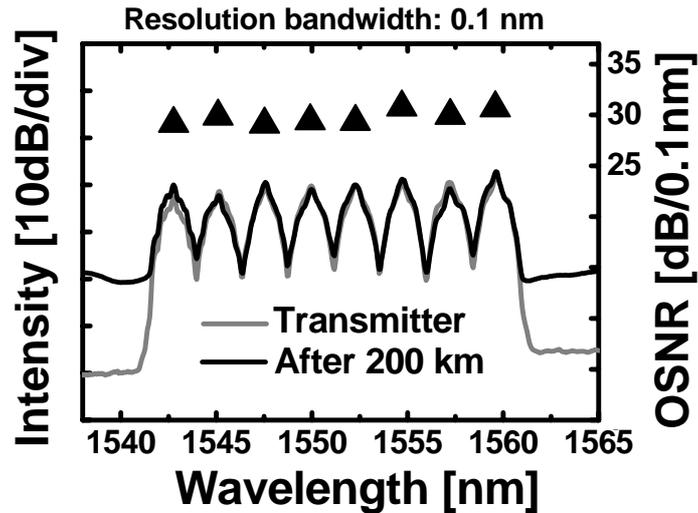


図 11 200km 伝送前後の光スペクトルと伝送後 OSNR(波長分解能 : 0.1nm)

図 12 に符号誤率から換算した 200km 伝送後の各チャネルの Q 値と、DGD との相関を示す。この評価の際も、単一波長伝送の場合と同様に、伝送路への入力信号の偏波状態を調整して、光ファイバ伝送路の PMD の影響が最大 (Q 値が最小) となるようにした。図 12 より、全チャネルについて 14.4dB 以上の Q 値が得られた。この値は、ITU-T で標準化されているインバンド誤り訂正符号 (FEC) [8] を用いた場合に、復号後に 1.0×10^{-13} 以下の符号誤り率を得ることができるしきい値 (Q 値 : 13.3dB) 以上となっており、インバンド FEC を用いることで十分な信号品質が得られることが分かった。これにより、光ファイバ伝送路特性が大きく変化する実環境伝送路上で、チャネル当りの伝送速度が 160Gbit/s の波長多重光信号を 200km にわたり伝送可能であることを世界で始めて実証した。

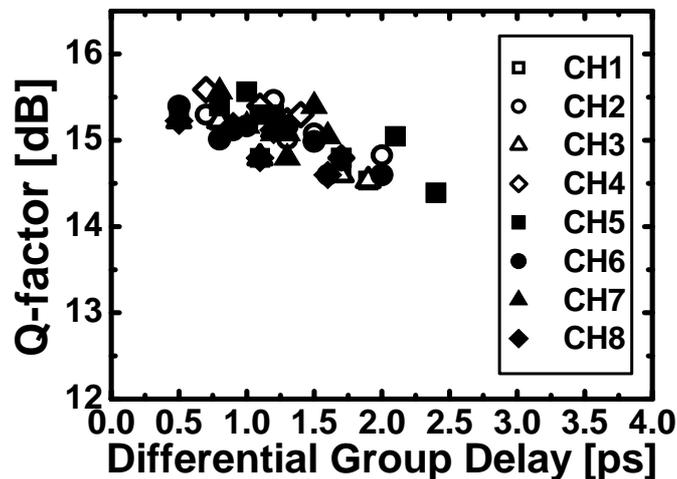


図 12 全チャネルの 200km 伝送後 Q 値と信号波長近傍 DGD 値との相関

また、受信後の光信号に付加する雑音を調整して OSNR を一定に保ちながら、隣接チャネルの有無による伝送特性変化を測定し、WDM チャネル間の干渉の影響を評価した結果、本実験でのチャネル間干渉による伝送特性劣化量は 0.5dB 以下であることが分かった。したがって、伝送信号に 7%程度の誤り訂正用の冗長ビットを付加することで、大きな誤り訂正能力 (8dB 以上) が得られるアウトバンド FEC を用いた場合[9]、冗長ビットの付加によ

