

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏 名	寺師一輝	学籍番号	1831102
論 文 題 目	DPSK 信号に対する NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作		
要 旨	<p>近年、情報通信技術の急速な発展と普及に伴い、情報通信におけるトラフィック量は指数関数的に増加している。そのため、ネットワークの更なる高速大容量化が必要とされている。そこで、伝送損失が低く大容量伝送が可能な光ファイバ通信での全光信号処理技術や多重化技術が注目を集めている。</p> <p>現在は光信号から電気信号に変換後、電気信号処理を行い再び光信号に変換しているため、波長分割多重方式(WDM:Wavelength-Division Multiplexing)と電気領域で信号を多重化する時分割多重化方式(TDM:Time-Division Multiplexing)を利用しているが、将来的には光領域で信号を多重化する光時分割多重化方式(OTDM:Optical Time-Division Multiplexing)を用いた全光信号処理を行うことで、ボトルネックとなっていた光電変換の際の低速度化や消費駆動電力が大きいといった問題が解決されると考えられる。</p> <p>これにより、将来的には多重化技術と全光信号処理技術を用いた高速で大容量なフォトニックネットワークの実現が期待されている。</p> <p>技術として、多重化方式にそれぞれ適した波形があるが、WDM では信号波形として NRZ(Non-Return to Zero) 波形、OTDM では RZ (Return to Zero)波形を用いることが一般的であり、多重化方式を変換する際には波形変換を行う必要があるといえる。しかし、多様な多重化方式を用いるネットワークを構築する際には実験系が複雑になるという問題がある。そこで、本研究では WDM から OTDM への多重化方式変換と多重化方式変換を行う際に必要となる NRZ から RZ への波形変換の 2 つの信号処理に注目し、簡易な構成を目的に検証を行うこととした。</p> <p>本研究では DPSK(Differential Phase Shift Keying)信号に対して NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作を行った。結果として、符号誤り率測定で 1 つの OTDM 信号から多重分離した各単チャネルの計 2 チャネルからエラーフリーを達成した。また、同じ信号に対しての WDM-to-multi-OTDM 変換に対しても一括光信号処理動作の検証を行った。結果として、符号誤り率測定で 2 つの OTDM 信号から多重分離した各単チャネルの計 4 チャネルからエラーフリーを達成した。</p>		

令和元年度修士論文

DPSK 信号に対する NRZ-to-RZ 波形変換及び
WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作

電気通信大学 情報理工学研究科
情報・ネットワーク工学専攻 情報通信工学プログラム
学籍番号 1831102

氏名 寺師 一輝

指導教員 來住 直人 教授

副指導教員 松浦 基晴 教授

令和元年 1 月 27 日

概要

近年、情報通信技術の急速な発展と普及に伴い、情報通信におけるトラフィック量は指数関数的に増加している。そのため、ネットワークの更なる高速大容量化が必要とされている。そこで、伝送損失が低く大容量伝送が可能な光ファイバ通信での全光信号処理技術や多重化技術が注目を集めている。現在は光信号から電気信号に変換後、電気信号処理を行い再び光信号に変換しているため、波長分割多重方式 (WDM:Wavelength Division Multiplexing) と電気領域で信号を多重化する時分割多重化方式 (TDM:Time Division Multiplexing) を利用しているが、将来的には光領域で信号を多重化する光時分割多重化方式 (OTDM:Optical Time Division Multiplexing) を用いた全光信号処理を行うことで、ボトルネックとなっていた光電変換の際の低速度化や消費駆動電力が大きいといった問題が解決されると考えられる。これにより、将来的には多重化技術と全光信号処理技術を用いた高速で大容量なフォトニックネットワークの実現が期待されている。

技術として、多重化方式にそれぞれ適した波形があるが、WDM では信号波形として NRZ(Non-Return to Zero) 波形、OTDM では RZ (Return to Zero) 波形を用いることが一般的であり、多重化方式を変換する際には波形変換を行う必要があるといえる。しかし、多様な多重化方式を用いるネットワークを構築するには実験系が複雑になるという問題がある。そこで、本研究では WDM から OTDM への多重化方式変換と多重化方式変換を行う際に必要となる NRZ から RZ への波形変換の二つの信号処理に注目し、簡易な構成を目的に検証を行うこととした。

同じ目的で実験構成等を参考にさせて戴いた先行研究 [1] では、OOK(On-Off Keying) 信号に対して NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作検証を行い、符号誤り率 (BER:Bit Error Rate) 測定でエラーフリーを得られていた。また、同じ信号に対しての WDM-to-multi-OTDM 変換に対しては検証を行っているものの、符号誤り率の測定までは行えておらず、事実上のエラーフリーを得られてはいなかった。そこで、本研究では DPSK(Differential Phase Shift Keying) 信号に対して NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作を行った。結果として、符号誤り率測定で1つの OTDM 信号から多重分離した各単チャンネルの計 2 チャンネルからエラーフリーを達成した。また、同じ信号に対しての WDM-to-multi-OTDM 変換に対しても一括光信号処理動作の検証を行った。結果として、符号誤り率測定で二つの OTDM 信号から多重分離した各単チャンネルの計 4 チャンネルからエラーフリーを達成した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的と論文の構成	2
第 2 章	本研究に用いる基礎技術	3
2.1	変調方式と波形方式	3
2.2	多重化方式	6
2.3	四光波混合 (FWM:Four Wave Mixing)	8
2.4	四光波混合を用いた多重化変換	10
2.5	四光波混合を用いた多重分離	12
第 3 章	NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作	13
3.1	実験構成	13
3.2	実験結果	14
第 4 章	NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-multi-OTDM 変換の一括光信号処理動作	20
4.1	実験構成	20
4.2	実験結果	21
第 5 章	考察	28
5.1	信号品質劣化の原因	28
5.2	OOK 信号を用いた先行研究と DPSK 信号を用いた本研究の比較	29
5.3	今後に向けての提案手法	29
第 6 章	結論	30
	謝辞	31
	参考文献	32

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、動画のストリーミング配信やスマートデバイス等の普及に伴い、インターネット上のトラフィック量は急激に増加している。また、あらゆるモノがネットワークに接続される IoT(Internet of Things) の本格的な実現が期待されていることから、トラフィック量の急激な上昇は今後も続くと予想されている。更に、今後は第5世代移動通信システム、通称 5G と呼ばれる移動通信システムの本格的な運用が始まることから、よりリアルタイムな通信が求められる自動運転技術などが台頭してくると考えられる。これに対応できる、現在よりも更に高速かつ大容量の通信ネットワークの整備が昨今の早急の課題となっている。現在のインターネットのバックボーンである基幹ネットワークでは、電気信号の代わりに光を用いる事で高速かつ大容量の通信を実現しているが、信号処理の際に光信号を一度電気信号に変換し、電気信号処理を行った後に再び光信号に戻していることから、通信速度の高速化や消費電力の抑制に限界があるという問題があった。この問題を解決するため、光信号を電気信号に変換することなく全てを光信号のまま信号処理を行う、全光信号処理の研究が進められている。

また、光を用いた大容量通信の実現のために、一本の光ファイバで複数の信号を伝送する多重伝送技術についても積極的に研究されている。WDM は複数の異なる波長の光に情報を変調して信号をつくり、波長軸上で信号が重ならないように配置することにより多重化を実現している。一方、OTDM は同一波長の複数の信号を、時間軸上でタイミングが重ならないように配置することにより多重化を実現している。WDM は既に実用化されており、OTDM は実用化に向けて現在積極的に研究が進められている最中である。将来的に様々なネットワークへこれらの異なる多重化方式が用いられた場合、信号を伝送する際に WDM と OTDM 間で多重化方式の変換及び NRZ と RZ の波形変換が必要となる。しかし、これらの信号処理を行うためには構成が複雑になってしまうという問題があった。そこで、本研究では簡易的な構成で多重化方式変換及び波形変換を一括で行う方法を提案した。

1.2 研究の目的と論文の構成

現在、WDMは波長分散に耐性のあるNRZ信号波形が広く利用されており、OTDMはタイムスロットを占有しないRZ信号波形が主に用いられている。そのため、WDM信号をOTDM信号へと変換する場合には、WDM-to-OTDMの多重化方式の変換に加えてNRZ-to-RZの波形変換を行う必要がある。そこで、本研究では多重化方式変換及び波形変換の信号処理を一括で行う方法を考えた。先行研究[1]では、OOK信号のWDM-to-OTDM変換における信号品質評価においてはエラーフリーを達成していた。しかし、DPSK信号を用いたWDM-to-OTDM変換に関しては未検証であり、他のWDM-to-OTDM変換に関する先行研究[2]でもエラーフリーを得られていない。また、本研究では高非線形ファイバー(HNLF:Highly NonLinear Fiber)によるNRZ-to-RZ波形変換を行うが、NRZ-to-RZ波形変換に関しては様々な手法による研究がなされており、SOAを用いた研究[3][4]や、ファブリペローレーザーダイオードの注入による研究[5]、マッハツェンダー干渉計を用いた研究[6]手法などもある。

本研究においてはDPSK信号に対するWDM-to-OTDM変換及びNRZ-to-RZ波形変換の一括光信号処理動作を行い、符号誤り率測定においてエラーフリーを達成することを第一の目標、DPSK信号を用いてWDM-to-multi-OTDM変換を行い、符号誤り率測定においてエラーフリーを達成することを第二の目標とし、低コストかつ簡易的な構成での波形変換及び多重化変換の一括光信号処理動作を目的とする。

本論文の構成は次の通りである。第1章で研究の背景、目的及び本論文の構成について述べる。第2章では本研究で用いる多重化技術と変調方式の概要について、非線形光学現象及びそれを用いた一括光信号処理動作の原理について紹介する。第3章ではWDM-to-OTDM変換の実験構成及び実験結果、第4章ではWDM-to-multi-OTDM変換の実験構成及び実験結果を示し、第5章では実験結果から得られた考察を示した。最後の第6章は結論である。

第2章 本研究に用いる基礎技術

2.1 変調方式と波形方式

ここでは現在の光ネットワークにおいて主に用いられている変調方式の内、最も基本形となる強度変調方式と本研究で用いる差動位相偏移変調方式、加えてNRZとRZの波形方式について説明する。

強度変調 (OOK:On-Off-Keying)

強度変調とは、信号の0と1の情報を搬送波の振幅の強度として表現する変調方式である。以下に縦軸を強度、横軸を時間として図2.1にNRZ-OOKとRZ-OOKの概要を示した。OOK信号は情報が0の時は振幅が0となり、情報が1の時は振幅が一定値となる最もシンプルな変調方式となっている。

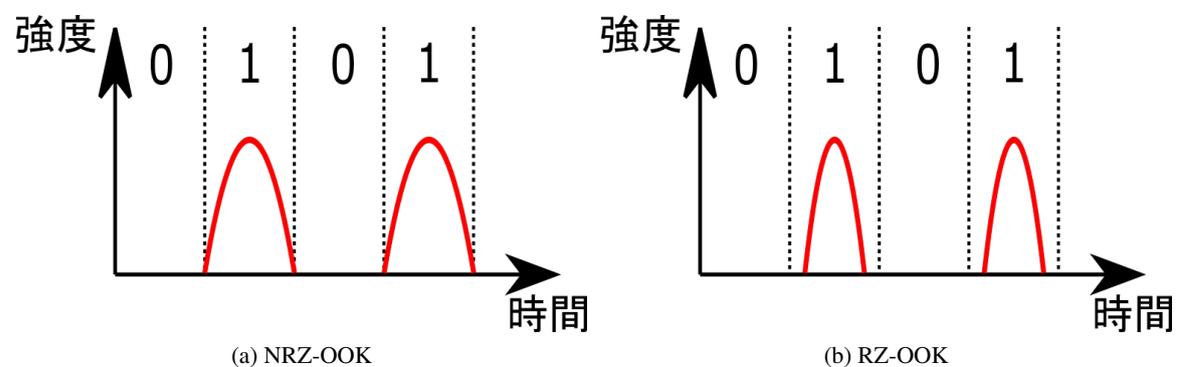


図 2.1: OOK 信号

差動位相偏移変調 (DPSK: Differential Phase Shift Keying)

