

平成20年度 成果報告書

超高速光マルチメディア配信システム の研究開発

委託先： 沖電気工業(株)

平成21年4月

情報通信研究機構

平成20年度 成果報告書

「超高速光マルチメディア配信システムの研究開発」

目 次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	3
2-2	研究開発目標	3
2-2-1	最終目標	3
2-2-2	中間目標	4
2-3	研究開発の年度別計画	5
3	研究開発体制	6
3-1	研究開発実施体制	6
4	研究開発実施状況	7
4-1	光ラベル処理によるOTDM高速アクセスの研究開発	8
4-1-1	はじめに	8
4-1-2	16ch システム伝送設計	8
4-1-3	波長依存性の検証	10
4-1-4	位相制御の改良	11
4-1-5	16ch システムの実証	13
4-1-5-1	16ch システムの構成	13
4-1-5-2	16ch システムの最小プロトタイプの開発	13
4-1-5-3	SMF20km 伝送実験	14
4-1-6	OCDM による多重チャネル数増大の検討	18
4-1-6-1	チップパルス間同期	18
4-1-6-2	16ch システムの最小プロトタイプを用いた 20km 伝送実験	19
4-2	総括	21
5	参考資料・参考文献	22
5-1	研究発表・講演等一覧	22

1 研究開発課題の背景

(研究背景)

インターネットの普及に伴い、ADSL や光などのブロードバンド加入者が急増している。このような加入者は、ファイル転送や動画配信などのデータ通信が中心であり、ネットワークのトラフィックもパケット通信が大部分を占める状況になりつつある。ブロードバンド加入者の増加に伴って、大容量の圧縮なしの映像を伝送するサービスなどを遅滞なく提供できるネットワークが求められており、1 ユーザが 1Gbps 以上のバースト的なデータを占有できるネットワークを必要とする時代がくることが予測される。

このような状況では、より効率的なパケット転送技術や、セキュリティの強化が必須となっている。パケット転送では、トラフィックが発生したときのみ、帯域を占有するという統計多重に基づいているため帯域の利用効率に優れているが、従来の波長多重ネットワークのノードにおいては、波長単位で挿入・引き落とし・経路切り替え（スイッチング）を行うことから、同一波長のパケットの中から特定のパケットのみを選択的に挿入・引き落とし・経路切り替え（スイッチング）することは不可能であった。そのため、トラフィックが十分でない場合にも、ノードへアクセスする手段として、一波長を占有し、光パスを設定する以外に方法はなかった。このため、ユーザはトラフィックの有無に関らず帯域を占有するので、帯域の無駄となり、その分コストがかかる。また、ユーザ数に合わせてあらかじめ 1000 波長以上の波長数が必要となることから、ノード装置の規模が大きくなることや、帯域利用効率の低下などの問題があった。

そこで、波長多重ネットワークの光ノード（光クロスコネクタ）と電気ルータを組み合わせ、WDM パスの一部分を電気信号に変換して、同一方向（宛先）のパケットをまとめるように電気処理でルーティングを行う方式により、電気ルータの処理低減と利用効率の改善を行う方法が検討されている。この方式は、ノードでの電気処理にかかる負荷が大きくなり、処理速度や遅延時間、電力消費、コストなどの問題点が生じ、パケット転送にもノードオフセット時間分の遅延が生じることから、その分ネットワーク転送効率低下が生じることが問題となる。また、ビットレートが 40Gbps 以上の高速となると、このような電氣的な処理は適用できなくなる。

本研究は、このような状況に対応するために、光処理によって、選択的にパケットを認識し、特定のパケットのみを選択的に挿入・引き落とし・経路切り替え（スイッチング）することを可能とする方式に関する基礎研究を行うものである。特に本研究では、今後のネットワークで必要とされるビットレートが 40Gbps 以上のバースト的なデータ転送をターゲットとしている。このような高速なパケット信号を、効率よくかつ高セキュリティに転送できるネットワークを実現することは、今後、デジタル家電や、コンテンツサービスなど、いろいろなブロードバンドサービスの提供の可能性を広げるものであり、情報通信分野全体に革新的な影響を及ぼすと考える。

(研究分野の現状)

北米／欧州の光アクセス市場では、G-PON (2.5Gbit/s) の導入が進んでおり、世界標準化活動では、10GE-PON や 10G-PON (共に 10Gbit/s の速度) の標準化が取り組まれている。また、Ethernet のインタフェースは、40Gbit/s、100Gbit/s の開発及び標準化が順調に進んでおり、「Communications Industry Research, Inc」の調査によると、2015 年ごろに 100GbE の市場が立ち上がると予測されている。世界的な主要学会である OFC2009 において、100G イーサネット用などに DQPSK (位相変調方式) による 100Gbit/s の変調モジュールなどの展示も去年に続き行われていた。すなわち、アクセス速度もどんどん速くなってきており、100Gb/s 超の実用化が近づいている。

映像配信では、RF 信号をそのまま光化して配信するトリプルプレイの導入が進んでいるが、IP 統合の IPTV 配信も検討が進んでおり、現状の GE-PON や G-PON で品質が確保できるか問題視され、標準化においても、普及が始まる現時点で既に容量拡張の議論が進められている。

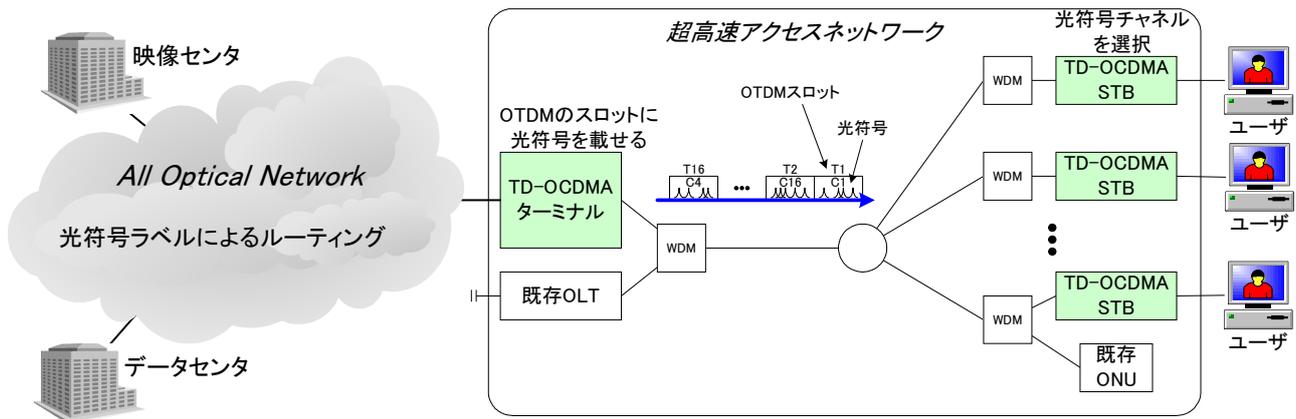
2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究では、光ルータ／光パケットスイッチのネットワークから、光符号ラベルにより光領域でパケットを選択的に認識し、挿入・引き落とし・経路切り替え（スイッチング）などを行うことで、エッジノードの高付加を解消することからストレスなしのポードレスネットワークを実現するものである。また、アクセスネットワークにおいては、バックボーンで利用可能な光符号信号を OTDMA のスロットに載せて配信することで、現状の PON システムにオーバーレイが可能でかつ、超高速なアクセスシステムが構築できる。このため、高精細映像を無圧縮で転送できることから、リアルタイム高精細映像配信を実現するものである。本研究開発は、光サイドバンド変調による光ラベル生成する符号器の開発、OTDM のスロットに載せる光 MUX/DEMUX の開発、信号を抽出する可変復号器の開発を行い、システム実証を行う。

サブテーマ

- ① 光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究
- ② 光ラベル処理による OTDM 高速アクセスの研究



2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成 21 年 3 月末）

光ルータ／光パケットスイッチのネットワークから、光符号ラベルにより光領域でパケットを選択的に認識し、挿入・引き落とし・経路切り替え（スイッチング）などを行うことで、エッジノードの高付加を解消するとともに、アクセスネットワークにおいては、バックボーンで利用可能な光符号信号を OTDMA のスロットに載せて配信することで、現状の PON システムにオーバーレイが可能でかつ、160Gbps と超高速なアクセスシステムの実証を行う。

① 光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究

光サイドバンド変調による符号器：16 チップ、拡散帯域 40Gbps

② 光ラベル処理による OTDM 高速アクセスの研究

- ・ データを識別するための可変復号器：16 チップ、可変速度：50ms 以下
- ・ 光 16MUX/DEMUX：40Gbps×16ch（640Gbps 相当）

を実現する。

2-2-2 中間目標（平成19年1月末）

光サイドバンド変調により、40Gb/s以上のレートまで効率的にラベル付与を行う光ラベル方式を開発するとともに、10Gbpsのデータ信号によりラベル付与および「トータル光通信技術開発」で開発された光MUX/光DEMUXを用いて4多重信号によるデータ信号の抽出実証を行う。

① 光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究

光サイドバンド変調による符号器：40Gb/sのレートで符号生成を実現

② 光ラベル処理によるOTDM高速アクセスの研究

- ・ 固定符号器（16チップ）による復号方法で、チャンネル識別を確認
- ・ 光4MUX/DEMUX：40Gbps×4ch（160G相当）による光ラベルの多重を確認

