

平成29年度修士論文

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

学籍番号 1631093

氏名 ZHANG YINGYI

指導教員 來住 直人 教授

副指導教員 松浦 基晴 准教授

平成30年1月29日

概要

近年、インターネットやスマートフォンなどの普及により、大容量かつ高速なネットワークの実現が求められている。そのため、光通信における信号の多重化技術の研究が進められており、特に、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 及び光時分割多重 (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) が積極的に利用されている [1]。波長分割多重は広い波長領域にわたる光ファイバの低損失性を有効に利用する特徴がある一方、光時分割多重は伝送速度を高速化する利点があるため、これらの多重化技術を組み合わせることにより、高速で大容量なネットワークが実現されることが期待されている。多様な多重化技術をそれぞれ採用するネットワーク同士を接続する際、WDM/OTDM 間の信号フォーマット変換が重要な役割を果たしている。しかし、WDM/OTDM 変換及び信号フォーマット変換を単に組み合わせると系が複雑になる。そこで、本報告では、簡単な構成を目的とした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を NRZ-OOK (Nonreturn to Zero - On Off Keying) 信号に応用し、検証した。

まず、 $2 \times 10 \text{ Gb/s}$ NRZ-OOK 信号に対して、波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括動作を検証するあたり、クロック光のパルス圧縮なし及びクロック光のパルス圧縮あり、の二つの場合について検証を行った。その結果として、パルス圧縮なしの場合では波形変換及び多重化変換の一括動作で、単チャネル分離後、符号誤り率特性におけるエラーフリーを達成できたのに対して、パルス圧縮ありの場合では、波形変換及び多重化変換の一括動作は成功したが、変換後の OTDM 信号波形の劣化により、多重分離を行うことができなかった。

さらに、パルス圧縮なしの場合と同じ構成で、入力信号の波長を変えることにより波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作を提案し、検証を行った。その結果、 $2 \times 10 \text{ Gb/s}$ WDM (NRZ-OOK)-to- $2 \times 20 \text{ Gb/s}$ OTDM (RZ-OOK) 変換に成功し、OTDM 信号の波形劣化は観察された。したがって、一括動作後に有効な OTDM 信号が得られている。

目次

| | | |
|-----|---|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 本研究の背景 | 1 |
| 1.2 | 本研究の目的と本論文の構成 | 2 |
| 第2章 | OOK 信号における複数光信号処理の一括動作方式 | 3 |
| 2.1 | 強度変調 | 3 |
| 2.2 | 多重化方式 | 5 |
| 2.3 | 四光波混合 | 7 |
| 2.4 | 四光波混合を用いた複数信号処理の一括動作の原理 | 11 |
| 2.5 | 四光波混合を用いた多重分離 | 17 |
| 2.6 | パルス幅圧縮 | 18 |
| 第3章 | NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括動作の評価 | 19 |
| 3.1 | クロック光のパルス圧縮を行わない場合 | 19 |
| 3.2 | クロック光のパルス圧縮を行った場合 | 25 |
| 第4章 | NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作の評価 | 36 |
| 第5章 | 考察 | 39 |
| 5.1 | 波長変換・波形変換・多重化変換 | 39 |
| 5.2 | 今後に向けての提案 | 42 |
| 第6章 | 結論 | 43 |
| | 謝辞 | 44 |
| | 参考文献 | 45 |

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年、情報通信技術の発展に伴い、携帯端末やパソコンの普及によりグローバル通信は一般的となっており、音声、動画などの大容量情報がいつでも、どこでも送受信できるようになりつつある。1970年代末から、光通信技術の発展は指数関数的に成長し、インターネットにおける世界的な通信サービスに巨大な貢献をしている。今後もICTを用いた技術を本格的に実現することに期待が寄せられている為、さらなる大容量かつ高速なネットワークシステムの構築が求められている。光ファイバ通信技術は通信ネットワークをサポートし、特にグローバル通信に重要な役割を果たしている。光通信技術がなければ、超高速なグローバルネットワークの実現が不可能となる [1]。従来の光通信システムでは、図 1.1 中の (a) に示すように、信号を処理する際、光信号を再生中継器でいったん電気信号に変換して、再び光信号に戻る必要があるため、伝送速度が制限されることが問題となる。高周波数、低消費電力を図るため、信号処理する際に、光信号を電気信号に変換せず、光のままに信号処理を行うフォトニックネットワークの構成が提案された。

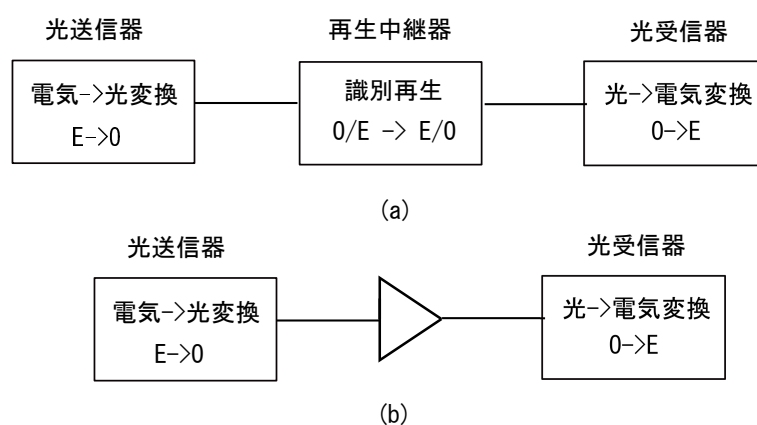


図 1.1: 従来 (a) と現在 (b) の光ファイバ通信システムの基本構成

大容量かつ高速なネットワークを実現する為、伝送損失が低く、高速及び大容量伝送が可能となる光ファイバ通信技術が用いられる。光ファイバ通信における一本の光ファイバで複数の信号を伝送する多重化技術が積極的に研究されており、特に波長分割多重 (WDM) 及び光時分割多重 (OTDM) が挙げられる。波長分割多重は異なる波長を持つ複数の信号光が波長軸上で重ならないように伝送することにより多重化を実現している。一方、光時分割多重は同一波長を持つ複数の信号光を時間軸上で重ならないように伝送することにより

多重化される。将来は WDM ネットワークと OTDM ネットワークが混在することが予想され、二つの多重化技術を変換する処理が必要となる。WDM では信号波形として NRZ を、OTDM では信号波形として RZ 信号が主に用いられている為、WDM ネットワークと OTDM ネットワークを接続する際に、信号フォーマット変換も合わせて行う。本研究では、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に注目する。

1.2 本研究の目的と本論文の構成

全光信号処理における WDM-to-OTDM 変換は、異なる周波数を持つ低速信号から同じ周波数を持つ高速な OTDM 信号に集約される特徴があるため、このような WDM-to-OTDM 変換についてすでに研究が行われている。RZ 信号に対する WDM-to-OTDM 変換の先行研究 [2][3][4] においては、NRZ 信号に対する WDM-to-OTDM 変換を検討する必要がある。その理由、NRZ 信号は分散に対する耐性があるため、WDM では NRZ 信号が広く利用されている。しかし、NRZ 信号はパルスの振幅がタイムスロットを専有してしまうため、一つのタイムスロットに複数の信号を多重化する OTDM に適用しない。そのため、WDM-to-OTDM 変換を行う際に、NRZ-to-RZ のフォーマット変換を検討する必要がある。また、NRZ 信号に対して電界吸収変調器と分散シフトファイバを 2 段階にして波形変換及び多重化変換を行う手法 [5] や 2 本の高非線形ファイバを用いた手法 [6] があるが、各信号処理において独立した非線形素子を用いているため構成が複雑になる。そこで、本研究では、NRZ 信号に対して、低コスト、簡易的な構成を目的とした波形変換及び多重化変換の一括動作の構成を提案した。

本論文の構成は以下の通りである、第一章には研究背景・目的及び本論文の構成について述べる。第二章には本研究で利用された、多重化方式・四光波混合の概要、複数信号処理の一括動作の原理、OTDM 信号から単チャネルを分離する方法及びパルス幅を圧縮する手法に触れ、実験構成と実験結果を第三章及び第四章に示す。第五章にはこの研究の考察及び今後向けの提案について述べる。第六章は本論文の結論である。

第2章 OOK 信号における複数光信号処理の一括動作方式

2.1 強度変調

情報を伝送させるため、搬送波の物理的な特性を変化させることを変調と呼ぶ、現在、多くの光通信システムにおいては、光の ON/OFF により情報を伝達する方式である強度変調 (OOK) が主に用いられる。図 2.1 に強度変調の概念図を示す。OOK 方式では光強度の有、無に信号情報の 1, 0 に表現している。受信機では光強度の強弱のみに情報の有無を判断するため、受信機の構成が比較的になるので、強度変調方式は最も一般的な変調方式として利用されている。本研究では、この強度変調を入力信号として研究を行う。

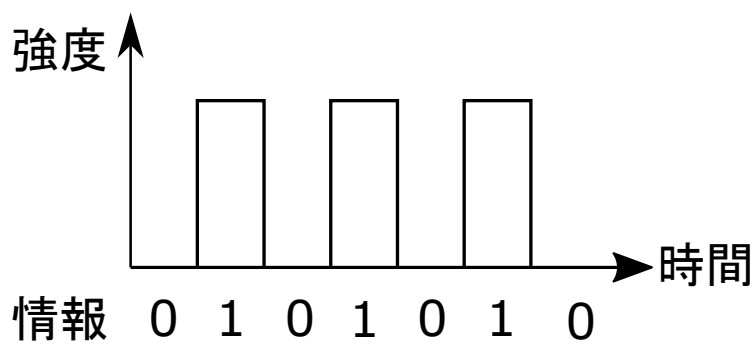


図 2.1: OOK 変調方式の基本概要

強度変調には NRZ-OOK 信号及び RZ-OOK 信号がある。図 2.2 に示すように、NRZ 信号は情報が 1 の時タイムスロットの中で 0 に戻らず、パルスがタイムスロットを専有する信号である。RZ 信号は情報が 1 の時タイムスロットの中で 0 に戻る信号である。よって、時間軸上で信号を多重化する OTDM ネットワークには RZ 信号を主に用いられている。波長軸上で信号光を多重化する WDM ネットワークには分散に対する耐性がある NRZ 信号が用いられているため、多重化方式変換を行うにあたり、WDM-to-OTDM 変換を加えて NRZ-to-RZ 変換が必要となっている。

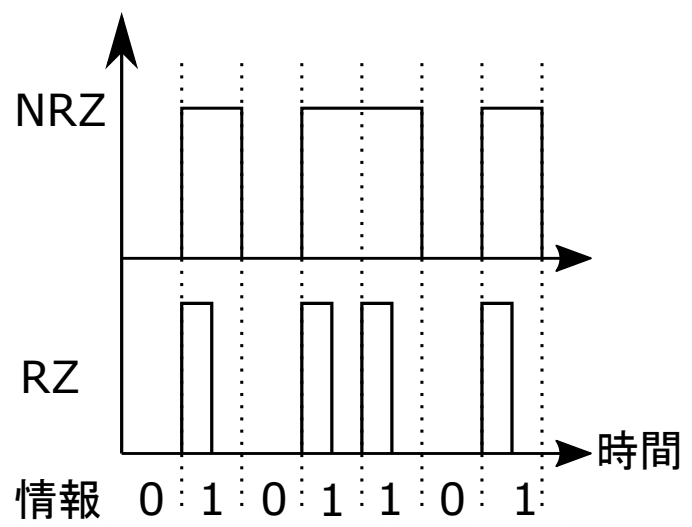


図 2.2: NRZ と RZ 信号の基本概要

2.2 多重化方式

伝送路の大容量及び高速化を求めめるため、信号を多重化する様々な技術が研究されている。これらの技術を大きく分けると二つの要素がある。それは電気信号における多重化技術及び光信号における多重化技術である。しかし、光ファイバ通信において電気信号処理部分には伝送限界があるため、超高速なネットワークを実現するには光信号処理に置き換える必要がある。その際、電気領域での信号を多重化する時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing) に代わり、高速伝送が可能とする OTDM の実用化が期待されている。本研究では、信号の多重化変換における複数の信号処理の一括動作を全光領域で行う。

波長分割多重 (WDM) の概念図は図 2.3 中の (a) に示す。光時分割多重 (OTDM) の概念図は図 2.3 中の (b) に示す。第四章の研究で提案した OTDM 信号を WDM で伝送する方式の概念図を図 2.3 中の (c) に示す。

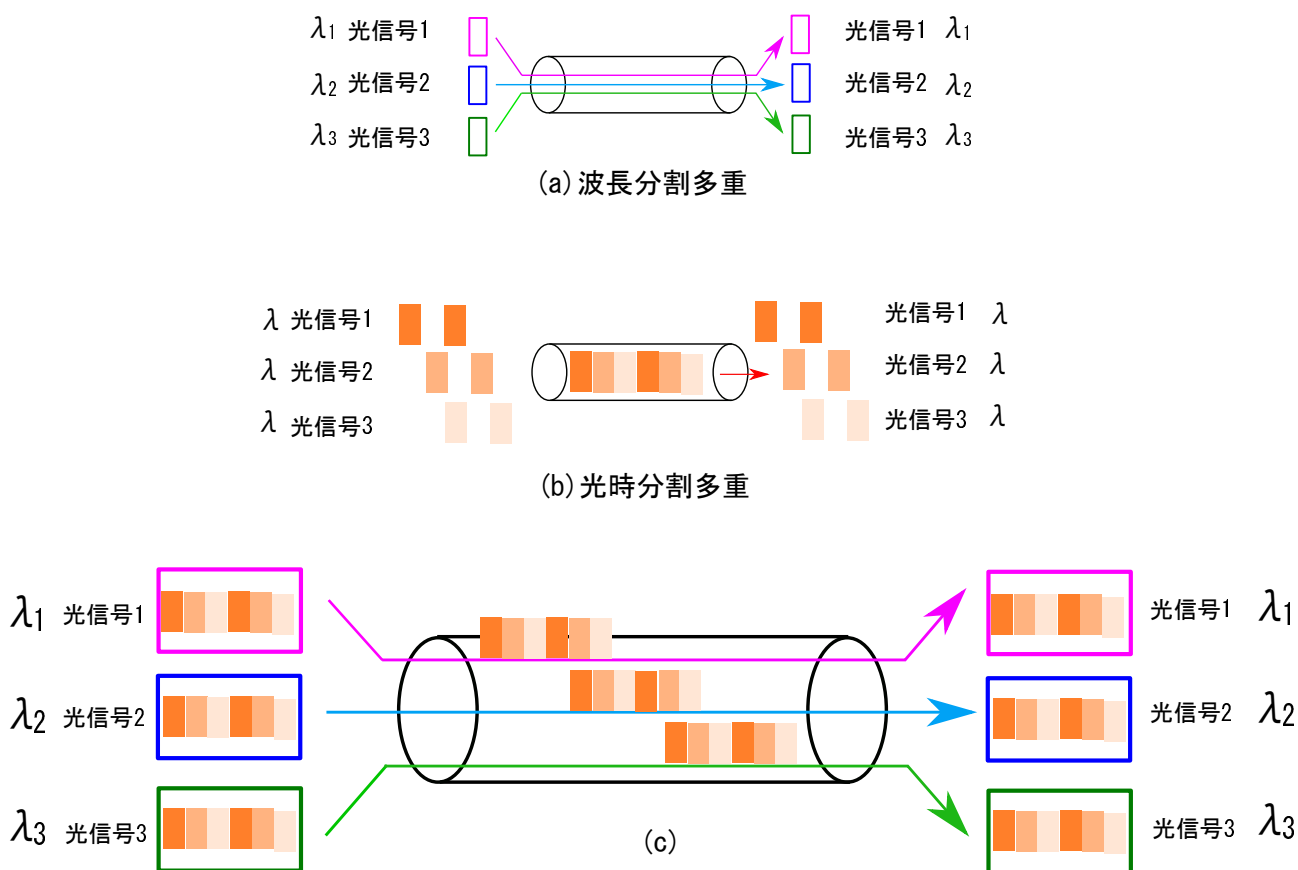


図 2.3: 波長分割多重・光時分割多重及び OTDM 信号を WDM 方式伝送する概念図

波長分割多重 (WDM) は複数の異なる波長を持つ光に信号を載せて伝送する際に、波長軸上で信号が重ならないように多重化する方式 [7] である。WDM を利用することで、複数の波長の異なる信号光を多重化できることに加えて、種別の異なる信号を同時に伝送することも可能である。図 2.3 の (a) に示すように、WDM 多重化方式は送信側において波長の異なる信号光を一本のファイバに入射し伝送させる。受信側では光分波器を用いることでそれぞれ個別のチャンネルに分離されることである。WDM は分散の影響を受けにくいいため、長距離伝送に向いている。そして、種別の異なる信号をそれぞれ異なる波長の光を用いて同時伝送が可能である [1]。しかしながら、入射する信号光の波長がファイバの零分散波長の周囲に配置すると、信号光間の相互作用を生じ、非線形効果が発生やすくなることが挙げられる。