差動位相偏移変調とは、一つ前に伝送された信号との位相差で情報を伝える変調方式である。以下に図 2.2 として NRZ-DPSK と RZ-DPSK の概要を示す。位相差が 0 の時は 0、位相差が π の時は 1 として伝送して、受信側では光信号を 1 ビット遅延して差動受光させることで位相差情報を 2 倍の振幅をもつ信号に変換する。これにより、強度変調より約 3dB 高い受信感度特性を得ることができる。また、DPSK 信号の特徴として従来の OOK 信号に比べて非線形光学効果への耐性に優れていること、RZ-DPSK 信号は NRZ-DPSK 信号より非線形光学効果への耐性が優れていることがあげられる [7]。

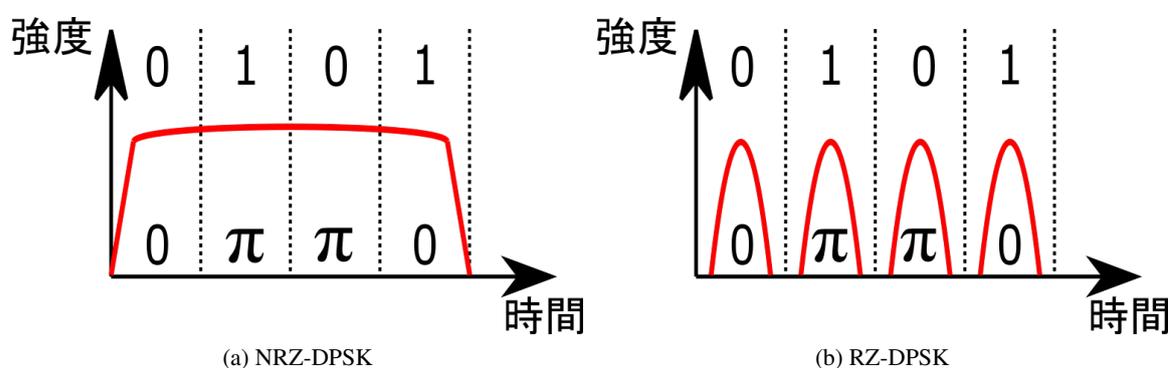


図 2.2: DPSK 信号

例えば位相が 0、 π 、 π 、0 と変化する場合、受信信号側で 1 ビット遅延させた信号と差をとると、最初は位相差が 0 より信号は 0、0 と π の位相差は π より信号は 1、 π と π の位相差は 0 より信号は 0、 π と 0 との位相差は π より信号は 1 となり、この場合は信号 0101 を伝送する。また、DPSK 信号は強度による変調とは異なるため NRZ-DPSK 信号では強度が変わらず一定であり、RZ-DPSK 信号ではパルス毎に 0 へと強度が戻る。

波形方式

NRZ(Non-Return to Zero) 方式とはビット毎に 0 に戻らない方式であり、特徴としては RZ(Return to Zero) 方式よりもパルス幅が広く、高調波成分が少なくなるという特徴がある。一方、RZ 方式とは 0 を基準として、ビット毎に 0 に戻る方式である [8]。

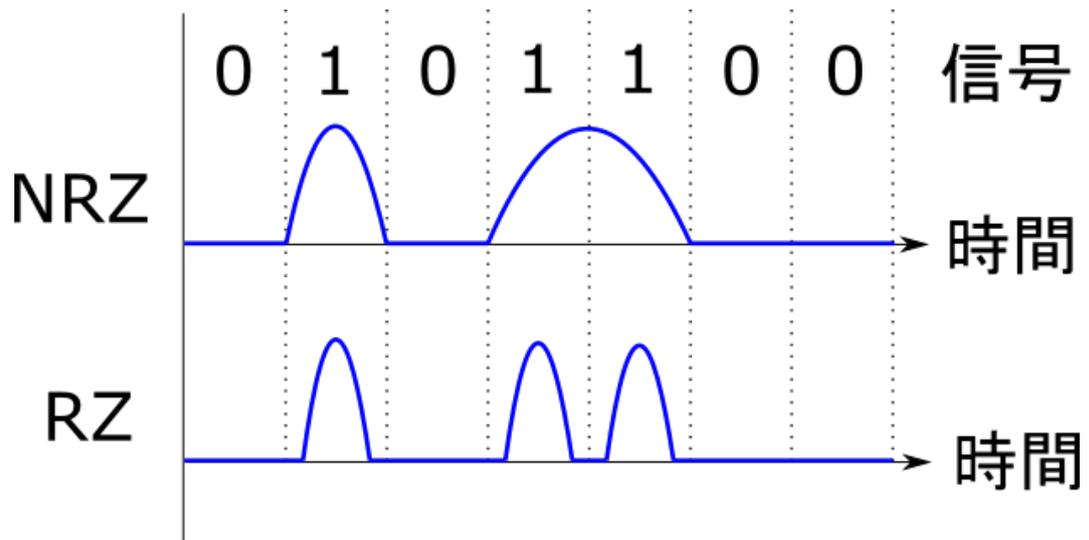


図 2.3: NRZ と RZ

2.2 多重化方式

現在、指数関数的に増加する通信トラフィック量の増加に対応するため、1本の光ファイバで大容量の信号を伝送させる多重伝送技術が利用されている。ここでは本研究で用いる二つの多重化方式について説明する。

波長分割多重化方式 (WDM: Wavelength-Division-Multiplexing)

光信号は波長の異なる光同士では互いに干渉せずに伝送することが可能である。この性質を用いることで、信号が波長軸上で重ならないように多重化を行っているのが波長分割多重化方式 (WDM) である。WDM の概要を以下に図 2.4 として示す。

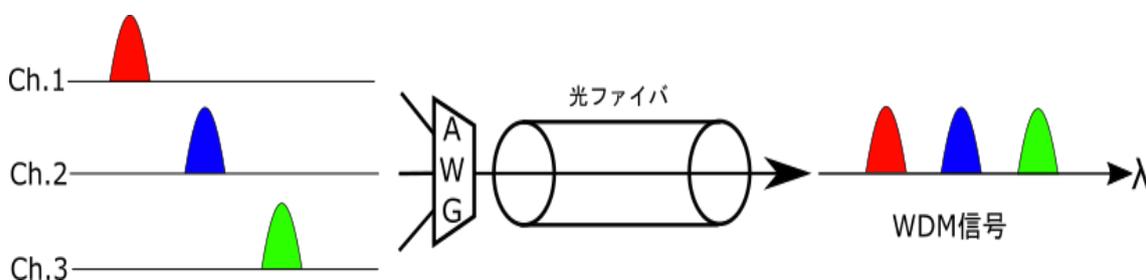


図 2.4: 波長分割多重方式

現在、WDM が利用されているネットワークとしては主要都市間を結ぶコアネットワーク、都道府県内の主要エリアを結ぶメトロネットワーク、各家庭や企業へ繋がるアクセスネットワークなど近距離から長距離までの幅広い大容量ネットワークに利用されている。

また、WDM は波長の間隔によって数種類に分類がされており、代表的な二種類について紹介する。一つ目は高密度波長分割多重 (DWDM: Dense-WDM) と呼び、信号の波長間隔の狭いもので必要な波長帯を切り取る際に高精度の AWG や BPF などの波長フィルタ、光増幅器 (EDFA: Erbium Doped optical Fiber Amplifier) を用意する必要があることからコストは掛かるが、より多くの波長帯の信号を一度に伝送できる。また、主に長距離伝送で用いられることから一度に多くの情報を送る必要があるコアネットワークで主に使用される。二つ目は粗波長分割多重 (CWDM: Coarse-WDM) と呼び、信号の波長間隔の広いもので必要な波長帯を切り取る際に高精度な機器は必要ないことからコストは抑えられるが、その分一波長が多くの帯域を占めてしまうことから一度に送れる信号も減ってしまう。また、主に光増幅器などは用いられず中距離伝送までで用いられることからメトロネットワークで主に使用される。最近では、DWDM デバイスの低コスト化を受けてメトロ、アクセスネットワークにも DWDM を適用するケースが増えている。[9]

光時分割多重化方式 (OTDM:Optical Time Division Multiplexing)

光信号のタイミングを時間軸上で調整して、各チャンネルの信号がひとつのタイムスロット内に収まるように多数の信号を伝送するのが光時分割多重化方式 (OTDM) である。OTDM の概要を以下に図 2.5 として示す。

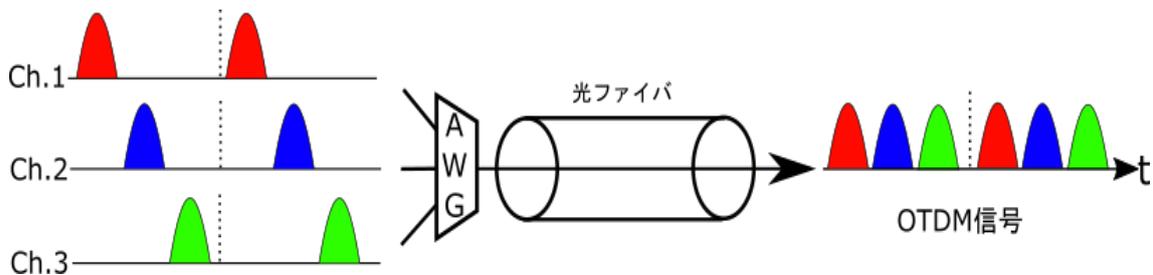


図 2.5: 光時分割多重化方式

現在は光信号を電気信号に変換して時間軸上でタイミングを調整後、再び光信号に戻す時分割多重化方式 (TDM) が主流だが、OTDM はこの TDM を光ネットワークに応用したもので、ボトルネックとなっている光電変換や電気信号処理が不要なため高速で大容量の通信が可能となるが、現在実用化の段階には至っておらず、日々研究が進められている。

OTDM に関しての他の先行研究においては、単一波長として最高の 1.28Tb/s,70km の OTDM 伝送実験 [10] や超高速光信号処理技術と WDM 技術を駆使した総容量 3Tb/s の伝送実験も報告されている [11]。また、Tb/s 以上の超高速な OTDM システムを構築する上では 300fs 以下の超短パルスが必要となり、短パルス発生に加えてパルス圧縮が必要となるが、最近ではスーパーコンティニューム発生を用いた超広帯域スペクトル発生法により、複数の波長で 300fs 秒程度の超短光パルス発生も可能となっている [12]。

2.3 四光波混合 (FWM:Four Wave Mixing)

四光波混合 (FWM) とは非線形光学現象の一つであり、二つ以上の異なる波長の高強度光を光ファイバに入射した際に、それらのどの波長とも一致しない波長にアイドラ光と呼ばれる新たな光が発生する現象のことである [13]。以下に四光波混合の概要を図 2.6 として示す。ここで f は周波数を表すものとする。