尚、中間評価の結果、上記の最終目標の達成に向けて、以下のように計画の見直しを行った。

【19年度の研究】

19年度の研究は、0～20kmの距離（アクセス区間）において、640Gbps相当の伝送を実現し、4MUXのプロタイプを開発することで、基本システムを検証する。

- 640Gbpsの伝送実現
 - モジュールの特性を加味した0～20kmの光伝送路の分散/SN設計（シミュレーションモデル作成）
 - シミュレーション実施から640Gbps伝送を実現するためのパルス幅の条件、入力位相誤差条件、分散補償条件などを導出
 - 入力位相制御器の立案
 - 分散補償制御器実現の立案
- 4chシステムによる基本構成の検証
 - 上記条件下で、4chシステムのプロタイプを開発（下りの4ch/640Gbps伝送のみ）
 - 基本検証により、システム化に向けた課題抽出

【20年度の研究】

20年度の研究は、最終目標に向けて、16chへの拡張を検証し、16chマルチメディア配信システムを実証します。拡張方法としては、波長分割多重を用い、CWDMグリッド（RZ-640Gbpsの伝送帯域は約11nmのため）による伝送を実現する。

- 波長依存性の検証
 - CWDM4波におけるモジュールの波長依存性を加味した分散設計/SN設計（シミュレーションモデルの作成）
 - シミュレーション実施から640Gbps×4WDM伝送を実現する各種条件を導出
 - 入力位相制御及び分散補償制御の改良
- 16chシステムの実証
 - 上り通信手段をGE-PONとした非対称帯域方式の制御方法立案
 - 10G-Etherのインタフェースを開発
 - 上記条件下で、16chシステムの最小プロトタイプを開発

上記プロトタイプを用いて、16chマルチメディア配信システムを実証

2-3 研究開発の年度別計画

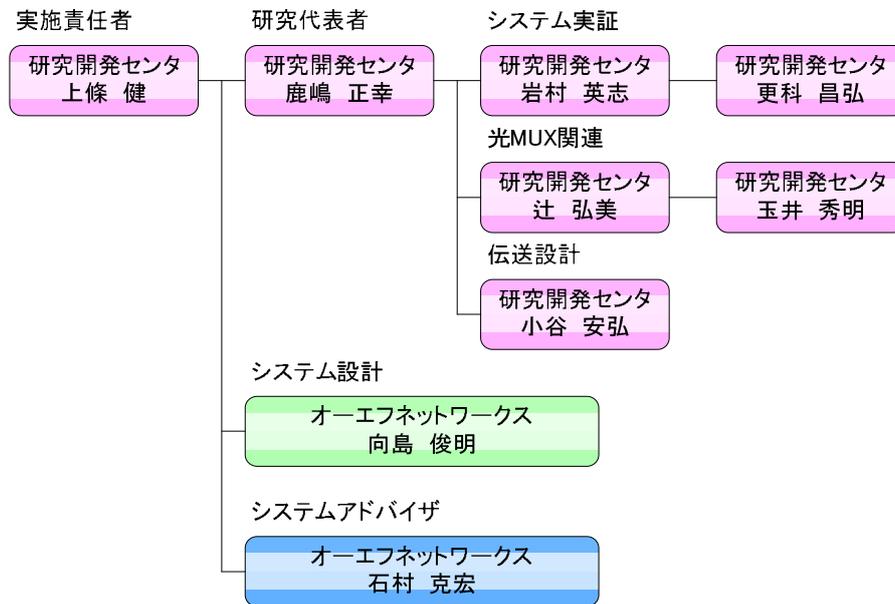
(金額は非公表)

研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
超高速光マルチメディア配信システムの研究開発							
① 光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究開発	方式開発・デバイス開発・評価 →					-	京都工芸繊維大学
② 光ラベル処理による OTDM 高速アクセスの研究開発 【可変符号器の研究】	方式開発・デバイス開発・評価 →					-	
【光 MUX/DEMUX の研究】			方式開発・デバイス開発・評価 →			-	
【システム実証】					システム実証 →	-	
間接経費	-	-	-	-	-	-	
合計	-	-	-	-	-	-	

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



4 研究開発実施状況

本年度は研究開発期間の最終年度であるので、まず、前年度までの実施状況をサブテーマごとに記載する。

サブテーマ①：光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究

- ・光サイドバンド変調による符号発生方式の検討において、5本の縦モードと等間隔の遅延時間の組み合わせによる14400通りの全符号パターンについて自己相関と相互相関での再生信号ピーク強度比をFFTベースのシミュレーションにより計算した。その結果、すべての符号パターンにおいて6dB以上の消光比（自己相関と相互相関とのピーク比）が得られることが確認できた。
 - ・シミュレーションで検討した符号パターンの中から10dB以上の消光比が得られる符号パターンについて、FBGベースの符号発生用デバイスを試作し、40GHzの繰り返しのモードロックレーザを光源として相関特性確認実験を行った。その結果、設計どおり10dB以上の消光比を有する光ラベルの発生が可能であることが確認できた。
- 本研究サブテーマは、平成16年度～18年度の研究である。

サブテーマ②：光ラベル処理によるOTDM高速アクセスの研究

- ・15チップGold-like系列の位相符号から相関特性の良い4種類の符号と波長ホップを用いる符号パターンを導出し、シミュレーションを行った結果、16チャンネル（光16MUX）の自己相関・相互相関の識別が可能であることが確認できた。
- ・反射波長の異なる複数の単位位相符号器により1つのOCDM符号器をFBGで構成し、これらの単位位相符号器の相対遅延時間を光遅延線により制御する可変符号方式を考案した。シミュレーションを行った結果、パターンの可変性と自己相関・相互相関特性を確認することで、FBGによる可変符号器が実現できることが確認できた。
- ・640Gbpsが伝送可能なパルス幅の許容範囲を確認するために、各構成デバイスの特性を考慮したアクセス区間のシミュレーションモデルを作成した。シミュレーションの結果、2.25ps以下であれば $BER10^{-12}$ 以上の受信が可能であることが確認できた。しかし、時間ゲート処理に用いるクロックを抽出するために十分な、自己相関/相互相関ピーク比を得るためには、入力パルス幅を2ps以下にしなければならないことが確認できた。
- ・640Gbpsが伝送可能な分散耐性を確認するために、伝送距離20kmのシミュレーションを行った結果、分散補償量のマージンは4.2ps/nm、分散スロープのマージンは4.5ps/nm²であることが確認できた。
- ・シミュレーション結果を実証するために、SMF20kmを用いた伝送実験を行った結果、シミュレーション結果と同様なクリアな受信波形が得られ、SMF20km伝送によるパワーペナルティは0.2dB以下、TDM-MUXによるパワーペナルティは1.2dB以下と小さいことが確認できた。
- ・光信号モニターによる光MUXの隣接チャンネル間遅延制御方式を検討した。光入力として短パルスを用いた場合は、光信号モニター出力のRFスペクトルからフロア信号(20MHz)とピーク信号(250MHz)を求め、その強度差を検出することにより遅延制御が可能であることが確認できた。
- ・40Gbpsのプロトタイプ作製と動作検証をおこなった。光サンプリングオシロスコープを用いた測定結果から、従来の測定結果と同様にクリアな受信波形が得られており、本装置が正常に動作していることが確認できた。
- ・受信装置における時間ゲート処理の自動制御の動作検証を行った。その結果、抽出タイミングが最適化された位置と外れた位置で0.5dB以上の光出力強度差があるため、これを検出することで時間ゲート位置の最適化が可能であることが確認できた。

本研究サブテーマは、平成 16 年度～20 年度の研究であり、次章に平成 20 年度の成果を記載する。

4-1 光ラベル処理による OTDM 高速アクセスの研究開発

4-1-1 はじめに

このテーマの目標は、光ラベル処理を行った 10Gbps×16ch の信号を光時分割多重 (OTDM) するための光 16MUX/光 16DEMUX 装置を開発することである。具体的には、まず、10Gbps の光パルスを発生し、16ch の信号を識別するために、光符号化デバイスにより 15chip の短パルス列に符号拡散する。次に、その短パルス列を 40GHz (25ps) の OTDM グリッドに配置する。このときチップレートは 15chip/25ps=600Gcps であるため、約 1.6ps 幅の短パルスを時間スロットに多重する技術と伝送するための技術を開発する必要がある。従い、本研究は、約 1.6ps パルスの多重及び伝送技術実現に注力し、符号化した 4ch-OTDM (600Gcps) を 4 波長で多重することで 160Gbps のデータ速度を検証する。また、光符号化された短パルス列は、光符号多重 (OCDM) が可能であるため、将来的に単一波長による装置の実現も可能である。そこで、本研究は、15chip の光符号化デバイスを用いて、2ch の OCDM の検討も行った。