WDM に対して、OTDM は時間軸上で信号光の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する方式である。複数の低速チャンネルを時間軸上で多重化し、より高速な信号光に変換して伝送することができる。図 2.3(b) に示すように、各チャンネルの光信号は同じ波長を持っている。そして、信号のタイミングを時間軸上で制御し、各チャンネルの信号光が同じタイムスロットに収まることを示している。OTDM 信号は分散に対する耐性が低い為、短距離に向いている。

これまで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 伝送実験が報告されている [8]。また、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 [9]。これらの光信号処理技術を組み合わせ、光ファイバ 1 心あたり 10 数 Tb/s の伝送が可能となっているため、柔軟かつ高速なネットワークの構築に向けた技術の開発が進展すると予想される。そこで、本報告では、OTDM 信号を WDM 方式で伝送することに着目し、波長の異なる OTDM 信号を一括動作で生成することを提案した。

2.3 四光波混合

物質の屈折率の原因は光の電界によって誘起される分極 [10] である。光の電界の大きさに比例する分極を線形分極と呼ぶ。分極が光の電界の大きさに比例しなくなる場合に非線形性が見られる。光ファイバに高強度を持つ光信号を入射すると、非線形光学効果が発生する。光ファイバ中で発生する非線形光学現象としては、自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation)、相互位相変調 (XPM: Cross Phase Modulation)、四光波混合 (FWM: Four Wave Mixing) が挙げられる。自己位相変調は自分自身の強度に起因する屈折率変化により、位相がシフトしまう現象 [10] である。それに対し、他の光の強度に起因する屈折率変化によって位相が変換することを相互位相変調 [10] と呼ぶ。これらは一般的に光ファイバの波長分散により波形を劣化させる。四光波混合は、一般的に三つ以上の光を入射する際に、それらのどの波長とも一致しない波長に新たにできた光信号を発生する現象 [10] である。その中、縮退四光波混合及び非縮退四光波混合がある。入射する信号光をプローブ光 (signal)、励起光をポンプ光 (pump)、新たに発生した光をアイドラ光 (idler) と呼ばれる。図 2.4 は四光波混合の概要であり、図 2.4 中の図 (a) は縮退四光波混合、図 (b) は非縮退四光波混合の概要である。

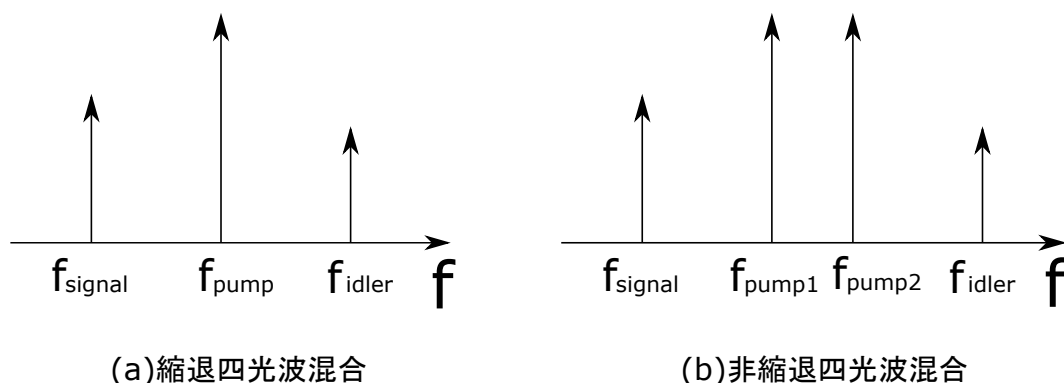


図 2.4: 周波数領域における四光波混合の概要図

ポンプ光の周波数が同じ場合は、縮退四光波混合 (DFWM: Degenerated Four-wave Mixing) と、入射するポンプ光の周波数が異なる場合は非縮退四光波混合と呼ばれる。縮退四光波混合を用いる場合は、ポンプ光、信号光、アイドラ光の周波数をそれぞれ f_{signal} 、 f_{pump} 、 f_{idler} とすると、アイドラ光が発生する周波数に関して次の式が成り立つ。

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

非縮退四光波混合を用いる場合は、信号光、アイドラ光の周波数をそれぞれ f_{signal} 、 f_{pump1} 、 f_{pump2} 、 f_{idler} とすると、アイドラ光が発生する周波数に関して次の式が成り立つ。

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

ここでのポンプ光と信号光を指定しない場合には、例えば、周波数は f_i 、 f_j 、 f_k の信号光をファイバに入射した際に、多数のアイドラ光を発生する。この場合、生成したアイドラ

光の周波数に関して以下の式が成り立つ

$$f_{ijk} = f_i \pm f_j \pm f_k \quad (2.3)$$

ここで、生成したアイドラ光の数は以下のようになる [11]。

$$N = (M^2(M - 1))/2 \quad (2.4)$$

この N は発生する四光波混合の数であり、M はファイバに入射波長数である。式 (2.4) を見ると、発生する四光波混合の数は入射波長数の 3 乗に比例する。WDM システムにおける使用する波長領域は表 2.1 のように分類される [1]。波長間隔の狭い WDM システムでは、C バンドと L バンドだけが使用され、波長間隔がおよそ 0.8nm 非常に細かく分割されている。

表 2.1: 波長領域の名称の定義

| 名称 | 帯域 |
|-------|---------------|
| O バンド | 1260nm-1360nm |
| E バンド | 1360nm-1460nm |
| S バンド | 1460nm-1530nm |
| C バンド | 1530nm-1565nm |
| L バンド | 1565nm-1625nm |
| U バンド | 1625nm-1675nm |

本論文における入射光の波長は全て C バンドから選ぶ。第三章では、縮退四光波混合のみを利用して WDM-to-OTDM 変換を行い、第四章では、縮退四光波混合及び非縮退四光波混合を利用した WDM-to-Multi-OTDM 変換を行う。

四光波混合が発生する時に入射したポンプ光の数と信号光の数により、生じたアイドラ光の数と位置が変わるので、以下は二つの例を述べる。

(a)-ポンプ光を一つ、信号光を複数利用する場合

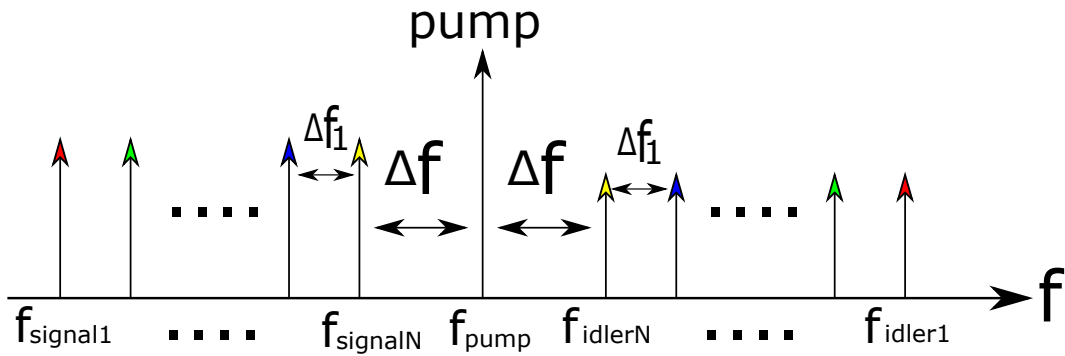


図 2.5: 信号光を複数利用する四光波混合

入力信号として、ポンプ光を一つ、信号光を複数ファイバに入射する際に発生する四光波混合は図 2.5 のように示す。信号光とポンプ光間の周波数間隔を Δf 、信号光間の周波数を等間隔 Δf_1 に設定するようにしている。ここでの信号光、ポンプ光、アイドラ光の周波数をそれぞれ $f_{signal1} \dots f_{signalN}$ 、 f_{pump} 、 $f_{idler1} \dots f_{idlerN}$ とすると、アイドラ光が発生する周波数に関して次の (2.5) 式、(2.6) 式、(2.7) 式が成り立つ [12]。

$N = 1$ の時

$$f_{idler1} = 2f_{pump} - f_{signal1} \quad (2.5)$$

$N > 1$ の時

$$f_{idlerN} = 2f_{pump} - f_{signalN} \quad (2.6)$$

$$= f_{pump} + \Delta f + (N - 1) \Delta f_1 \quad (2.7)$$

四光波混合を行う際に、変換効率を入射するポンプ光のパワー、ファイバの長さ、ファイバの非線形係数及び位相不整合等の条件に依存する。入射光の強度が強いほど、発生するアイドラ光の強度も大きくなる。しかしながら、この発生したアイドラ光の周波数が入射信号の周波数のいずれかに一致すると、これは強度雑音として信号光を干渉し、信号光の伝送特性を劣化させてしまうため、波長配置に配慮し、等間隔にせず、不等間隔とする必要がある。また、効率の良い四光波混合を発生させるためには、ポンプ光と光ファイバの零分散波長をできるだけ一致させることが要求される [1]。

(b)-信号光を一つ、ポンプ光を複数利用する場合

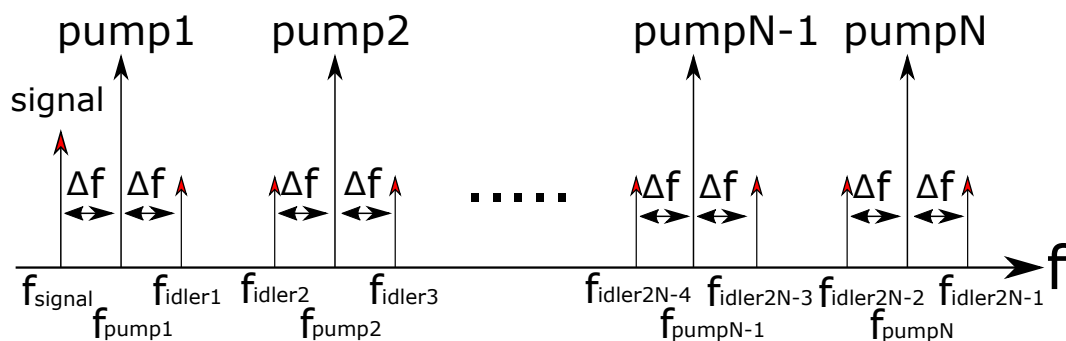


図 2.6: ポンプ光を複数利用する四光波混合

図 2.6 に示すように、入力信号としてポンプ光を複数、信号光を一つ、ファイバに入射する際に、縮退四光波混合と非縮退四光波混合を同時に発生することを図示した。ポンプ光、信号光、アイドラ光の周波数をそれぞれ $f_{\text{pump1}}, \dots, f_{\text{pumpN}}, f_{\text{signal}}, f_{\text{fidler1}}, \dots, f_{\text{fidler}(2N-1)}$ とすると、アイドラ光が発生する周波数に関して次の (2.8) 式、(2.9) 式、(2.10) 式が成り立つ [12]。

$N=1$ の時

$$f_{\text{fidler1}} = 2f_{\text{pump1}} - f_{\text{signal}} \quad (2.8)$$

$N \geq 2$ の時

$$f_{\text{fidler}(2N-2)} = f_{\text{pumpN}} - f_{\text{pump1}} + f_{\text{signal}} \quad (2.9)$$

$$f_{\text{fidler}(2N-2)} = f_{\text{pumpN}} + f_{\text{pump1}} - f_{\text{signal}} \quad (2.10)$$

ここの N はポンプ光の数を示す。四光波混合は一般的に波長変換に用いられる。入射する信号光を異なる波長に変換することは、将来、フォトニックネットワークの構築に向けて大きな期待を寄せられている。今まで、波長変換には様々な手法を利用されている。例えば、半導体増幅器 (SOA) の相互利得変調方式 (XGM) を用いた手法があるが、入射光の波長、強度、伝搬方向など、SOA の動作条件に大きな影響を与えられ。また、SOA 中の相互位相変調 (XPM) を用いた手法がある [13] が、SOA と合分波器などの受動素子とを集積化しなければならないし、干渉計構造に起因して光出力特性が周期的であることは、実用化には問題がある。そこで、光ファイバの四光波混合を用いた手法は他の波長変換に比べて、変換速度が速い、そして、波長帯域間の信号を一括で変換できる利点がある。しかし、良い変換効率を実現するにはいくつかの条件を満たされる必要がある。それはポンプ入射光の偏波状態を揃えること、そして、ポンプ光の波長はなるべくファイバの零分散波長の一致することが挙げられる。

2.4 四光波混合を用いた複数信号処理の一括動作の原理

2.4.1 NRZ-OOK信号に対する波形変換及びWDM-to-OTDM変換の一括動作

図 2.7 に四光波混合を用いた NRZ/RZ 波形変換の概要を示す。NRZ 信号は分散に対する耐性があるため、WDM では NRZ 信号を主に用いられる。しかし、NRZ 信号はタイムスロット全体を専用してしまうため OTDM 信号として不適である。これによって、WDM-to-OTDM 変換を行うには、NRZ 信号から RZ 信号への波形変換を行う必要がある。

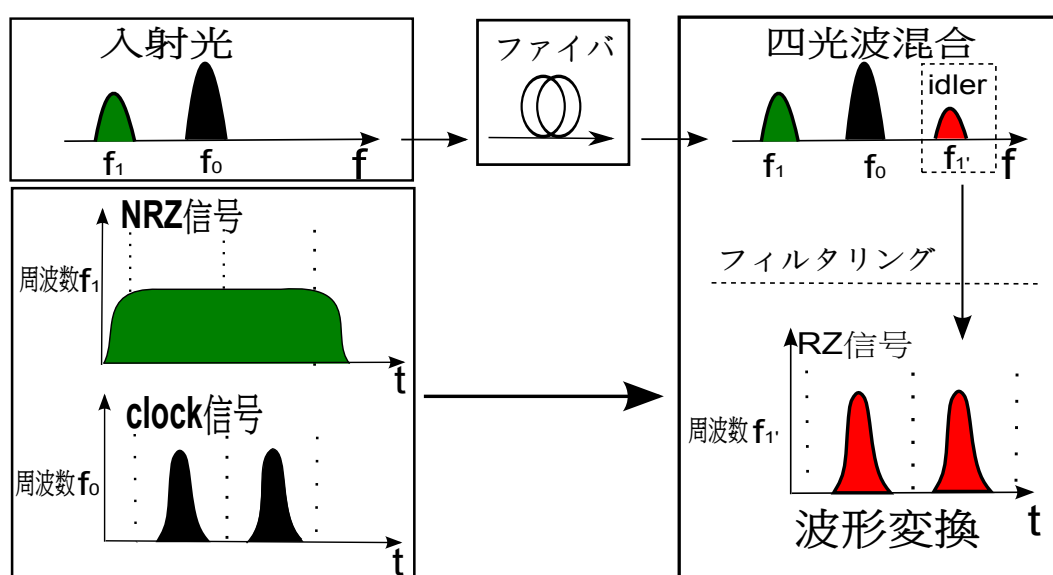


図 2.7: 四光波混合を用いた波形変換

図 2.7 に示すように、周波数 f_1 の低パワー NRZ 信号と周波数 f_0 の高パワー RZ クロック信号をファイバに入射すると、四光波混合が発生する。周波数 f_1' のところにアイドラ光が出力される。このアイドラ光をフィルタリングによって切り出すことで入射信号の情報を受け継ぐ信号を得ることができる。また、この新たにできたアイドラ光は NRZ 信号と RZ クロック信号が同時に存在している時間にも発生するので、出力された信号は RZ 信号になる。これによって、NRZ 信号から RZ 信号への波形変換が可能とする。