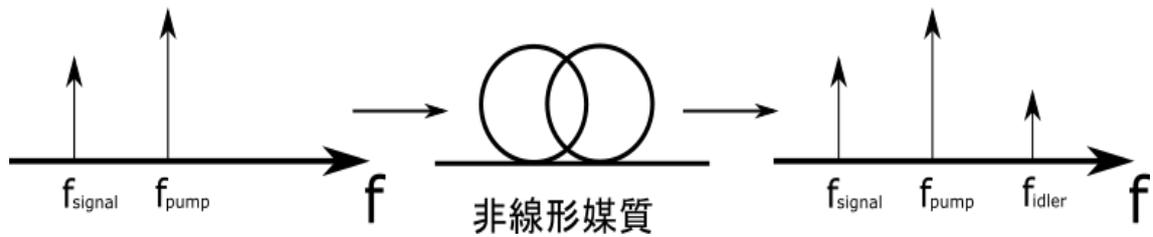


図 2.6: 四光波混合の概要

この四光波混合には大きく大別して、縮退四光波混合と非縮退四光波混合の二種類がある。以下に縮退四光波混合と非縮退四光波混合の概要図を図 2.7 として示す。

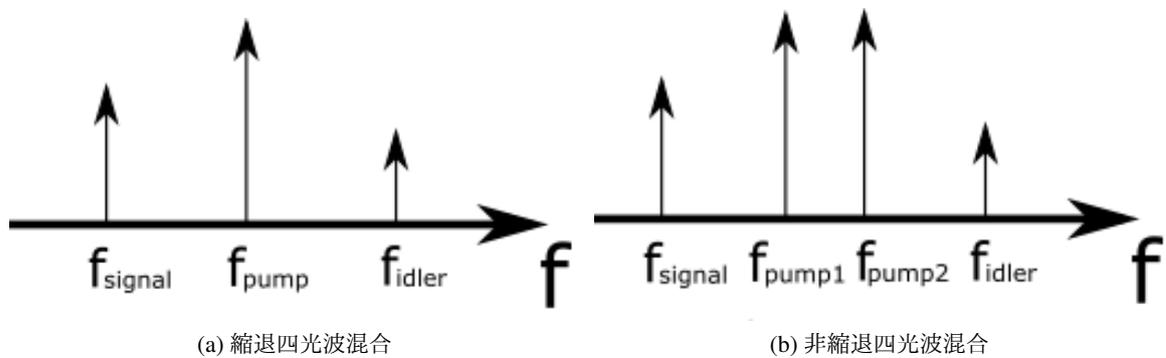


図 2.7: 四光波混合の種類

ここで、アイドラ光が発生する際の周波数の導出式をそれぞれ以下に示す。縮退四光波混合が起きる場合、以下の式でアイドラ光の周波数は導出される。

$$f_{\text{idler}} = 2f_{\text{pump}} - f_{\text{signal}} \quad (2.1)$$

非縮退四光波混合が起きる場合、以下の式でアイドラ光の周波数は導出される。

$$f_{\text{idler}} = f_{\text{pump1}} + f_{\text{pump2}} - f_{\text{signal}} \quad (2.2)$$

ここで、発生するアイドラ光の数を M 、入射する波長の数を N とすると発生するアイドラ光の数は以下の式で表される [13]。

$$M = \frac{N^2(N-1)}{2} \quad (2.3)$$

四光波混合は入射光強度が強いほど発生するアイドラ光の強度も強くなる。また、波長の異なる複数の光信号の位相整合条件が高いほど発生効率が高まり、零分散波長において発生効率が最大となる。しかし、発生効率が高い故に発生したアイドラ光が入力信号の周波数と一致する場合には、強度雑音として信号光に干渉して伝送特性を著しく劣化させてしまう。このことから、零分散波長付近で波長多重化した信号を伝送する際には四光波混合の影響を抑えるために波長間隔を不等間隔とすることが望ましい [12]。

2.4 四光波混合を用いた多重化変換

四光波混合を用いた WDM-to-OTDM 変換

WDM は波長軸上で波長の異なる複数の光信号を伝送する多重化方式であり、OTDM は同一波長の光信号を時間軸上でタイミング調整することで複数の光信号を伝送する多重化方式である。このことから、多重化変換である WDM-to-OTDM 変換を行う際には、複数の異なる波長を波長変換して同一波長へと合わせるための変換が必要になる。そのための手法の一つとして、今回は非線形光学効果の一つである四光波混合を用いた。以下に四光波混合を用いた二波長入力に対する WDM-to-OTDM 変換の原理図を示す。

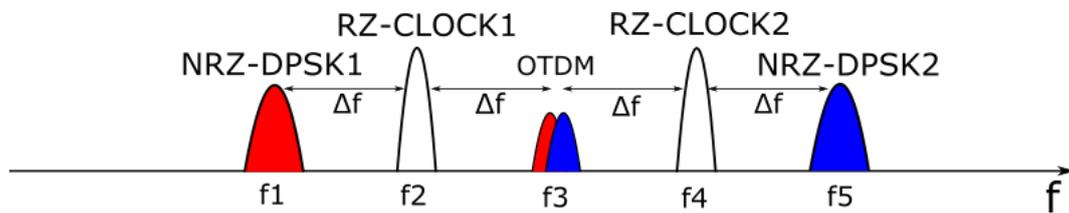


図 2.8: WDM-to-OTDM 変換の原理図

信号光である NRZ-DPSK1 と NRZ-DPSK2 の二波長と、励起光 (制御光) である RZ-CLOCK1 と RZ-CLOCK2 の二波長を光ファイバに入射した際に、NRZ-DPSK1 と RZ-CLOCK1、NRZ-DPSK2 と RZ-CLOCK2 を二組のペアとしてそれぞれ縮退四光波混合を発生させる。これにより、二つの信号光である WDM 信号を 1 つの OTDM 信号へと変換することが可能である。以下に生じるアイドラ光、今回の場合は OTDM 信号に当たる光信号の周波数を以下に示す。

$$f_3 = 2f_2 - f_1 \quad (2.4)$$

$$f_3 = 2f_4 - f_5 \quad (2.5)$$

この時、式 (2.4) は f_2 を励起光として f_1 の信号光のデータが f_3 にシフトし、式 (2.5) は f_4 を励起光として f_5 の信号光のデータが f_3 にシフトし、 f_3 が 2 チャンネルの情報を保持していることを表す。

四光波混合を用いた WDM-to-multi-OTDM 変換

次に二波長入力に対する WDM-to-multi-OTDM 変換の原理図を以下に示す。

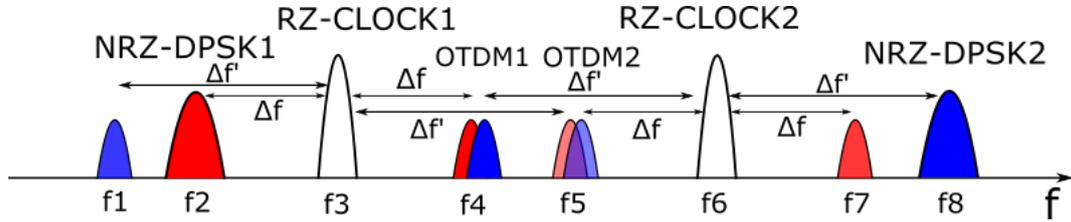


図 2.9: WDM-to-multi-OTDM 変換の原理図

NRZ-DPSK1 と RZ-CLOCK1、NRZ-DPSK2 と RZ-CLOCK2 を二組のペアとしてそれぞれ縮退四光波混合を起こすことで OTDM1 を発生させる。その際の周波数を以下に示す。

$$f_4 = 2f_3 - f_2 \quad (2.6)$$

$$f_5 = 2f_6 - f_8 \quad (2.7)$$

また、NRZ-DPSK2 と RZ-CLOCK1 と RZ-CLOCK2、NRZ-DPSK1 と RZ-CLOCK1 と RZ-CLOCK2 を二組のペアとして非縮退四光波混合を発生させることで f_1 と f_7 の一次のアイドラ光をそれぞれ発生させる。また、一次アイドラ光である f_1 と RZ-CLOCK1、一次アイドラ光である f_7 と RZ-CLOCK2 をそれぞれ二組のペアとしてそれぞれ縮退四光波混合を起こすことで二次のアイドラ光である OTDM2 を発生させる。その際の周波数を以下に示す。

$$f_1 = f_3 + f_6 - f_8 \quad (2.8)$$

$$f_7 = f_3 + f_6 - f_2 \quad (2.9)$$

$$f_5 = 2f_6 - f_7 \quad (2.10)$$

$$f_5 = 2f_3 - f_1 \quad (2.11)$$

2.5 四光波混合を用いた多重分離

各 10Gbps の光信号に対して、WDM-to-OTDM 変換を行うことで 20Gbps の OTDM 信号が生成されるが、符号誤り率を測定するためには多重分離を行い 10Gbps の単チャンネルごとの光信号へと多重分離を行う必要がある。今回は四光波混合を用いての多重分離を行う。以下に概要図を示す。

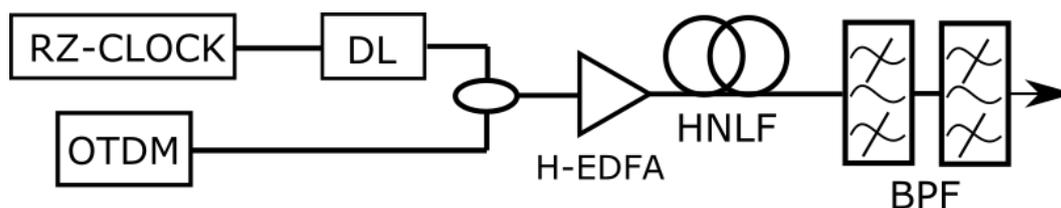


図 2.10: 多重分離の簡易系

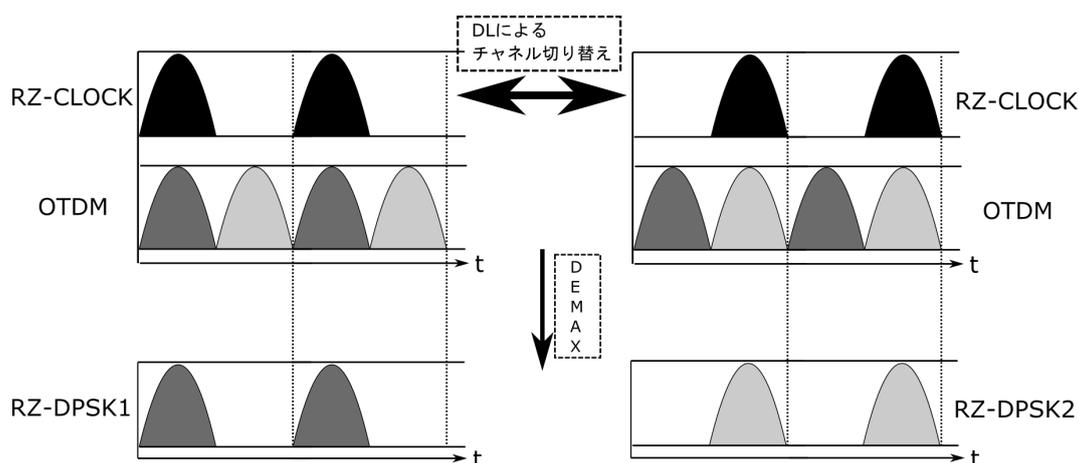


図 2.11: 多重分離の概要図

遅延線 (DL:Delay Line) を用いてタイミング調整が出来る RZ-CLOCK と OTDM 信号を合波し、高出力光増幅器 (H-EDFA:High power-Erbium Doped optical Fiber Amplifier) で増幅の後に HNLF に入射させ、四光波混合を起こす。そのままでは不要な信号が残っているので、バンドパスフィルタ (BPF:Band Pass Filter) を用いて必要な波形のみを取り出して DL のタイミング調整により、各チャンネル毎の多重分離が可能となる。