4-1-2 16 ch システムの伝送設計

WDM を用いたシステムでは、隣接する波長間のクロストークにより伝送特性が劣化する。そこで、このクロストークの影響を確認するため、モジュールの波長依存性を加味した分散設計/SN 設計 (シミュレーションモデルの作成) を行い、波長多重数を 1 から 4 まで変化させたときの受信波形の Q 値をシミュレーションにより求めた。図 4.1.1 にシミュレーションの構成を示す。CW 光源の中心波長 ($\lambda 1\sim 4$) を 1530~1560nm の 10nm 間隔とし、波長多重数に応じて、用いる光源を $\lambda 3$ だけ (4ch)、 $\lambda 2$ と $\lambda 3$ (8ch)、 $\lambda 1\sim 3$ (12ch)、全波長 (16ch) とした。外部変調器から出力されるパルス幅を 0.8ps とし、実際の短パルス光源の性能を考慮して、65fs のタイミングジッタを与えた。EDFA の NF は 5dB とし、ASE 光のフィルタリングに Gaussian 型の BPF を用いた。光符号器には 15chip の BPSK で 4 種類の符号を与え、それぞれの波長で光符号化した (図 4.1.1 中において Optical Encoder1, 5, 9, 13 は同一符号である)。光符号化された各チャネルの信号は同一の強度とし、光遅延器により 25ps 間隔に調節して TDM-MUX した。伝送に用いた SMF のパラメータは、ファイバ長 20km、ロス 0.4dB/km、DGD 0.2ps/km、分散 16.75ps/nm/km、分散スロープ 0.092 ps/nm²/km、 A_{eff} 84.9 μm^2 、 n_2 2.6E⁻²⁰ m²/W とした。伝送された信号は、それぞれのチャネル毎に光復号器で復号される。復号された信号は、相互相関によるノイズを除去するため、外部変調器を用いた時間ゲート処理 (ゲート幅 10ps) を行うこととした。

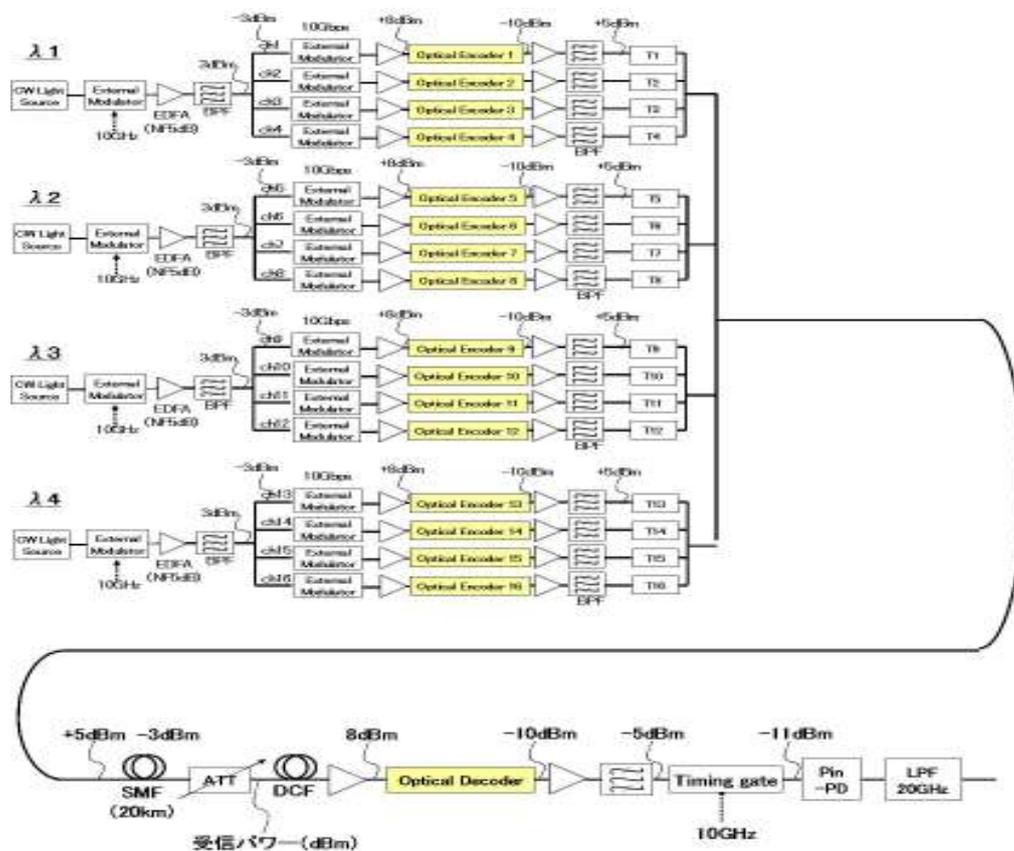


図 4. 1. 1 16ch システムのシミュレーション構成

図 4. 1. 2 に 16ch 多重後のスペクトル波形を示す。入力パルス幅が 0. 8ps のとき、周波数チャープのないフーリエ変換リミット光パルス (Gauss) である場合、時間帯域幅積の計算結果から波長帯域は約 4. 4nm であるため、隣接波長間隔が 10nm のときのクロストークは小さく、ダイナミックレンジは約 40dB であった。

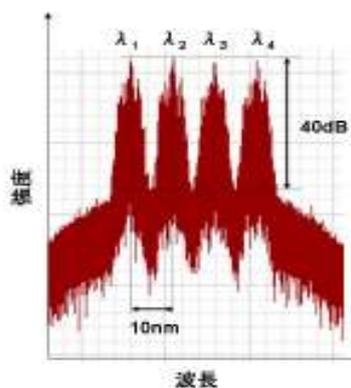


図 4. 1. 2 16ch 多重後のスペクトル波形

図4. 1. 3に多重する波長数を変化させたときの (4ch→16ch)、分散補償前の受信パワーに対する復号処理後 (図4. 1. 1においてLPF20GHz後) の受信波形のQ値を示す。Q値が6のとき (BERで換算すると約 10^{-9}) のそれぞれの受信パワーが、1波長 (4ch多重) のとき約-32dB、2波長 (8ch多重) のとき約-27. 9dB、3波長 (12ch多重) のとき約-26. 3dB、4波長 (16ch多重) のとき約-25. 6dBと変化していることが分かる。これは、多重する波長数を変化させると、伝送前の光出力パワーがそれぞれ-1dBm、2dBm、3. 7dBm、5dBmと大きくなるため、波長多重のクロストークによるパワーペナルティは、8ch多重のとき $(-27. 9) - (-32) - (2) +$

$-1)=1.1\text{dB}$ と小さいことが確認できた。同様に、12ch多重のとき $(-26.3)-(-32)-(3.7)+(-1)=1.0\text{dB}$ 、16ch多重のとき $(-25.6)-(-32)-(5)+(-1)=0.4\text{dB}$ と小さいことが確認できた。また、20km伝送ファイバロス -8dB (0.4dB/km)、16分岐器によるロス -14dB 、DCFのロス -1dB であると考え、本伝送システムのロスバジェットは 23dB であり、16ch多重の場合に伝送前の光出力パワーが $+5\text{dBm}$ 、Q値が7のとき (BERで換算すると約 10^{-12}) の受信パワーが -24.8dB であることを考えると、 $(5)-(-24.8)=29.8>23$ であり、このロスバジェット 23dB は十分クリアできる値であり、設計値に問題がないことが確認できた。

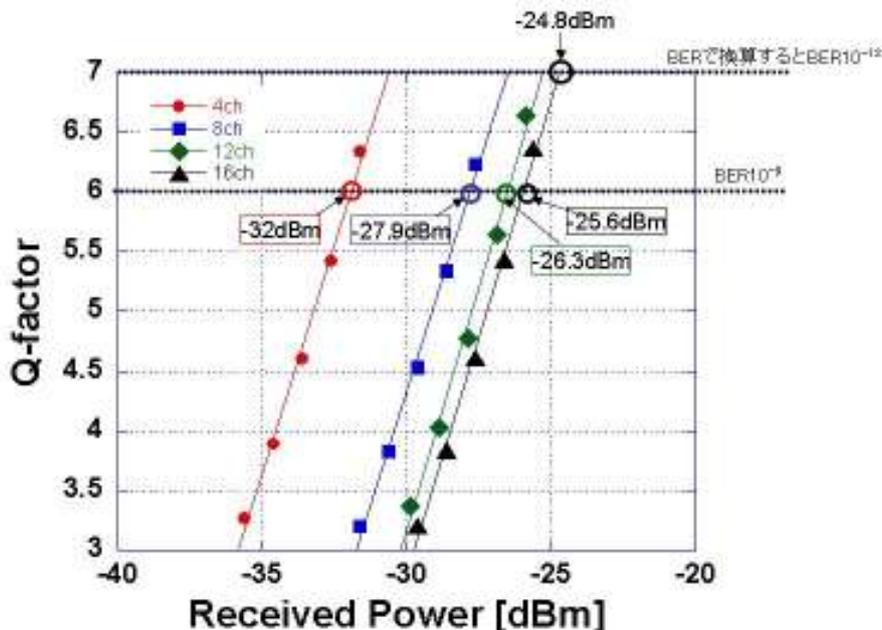


図 4.1.3 多重する波長数を変化させたときの受信波形の Q 値

4-1-3 波長依存性の検証

将来的な波長利用効率の改善を検討するために、上述した設計値をもとに、隣接する波長間隔を変化させたときの受信波形の Q 値 (8ch 多重) をシミュレーションにより確認した。図 4.1.4 に波長間隔を $10\text{nm} \rightarrow 5\text{nm} \rightarrow 3\text{nm}$ と変化させたときのスペクトル波形の変化を示す。波長間隔 10nm のときに約 40dB であったダイナミックレンジが、波長間隔 5nm のときに約 10dB 、波長間隔 3nm のときに約 5dB と低減することが確認できた。図 4.1.5 に波長間隔を変化させたときのそれぞれの受信波形の Q 値を示す。波長間隔 10nm のときと 5nm のときの受信パワーを比較すると、約 0.9dB (Q 値 6) とペナルティは小さいことが確認できた。一方、波長間隔を 3nm まで狭めるとペナルティが約 4.5dB まで拡大することが確認できた。また、本システムのロスバジェットが約 23dB であり、Q 値が 7 のときの受信パワーは -18dBm より小さい必要があり、波長間隔 3nm ではペナルティが大きく実現できないため、波長間隔 5nm までが許容範囲であると判断した。