波形変換を行う同時に、多重化変換も行われる。2.2 節で説明した通り、WDM は、波長が異なる複数の信号光を波長軸上で伝送させる多重方式であり、OTDM は、単一波長の信号光を時間軸上で伝送させる多重方式である。言い換えると、OTDM では各チャンネルの波長は同じであるが、WDM では各チャンネルの波長がそれぞれ異なっている。したがって、WDM-to-OTDM 変換を行うためには、各チャンネルの波長をまとめる必要がある。また、光ファイバの零分散波長とポンプ光の波長が一致した際に、四光波混合が最も強く発生する [1]。そこで、本研究では複数縮退四光波混合をうまく発生させるため、アイドラ

光の波長は零分散波長に一致するように入射光の波長を設定した。この四光波混合を利用して WDM-to-OTDM 変換を行う仕組みを図 2.8 に示す。

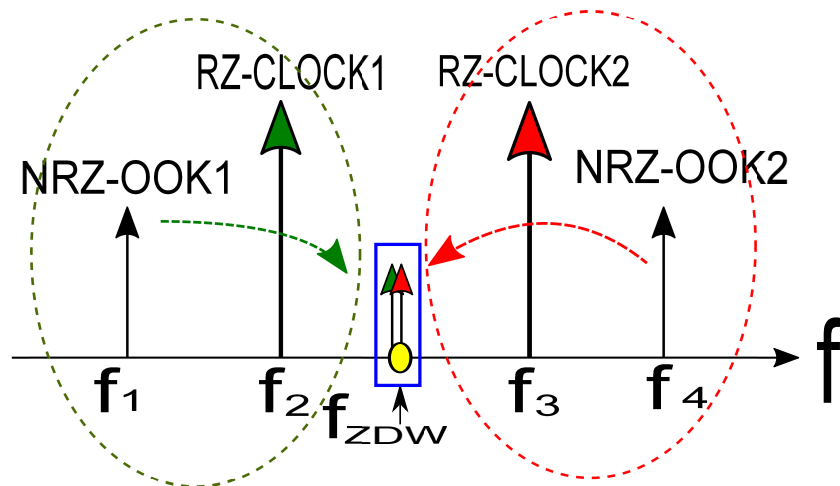


図 2.8: 四光波混合を用いた WDM-to-OTDM 変換の原理

2 波長の信号光 (NRZ-OOK) と 2 波長のポンプ光 (RZ-CLOCK) を光ファイバに入射する際、NRZ-OOK1 と RZ-CLOCK1、NRZ-OOK2 と RZ-CLOCK をセットにし、縮退四光波混合を発生させる。四光波混合によって生じたアイドラ光は同時に零分散波長に生成させるため、式 (2.11)、(2.12) のように信号光とポンプ光の周波数を計算し、波長を設定した。生じたアイドラ光の周波数の計算式は以下ようになる。

$$f_{ZDW} = 2f_2 - f_1 \quad (2.11)$$

$$f_{ZDW} = 2f_3 - f_4 \quad (2.12)$$

式 (2.11) より計算された周波数には NRZ-OOK1 の情報を保存している。式 (2.12) より計算された周波数には NRZ-OOK2 の情報を保存している。同じ周波数を持つ光に 2 チャンネルの情報を乗っているため、この周波数のアイドラ光 (周波数: f_{ZDW}) を切り取ることで WDM-to-OTDM 変換が可能とする。

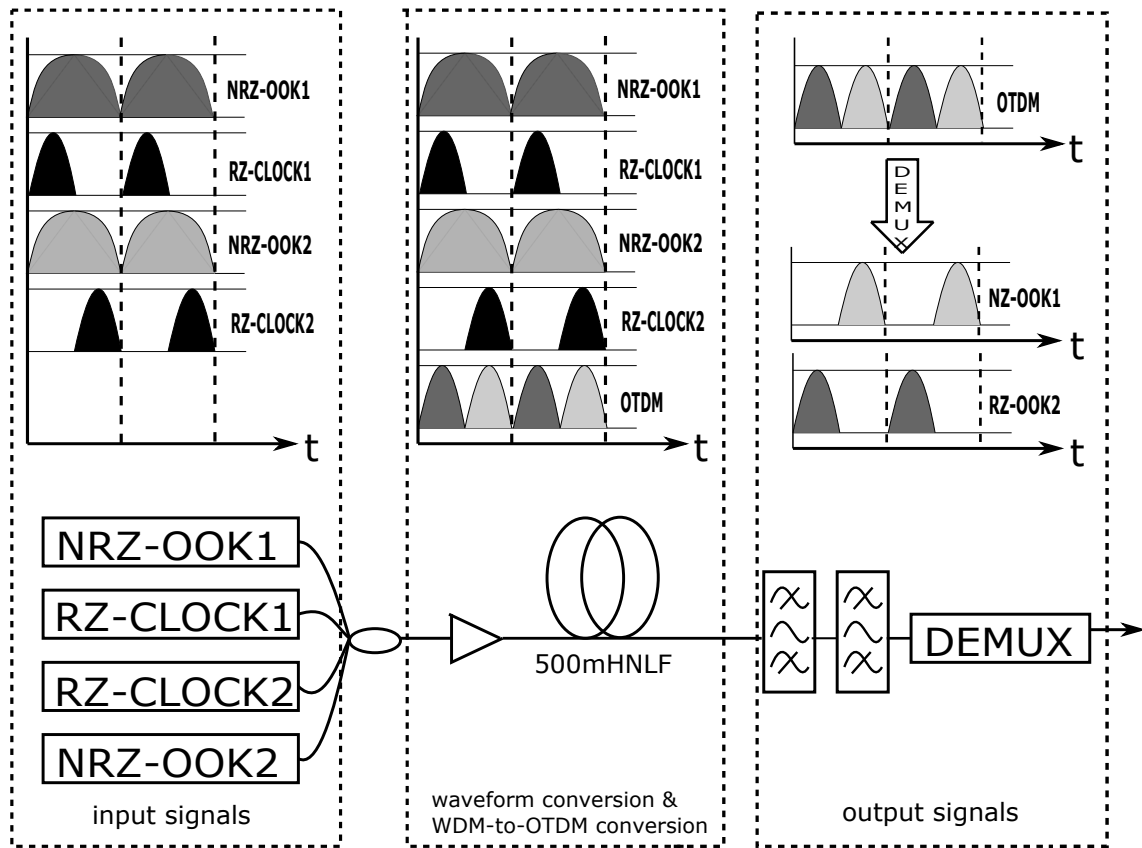


図 2.9: NRZ-OOK 信号における波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括動作の変換概要図

四光波混合を利用した NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-OTDM 変換一括動作の変換概要を図 2.9 に示す。図 2.9 中の (a) は時間軸上における入力信号である。(b) はファイバ中で四光波混合を行う際に時間軸上での信号光で、(c) は切り出した OTDM 信号及び分離後の単チャンネル信号である。2 チャンネルの WDM 信号光及び 2 波長のクロック光を高非線形ファイバに入射し、四光波混合を発生させる。NRZ-OOK1 と RZ-CLOCK1、NRZ-OOK2 と RZ-CLOCK2 が時間軸上でそれぞれ重なるタイミングにイドラ光が生成する。生成した信号光をファイバの出力端におけるバンドパスフィルタで切り出すことで OTDM 信号を得る。OTDM 信号の符号誤り率特性を直接測定できないため、バンドパスフィルタの後多重分離を行う。単チャンネルに対して符号誤り率特性を測定することで、波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括動作の変換特性を推測する。

2.4.2 NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作

概要で述べた通り、通信の発展に伴い、光通信における信号の多重化技術の研究が進められており、特に、WDM 及び OTDM が積極的に利用されている。WDM 及び OTDM がそれぞれの特徴を持っているため、これらの多重化技術を組み合わせることで、大容量及び高速なネットワークの実現が求められる。そこで、本研究では、OTDM 信号を WDM 多重方式で伝送することに着目し、より大容量のネットワークを実現することを目指している。図 2.10 には、四光波混合を利用して NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の仕組みを示す。

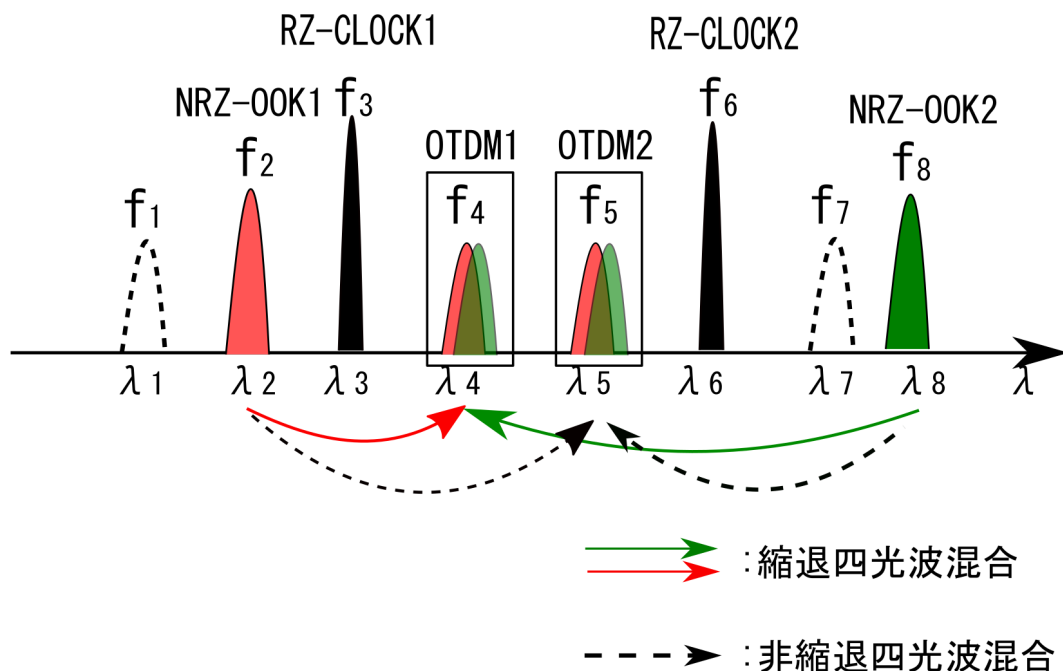


図 2.10: NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の原理図

WDM-to-Multi-OTDM 変換を行うには、NRZ-OOK1、NRZ-OOK2、RZ-CLOCK1、CLOCK2 を入力信号として、四光波混合を発生させる。図 2.10 に示すように、周波数 f_2 を持つ信号光と周波数 f_3 を持つクロック光、周波数 f_8 を持つ信号光と周波数 f_6 を持つクロック光をペアにし、縮退四光波混合を発生する。それぞれ生成したアイドラ光は同じ周波数 (f_4) を持つため、OTDM1 信号になる。また、周波数 f_2 を持つ信号光と周波数 f_3 、周波数 f_6 を持つクロック光、周波数 f_8 を持つ信号光と周波数 f_3 、周波数 f_6 を持つクロック光をペアにし、非縮退四光波混合を発生する。それぞれ生成したアイドラ光は同じ周波数 (f_5) を持つため、OTDM2 信号を得る。OTDM1 信号と OTDM2 信号を異なる周波数を持つため、Multi-OTDM を得ることができる。式 (2.1) と式 (2.2) により、それぞれ生成されたアイド

ラ光の周波数は以下ようになる。

$$f_4 = 2f_3 - f_2 \quad (2.13)$$

$$f_4 = 2f_6 - f_8 \quad (2.14)$$

$$f_5 = f_6 + f_2 - f_3 \quad (2.15)$$

$$f_5 = f_3 + f_8 - f_6 \quad (2.16)$$

周波数 f_1 を持つアイドラ光は周波数 f_3 周波数 f_6 周波数 f_8 を持つ信号における四光波混合から生成されたものである。また、周波数 f_7 を持つアイドラ光は周波数 f_3 周波数 f_6 周波数 f_2 を持つ信号における四光波混合から生成されたものである。これらのアイドラ光は周波数 f_3 及び周波数 f_6 の信号光と高次四光波混合を発生すると、周波数 f_5 のところにアイドラ光を生じる可能性があるため、周波数 f_5 を持つ OTDM 信号は、周波数 f_4 を持つ OTDM 信号より劣化している可能性がある。

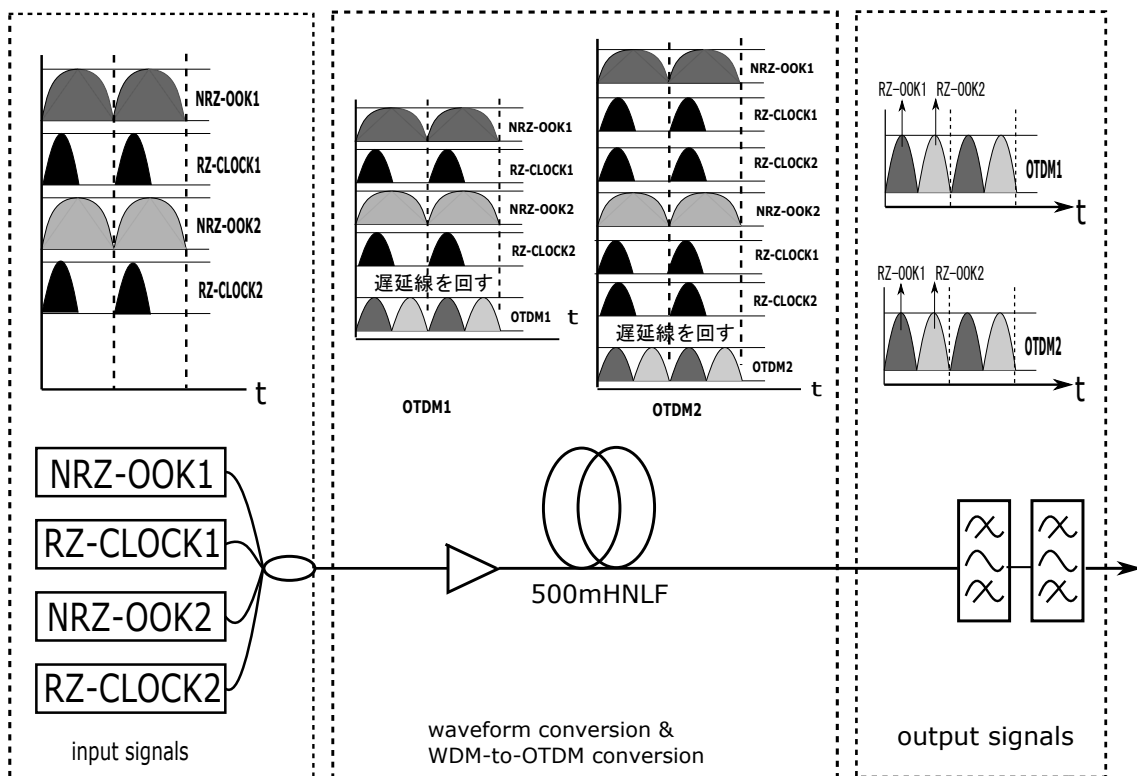


図 2.11: RZ-OOK 信号における WDM-to-multi-OTDM 変換の一括動作の構成概要図

また、四光波混合を用いた WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作の構成概要図を図 2.11 に示す。2 チャネルの WDM 信号光 (NRZ-OOK) 及び 2 波長のクロック光を高非線形ファ

ファイバに入射し、四光波混合を発生させる。生成した信号光をファイバの出力端におけるバンドパスフィルタで切り出すことで Multi-OTDM 信号を得る。

2.4.3 励起光として使われる RZ-CLOCK 及び CW 光

| 励起光 | 入力信号 | 変換後の信号 | アプリケーション |
|----------|------|--------|--|
| CW | | | <ul style="list-style-type: none"> ・波長変換 ・光位相共役(optical phase conjugation) |
| RZ-CLOCK | | | <ul style="list-style-type: none"> ・多重分離 ・波形・波長変換 ・サンプリング |