る信号帯域拡大の効果や、それに起因する実効的なチャンネル間隔の縮小の効果を検討する必要があるが、さらにチャンネル間隔を縮小することによる周波数利用効率の向上も期待される。

5 . 超高速化による波及効果

これまでの光伝送システムの進展においては、伝送速度の向上により送受信装置のビット当たりのコストの低減がもたらされてきた。160Gbit/s クラスまで超高速化した場合に、伝送速度とコストの増加の割合が従来と同様の関係を維持した場合、160Gbit/s 送受信装置のコストは、10Gbit/s システムの場合の 4 倍程度となり、ビット当たりのコストの大幅な低減が期待される。

また、総伝送容量が非常に大きくなる光伝送システムにおいては、チャンネル当たりの伝送速度の高速化による所要チャンネル数の低減によるメリットは大きい。例えば、1Tbit/s の伝送容量を得るために、10Gbit/s ベースシステムでは 100 チャンネル必要となるが、160Gbit/s ベースシステムが実現できれば、6 チャンネルで同程度の伝送容量を得ることができる。この大幅なチャンネル数の低減により、送受信装置の数を大幅に減少できるため、システム全体での省スペース化、低消費電力化、および、低コスト化が期待される。また、ネットワークの運用管理の点でも、波長数が非常に多くなった場合の負荷は大きくなるため、運用管理の簡易化というメリットも期待される。

一方、伝送速度の高速化は、帯域有効利用（周波数利用効率の向上）の観点からもメリットがある。周波数利用効率を一定とした場合、チャンネル当たりの伝送速度の向上とともに、チャンネル間隔は拡大される。例えば、10Gbit/s の信号が 50GHz 間隔で波長多重された場合の周波数利用効率は、 $0.2\text{bit/s/Hz} (= 10\text{Gbit/s} / 50\text{GHz})$ となるが、これと同じ周波数利用効率を 160Gbit/s ベースシステムで得る場合、チャンネル間隔は 800GHz まで拡大される。このような大幅なチャンネル間隔の拡大は、合分波器等の光部品の製造性を格段に向上させるため、高密度化による周波数利用効率の向上が相対的に容易になると考えられる。このような周波数利用効率の拡大により、一定の伝送容量を得るための必要帯域を低減することが可能となるため、伝送用光ファイバの分散 / 損失管理を行う帯域の低減や、光増幅器で確保すべき利得帯域（利得の平坦性も含めて）の低減による低コスト化が期待される。

さらに、10GbE の次の世代のイーサネット規格として 100GbE が標準化されることも予想されており、ここで検討した超 100Gbit/s 光伝送技術が、その実用化に大きく貢献することも期待される。

6 . まとめ

光伝送システムの高速化を実現するための技術として、PMD 補償技術と変復調技術の研究開発を行った。架空区間をリンクの一部に含んだ既設光ファイバ伝送路を用いて、160Gbit/s 伝送における偏光子ベースの PMD 補償方式と DPSK 方式の有効性を示した。これらの技術を用いることにより、光ファイバ伝送路特性が大きく変化する実環境伝送路上で、チャンネル当りの伝送速度を 160Gbit/s まで高速化した波長多重光信号（総伝送容量：1.3Tbit/s）を 200km にわたり伝送可能であることを世界で始めて実証した。

7 . 参考文献

- [1] 総務省報道資料（平成 18 年年 3 月 10 日）「我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算」、http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/060310_8.html
- [2] H. Kogelnik, et al., "Optical fiber telecommunications IVB, systems and impairments," Chapter 15, Academic Press, 2002..
- [3] M. Hayashi, et al., OECC2001, pp.48-49, 2001.
- [4] A. Gnauck and P. Winzer, IEEE J. Lightwave Technol., vol.23, pp.115-130, 2005.

- [5] <http://www.jgn.nict.go.jp/>
- [6] B. L. Heffner, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 4, pp.1066-1099, 1992.
- [7] N. Bergano, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, PP. 304-306, 1993.
- [8] ITU-T recommendation G.707/Y.1322.
- [9] ITU-T recommendation G.709.