第3章 NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括光信号処理動作

3.1 実験構成

本研究の WDM-to-OTDM 変換における実験構成を以下に図 3.1 として示した。

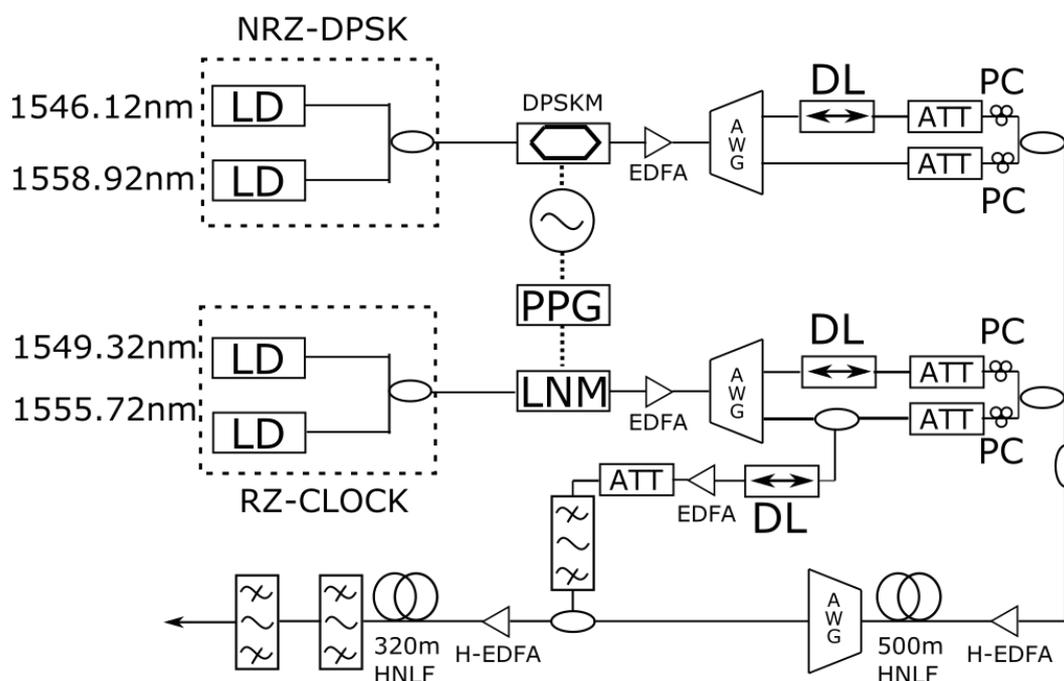


図 3.1: WDM-to-OTDM 変換における実験系

波長 1546.12nm と 1558.92nm の光信号を DPSK 変調した NRZ のデータ信号、波長 1549.32nm と 1555.72nm の光信号を LN 変調したものを RZ の CLOCK 信号としてそれぞれ用いた。波長多重化を行うために、AWG で各信号に分離を行い、DL でタイミングを、ATT で光の強度を調整し、適切な状態で各光信号の合波を行い、WDM 信号を作成した。この WDM 信号を H-EDFA に入射して信号強度を高めた状態で、長さ 500m の HNLF に入射させることで縮退四光波混合を起こし、波長 1552.52nm 帯に新しく出来たアイドラ光の一つである OTDM 信号を AWG により切り取った。その後、最初に作成した波長 1555.72nm の

RZ-CLOCK 信号を DL を付してタイミング調整が可能な状態で先程切り取った OTDM 信号と合波し、再び H-EDFA に入射させた。これにより、信号強度を高めた状態で長さ 320m の HNLF に入射させることで縮退四光波混合を起こして、1558.92nm 帯に新しく出来る OTDM 信号から多重分離された信号を取り出すことでタイミングを調整して、2 チャンネルそれぞれの符号誤り率を測定した。

3.2 実験結果

ここから、本研究の WDM-to-OTDM 変換における実験から得られた結果を示す。まず、波長 1546.12nm と 1558.92nm の光信号から作成した NRZ-DPSK 信号の光波形、電気波形及びスペクトルをそれぞれ以下に示す。

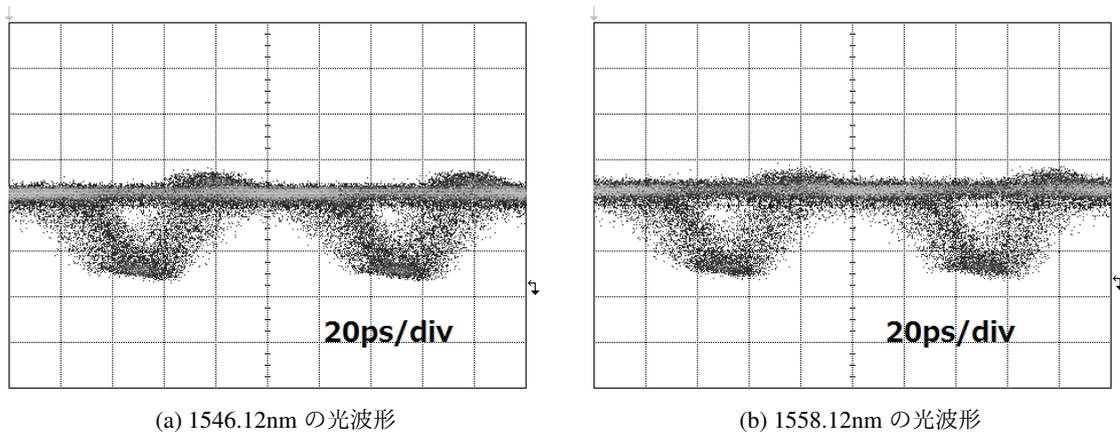


図 3.2: NRZ-DPSK 信号の光波形

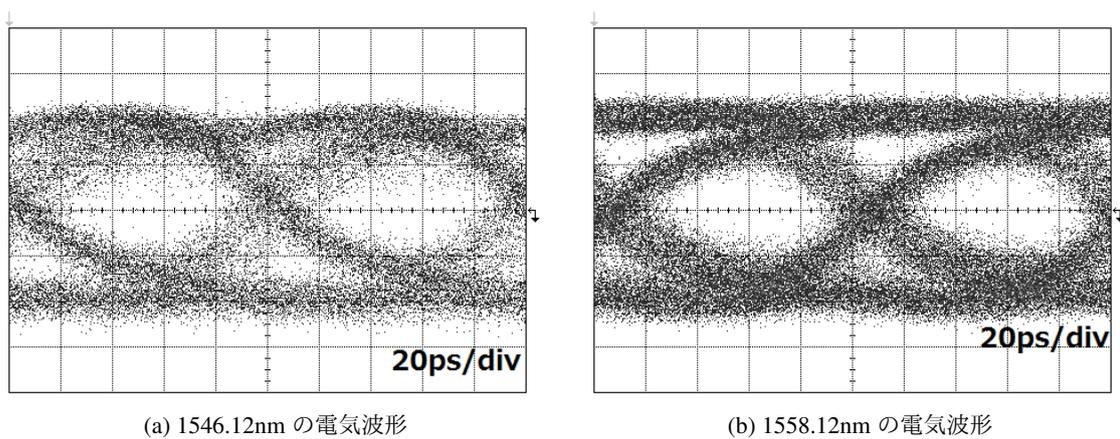


図 3.3: NRZ-DPSK 信号の電気波形

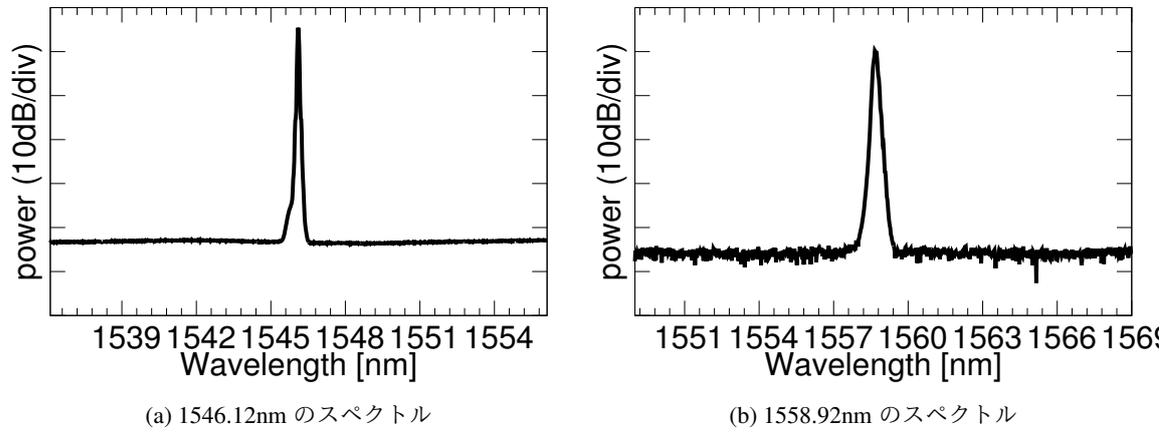


図 3.4: NRZ-DPSK 信号のスペクトル

また、作成した各 DPSK 信号の利得とタイミングの調整後に光カプラにより合波を行い、波長多重化した DPSK 信号の光波形とスペクトルを以下に示す。

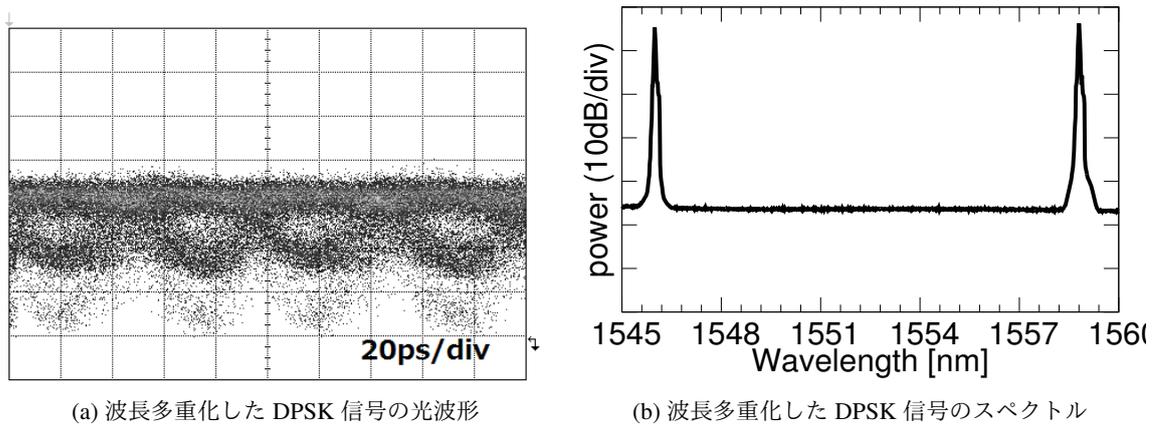


図 3.5: 波長多重化した DPSK 信号

次に、波長 1549.32nm と 1555.72nm の光信号から作成した RZ-CLOCK 信号の光波形をそれぞれ以下に示す。

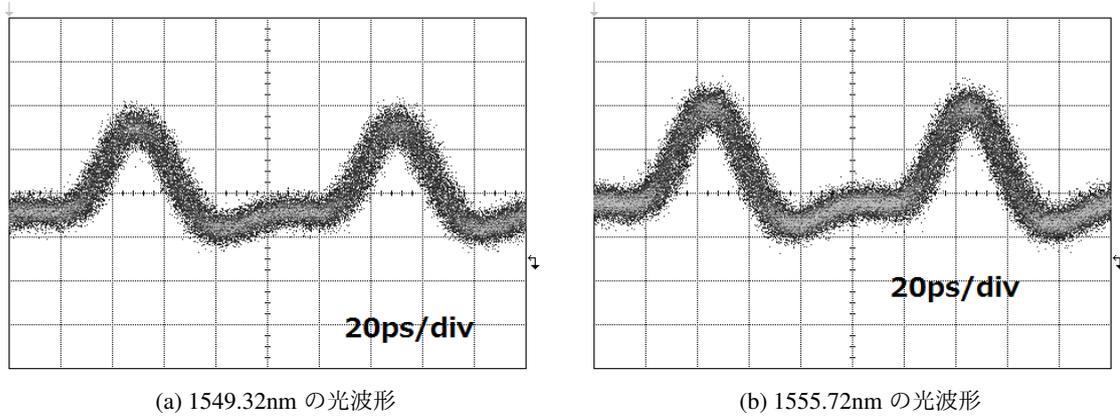


図 3.6: RZ-CLOCK 信号の光波形

作成した各 CLOCK 信号の利得とタイミングの調整後に光カプラにより合波し、波長多重化した CLOCK 信号の光波形とスペクトルを以下に示す。

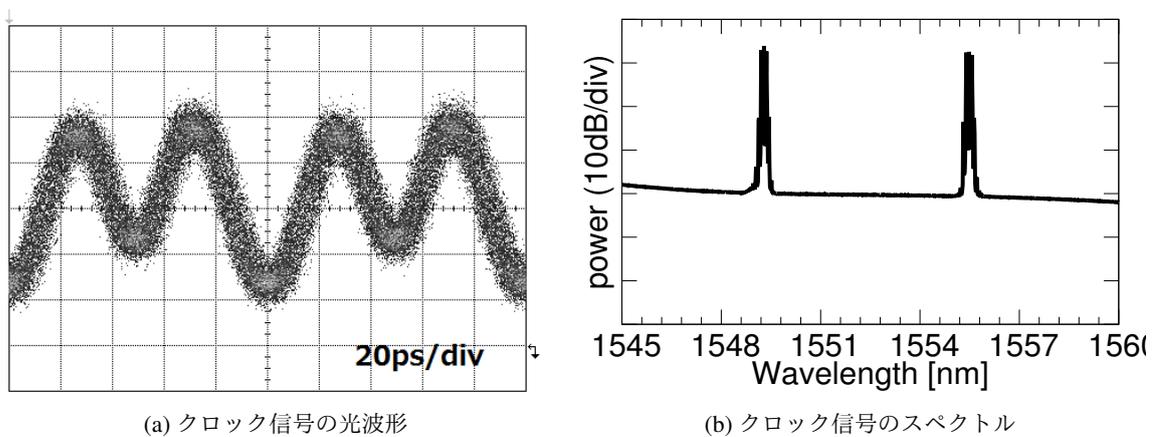


図 3.7: 波長多重化したクロック信号

二つのデータ信号と二つのクロック信号で波長多重化した光信号を H-EDFA で増幅した後に HNLF に入射させ、四光波混合を起こす前後のスペクトルを以下に示した。