図 2.12: 励起光としての CW 及び RZ-CLOCK

ファイバ中に四光波混合現象を起こすためには、連続光 (CW) 及びクロック光 (RZ-CLOCK) が励起光としてよく使われている。連続光の生成は、変調器を用いる RZ-CLOCK の生成より簡単だが、それぞれの特徴を持っているため、用途が異なる。表 2.12 にはこの二つの励起光について、応用例及び発生する FWM 現象などを示す。連続光について、波長 λ_p の信号光 (NRZ-OOK) と波長 λ_s の連続光をファイバに入射し、四光波混合の発生により生成されたアイドラ光は NRZ-OOK の信号光である。また、生成されたアイドラ光のパルス幅は入力する信号光のパルス幅に依存する。連続光は一般的に波長変換及び光位相共役に使われている。それに対し、クロック光の場合は、波長 λ_p の信号光 (NRZ-OOK) と波長 λ_s のクロック光をファイバに入射し四光波混合を発生させ、生じたアイドラ光は RZ-OOK 信号であるため、クロック光は多重分離、波形・波長変換及びサンプリングとしてよく使われる。また、生成されたアイドラ光のパルス幅はクロック光のパルス幅に依存する。そこで、本研究における一括動作では、四光波混合を起こすための励起光として、全てクロック光を使用する。また、連続光を利用する一括動作の構成は今後向けの課題とする。

2.5 四光波混合を用いた多重分離

WDM-to-OTDM 変換には、変換された OTDM 信号の品質の直接の測定ができないため、多重分離が必要となる。本報告では、変換後の OTDM 信号に対して、長さ 320m の高非線形ファイバ中の四光波混合を利用し、単チャンネル分離を行った。OTDM 信号における多重分離の概念図を図 2.13 に示す。四光波混合を用いた多重分離手法には RZ-CLOCK を励起光として用いている。

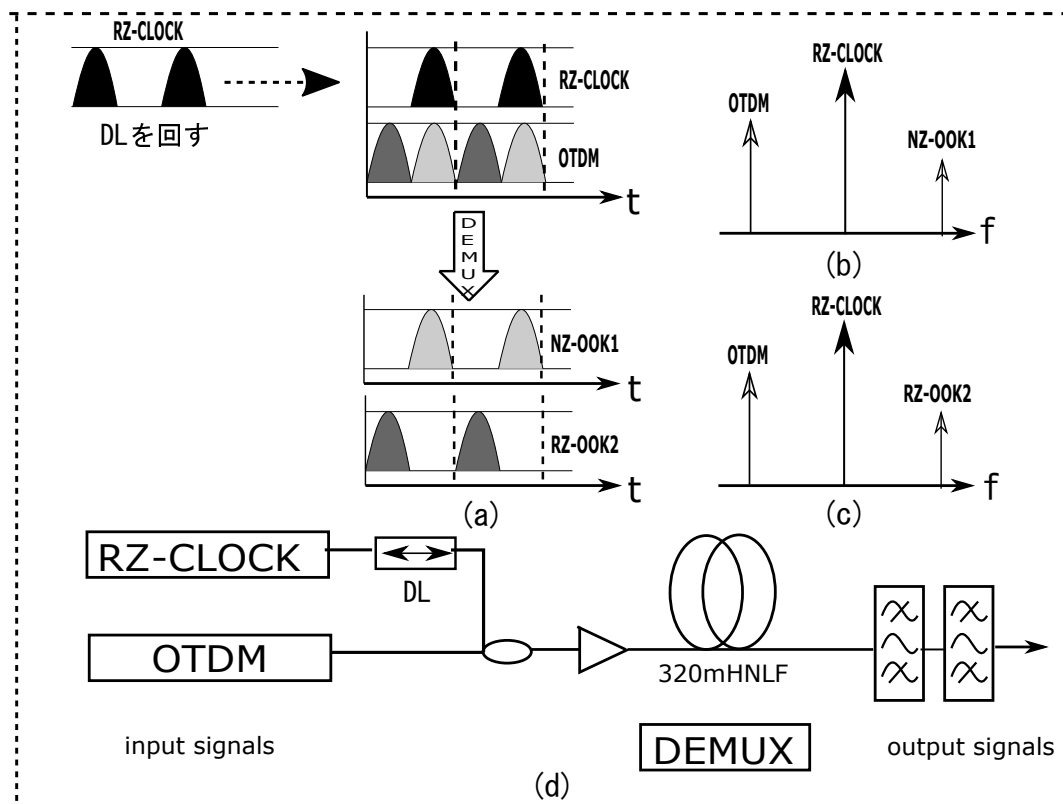


図 2.13: 四光波混合を用いた多重分離の概念図

OTDM 信号をタイミング調整後のクロック光と合波し、HNLF で四光波混合を発生させ、バンドパスフィルタを用いてアイドル光を切り出すことにより単チャンネル信号を抽出する。この過程の時間軸表示を図 2.13 の (a)、周波数軸表示を図 2.13 の (b) に示す。図 2.13 の (a) を見ると、RZ-CLOCK をタイムスロットの中、片方のチャンネルと重なるようにタイミングを調整することで、単チャンネル信号を得ることができる。

2.6 パルス幅圧縮

現在の光ファイバ通信において光電変換により伝送速度が制限があるため、それ以上の高速なネットワークの実現には全光信号処理に置き換える必要がある。全光信号処理における OTDM 多重化技術を用いられる場合、より多重度の高い OTDM にはより狭いパルス幅が要求される。しかしながら、レーザー体型電界吸収型変調器 (EML: Electro-absorption Modulator integrated Laser diode)、LiNbO₃ 強度変調器 (LNM) などは限定されたパルス幅しか出力できないため、狭いパルス幅を得るため、パルス圧縮を行う必要がある。本研究では、パルス圧縮を伴う波形変換及び多重化変換の一括動作を提案し、検証を行った。図 2.14 には高非線形ファイバ及びシングルモードファイバを用いたパルス圧縮の原理図を示す。LNM の出力を増幅してから HNLF に入射する。その際、自己位相変調により、クロック光の時間軸上先端側の周波数が高くなる。後方側の周波数が低くなる。その後、シングルモードファイバに入射することで、周波数の高いキャリアは時間軸上で遅く伝搬され、その反対に、周波数の低いキャリアは時間軸上で速く伝搬されるので、クロック光の両端はお互い接近し、パルス圧縮が可能となる。

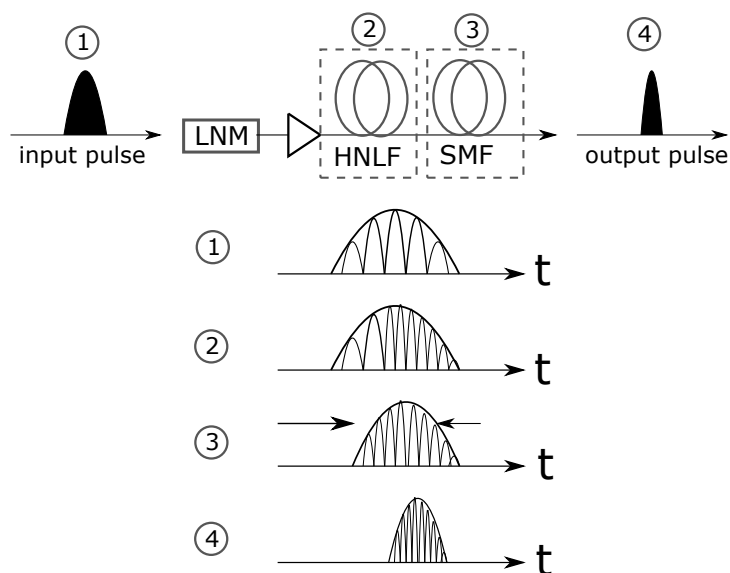


図 2.14: パルス圧縮の概念図

パルス幅を圧縮する先行研究には、断熱ソリトンパルス圧縮技術を用いた手法が報告されている [12]。この手法は分散シフトファイバ (DSF: Dispersion shifter fiber) 及び波長可変ラマンレーザー (TFRL: Wavelength tunable Raman laser) が用いられる。また、近年、非線形ファイバは分散性及び非線形性が特徴であるため、パルス圧縮にはよく利用されている。例えば、高非線形ファイバの自己位相変調を用いた Mamyshev 型手法 [14] では、パルス圧縮を伴い、光信号の再生効果を得ることもできる。また、高非線形ファイバの後にシングルモードファイバを繋ぐ手法 [15] では、自己位相変調を用いてパルスがチャープされ、さらにシングルモードファイバを利用することで圧縮を行う。本報告では、この手法を用いてパルス圧縮を行ったが、今後、他の手法と一括動作を組み合わせる必要があると考えられる。

第3章 NRZ-OOK信号に対する波形変換及びWDM-to-OTDM変換の一括動作の評価

3.1 クロック光のパルス圧縮を行わない場合

NRZ-OOK 信号に対して、波形変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括動作を行うあたり、クロック光のパルス圧縮なしとクロック光のパルス圧縮ありの二つの場合についてそれぞれ検証を行った。いずれの場合についても同じ波長を持つ信号光を利用した。各入力信号の波長は表 3.1 に示すように設定した。

表 3.1: 各入力信号の波長

| NRZ-OOK1 | NRZ-OOK2 | RZ-CLOCK1 | RZ-CLOCK2 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1546.12nm | 1558.92nm | 1549.32nm | 1555.72nm |

図 3.1 に NRZ-OOK 信号の波長・波形変換及び多重化変換一括動作の実験構成を示す。2×10Gbps の NRZ-OOK 信号は、周波数 10Gbps で PRBS²³¹-1 の電気信号と LNM(LiNbC3 強度変調)を用いて生成した。さらに、エルビウム添加光ファイバ増幅器を用いて信号の強度を調整してから AWG により各波長ごとに分波し、片方のチャンネルを遅延線でタイミング制御した後合波することで波長多重信号となる。

LN 変調器で生成した 2 波長の RZ クロック信号のタイミング・強度・偏波を調整してから NRZ-OOK 信号光と合波する。ここで、カプラ直前において、信号光のパワーを -9.4dBm、ポンプ光のパワーを -3.6dBm となるように調整した。高利得増幅器によって合波した複数の信号光を 23dBm に増幅してから長さ 500 m の高非線形ファイバに入射し、四光波混合を発生させる。生じたアイドラ光を高非線形ファイバの出力端においた AWG 及びバンドパスフィルタを用いて切り取ることによって NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び多重化変換の一括動作を行われた。切り出したアイドラ光を、ディレイラインでタイミングを制御してから RZ クロック信号と合波する。ここでカプラ直前において、信号光のパワーを -10dBm、ポンプ光のパワーを -4dBm となるように調整した。高利得増幅器によって合波した複数の信号光を 23dBm に増幅してから長さ 320 m の高非線形ファイバに入射し、

四光波混合を発生させることにより多重分離をする。ファイバの出力端においた狭帯域バンドパスフィルタを用いて単チャンネルのみを抽出し、符号誤り率特性を測定する。

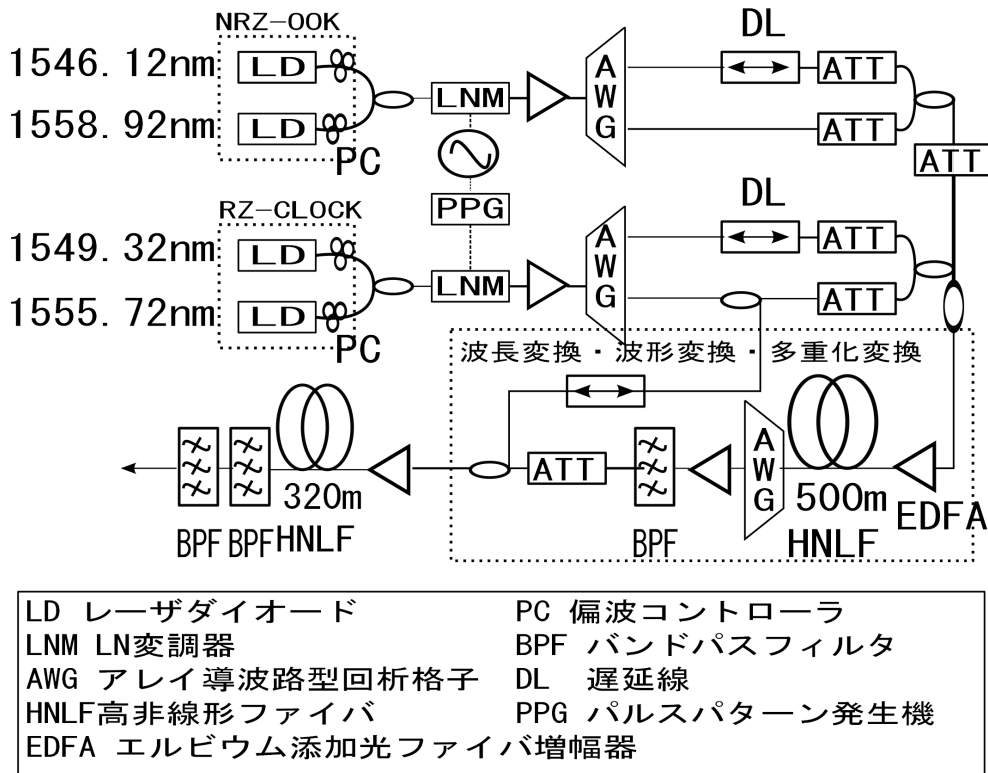
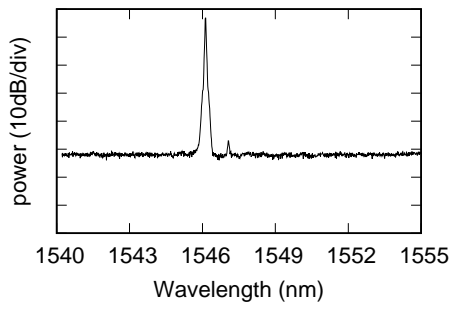
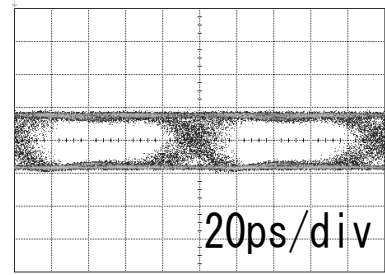


図 3.1: NRZ-OOK 信号の波長変換・波形変換及び多重化変換の一括動作の実験構成

入射信号として 2 波長の NRZ-OOK 信号のスペクトル及び光波形は図 3.2、3.3 に示す。高非線形ファイバの中で非縮退四光波混合の発生を抑えるため、2 波長の RZ クロック信号のタイミング調整が必要となる。ディレイラインでタイミング制御した後の RZ クロック信号の光波形を図 3.4 に示す。500m の高非線形ファイバ入力端におけるスペクトルは図 3.5 に示す。それと同様に 500m の高非線形ファイバ出力端におけるスペクトルは図 3.6 に示す。ここで、四光波混合で生じたアイドラ光をフィルタリングすることで、OTDM 信号を得ることができる。切り出したアイドラ光のスペクトル及び光波形を図 3.7 に示す。OTDM 信号を多重分離するため、長さ 320 m の高非線形ファイバに入射し、四光波混合を発生する際のスペクトルを図 3.8 に示す。図 3.9 はバンドパスフィルタを用いて切り出したアイドラ光のスペクトル、図 3.10 には OTDM 信号から分離された CH1 及び CH2 の光波形を示す。その後、単チャンネルに対して符号誤り率特性を測定する。