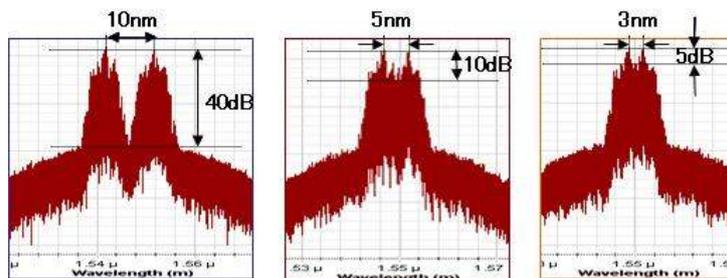


図 4.1.4 波長間隔を変化させたときのスペクトル波形の変化 (8ch)

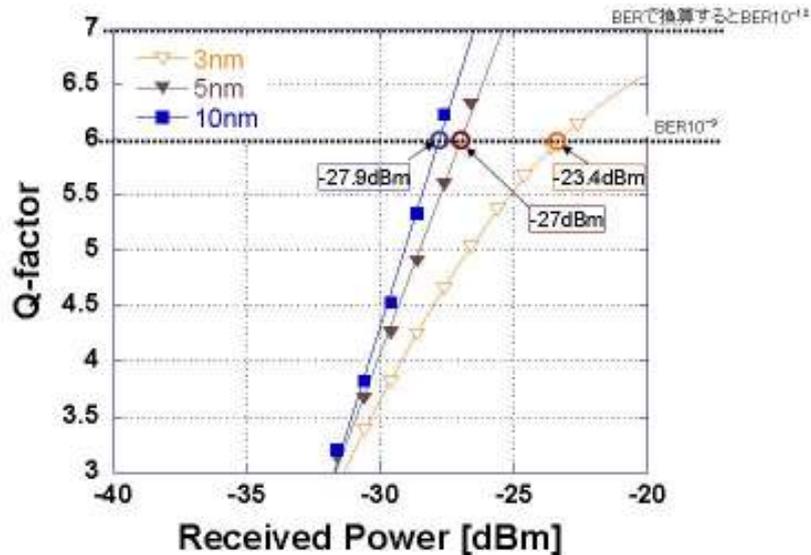


図 4.1.5 波長間隔を変化させたときの受信波形の Q 値 (8ch)

4-1-4 位相制御の改良

前年度に検討した光信号モニターによる光 MUX の隣接チャネル間遅延制御方式について、光遅延量の精度をあげることにより、光入力として光符号化後の光パルス列を用いた場合にも動作するように、光遅延時間のフィードバック制御系を構築した。一例として、2ch の制御系を図 4.1.6 に示す。パルス発生、データ変調後に光符号化された信号は、光遅延器 (T1 お呼び T2) を介して多重される。多重された信号は、分岐され、一方は OTDM/OCDM 装置の出力となり、他方は制御系の光強度変調器へ送られる。光変調器は、基準クロックである 10GHz の信号と、差周波である 0.25GHz の信号のミキシングにより得られたサンプリング周波数 9.75GHz の信号により駆動される。強度変調された信号は、PD によって光電気変換され、フィルタリングにより 0.25GHz の信号だけがパワーモニタリングされる。このパワーモニタリングされた信号強度に応じて、T1 と T2 の光遅延量の調整を行うことで、フィードバックを行う。図 4.1.7 に OTDM/OCDM 装置の出力波形を、図 4.1.8 に PD からの出力信号を RF スペクトルで測定した波形を示す。図 4.1.7(a)~(d) のように、T1 と T2 の光遅延量の調整を行うことにより、2ch 多重した波形はそれぞれ 40GHz (25ps) の TDM スロットへ配置される。それぞれの配置の状態に応じて、図 4.1.8(a)~(d) に示すように、RF スペクトル波形が変化し、それに伴って 0.25GHz の信号強度が変化する。図 4.1.9 に 2ch の遅延差 (T1-T2) に対する 0.25GHz のピークパワーの変化を示す。それぞれのチャネルの信号は、10Gbps の信号が 1 スロット (25ps) に光符号化されているため、100ps の繰り返しで重なる。ピークパワーが最小値となる点が 2ch の信号が等間隔に配置された点であり、この点を基準としてフィードバックを行うことにより、光 MUX の隣接チャネル間遅延制御を自動的に行うことができる。図 4.1.9 に示すように、この制御は 0.1ps の精度による動作が可能であり、600Gbps (パルス幅≒1.6ps) の短パルスのスロット配置が実現できた。