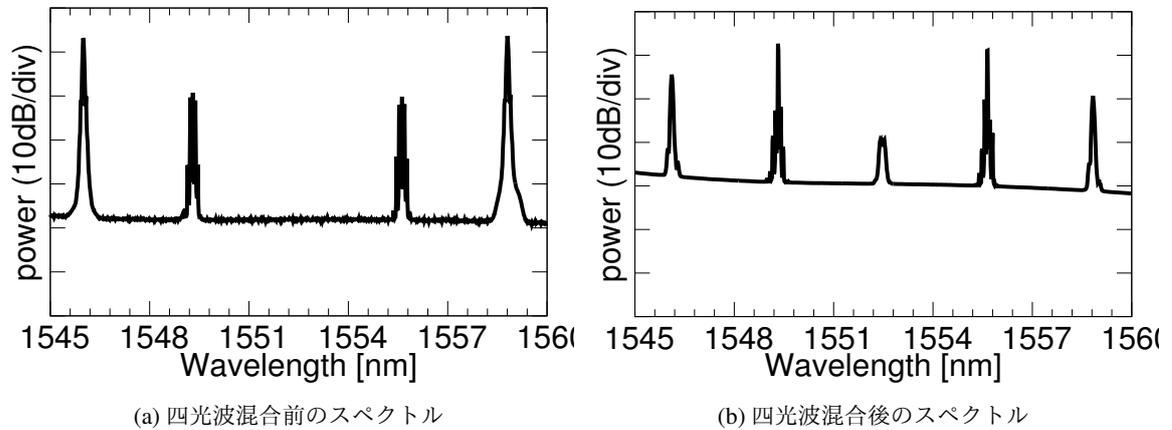


図 3.8: 四光波混合前後のスペクトル

波長 1552.52nm に新しく OTDM 信号に当たるアイドラ光が生成されていることが確認できる。四光波混合により発生した OTDM 信号を AWG で取り取った際の光波形とスペクトルを以下に示す。

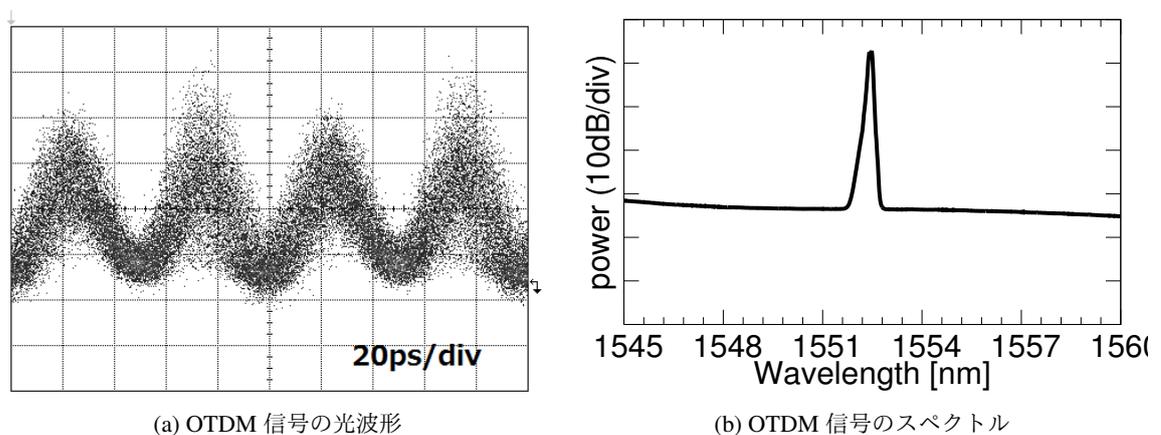


図 3.9: OTDM 信号

光波形を見ると山が4つ出来ていることから、ビットレートが 10Gbps から 20Gbps へ変換されていることが確認できる。

得られた OTDM 信号に対して、RZ-CLOCK 信号を用いて再び四光波混合を起こすことで多重分離を行い、RZ-CLOCK の DL によってタイミングを調整することで単チャンネルごとのデータを得た。以下に各チャンネル毎の光波形と電気波形を示す。

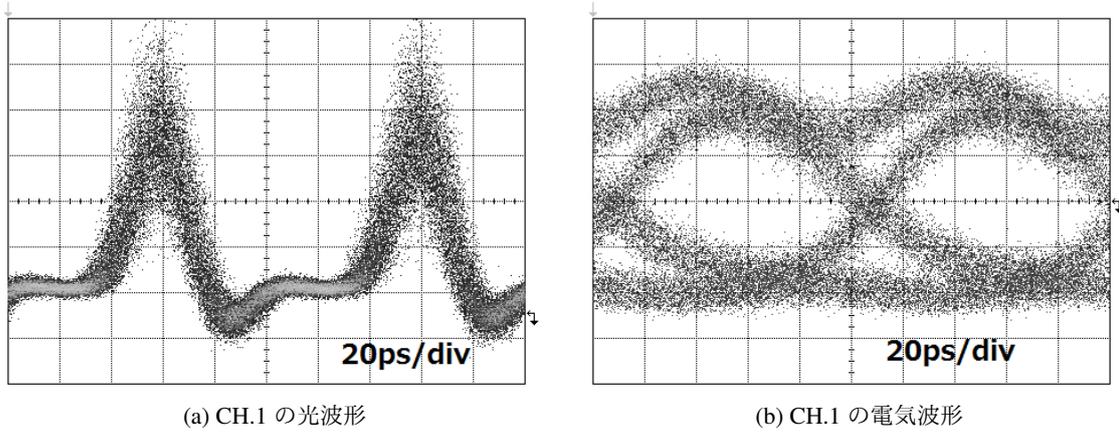


図 3.10: CH.1 の光波形と電気波形

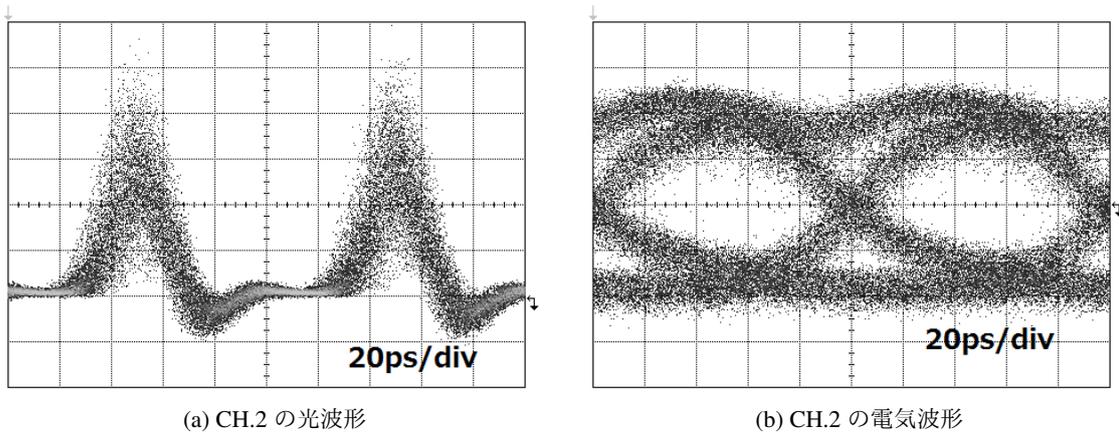


図 3.11: CH.2 の光波形と電気波形

各 DPSK 信号の back-to-back と OTDM 信号を多重分離した後の各チャネルから得られた符号誤り率 (BER:Bit Error Rate) 測定結果をまとめたものを以下に図 3.12 として示した。

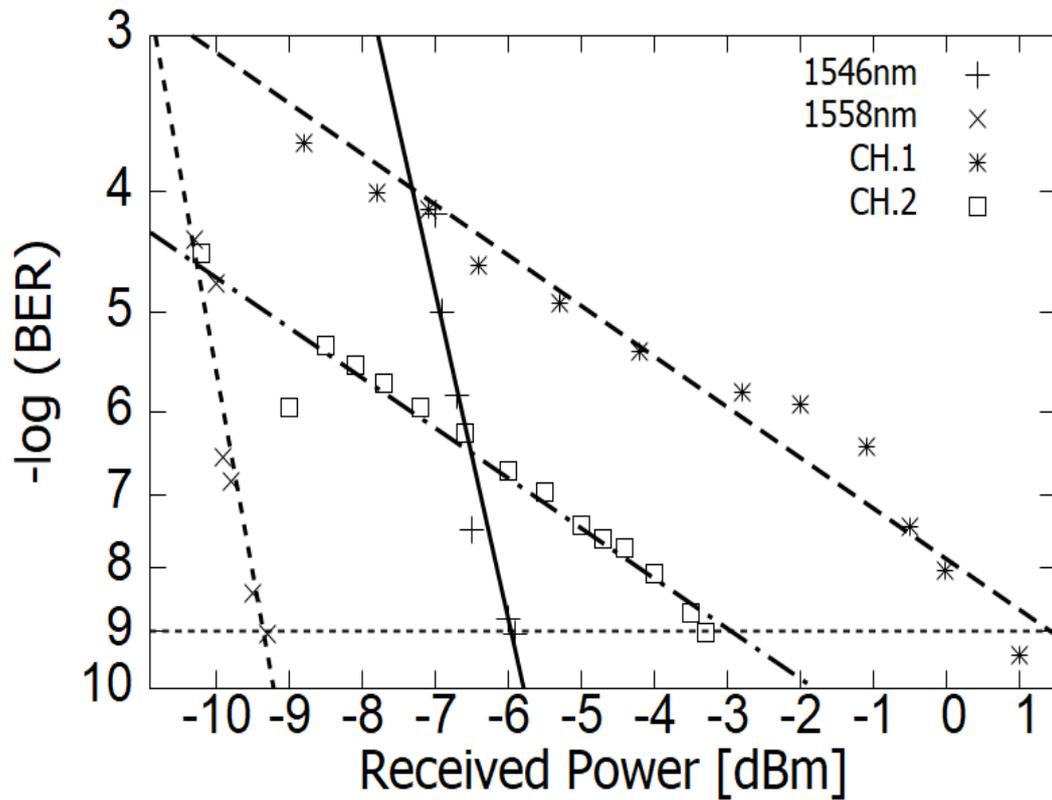


図 3.12: WDM-to-OTDM 変換における符号誤り率測定の結果

符号誤り率測定の結果、各単チャネルからエラーフリーを得ることが出来た。また、各パワーペナルティは ch.1 で約 7dB, ch.2 で約 6dB であった。

第4章 NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-multi-OTDM 変換の一括光 信号処理動作