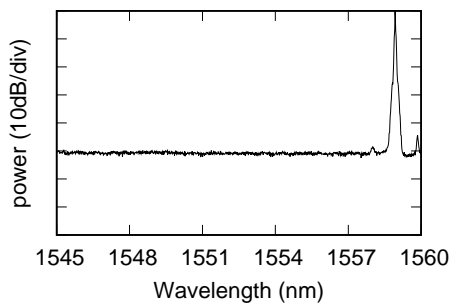


(a)NRZ-OOK1 のスペクトル

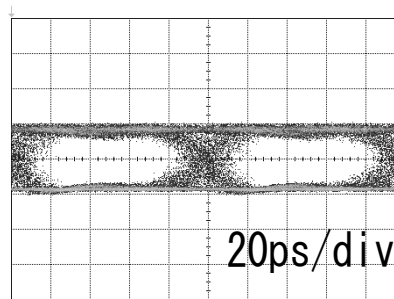


(b)NRZ-OOK1 の光波形

図 3.2: 波長 1546.12nm の入力信号のスペクトル及び光波形

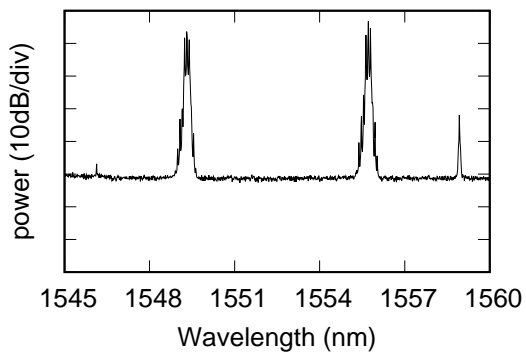


(a)NRZ-OOK2 のスペクトル

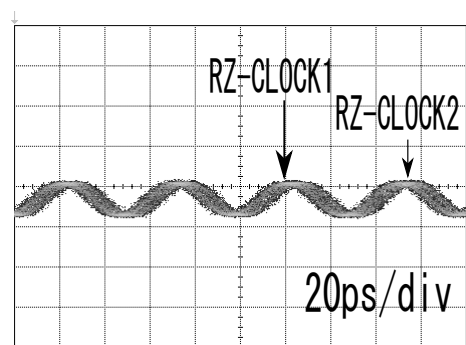


(b)NRZ-OOK2 の光波形

図 3.3: 波長 1558.92nm の入力信号のスペクトル及び光波形



(a) 合波した RZ-CLOCK のスペクトル



(b) 合波した RZ-CLOCK の光波形

図 3.4: 合波したクロック光のスペクトル及び光波形

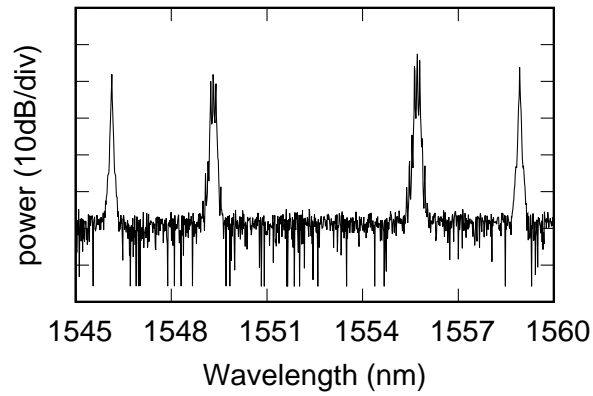


図 3.5: 500m の高非線形ファイバ入力端においてのスペクトル

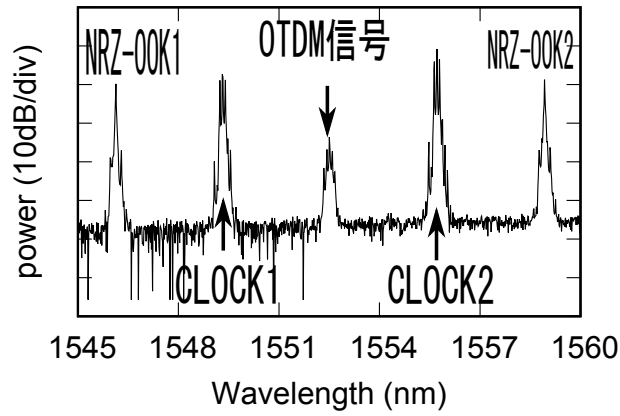


図 3.6: 500m の高非線形ファイバ出力端においてのスペクトル

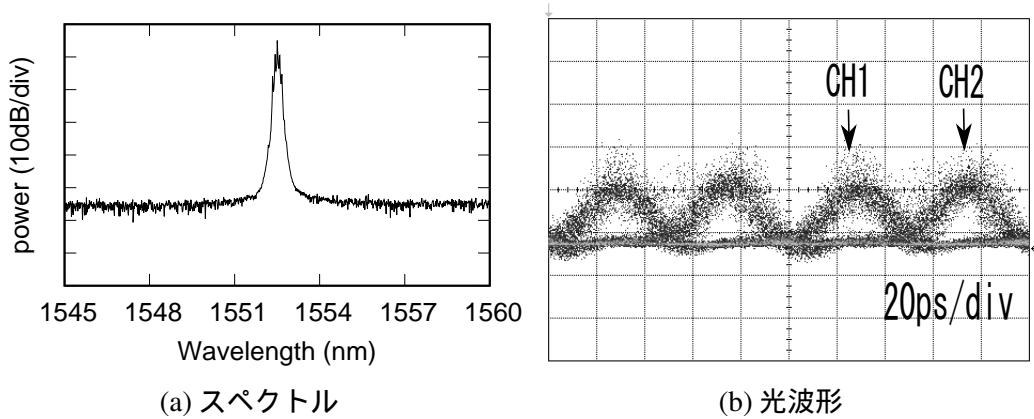


図 3.7: 切り出した OTDM 信号のスペクトル及び光波形

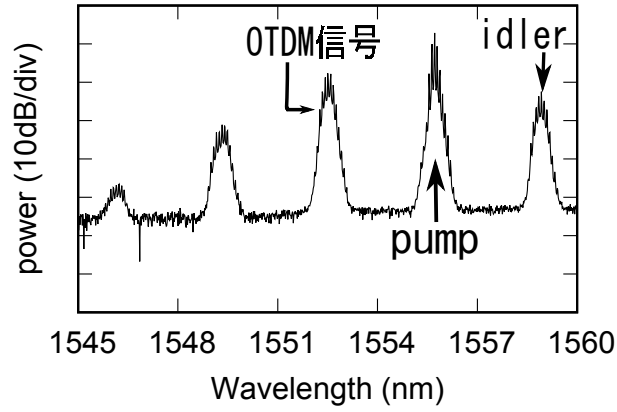


図 3.8: 四光波混合が発生する際のスペクトル

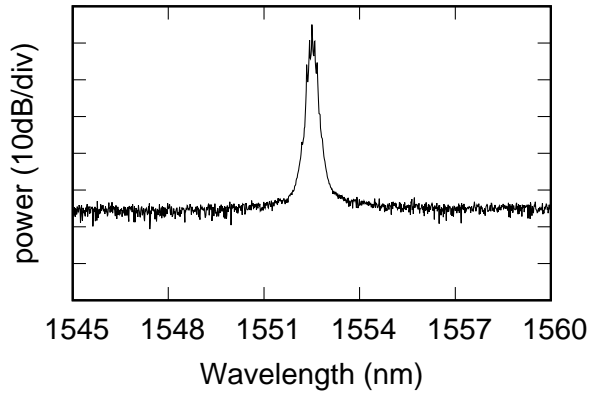
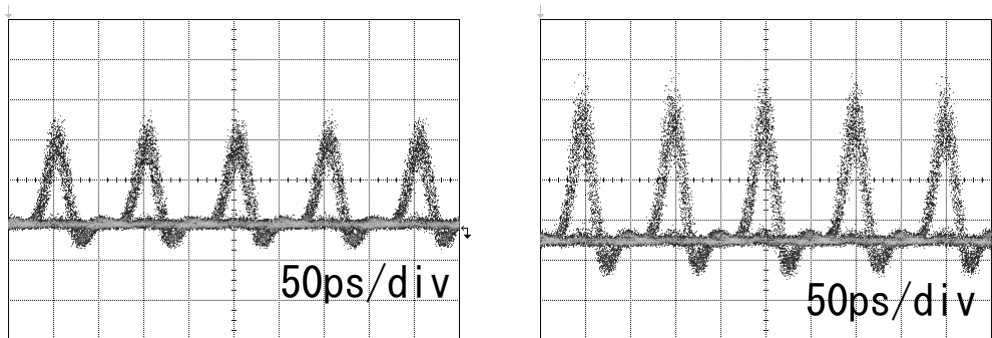


図 3.9: 切り出した単チャンネルのスペクトル



(a) チャンネル CH1 光波形

(b) チャンネル CH2 光波形

図 3.10: DL を調整しながら得られた 2 チャンネルの光波形

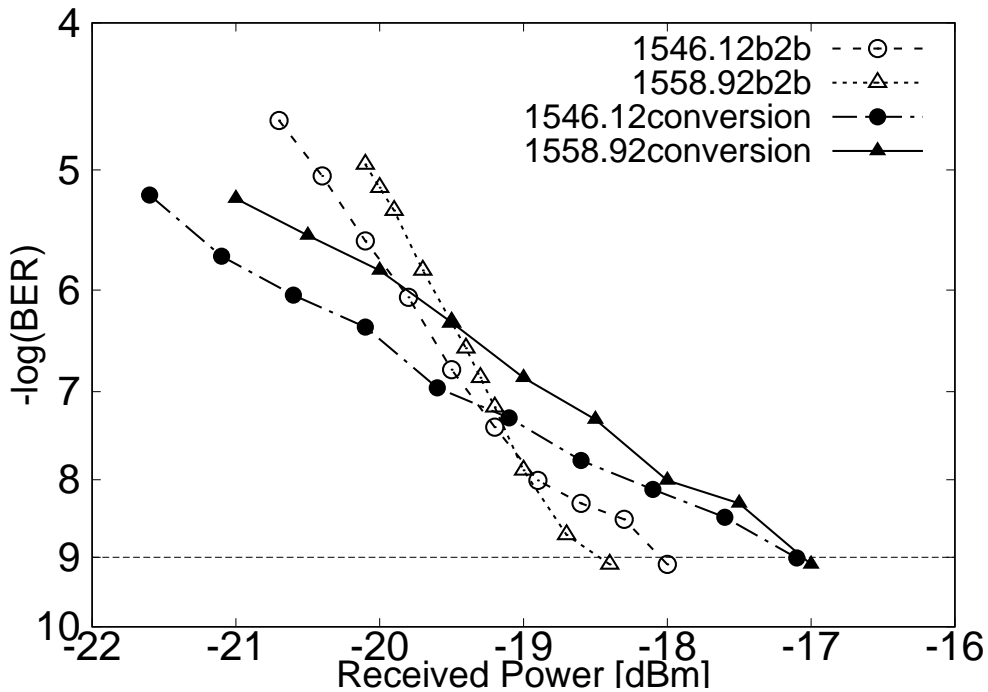


図 3.11: 符号誤り率特性

抽出した単チャネルの光波形及び符号誤り率特性を図 3.11 に示す、白丸と白三角は入力信号の特性で、黒丸と黒三角は多重化変換後の単チャネルの変換特性である。多重分離後、いずれの 10GbpsRZ-OOK 信号のアイパターンから目視による波形の劣化は特に見られなかったが、符号誤り率特性が劣化していることがわかった。入力信号の特性と比べてチャンネル 1 における $BER=10^{-9}$ でのパワーペナルティ約 1dB となり、チャンネル 2 におけるパワーペナルティ約 1.3dB となった。NRZ-to-RZ 変換及び WDM-to-OTDM 変換の一括動作後、入力信号のパルス幅が圧縮され、変換後の RZ-OTDM 信号の品質が改善されるはずだが、信号品質の直接の測定はできないため、OTDM 信号を多重分離している。多重分離後の信号品質の劣化は、再度四光波混合を行うことによるものと推測される。したがって、WDM-to-OTDM 変換の段階では良好な OTDM 信号を得られたことを推測される。

3.2 クロック光のパルス圧縮を行った場合

OTDM では RZ 信号のパルス幅が狭い方が OTDM 信号の多重度を高めることが出来、より多くの情報を伝達することが可能となる。その為、高速な OTDM に対応するには RZ 信号のパルス幅について検討する必要がある。そこで、本研究における信号処理では、NRZ-OOK 信号に対し、一括動作変換後の RZ-OOK 信号のパルス幅はポンプ光として使われるクロック光のパルス幅に依存するため、クロック光のパルス圧縮を伴う波形変換及び多重化変換の一括動作を検証した。以下は、26.4ps のパルス幅を持つクロック光に対して、パルス圧縮を行った結果に対して述べる。

第 2 章 2.6 節で説明した通り、パルス圧縮を行うため、LN 変調器の後ろに 500m の HNLF と 4km のシングルモードファイバを挿入した。HNLF に入射する前における高利得増幅器 (EDFA) の出力を 22dBm から 25dBm まで変化させた場合のクロック光のパルス幅について表 3.1 に示す。ここで、高利得増幅器の出力はパルス圧縮用のパワーを示す。また、各 EDFA 出力に対して、パルス圧縮後、2 波長のクロック光のそれぞれの時間波形をオートコリレータで計測したものを図 3.13 及び図 3.14 に示す、スペクトルは図 3.15 に示す。

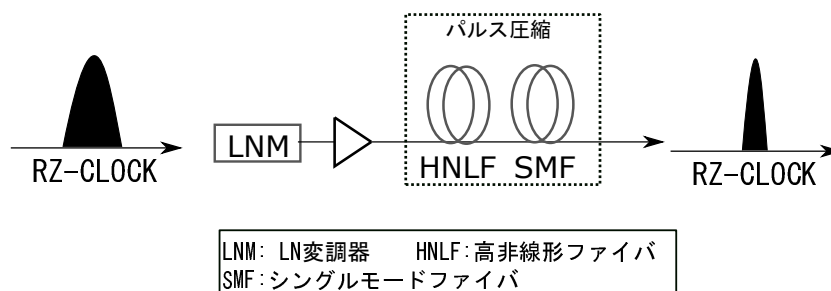
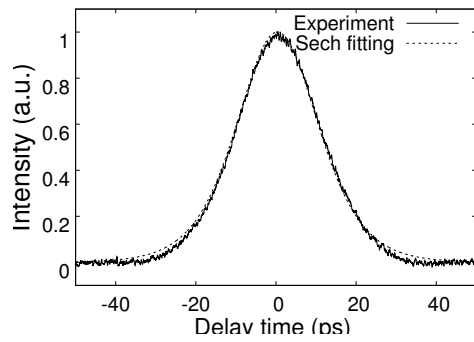


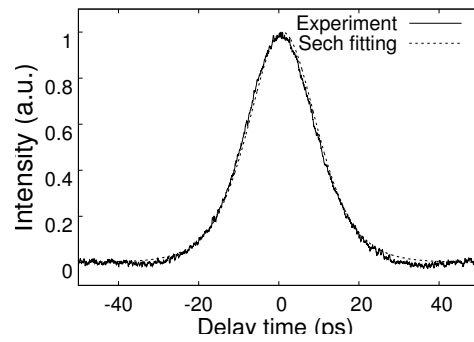
図 3.12: クロック光パルス圧縮の構成

表 3.2: パルス圧縮後のパルス幅 [ps]

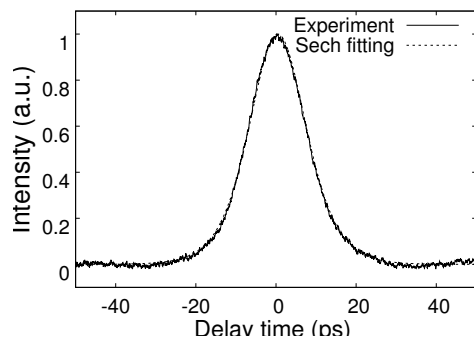
| EDFA 出力 [dBm] | クロック 1 のパルス幅 [ps] | クロック 2 のパルス幅 [ps] |
|---------------|-------------------|-------------------|
| 22 | 15.40 | 15.49 |
| 23 | 13.14 | 12.91 |
| 24 | 10.93 | 10.83 |
| 25 | 8.99 | 8.97 |