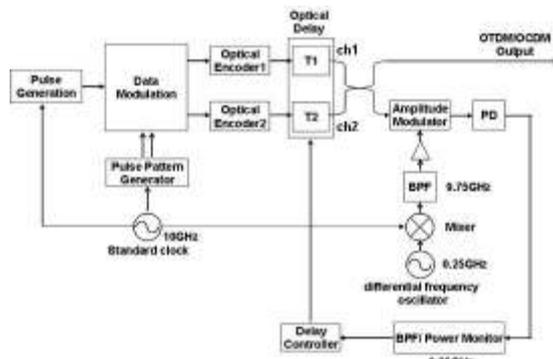


図 4. 1. 6 隣接チャネル間遅延制御方式の光遅延時間フィードバック制御系

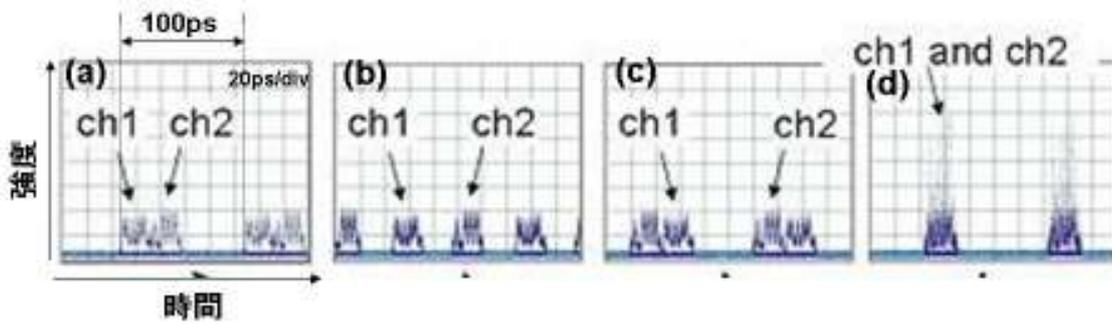


図 4. 1. 7 OTDM/OCDM 装置の出力波形

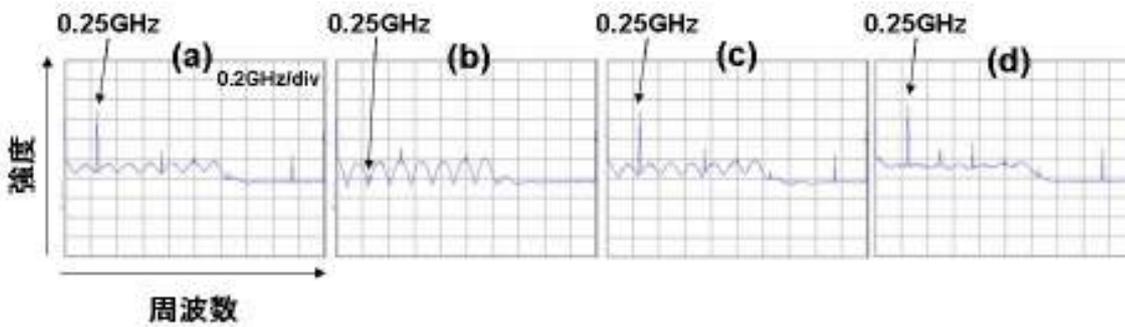


図 4. 1. 8 PD からの出力信号を RF スペクトルで測定した波形

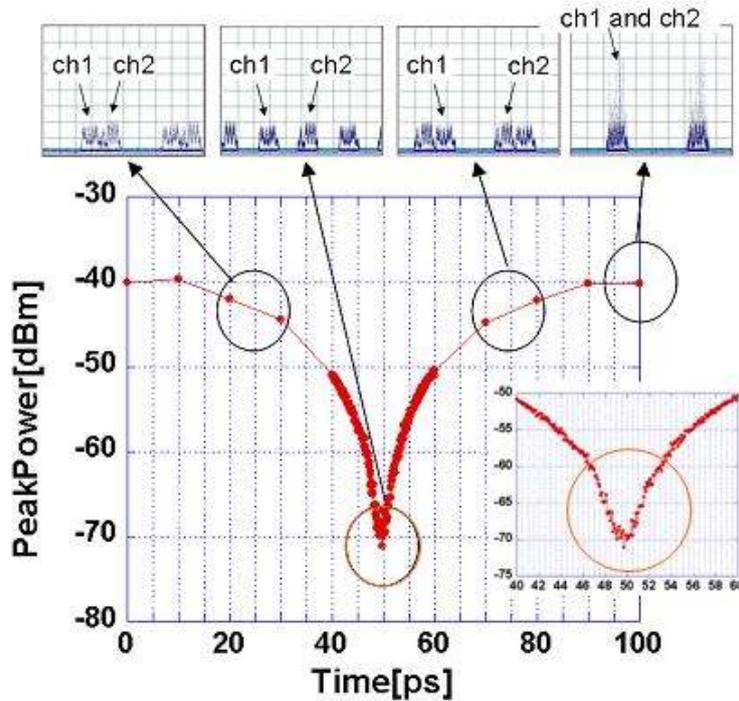


図 4.1.9 2ch の遅延差に対する 0.25GHz のピークパワーの変化

4-1-5 16 ch システムの実証

4-1-5-1 16 ch システムの構成

図 4.1.10 に 16ch システムの構成を示す。下りの信号は光符号化された 10Gbps の信号を 40GHz の TDM グリッドに 4ch-OTDM し、4WDM することで 160Gbps とする。また光符号化されているため、OCDM を行うことで、さらに多重するチャンネル数を拡大することが可能となる。上りの信号は、既存の GE-PON と同様の方式を用いてトータル 1Gbps のシステムとする。GE-PON の OLT から GE-PON の ONU へタイミング制御信号 (OAM) が出力された後、ONU は OLT へ上りの信号を送出する。このような既存システムを流用するためには、上りの信号と下りの信号とを L2-SW で切替できるかどうかは課題の一つであり、ギガビットイーサおよびファーストイーサのインタフェースを有する L2-SW を用いた評価の結果、L2-SW による上り下り信号のポート切替は可能であることを確認した。

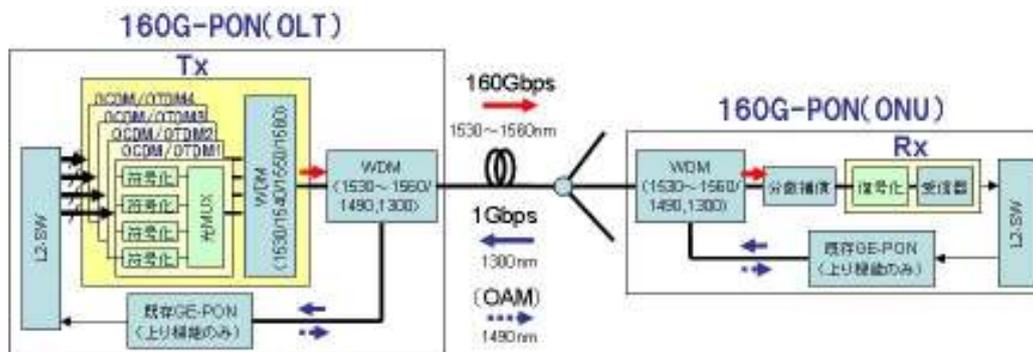


図 4.1.10 16ch システムの構成

4-1-5-2 16 ch システムの最小プロトタイプの開発

16ch システム送受信装置の最小プロトタイプを作製した。図 4.1.11 に構成を、図 4.1.12 に概観を示す。送信機 (Tx) は、波長間隔 10nm のファイバリングレーザ光源 4 台、4 台の EA 変調器および変調器ドライバを備えたデータ変調装置 4 台、符号の異なる 4 種類の光符

号器と光符号化されたそれぞれの信号の遅延量を調整する機能を備えた OCDM/OTDM 装置 4 台と 4 種の波長フィルタと合波器を備えた WDM 装置により構成される。受信機 (Rx) は、光復号器、クロック抽出器、時間ゲート処理用の光変調器、クロック信号およびデータ信号を再生するための 2R レシーバにより構成される。分散補償部は波長フィルタを有し、復号器に対応する波長成分だけに対し分散補償を行う。分散補償部と光復号器は、パワーロスを補償するための光アンプを有する。

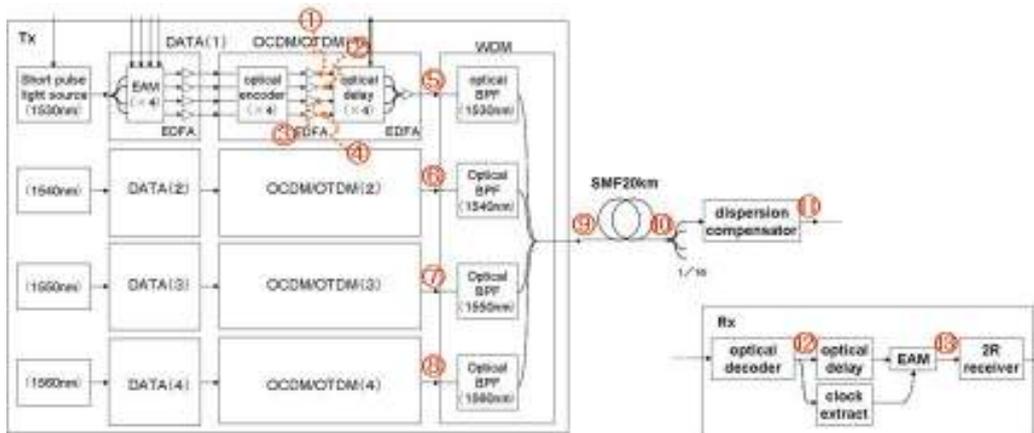


図 4. 1. 11 最小プロトタイプの詳細

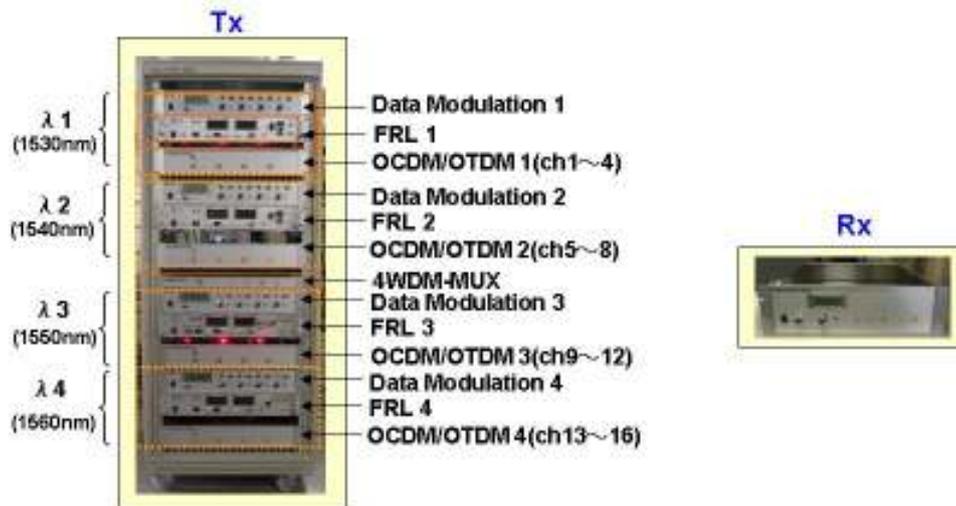


図 4. 1. 12 最小プロトタイプの概観

4-1-5-3 SMF20km 伝送実験

16ch システム送受信装置の最小プロトタイプの動作確認のため、SMF20km を用いた伝送実験を行った。図 4. 1. 13 に実験系を示す。実験に用いた SMF の分散および分散スロープはそれぞれ、 17.37ps/nm/km 、 $0.0625\text{ps/nm}^2/\text{km}$ であり、これを補償するために分散補償 -347.27ps/nm 、分散スロープ -1.12ps/nm^2 の DCF (1550nm) を用いた。光源波長の違いにより生じる分散補償後のパルス幅の変化は、光符号器に調整用の光ファイバを挿入することにより補償した。16ch すべてについて伝送評価を行うため、チャンネルごとに Rx 内部の光復号器の取替えを行い、EA 変調器後に挿入した光可変アッテネータ後のパワーに対するエラーレートを測定した。