4.1 実験構成

本研究の WDM-to-multi-OTDM 変換における実験構成を以下に図 4.1 として示した。

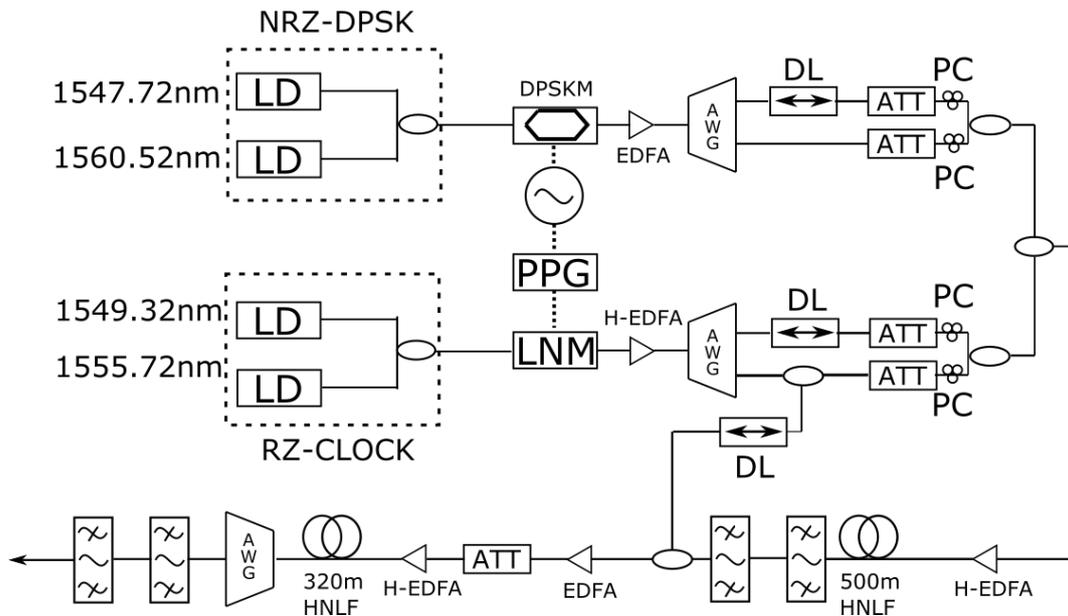


図 4.1: WDM-to-multi-OTDM 変換における実験構成

WDM-to-OTDM 変換では波長 1546.12nm と 1558.92nm の光信号を DPSK 変調した NRZ のデータ信号を用いていたが、WDM-to-multi-OTDM 変換では波長 1547.72nm と 1560.52nm の光信号を NRZ-DPSK 信号として用いた。クロック信号に関しては、WDM-to-OTDM 変換と同じ波長帯である波長 1549.32nm と 1555.72nm の光信号を LN 変調したものを RZ のクロック信号としてそれぞれ用いた。波長多重化を行うために、AWG でそれぞれの信号に分離を行い、DL でタイミングを、ATT で光の強度を調整し、適切な状態で各光信号の合波を行い、WDM 信号を作成した。この WDM 信号を H-EDFA に入射して信号強度を高めた状態で、長さ 500m の HNLF に入射させることで縮退四光波混合及び非縮退四光混合

を起こし、波長 1550.92nm と 1554.12nm に新しく出来た二つの OTDM 信号を順番に BPF により切り取る。その後、最初に作成した波長 1555.72nm の RZ-CLOCK 信号を DL を付してタイミング調整が可能な状態で先程切り取った各 OTDM 信号と合波し、再び H-EDFA に入射させる。これにより、信号強度を高めた状態で 320m の HNLF に入射させることで縮退四光波混合を起こす。その際、1550.92nm 帯の OTDM 信号を先に切り取っている場合は波長 1560.58nm に多重分離した信号が生成され、波長 1554.12nm の OTDM 信号を先に切り取っている場合は波長 1557.38nm に多重分離した信号が生成される。そして、多重分離された信号を切り取ることでタイミングを調整して、二つの OTDM 信号から多重分離された各 2 チャンネルの計 4 チャンネルの符号誤り率をそれぞれ測定した。

4.2 実験結果

ここから、本研究の WDM-to-multi-OTDM 変換における実験から得られた結果を示す。まず、波長 1547.12nm と 1560.52nm の光信号から作成した NRZ-DPSK 信号の光波形、電気波形及びスペクトルをそれぞれ以下に示す。

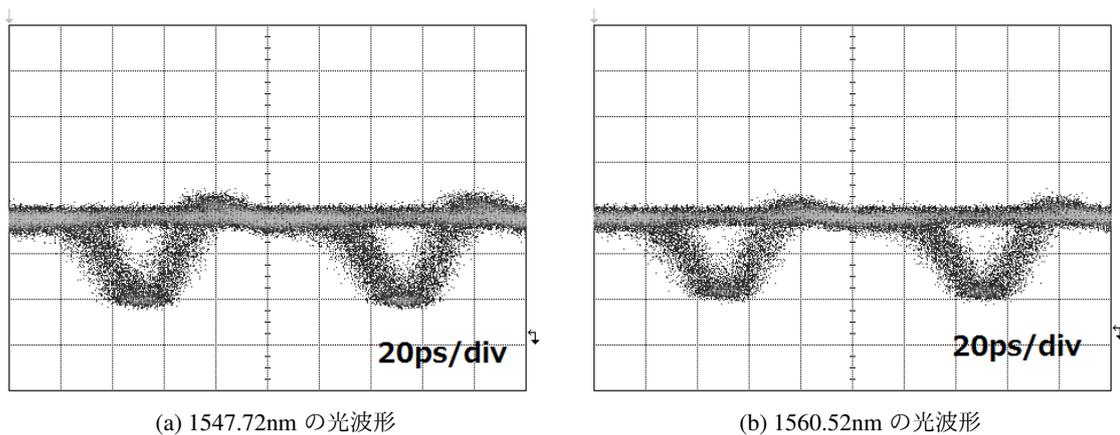
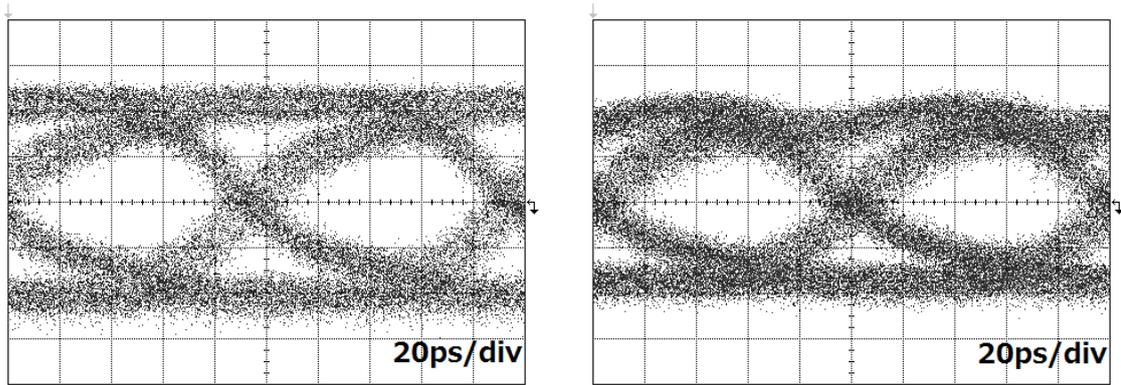


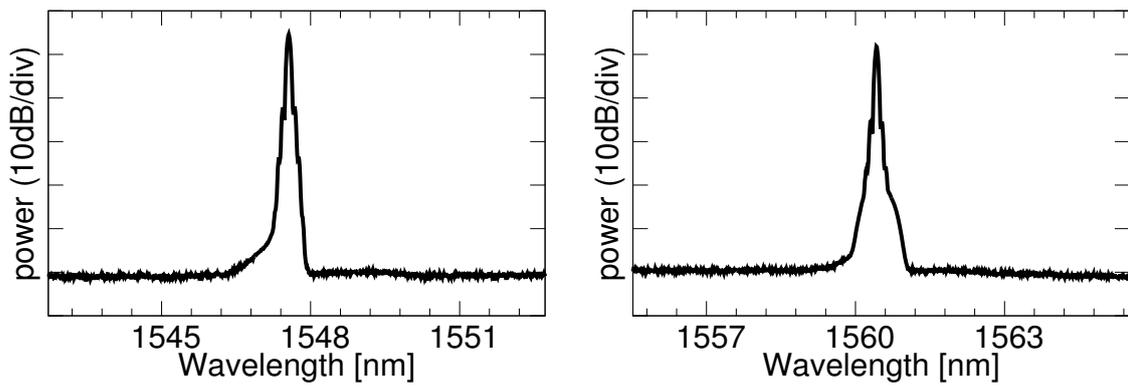
図 4.2: NRZ-DPSK 信号の光波形



(a) 1547.72nm の電気波形

(b) 1560.52nm の電気波形

図 4.3: NRZ-DPSK 信号の電気波形

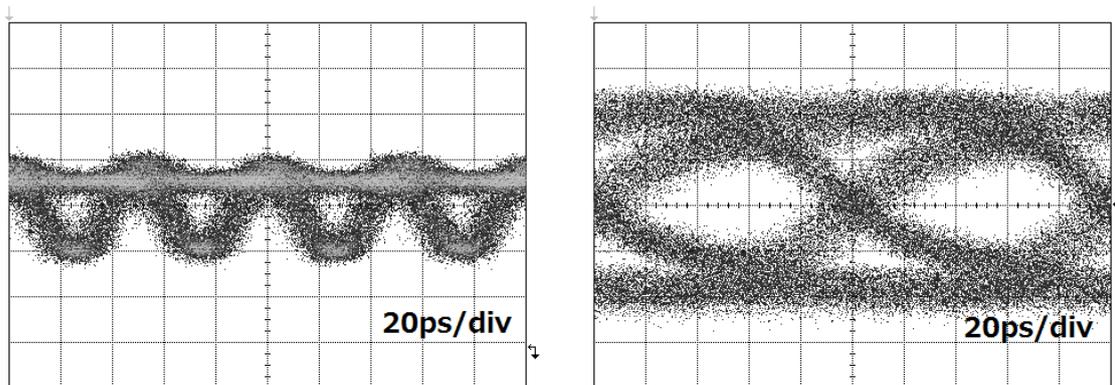


(a) 1547.72nm のスペクトル

(b) 1560.52nm のスペクトル

図 4.4: NRZ-DPSK 信号のスペクトル

また、作成した各 DPSK 信号の強度とタイミングの調整後に光カプラにより合波を行い、波長多重化した DPSK 信号の光波形、電気波形及びスペクトルを以下に示す。