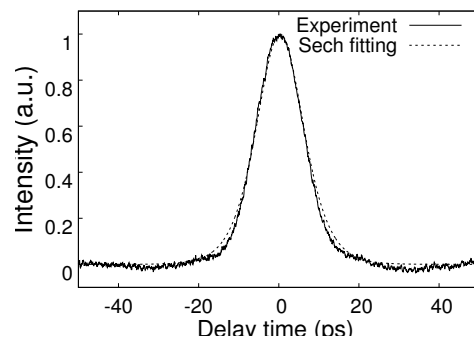
(a)EDFA=22dBm



(b)EDFA=23dBm

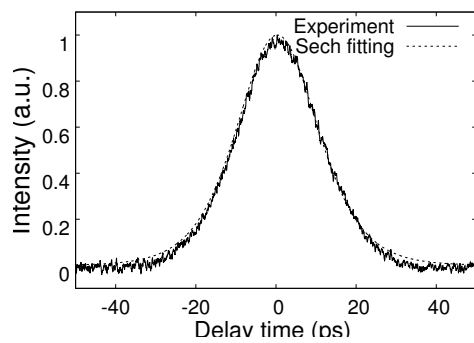


(c)EDFA=24dBm

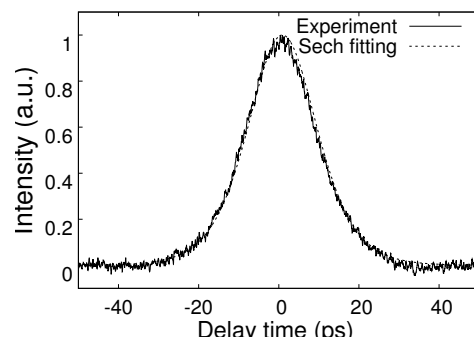


(d)EDFA=25dBm

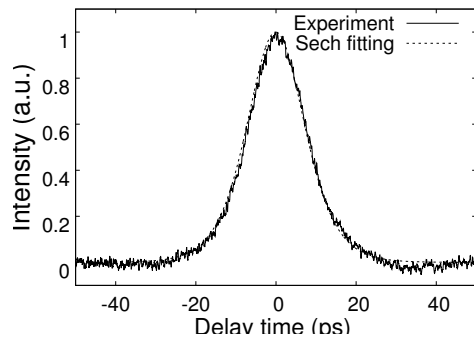
図 3.13: (a)EDFA=22dBm、(b)EDFA=23dBm、(c)EDFA=24dBm、(d)EDFA=25dBm における波長 1549.32nm のクロック光の時間波形



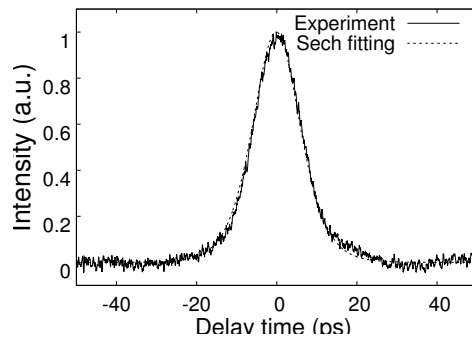
(a)EDFA=22dBm



(b)EDFA=23dBm

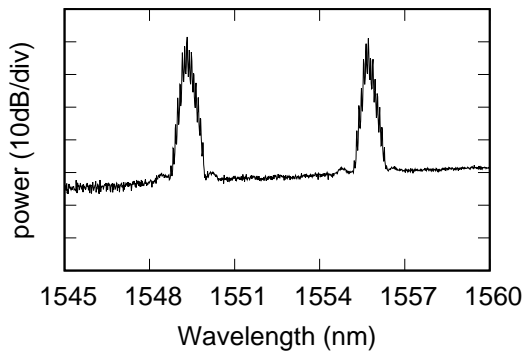


(c)EDFA=24dBm

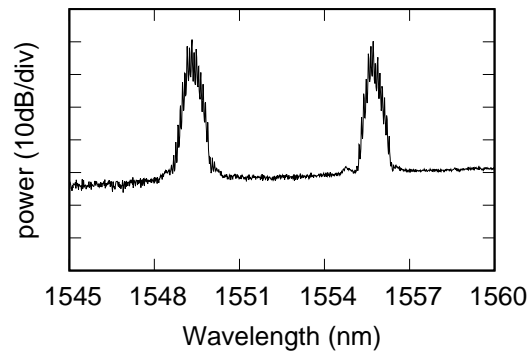


(d)EDFA=25dBm

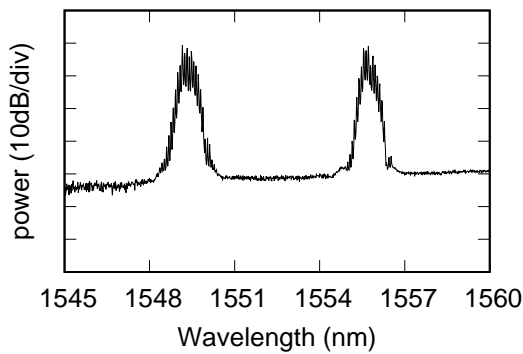
図 3.14: (a)EDFA=22dBm、(b)EDFA=23dBm、(c)EDFA=24dBm、(d)EDFA=25dBm における波長 1555.72nm のクロック光の時間波形



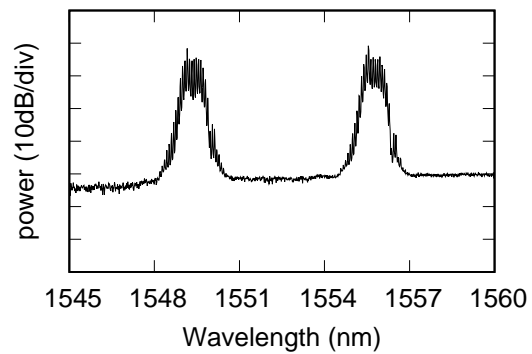
(a)EDFA=22dBm



(b)EDFA=23dBm



(c)EDFA=24dBm



(d)EDFA=25dBm

図 3.15: (a)EDFA=22dBm、(b)EDFA=23dBm、(c)EDFA=24dBm、(d)EDFA=25dBm における合波後のクロック光のスペクトル

表 3.2 を見ると、EDFA の出力パワーを 25dBm に設定する時、それぞれのクロック光のパルス幅は 8.99ps、8.97ps と最も小さくなる。EDFA の出力を 1dBm ずつ上げることに連

れて、得られたそれぞれのクロック光のパルス幅は約 2ps 毎に圧縮されていくことが分かる。図 3.13、図 3.14 に示した時間波形と図 3.15 で示した合波後クロック光のスペクトルをみると、パルス圧縮後、パルス幅が小さくなっており、その反対にスペクトルは拡大していくことが分かる。一括動作では四光波混合現象を用いるため、拡大されたスペクトルは四光波混合現象に何らかの影響があるかを調べる必要があるため、表 3.2 に示した各場合クロック光を用いて単チャンネルとの四光波混合を行う。

3.2.1 圧縮したクロック光を用いた四光波混合の特性

各 EDFA 出力の場合における圧縮されたクロック光を用いて単チャンネル信号光と四光波混合を行うための実験構成を図 3.16 に示す。波長 1558.92nm の NRZ-OOK 信号光と波長 1555.72nm のクロック光を利用して四光波混合を発生させ、生成したアイドラ光をバンドパスフィルタで切り出すことで変換効率を調べる。最後切り出したアイドラ光に対して符号誤り率特性を測定する。

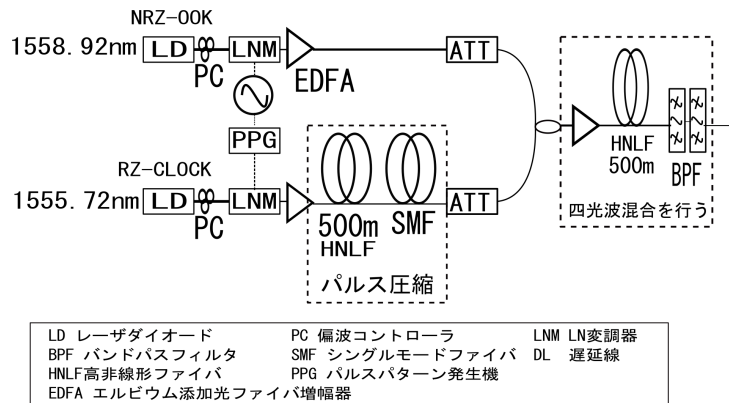
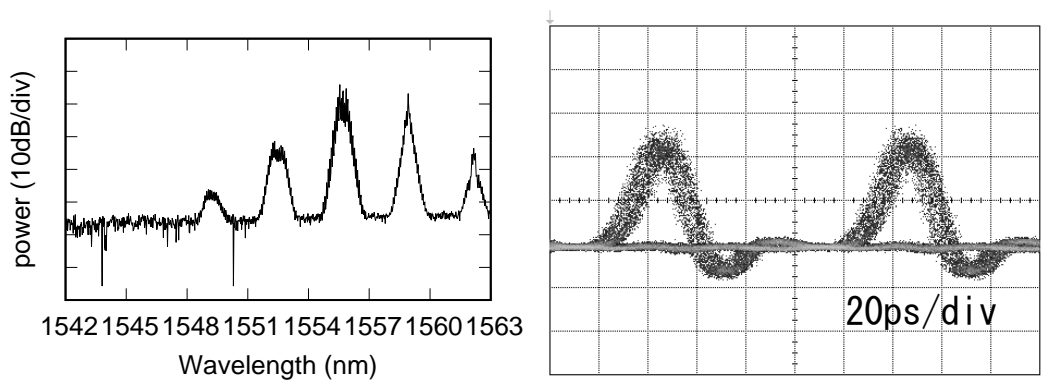


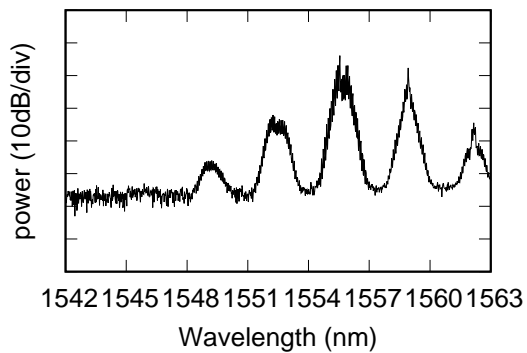
図 3.16: 四光波混合を用いて NRZ-OOK 信号の波長変換・波形変換の実験構成

図 3.16 に示すように、クロック光のパルスを圧縮するため、LN 変調器の後に 500m の高非線形ファイバとシングルモードファイバを挿入した。パルス圧縮の入力端における高利得増幅器の出力を 22dBm から 25dBm まで調整しながら四光波混合を行った。四光波混合を行う部分の入力端における高利得増幅器の出力パワーを全ての場合において 22dBm と設定した。パルス圧縮用のパワーを変化させ、2 番目の 500mHNLF の出力端におけるそれぞれのスペクトル及びバンドパスフィルタより切り出したアイドラ光の光波形は図 3.17 図 3.20 に示す。そして、各アイドラ光の符号誤り率特性を図 3.21 に示す。