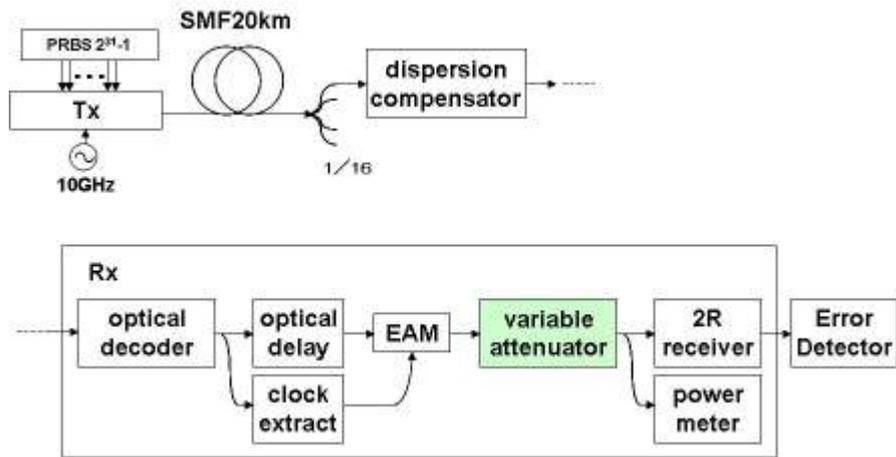


図 4. 1. 13 伝送実験系

図 4. 1. 14 に Tx 内部の各測定ポイントにおける時間波形を示す。①～④は各波長に対する符号化波形、⑤～⑧は各波長における OTDM 波形である。⑤～⑧の波形が示すとおり、光遅延時間フィードバック制御により、いずれの波長においても正確な隣接チャンネル間遅延制御が実現できることが確認できた。図 4. 1. 15 に 16ch 多重された信号の時間波形を示す。⑨は伝送前、⑩は伝送後である。本システムでは短パルスを用いているため、分散補償を行わない状態では、波形が大きく劣化してしまうことが確認できた。図 4. 1. 16 に分散補償後⑪の時間波形を示す。各波長に応じた分散補償を行うことによって、波形が再生されていることが確認できた。図 4. 1. 17 に光復号化後⑫の時間波形を、図 4. 1. 18 に時間ゲーティング処理後⑬の時間波形を示す。図 4. 1. 17 の波形から、16ch すべての復号化動作が正確に行われていることが確認され、いずれの場合にもクロック抽出が可能であった。図 4. 1. 18 に示すように、16ch すべてにおいてクリアなアイダイアグラムが得られることが確認できた。

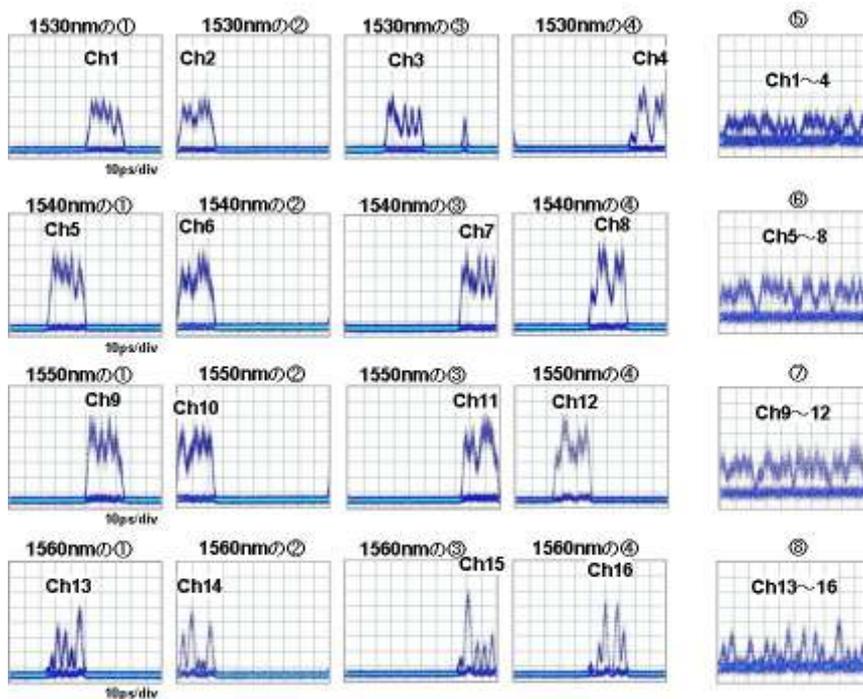


図 4. 1. 14 Tx 内部の各測定ポイントにおける時間波形
(①～④各波長に対する符号化波形、⑤～⑧各波長における OTDM 波形)

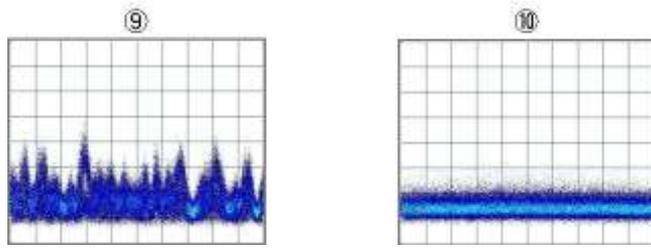


図 4.1.15 16ch 多重された信号の時間波形 (⑨伝送前、⑩伝送後)

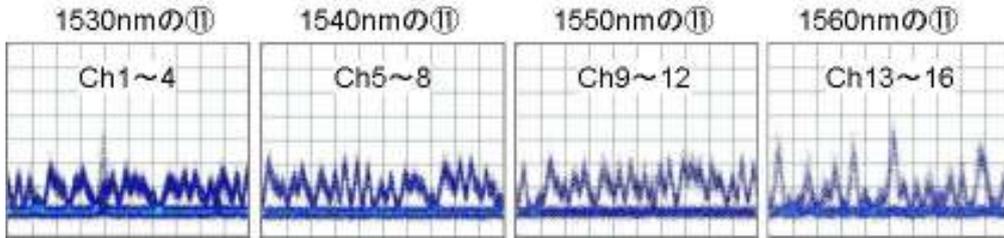


図 4.1.16 分散補償後の時間波形

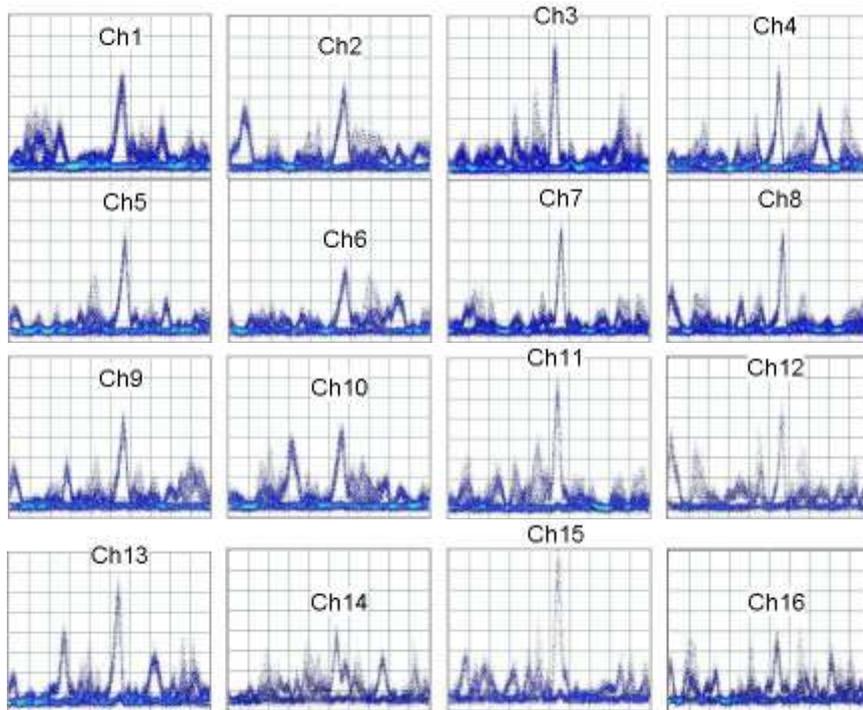


図 4.1.17 光復号化後⑫の時間波形

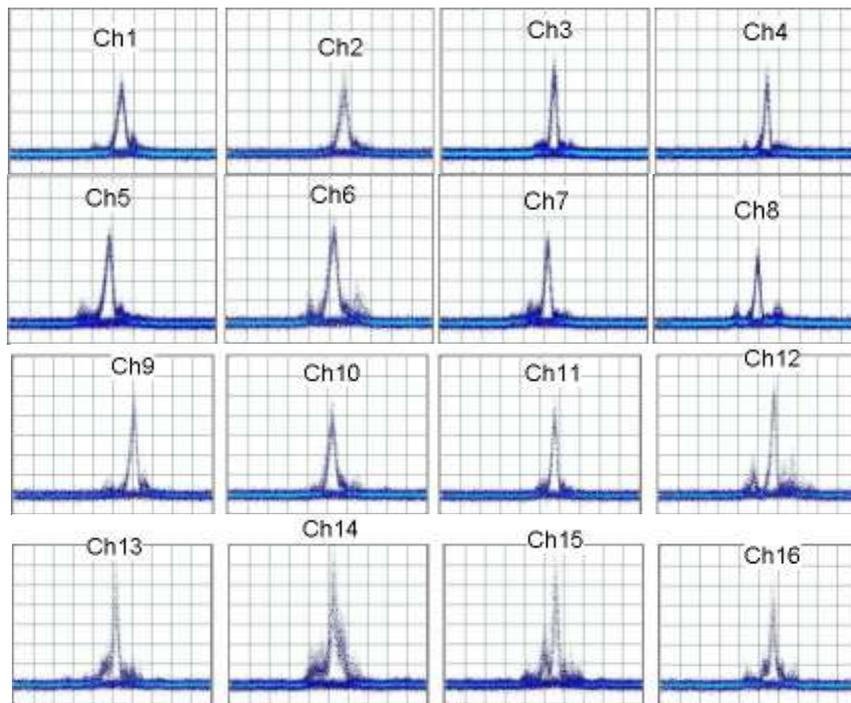


図 4.1.18 時間ゲーティング処理後⑬の時間波形

図 4.1.19 に 16ch の BER 測定結果を示す。光符号器/復号器の相関特性に応じて様々な BER 測定結果が得られているが、いずれの場合も 10^{-9} をクリアしていることが確認できた。また、本システムの Tx 出力パワーは +9dBm であり、いずれのチャネルの受信パワーも -15dBm 以下であることから、本システムはロスバジェット 23dB 以上がクリアできることが確認できた。