(a) 波長多重化した DPSK 信号の光波形 2

(b) 波長多重化した DPSK 信号の電気波形 2

図 4.5: 波長多重化した DPSK 信号の光波形と電気波形

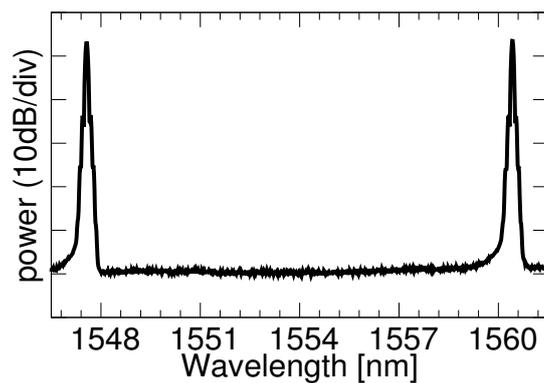


図 4.6: 波長多重化した DPSK 信号のスペクトル

次に、波長 1549.32nm と 1555.72nm の光信号から作成した RZ-CLOCK 信号の光波形をそれぞれ以下に示す。

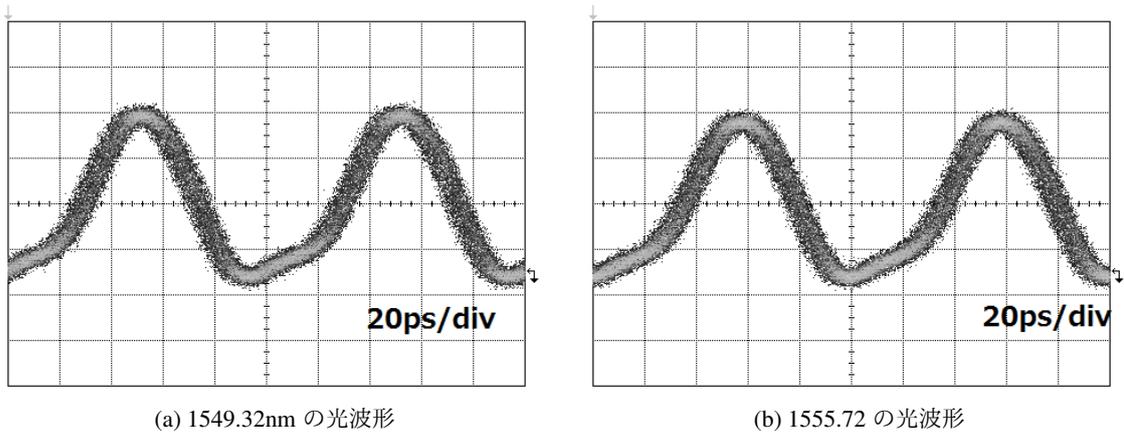


図 4.7: CLOCK 信号の光波形

作成した各 CLOCK 信号の強度とタイミングの調整後に光カプラにより合波し、波長多重化した CLOCK 信号の光波形とスペクトルを以下に示す。

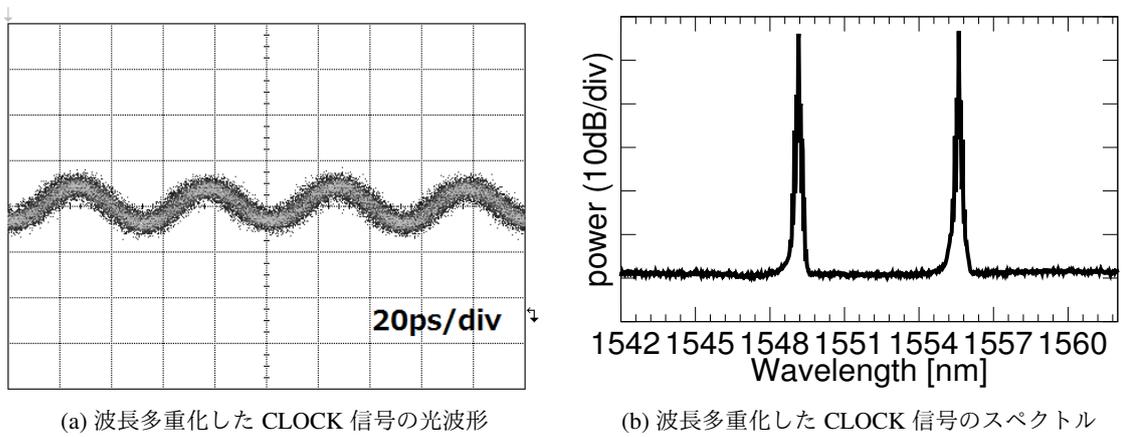


図 4.8: 波長多重化した CLOCK 信号

二つのデータ信号と二つのクロック信号で波長多重化した光信号を H-EDFA で増幅した後に HNLN に入射させ、四光波混合を起こす前後のスペクトルを以下に示した。

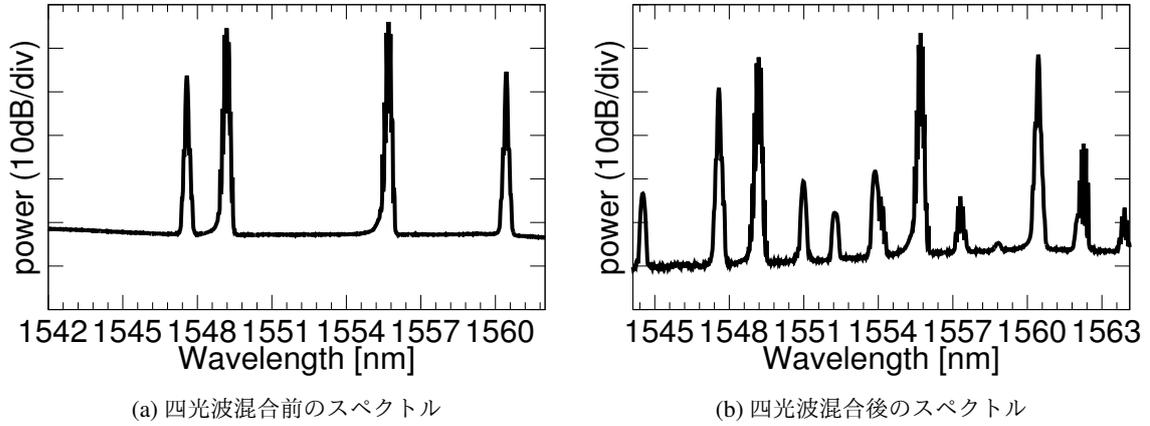


図 4.9: 四光波混合前後のスペクトル

四光波混合発生後のスペクトルより、波長 1550.92nm と 1554.12nm に新しく二つの OTDM 信号に当たるアイドラ光が発生していることが確認できる。また、励起光、信号光、発生した OTDM 信号以外の部分に当たるところにもアイドラ光が観測できるが、波長 1544.52nm と 1557.32nm に発生するアイドラ光は波長 1554.12nm の OTDM 信号を生成する過程に出来る一次のアイドラ光である。それ以外のアイドラ光に関しては、今回の実験では不要に発生するアイドラ光である。

四光波混合により発生した各 OTDM 信号を AWG で切り取った際のスペクトルと光波形を以下に示す。

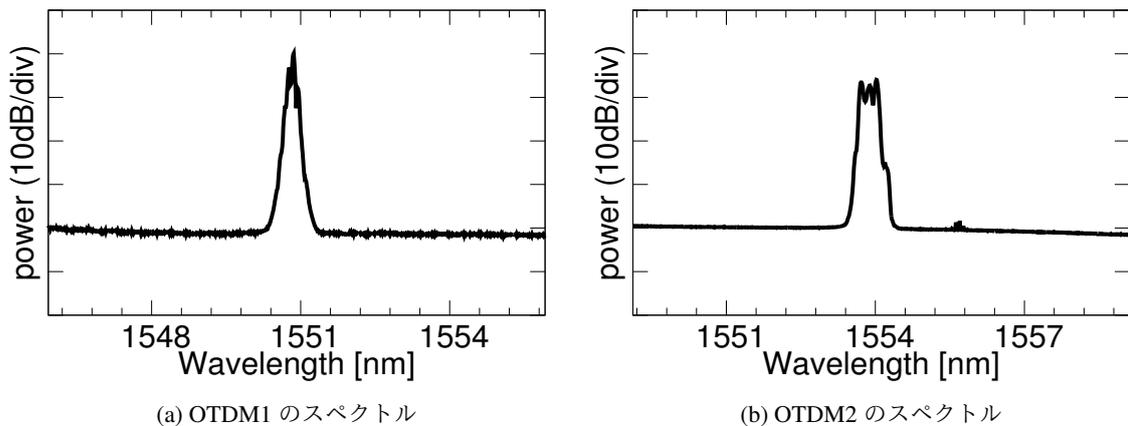


図 4.10: OTDM 1 と 2 のスペクトル

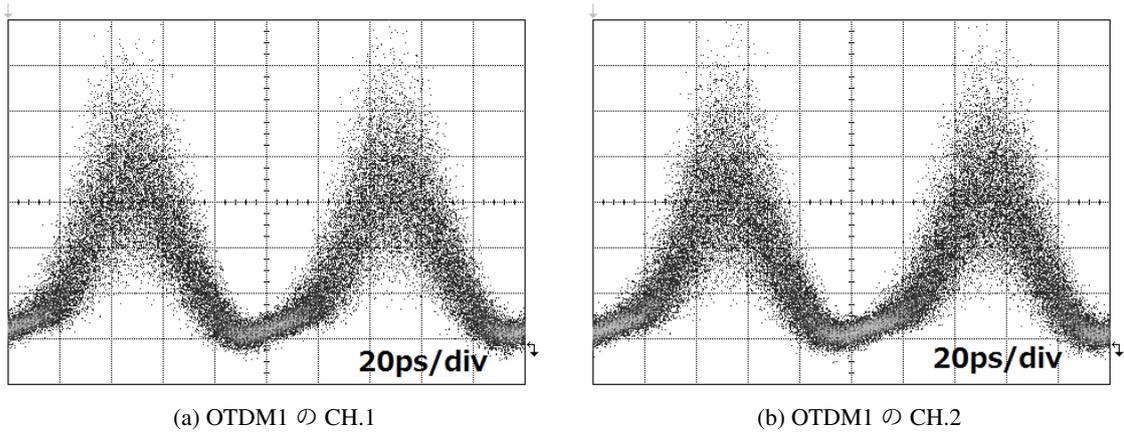


図 4.11: OTDM1 の各チャンネルの光波形

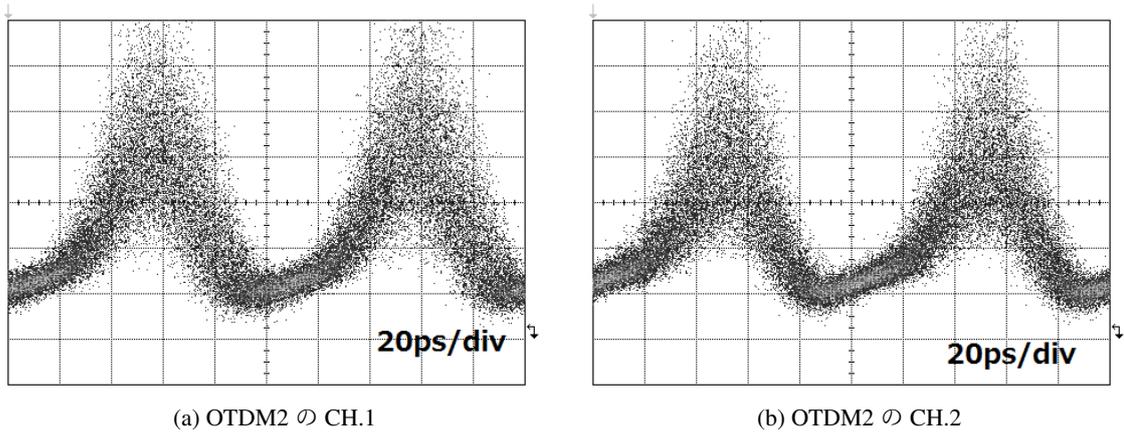


図 4.12: OTDM2 の各チャンネルの光波形

各 DPSK 信号の back-to-back と OTDM 信号を多重分離した後の各チャネルから得られた符号誤り率測定結果をまとめたものを以下に図 4.13 として以下に示した。

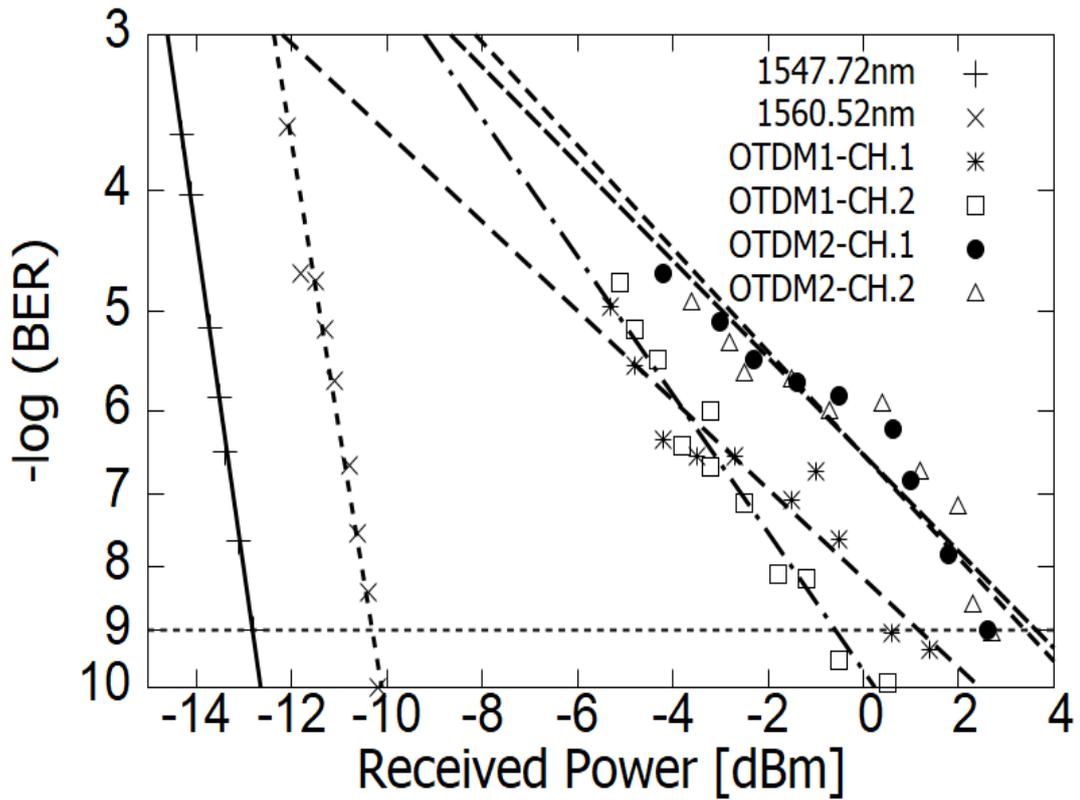


図 4.13: WDM-to-multi-OTDM 変換における符号誤り率測定の結果

符号誤り率測定の結果、各単チャネルからエラーフリーを得ることが出来た。また、各パワーペナルティは OTDM1 の ch.1 で約 14dB, ch.2 で約 12dB, OTDM2 の ch.1 で約 13dB, ch.2 で約 13dB とかなり大きい損失値であった。