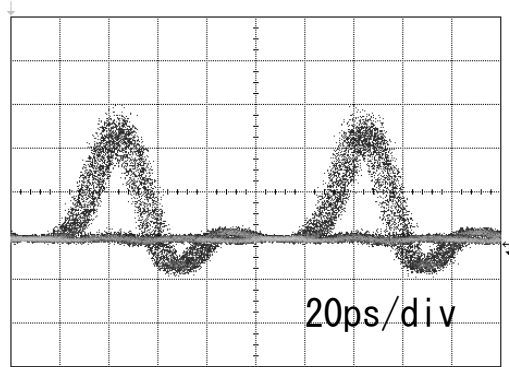


(a) 四光波混合を行う際のスペクトル (b) 切り出したアイドラ光 (波長 = 1552.52) の光波形

図 3.17: EDFA=22dBm の場合における (a) スペクトル (b) アイドラ光の光波形

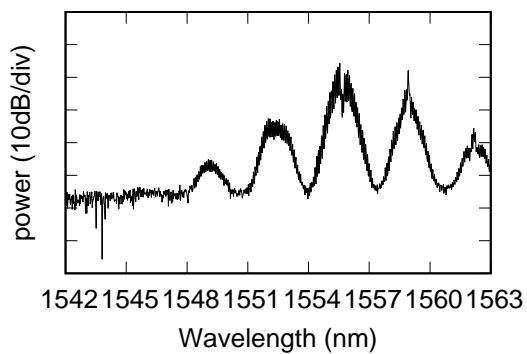


(a) 四光波混合を行う際のスペクトル

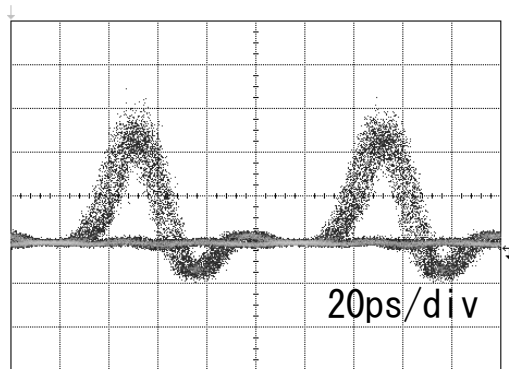


(b) 切り出したアイドラ光 (波長 = 1552.52) の光波形

図 3.18: EDFA=23dBm の場合における (a) スペクトル (b) アイドラ光の光波形

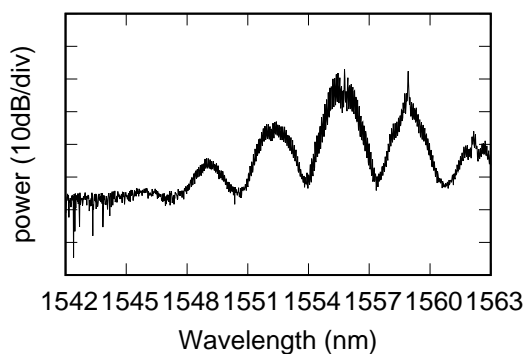


(a) 四光波混合を行う際のスペクトル

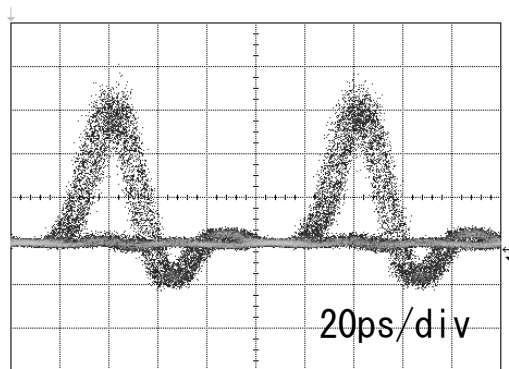


(b) 切り出したアイドラ光 (波長 = 1552.52) の光波形

図 3.19: EDFA=24dBm の場合における (a) スペクトル (b) アイドラ光の光波形



(a) 四光波混合を行う際のスペクトル



(b) 切り出したアイドラ光 (波長 = 1552.52) の光波形

図 3.20: EDFA=25dBm の場合における (a) スペクトル (b) アイドラ光の光波形

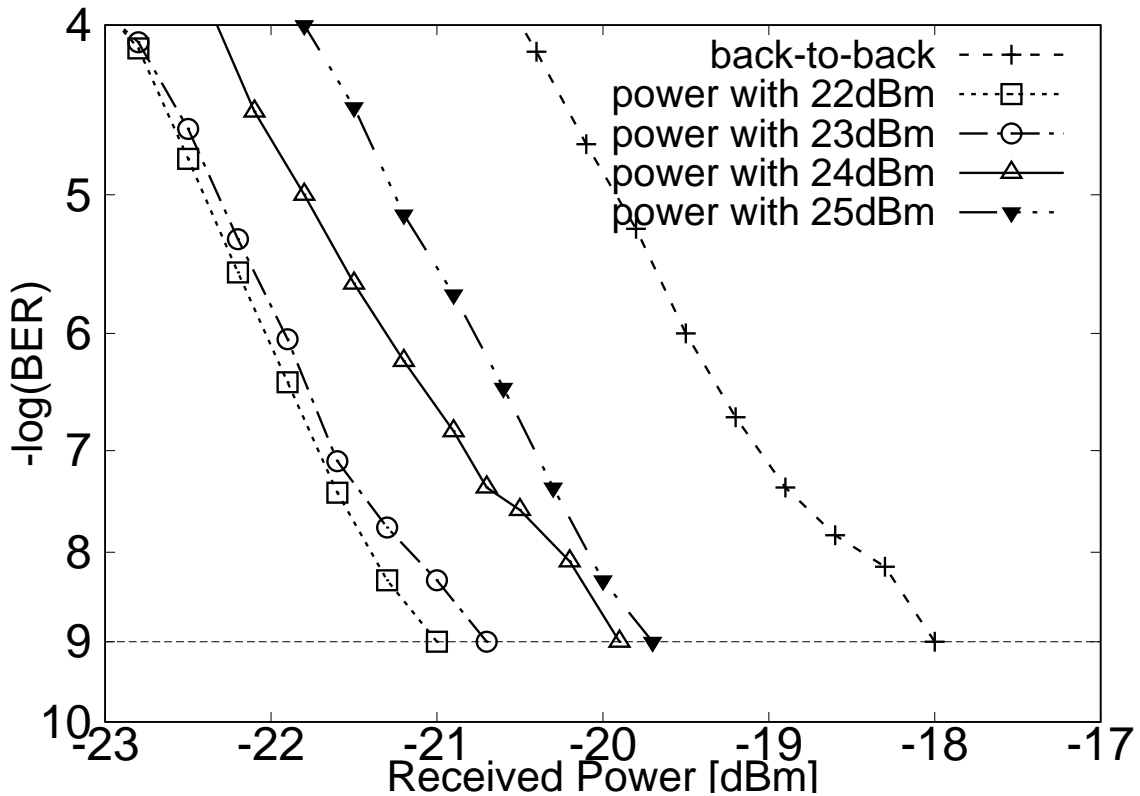


図 3.21: 符号誤り率特性

図 3.17 から図 3.20 まで中の (a) を見ると、パルス圧縮用のパワーを増加しづつ、スペクトルが拡大していくことが分かる。(b) を見ると、それぞれの EDFA 出力における四光波混合で切り出したアイドラ光の光波形は大きな差が見られなかったが、符号誤り率特性図を見ると、変換特性には差が生じたことが分かった。そして、全ての場合において符号誤り率特性は back-to-back と比べて改善し、出力パワーが 22dBm では BER= 10^{-9} におけるパワーペナルティは約 -3、出力パワーが 23dBm ではパワーペナルティは約 -2.8、出力パワーが 24dBm ではパワーペナルティは約 -1.9、出力パワーが 25dBm ではパワーペナルティは約 -1.7、パルス幅が小さくなるものの、変換後の信号が劣化していることがわかる。出力パワーを 22dBm で設定する時、クロック光のパルス幅を元々の 26ps から 15.4ps まで圧縮され、四光波混合変換後のパワーペナルティは最も小さくなる。そこで、次ぎの研究ではこの 15.4ps のパルス幅を持つクロック光を用いる。

3.2.2 パルス圧縮ありの場合 NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び多重化変換の一括動作の評価

図 3.22 はクロック光のパルス圧縮を伴う波形変換及び多重化変換の一括動作特性検証の実験構成である。各入力信号の波長の設定を表 3.3 に示す。

表 3.3: 各入力信号の波長

| NRZ-OOK1 | NRZ-OOK2 | RZ-CLOCK1 | RZ-CLOCK2 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1546.12nm | 1558.92nm | 1549.32nm | 1555.72nm |

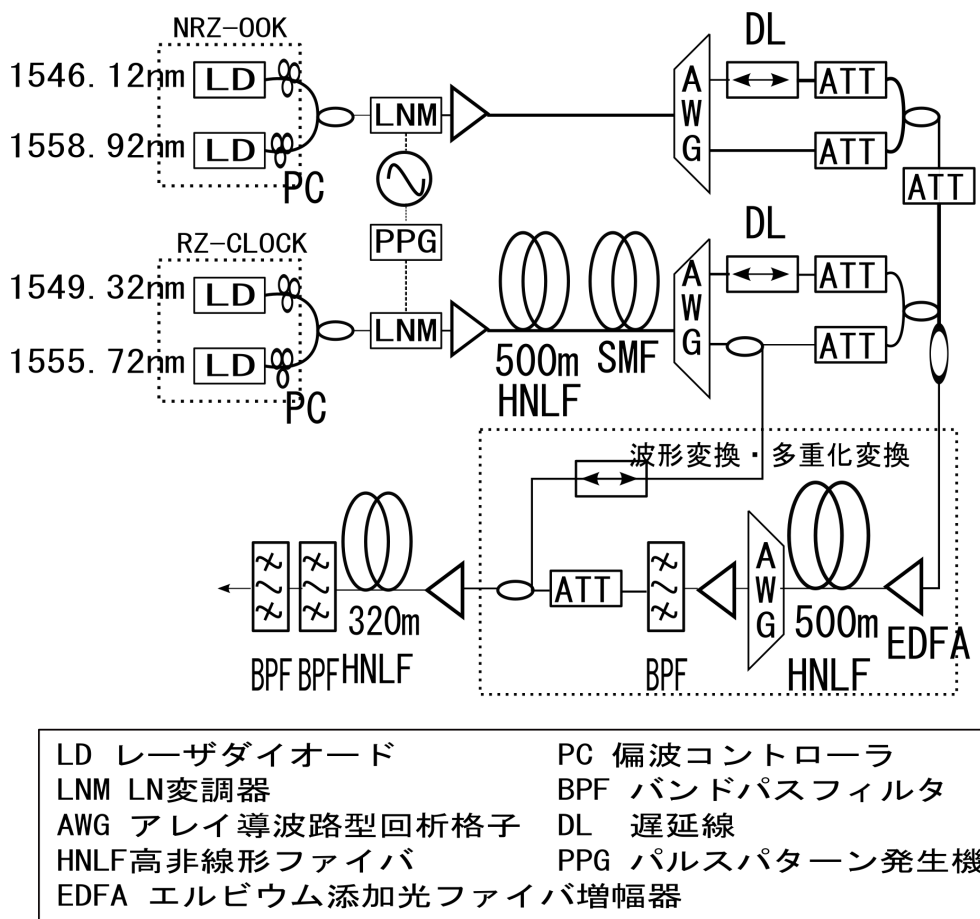


図 3.22: NRZ-OOK 信号の波長変換・波形変換及び多重化変換の一括動作の実験構成

2 波長の NRZ-OOK 信号は、二つの LD からレーザ光を発射し、合波した信号を LN 変調器を用いて生成する。さらに、エルビウム添加光ファイバ増幅器を用いて信号の強度を調整してから AWG により各波長ごとに分波し、片方のチャンネルを遅延線でタイミング制

御した後合波することで波長多重信号となる。

クロック光のパルス幅を圧縮するには、LN 変調器の後ろに高非線形ファイバ及びシングルモードファイバを挿入する。その後、それぞれのクロック光のタイミング、強度及び偏波を調整してから NRZ-OOK 信号光と合波する。ここで、カブラ直前において、信号光のパワーを -9dBm 、ポンプ光のパワーを -3.2dBm となるように調整した。高利得増幅器によって合波した複数の信号光を 23dBm に増幅してから長さ 500m の高非線形ファイバに入射し、四光波混合を発生させる。生じたアイドラ光を高非線形ファイバの出力端において AWG 及びバンドパスフィルタを用いて切り取ることによって NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び多重化変換の一括動作を行われた。ここで、切り出したアイドラ光に対し多重分離を行い、単チャンネル符号誤り率特性を測定する。

入射信号としてまで 2 波長の NRZ-OOK 信号のそれぞれの光波形は図 3.23、合はした後のスペクトルを図 3.24 に示す。高非線形ファイバの中で非縮退四光波混合の発生を抑えるため、2 波長の RZ クロック信号のタイミング調整が必要となる。ディレイラインでタイミング制御した後の RZ クロック信号の光波形を図 3.25 に示す。500m の高非線形ファイバ入力端におけるスペクトルは図 3.26 に示す。それと同様に 500m の高非線形ファイバ出力端におけるスペクトルは図 3.27 に示す。ここで、新たに生じたアイドラ光をフィルタリングすることで、OTDM 信号を得ることができる。切り出したアイドラ光のスペクトル及び光波形を図 3.28 に示す。多重分離後、それぞれの単チャンネルの光波形は図 3.29 中の (a) と (b) を示す。

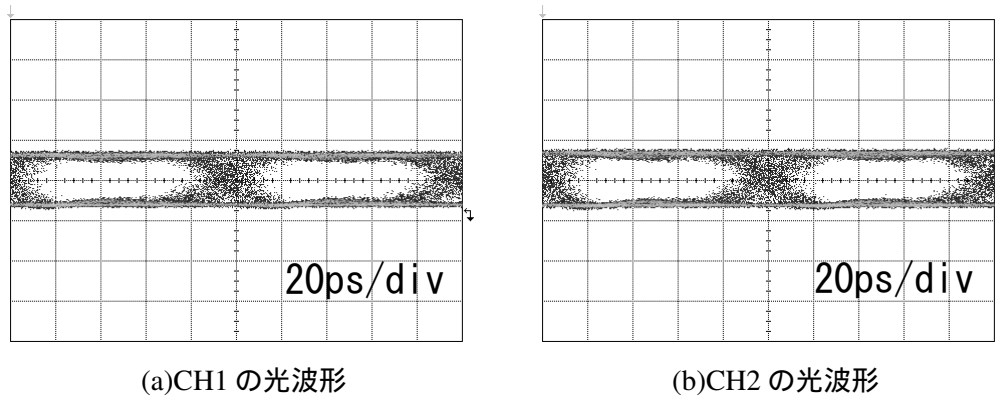


図 3.23: 2 波長の NRZ-OOK 信号の光波形

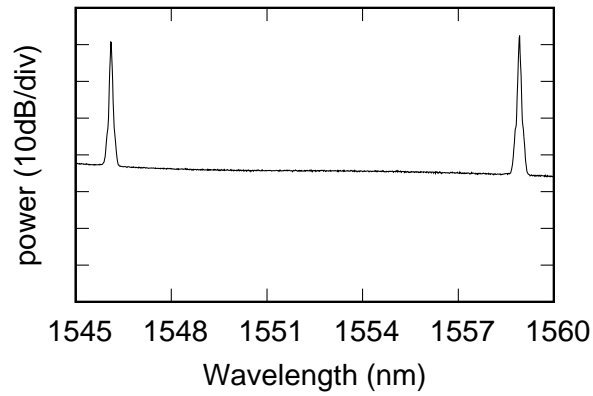
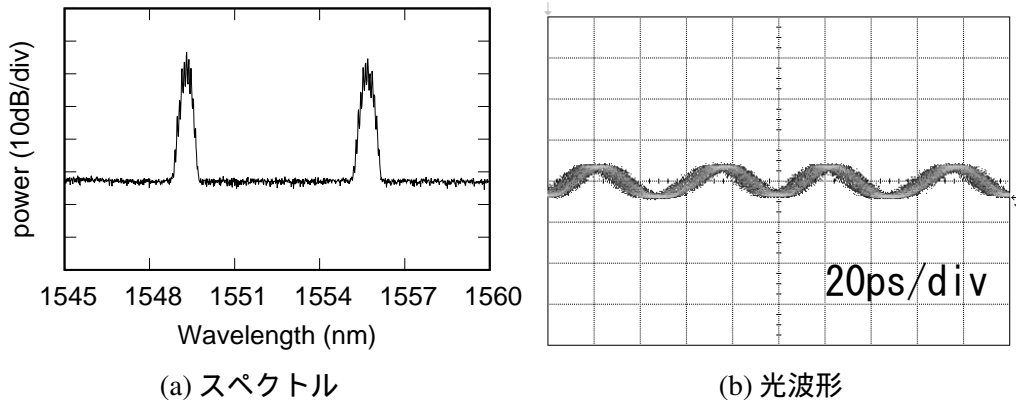


図 3.24: 合波した 2 波長の NRZ-OOK 信号のスペクトル



(a) スペクトル

(b) 光波形

図 3.25: パルスを行った 2 波長のクロック光を合波後のスペクトル及び光波形

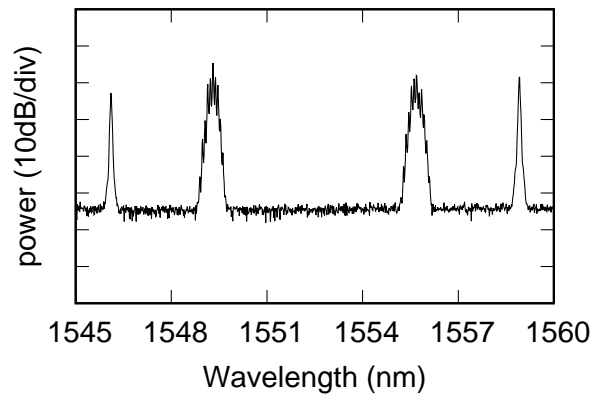


図 3.26: 2 番目の 500m の高非線形ファイバ入力端においてのスペクトル

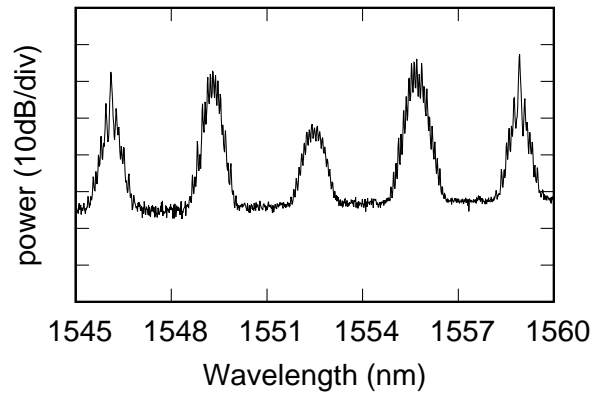
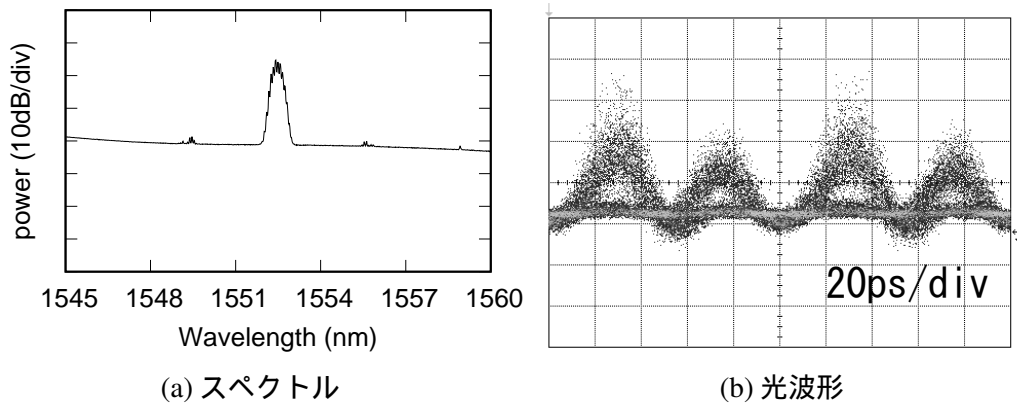


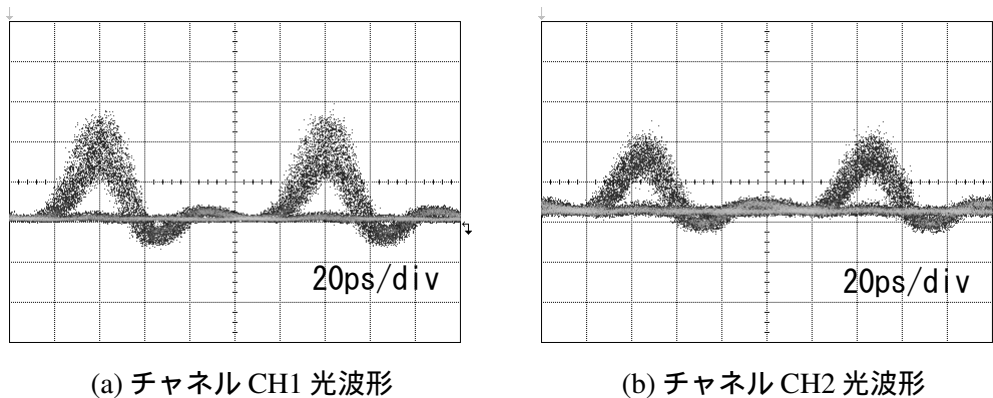
図 3.27: 2 番目の 500m の高非線形ファイバ出力端においてのスペクトル