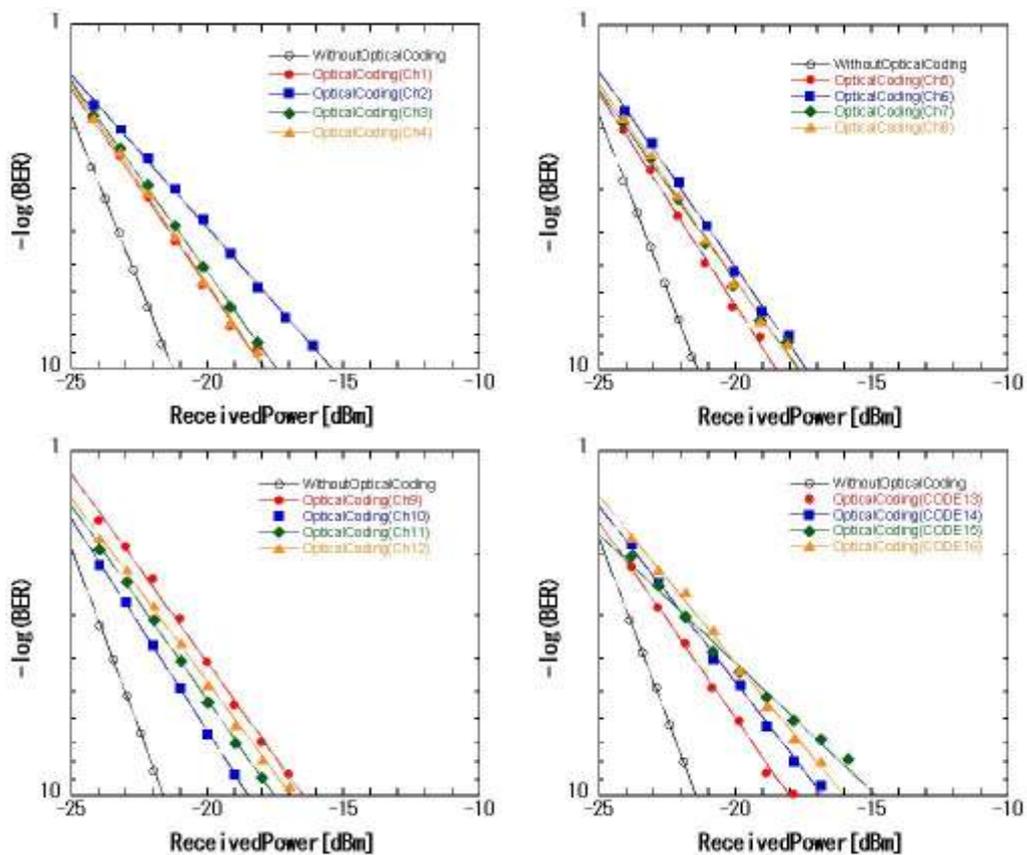


図 4.1.19 BER 測定結果

4-1-6 OCDMによる多重チャネル数増大の検討

同一の TDM スロットに同一波長で異なる符号の信号を多重する OCDM を行うことにより、波長資源を有効に利用することが可能である。これにより、一波長で多重可能なチャネル数の増大が実現できる。しかし、本システムでは、光符号長が短いために MAI ノイズの影響が大きく、また、同一波長成分の符号多重によるビートノイズの影響を大きく受けるため、OCDM を実現するためにはこれらのノイズの影響を緩和する必要がある。そこで、本システムでは、隣接チャネル間遅延制御方式の光遅延時間フィードバック制御方式を応用して、多重される 2 つの符号化チップパルス列間でチップパルスの位置を正確にそろえる(チップパルス間同期)方法を検討した。これにより、ビートノイズや MAI ノイズの影響を最小限におさえることで、同一の TDM スロットに 2ch の OCDM を実現した。

4-1-6-1 チップパルス間同期

図 4.1.9 に示したように、0.25GHz のピークパワーが極大値をとるポイントが、光符号化された 2ch の信号間のチップパルス間同期が確立された状態である。しかし、この極大値をとるポイントは、図 4.1.9 に示すように、正確な位置の判別が難しい。そこで、まず、0.25GHz のピークパワーが極小値をとるポイントを確認し、次に、2ch の信号間に基準クロックの 2 倍の値に相当する遅延量を与える(基準クロック 10GHz ならば 50ps) ことでチップパルス間同期を行う方法を検討した。図 4.1.20 にチップパルス間同期により OCDM した信号の時間波形を、(a)実測結果、(b)シミュレーション結果についてそれぞれ示す。これらを比較すると、相似した波形が得られているため、正確なチップパルス間同期が実現できていると判断した。

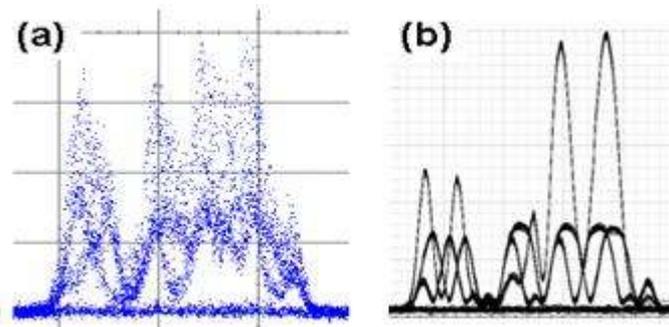


図 4.1.20 チップパルス間同期により OCDM した信号の時間波形
(a)実測 (b)シミュレーション

図 4.1.21 に復号化後の時間波形を示す。(a)、(b)はそれぞれ ch1 の実測結果とシミュレーション結果であり、(c)、(d)は ch2 の結果である。いずれのチャネルの場合も、実測結果とシミュレーション結果で相似した波形が得られており、本方式によるチップパルス間同期は有効であることが確認できた。

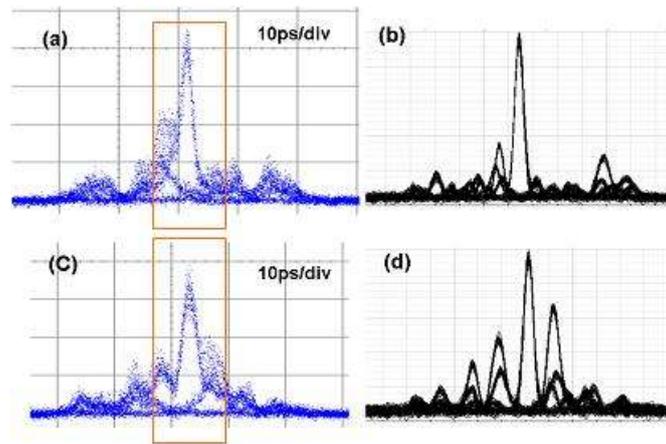


図 4. 1. 21 復号化後の時間波形 (a) ch1-実測 (b) ch1-シミュレーション
(c) ch2-実測 (d) ch2-シミュレーション

4-1-6-2 16ch システムの最小プロトタイプを用いた 20km 伝送実験

16ch システム送受信装置の最小プロトタイプを用いて、チップパルス間同期を行った OCDM 信号による 20km 伝送実験を行った。図 4. 1. 22 にチップパルス間同期により OCDM された信号の時間波形を示す。同一波長で異なる光符号を有する ch1 と ch3、ch2 と ch4 をそれぞれ同一スロットに多重した。(これにより生じる空のスロットを利用することで、将来的に波長利用効率を上げることが可能となる。)

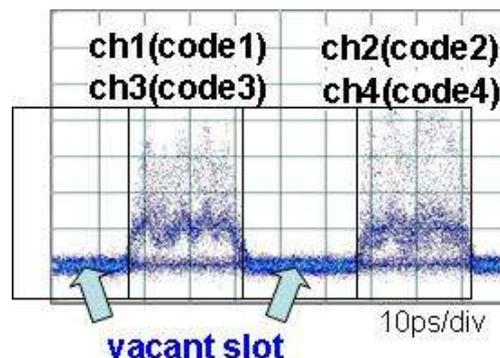


図 4. 1. 22 プロトタイプを用いて OCDM された信号の時間波形

図 4. 1. 23 に 16ch 多重 (2ch-OCDM×2ch-OTDM×4WDM) された信号の (a) 伝送前、(b) 伝送後、(c) 分散補償後の各ポイントにおける時間波形を示す。図 4. 1. 15 と図 4. 1. 16 に示した 4ch-OTDM×4WDM の場合と同様に、伝送ファイバによる分散を補償することで、WDM 前の時間波形が再現されることが確認できた。