第5章 考察

5.1 信号品質劣化の原因

WDM-to-OTDM 変換と WDM-to-multi-OTDM 変換においてパワーペナルティを比較すると、WDM-to-OTDM 変換でのパワーペナルティは各チャンネル毎に約 6~7dB、WDM-to-multi-OTDM 変換でのパワーペナルティは各チャンネル毎に約 12~14dB となっている。この大きなパワーペナルティの原因及び、WDM-to-OTDM 変換と WDM-to-multi-OTDM 変換におけるパワーペナルティ差の原因を考えた時に、以下の四つが大きな原因と考えられる。

一つ目は、一次アイドラ光の再利用である。WDM-to-OTDM 変換においては縮退四光波混合を一度用いた一次のアイドラ光である OTDM 信号を 1 つ生成するのに対して、WDM-to-multi-OTDM 変換においては非縮退四光波混合と縮退四光波混合を一度ずつ用いて、一次のアイドラ光を再利用することで二次のアイドラ光である OTDM 信号を二つを生成している。そのため、二次のアイドラ光に関してはパワーが落ちている上に雑音も付加して信号品質が落ちている可能性が高いと考える。

二つ目は、四光波混合で発生する不要なアイドラ光の数が WDM-to-OTDM 変換よりも WDM-to-multi-OTDM 変換の方が多いことにより、パワーが多く消費されてしまった可能性が考えられる。HNLF に入射させる際のパワーにもよるが、実際に図 3.8 と図 4.9 を確認すると図 4.9 は二つの OTDM 信号以外にも多くの不要な高次のアイドラ光が発生していることが確認できる。

三つ目は、非線形光学現象を起こす為直前の H-EDFA の出力を 27dBm に設定していることから、ASE(Amplified Spontaneous Emission) 雑音等の付加による影響を受けることにより、信号品質の劣化が起きている可能性があると考えられる。ここで、ASE 雑音とは光増幅器によって誘導放出された光信号の増幅と共に、自然放出光が増幅されて出力される雑音光成分のことである [14]。ASE 雑音を強度と考えた時に、強度雑音は四光波混合が起こる際に位相雑音へ変化してしまう。そのため、位相差で信号を判断する DPSK 信号では位相雑音の効果を受けて信号品質に影響が及んだと考えられる。

四つ目は、自分の実験的技量の不足により信号品質の劣化に繋がっている可能性がある。本研究における一括光信号処理動作に関しては、波形変換、多重化変換、波長変換の 3 つの光信号処理が一括で同時に行われている。そのため、各光信号のパワー、偏波の状態、増幅器の利得、タイミングの調整、正確な波長帯の切り取りなど実験的に高度な技量が求められることから、著者の実験的技量の不足により信号品質の劣化に繋がっている可能性があると考えた。具体的には、DPSK 信号の位相判定の閾値を弄ることが出来る Threshold level という部分により、BER を図る際に閾値をより適切な値に適宜合わせながら測定を行

わなければならないが、閾値が途中から適切ではない値に設定されて測定を行ってしまっていたことからパワーペナルティが大きくなっている可能性が考えられた。

これら4つのことが大きな原因で、それぞれの back-to-back に対してのパワーペナルティが大きくなってしまい、加えて WDM-to-OTDM 変換と WDM-to-multi-OTDM 変換におけるパワーペナルティの差に約2倍の差が出てしまったのではないかと考える。

5.2 OOK 信号を用いた先行研究と DPSK 信号を用いた本研究の比較

OOK 信号を用いた先行研究 [1] における WDM-to-OTDM 変換と DPSK 信号を用いた本研究における WDM-to-OTDM 変換の符号誤り率測定の結果を比較する。パワーペナルティは OOK 信号を用いた先行研究ではチャンネル 1 で約 1dB、チャンネル 2 で約 1.3dB であり、DPSK 信号を用いた本研究ではチャンネル 1 で約 7dB、チャンネル 2 で約 6dB であり、DPSK 信号を用いた実験結果の方が悪いものとなった。この差の原因として、DPSK 信号の時間変化による不安定な出力が原因だと考えられる。OOK 信号は強度変調のため、光があれば 1、無ければ 0 と判断されるが、DPSK 信号の場合は位相による変調方式であり、受信信号側で位相差から信号を復調することから多重化変換及び多重分離を行う過程で信号の位相が不安定になっていることが OOK 信号との大きな違いであり、原因であると考えられる。実際に元の信号である back-to-back の信号を比べた時に、OOK 信号では $-18 \sim -18.5$ dBm からエラーフリーが取れているのに対して、DPSK 信号では $-6 \sim -10$ dBm となっている。このことから、10Gbit/s での簡易な実験構成であれば OOK 信号を用いたほうが信号品質が高く、優位性が高いと考えられる。しかし、長距離で高速大容量伝送を行う上では雑音耐性を維持しつつ、多くの情報量を一度に伝送することが課題になることから、DPSK 信号を初めとした DQPSK 信号や、QAM 信号などの位相や振幅を用いた変調方式の方が優位性が高く、利用用途によって信号を使い分ける必要があると考える。

5.3 今後に向けての提案手法

今回の実験で WDM-to-OTDM 変換と WDM-to-multi-OTDM 変換の検証においてエラーフリーを得られたが、パワーペナルティはどちらも大きく、信号品質を改善する課題が見つかった。そこで、解決策としては利得を抑えて雑音の付加をなるべく防ぎたいが、四光波混合を起こす関係上利得を強める必要がある。ここで、非線形光学現象の起き易さは HNLF の長さや入力光強度に依存することから、解決手法として H-EDFA の利得を抑えて HNLF の長さを長くすることで四光波混合を起こしやすく出来るのではないかと考えた。これにより、H-EDFA の過出力による歪の抑制を行える可能性があると考えられる。そのため、HNLF の長さや EDFA の利得のバランスを変えることによって、非線形光学現象の発生と雑音付加の具合を今後検証する必要があると考える。

第6章 結論

本研究では、二波長の NRZ-DPSK 信号と二波長の RZ-CLOCK 信号に対して、四光波混合による波形変換及び多重化変換を利用した NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-OTDM 多重化変換における光信号一括処理動作の検証を行った。加えて、四光波混合による波形変換及び多重化変換を利用した NRZ-to-RZ 波形変換及び WDM-to-multi-OTDM 多重化変換における光信号一括処理動作の検証を行った。

検証の結果として、WDM-to-OTDM 変換においては、生成した OTDM 信号から多重分離の後に取り出した各チャネルの符号誤り率測定からエラーフリーを達成することが出来た。また、WDM-to-multi-OTDM 変換においても生成した二つの OTDM 信号からそれぞれ多重分離の後に取り出した各チャネルの符号誤り率測定からエラーフリーを達成することが出来た。しかし、どちらの検証においても大きなパワーペナルティが出る結果となった。そのため、今後の課題としては信号品質を上昇させることにより、パワーペナルティを小さくする必要がある。その為の解決策として、EDFA の利得を抑えて光信号処理を行うことにより、光信号処理時に位相雑音となる雑音の発生を抑え、精度の高い OTDM 信号の生成及び多重分離を行うことで、本検証結果よりも信号品質の改善が見込め、パワーペナルティが小さくなると考えた。

謝辞

本研究を行うに際して、このような研究の機会を与えていただき、懇切なる指導と助言を賜りました電気通信大学情報・ネットワーク工学専攻の來住直人教授に深く感謝を申し上げます。また、実験機器の使用方法、実験構成及び結果の検証にあたり適切な助言を賜りました電気通信大学情報・ネットワーク工学専攻の松浦基晴教授に深く感謝申し上げます。最後に、本研究を進めるにあたり、参考となる助言を頂いたり、様々な知識をご教授頂いた來住研究室及び松浦研究室の先輩・同輩の皆様方に感謝致します。

参考文献

- [1] ZHANG YINGYI, 「信号の多重化方式変換における複数の光信号処理の一括動作」, 電気通信大学情報理工学研究科情報・ネットワーク工学専攻修士論文, 2018.
- [2] 小林竜也, 「DPSK 光信号の WDM-to-OTDM 変換」, 電気通信大学情報理工学研究科情報・ネットワーク工学専攻修士論文, 2018.
- [3] F. Wang, E. Xu, Y. Yu and Y. Zhang, "All-optical 40 Gbit/s data format conversion between RZ and NRZ using a fiber delay interferometer and a single SOA," 2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), Shanghai, 2011, pp. 1-6.
- [4] Anlin Yi, Lianshan Yan, Bin Luo, Wei Pan, Lin Jiang, Zhiyu Chen, Yan Pan, "Polarization-Insensitive and Receiver-Sensitivity-Gain Format Conversion for PDM Signals Based on Dual-Orthogonal-Pump Four-Wave Mixing in Highly Nonlinear Fiber," in IEEE Photonics Journal, vol. 7, no. 1, pp. 1-6, Feb. 2015, Art no. 7200606.
- [5] B. Zou, Y. Yu, X. Huang, Z. Wu, W. Wu and X. Zhang, "All-Optical Format Conversion for Multichannel QPSK Signals," in Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 3, pp. 375-384, Feb.1, 2013.
- [6] W. Astar, Jeffrey B. Driscoll, Xiaoping Liu, Jerry I. Dadap, William M. J. Green, Yurii A. Vlasov, Gary M. Carter, Gary M. Carter, Richard M. Osgood, Jr., "All-Optical Format Conversion of NRZ-OOK to RZ-OOK in a Silicon Nanowire Utilizing Either XPM or FWM and Resulting in a Receiver Sensitivity Gain of ~ 2.5 dB," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no. 1, pp. 234-249, Jan.-feb. 2010.
- [7] 井上貴則, "光海底ケーブルシステムを支える大容量長距離光伝送技術", NEC 技報, Vol.62, No.4, pp.16-19, 2009.
- [8] 情報通信研究機構, 「光ネットワーク技術のすべて」, 日本実業出版社, 2005.
- [9] 可児淳一, "アクセス系ネットワークの光インターフェース標準化動向", NTT 技術ジャーナル, Vol.19, No.7, 2007.
- [10] M.Nakazawa, T. Yamamoto, K.R. Tamura, "1.28Tb/s-70km OTDM transmission using third and forth order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator", Electronics Letters, vol. 36, pp. 2027-2029, 2000.
- [11] S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake, K. Mori, "3 Tbit/s (160 Gbit/s \times 19 channel) optical TDM and WDM transmission experiment", Electronics Letters, Vol.35, pp. 826-827, 1999.

- [12] 三木哲也, 須藤昭一, 「光通信技術ハンドブック」, オプトロニクス社, 2002.
- [13] 麻生修, 忠隈昌輝, 並木周, "光ファイバ中の四光波混合発生とその応用技術開発", 古河電工時報, 105, 46-51, 2000.
- [14] 菊池和朗, 「光情報ネットワーク」, オーム社, 2002.