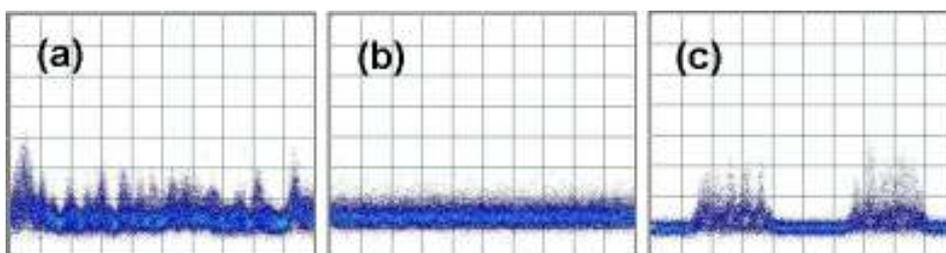


図 4. 1. 23 16ch 多重された信号の時間波形
(a) 伝送前、(b) 伝送後、(c) 分散補償後

図 4. 1. 24 に復号後の時間波形を ch1 と ch3 についてそれぞれ示す。ビートノイズの影響に

よる強度の揺らぎが生じているが、いずれの場合もクリアなアイダイアグラムが得られていることが確認できた。図 4. 1. 25 に再生されたクロック波形を示す。いずれの場合も安定したクロック抽出が可能であることが確認できた。図 4. 1. 26 に時間ゲート処理後の時間波形を示す。抽出されたクロックが安定しているため、正確な時間ゲート処理が行われていることが確認できた。

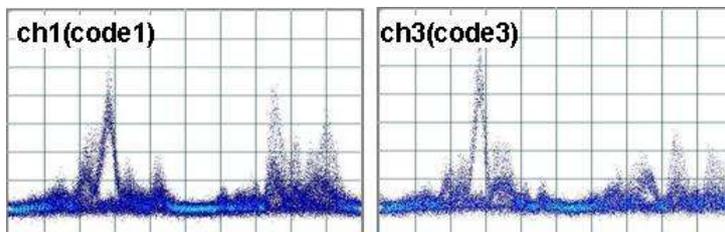


図 4. 1. 24 復号化後の時間波形

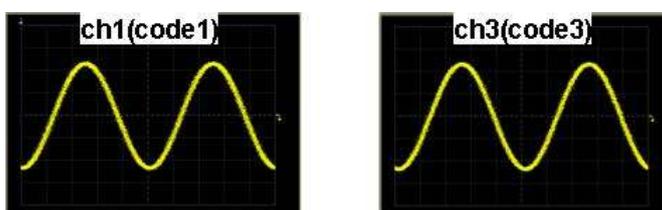


図 4. 1. 25 再生されたクロック波形

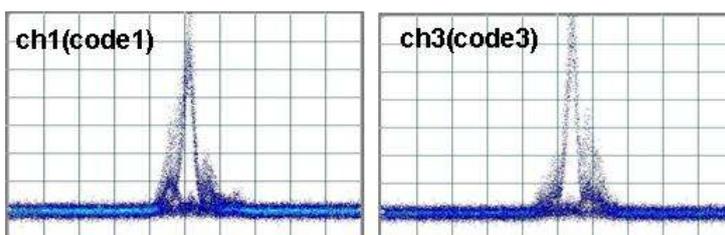


図 4. 1. 26 時間ゲート処理後の時間波形

図 4. 1. 27 に BER 測定結果を示す。図 4. 1. 19 の結果と同様に、光符号/復号動作によるペナルティが生じているが、OCDM による大きな劣化はなく、エラーフリー伝送が可能であることが確認できた。

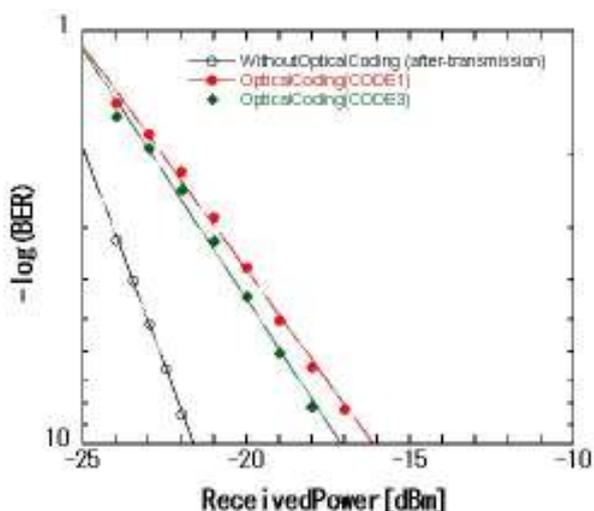


図 4. 1. 27 BER 測定結果

4-2 総括

以下に成果を示す。

- ・隣接波長からのクロストークの影響を確認するため、モジュールの波長依存性を加味した分散設計/SN設計（シミュレーションモデルの作成）を行った。シミュレーションの結果から、波長多重なしの場合に対するパワーペナルティは、2波長（8ch）多重のとき1.1dB、3波長（12ch）多重のとき1.0dB、4波長（16ch）多重のとき0.4dBといずれの場合にも小さいことが確認できた。また、16ch多重の場合でも、ロスバジェット23dBは十分クリアできる値であり、設計値に問題がないことが確認できた。
- ・波長利用効率の改善を検討するために、隣接する波長間隔を変化させたときのシミュレーションを行った結果、波長間隔5nmまでが許容範囲であることが確認できた。
- ・光遅延時間のフィードバック制御系を構築し、光MUXの隣接チャンネル間遅延制御の自動化を行った。その結果、光MUXの隣接チャンネル間遅延制御は0.1psの精度による動作が可能であり、600Gcps（パルス幅 \approx 1.6ps）の短パルスのスロット配置が実現できた。
- ・16chシステム送受信装置（4ch-OpticalCoded TDM \times 4WDM）の最小プロトタイプを作製し、SMF20kmを用いた伝送実験を行った。BER測定結果から、16chいずれの場合も 10^{-9} をクリアしており、ロスバジェット23dB以上がクリアできることが確認できた。
- ・隣接チャンネル間遅延制御方式の光遅延時間フィードバック制御方式を応用して、チップパルス間同期によるOCDMを実現した。16ch多重（2ch-OCDM \times 2ch-TDM \times 4WDM）された信号のSMF20kmを用いた伝送実験におけるBER測定結果から、OCDMによる大きな劣化はなく、エラーフリー伝送が可能であることが確認できた。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- [1] (学会発表) 辰巳大祐、守友連一、和田尚也、大柴小枝子、「SSFBG を用いた光位相信号ラベル方式における波長およびパルス幅依存性の実験検討」、電子情報通信学会 2005 春 : B-10-79
- [2] (学会発表) 辰巳大祐、小林秀幸、佐々木健介、大柴小枝子、「モードロックレーザの縦モード変調を用いた光符号ラベル認識に関する検討」、電子情報通信学会 2005 秋 : B-10-37
- [3] (学会発表) 辰巳大祐、山元梨紗子、大柴小枝子、「ヘッダーラベル間相互接続が可能な光ラベルネットワークの検討」、電子情報通信学会 2006 春 : B-12-34
- [4] (学会発表) 辰巳大祐、小林秀幸、佐々木健介、大柴小枝子、「スペクトル時間変調方式を用いた光符号ラベル生成に関する検討」、電子情報通信学会技術研究報告 : PN2005-62
- [5] (学会発表) 大柴小枝子、佐々木健介、小林秀幸、「FBG 符号器を用いた光符号ラベル生成に関する検討」、電子情報通信学会技術研究報告 : OFT 研究会 2006 年 5 月
- [6] (国際会議) D. Tatsumi and S. Oshiba, "Spectrum-time Modulation a new way for Optical Label Recognition by using Longitudinal Modes of the MLLD", Proceedings of CPT2006 J-3
- [7] (論文) 辰巳大祐、大柴小枝子、「モードロックレーザの縦モード変調を用いたひかり符号ラベル生成手法」、電子情報通信学会和文論文誌
- [8] (論文) R. Moritomo and S. Oshiba, "Simulation Study of Pulse Width Dependence in Time-Spreading OCDM System Using Phase En/Decoder", IEICE Transactions. Vol. E88-B No.10 p.3971, 2005
- [9] (国際会議) S. Oshiba, "Optical code generation using optical correlator based on super-structured fiber bragg grating", Joint Workshop on OCDMA and OPS, December, 2006
- [10] (国際会議) S. Oshiba, D. Tatsumi, H. Tamai, K. Sasaki, S. Kobayashi, Y. Ogawa, "Optical Code Generation Using Longitudinal Mode Modulation of 40Gbps Mode-Locked Laser Diode", Proceeding of the OFC-NFOEC, 2006
- [11] (学会発表) 岩村英志、辻弘美、玉井秀明、更科昌弘、湊直樹、鹿嶋正幸、上條健、「FBG 型光符号器を用いた OTDM 信号のチャネル識別に関する検討」、電子情報通信学会 2007 秋 : B-10-60
- [12] (国際会議) Hideyuki Iwamura, Hiromi Tsuji, Hideaki Tamai, Masahiro Sarashina, Naoki Minato, Masayuki Kashima, Takeshi Kamijoh, "A Study of 160Gbps PON System Using OTDM and OCDM Technologies", Proceeding of the OFC-NFOEC, 2008
- [13] (学会発表) 岩村英志・辻弘美・更科昌弘・玉井秀明・湊直樹・鹿嶋正幸・上條健、「OTDM/OCDM ハイブリッド技術を用いた高速 PON システムの検討」、電子情報通信学会研究報告会 : OCS2008-54
- [14] (国際会議) Hideyuki Iwamura, Hiromi Tsuji, Hideaki Tamai, Masahiro Sarashina, Naoki Minato, Masayuki Kashima, Takeshi Kamijoh, "Optical Code Division Multiplexing Technique for Ultra High Speed NGA Asymmetric PON System", Proceeding of the OFC-NFOEC, 2009
- [15] (報道発表) プレスリリース、OKI web サイト、2009 年 3 月 24 日