(a) スペクトル

(b) 光波形

図 3.28: 切り出した OTDM 信号のスペクトル及び光波形



(a) チャンネル CH1 光波形

(b) チャンネル CH2 光波形

図 3.29: DL を調整しながら得られた 2 チャンネルの光波形

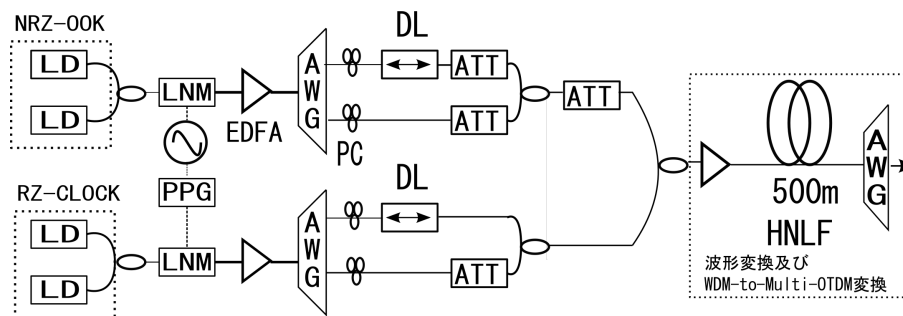
図 3.28 中の (b) を見ると、OTDM 信号の波形は目視により悪化していることが分かった。多重分離後、CH1、CH2 いずれの信号波形も大きく劣化しており、符号誤り率特性におけるエラーフリーを得ることができなかった。

第4章 NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作の評価

図 4.1 は NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作特性検証の実験構成である。各入力信号の波長の設定を表 4.1 に示す。クロック光の波長は第三章におけるクロック光の波長と同じである。

表 4.1: 各入力信号の波長

| NRZ-OOK1 | NRZ-OOK2 | RZ-CLOCK1 | RZ-CLOCK2 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1547.72nm | 1560.52nm | 1549.32nm | 1555.72nm |



| | |
|----------------------|----------------|
| LD レーザダイオード | PC 偏波コントローラ |
| LNM LN変調器 | BPF バンドパスフィルタ |
| AWG アレイ導波路型回析格子 | DL 遅延線 |
| HNLF高非線形ファイバ | PPG パルスパターン発生機 |
| EDFA エルビウム添加光ファイバ増幅器 | |

図 4.1: NRZ-OOK 信号の波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作の実験構成

本研究における一括動作までの実験構成は第三章における NRZ-OOK 信号に対する波形変換及び多重化変換の一括動作までと同一である。

2×10 Gbps の NRZ-OOK 信号は、周波数 10Gbps で PRBS $2^{31}-1$ の電気信号と LNM(LiNbC3 強度変調)を用いて生成した。さらに、エルビウム添加光ファイバ増幅器を用いて信号の強度を調整してから AWG により各波長ごとに分波し、片方のチャネルを遅延線でタイミング制御した後合波することで波長多重信号となる。LN 変調器で生成した 2 波長の RZ クロック信号のタイミング・強度・偏波を調整してから NRZ-OOK 信号光と合波する。こ

ここで、カプラ直前において、信号光のパワーを -11.2dBm 、ポンプ光のパワーを -2.1dBm となるように調整した。高利得増幅器によって合波した複数の信号光を 23dBm に増幅してから長さ 500m の高非線形ファイバに入射し、四光波混合を発生させる。各入力信号の波長を式 (2.13) から式 (2.16) に代入すると、波長 1550.92nm と波長 1554.12 の所に OTDM 信号を得られることが予想される。この 2 波長に生成した信号光をフィルタリングすることで、波形変換及び WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作を検証する。

入射信号として 2 波長の NRZ-OOK 信号のそれぞれの光波形は図 4.2 に示す。また、2 波長の RZ クロック信号を合波した後のスペクトル及び光波形を図 4.3 に示す。 500m の高非線形ファイバ出力端におけるスペクトルは図 3.27 に示す。ここで、新たに生じたアイドラ光をフィルタリングすることで、OTDM 信号を得ることができる。切り出したアイドラ光のスペクトル及び光波形を図 4.5、図 4.6 に示す。

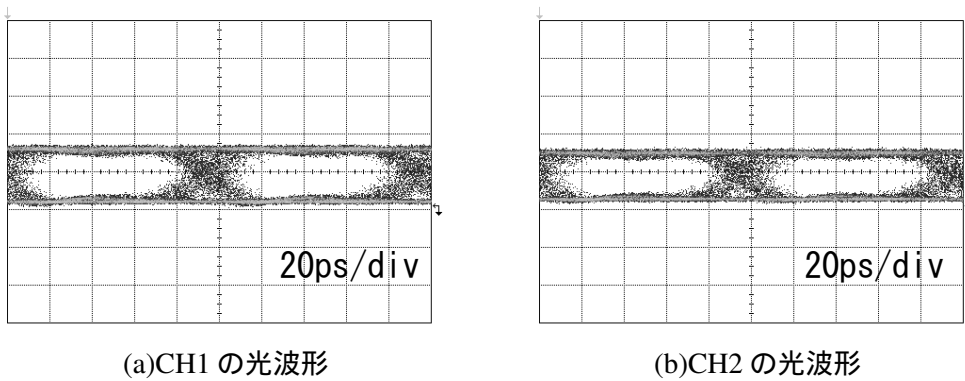


図 4.2: 2 波長の NRZ-OOK 信号の光波形

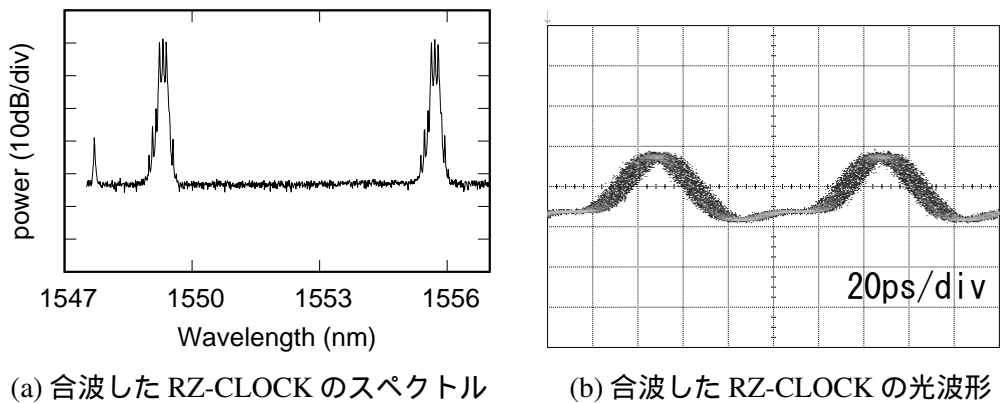


図 4.3: 合波したクロック光のスペクトル及び光波形

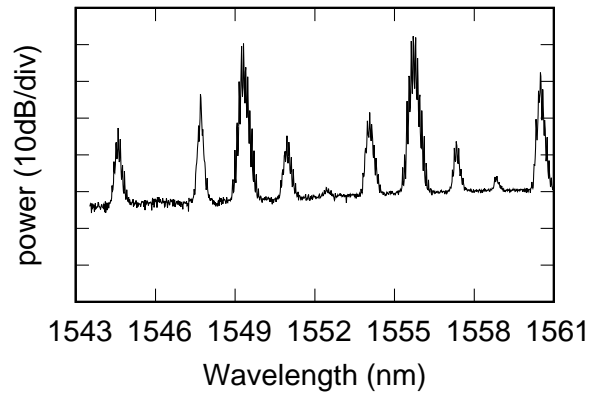


図 4.4: 500m の高非線形ファイバ出力端においてのスペクトル

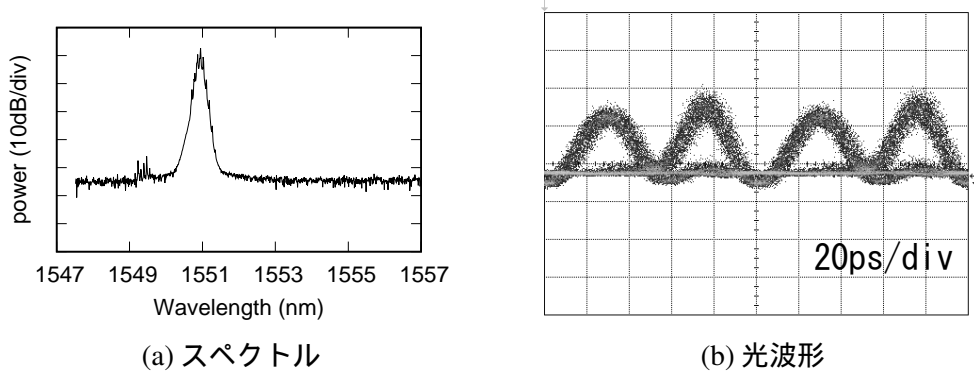


図 4.5: 切り出した OTDM 信号 1 のスペクトル及び光波形

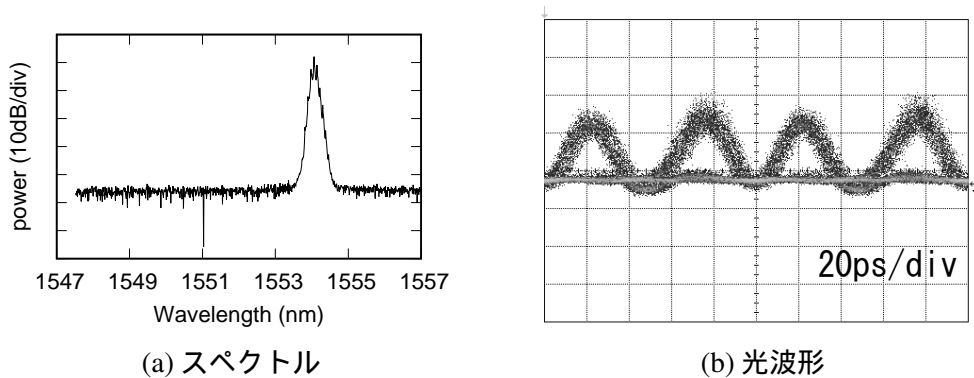


図 4.6: 切り出した OTDM 信号 2 のスペクトル及び光波形

図 4.5、4.6 を見ると、波形変換及び WDM-Multi-OTDM 変換の一括動作を達成したことが分かった。そして、いずれの OTDM 信号も、波形の劣化が特に見られなくて、アイが開いていることが分かる。

第5章 考察

2波長のNRZ-OOK信号に対して、波形変換及びWDM-to-OTDM変換の一括動作において、クロック光のパルス圧縮なし、クロック光のパルス圧縮あり、のそれぞれの場合について検証を行った。また、波長を変えたNRZ-OOK信号に対して、波形変換及びWDM-to-Multi-OTDM変換の一括動作を検証した。いずれの一括動作においても、波長変換、NRZ-RZ波形変換、多重化変換、の3つの信号処理が行われているため、いずれの動作において、偏波状態、強度調整、高利得増幅器のパワー設定、タイミング調整、フィルタリングを行う帯域などの条件の一つでも調整が不十分である場合、変換されたOTDM信号の品質の劣化を招く可能性があると考えられる。

5.1 波長変換・波形変換・多重化変換

まず、波長変換において、多重分離後の各チャネルの信号品質に差が生じた原因について考察する。クロック光のパルス圧縮なしの場合、2波長のNRZ-OOK信号に対して波形変換及びWDM-to-OTDM変換の一括動作において、変換後のOTDM信号を多重分離した後、単チャネル符号誤り率特性におけるエラーフリーを達成した。図3.11から見ると、変換後の片方のRZ-OOKはback-to-backと比べて約1dB劣化し、もう片方のRZ-OOKはback-to-backと比べて約1.3dB劣化してしまうことが分かった。その理由として、図5.1に示すように、波長変換後の信号光は波長軸上に一致しなかったことで、フィルタリングする時、両方とも良い信号品質を載せたスペクトルを同時に切り出さなかったことだと考えられる。一括動作を行う時、各入力信号の理論値及び実験値を表5.1に示す。

表 5.1: 各入力信号波長の理論値と実験値

| 入力信号 | 理論値 [nm] | 実験値 [nm] |
|-----------|----------|----------|
| NRZ-OOK1 | 1546.12 | 1546.13 |
| NRZ-OOK2 | 1558.92 | 1558.79 |
| RZ-CLOCK1 | 1549.32 | 1549.30 |
| RZ-CLOCK2 | 1555.72 | 1555.71 |

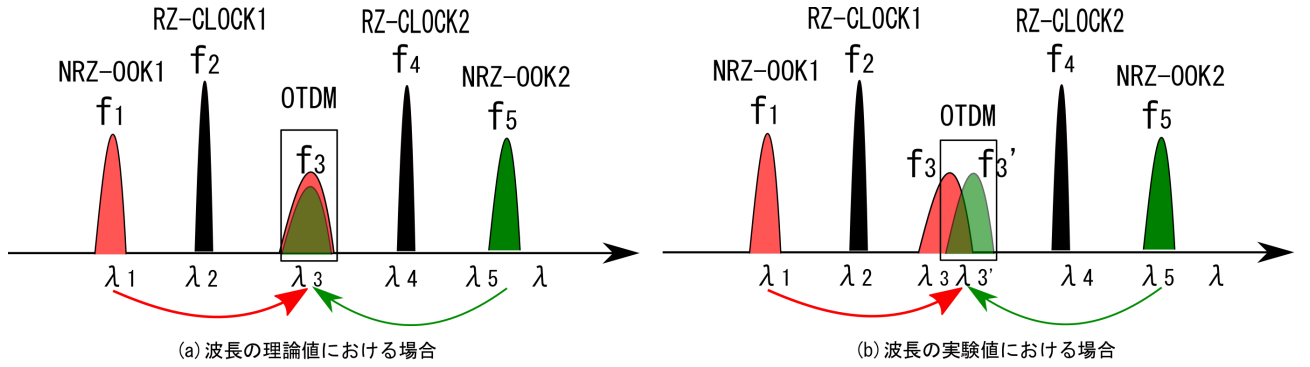


図 5.1: 四光波混合が発生する際の原理図

四光波混合を行う際に、信号光の周波数に関して式 (2.1),(2.2) が成り立つ。また、光の周波数と波長の関係は以下ようになる。

$$f = \frac{c}{\lambda \times 10^3} \quad (5.1)$$

ここでの λ は波長 [nm]、 f は周波数 [THz]、 c は光速 (2.99792458×10^8 [m/s]) である。式 (5.1) を式 (2.1)、(2.2) に代入すると、以下の式が成り立つ。

$$f_{ZDW1} = 2 \times f_2 - f_1 \quad (5.2)$$

$$= 2 \times \frac{c}{\lambda_2 \times 10^3} - \frac{c}{\lambda_1 \times 10^3} \quad (5.3)$$

$$f_{ZDW2} = 2 \times f_4 - f_5 \quad (5.4)$$

$$= 2 \times \frac{c}{\lambda_4 \times 10^3} - \frac{c}{\lambda_5 \times 10^3} \quad (5.5)$$

表 5.1 に示す理論値及び実験値を式 (5.3)、(5.5) に代入すると、以下の結果を得ることができる。理論値を代入する場合は

$$f_{ZDW1} = f_{ZDW2} = f_3 = 1552.533nm \quad (5.6)$$

となった。実験値を代入する場合は

$$f_{ZDW1} = f_3 = 1552.48nm \quad (5.7)$$

$$f_{ZDW2} = f_{3'} = 1552.64nm \quad (5.8)$$

となった。式 (5.6) に示すように、生成したそれぞれのアイドラ光の波長を理論値で計算すると、得られた結果は全く同じであるものの、実験値で計算した結果は 0.16nm の差が生じたため、フィルタリング帯域の調整が不十分である場合、片方の信号の品質を劣化させた可能性がある。

続いて、波形変換及び多重化変換において、パルス幅について考察する。OTDM では RZ 信号のパルス幅が狭いほど、より多重度が高めて、より多くの情報を伝送することができる。表 5.2 には高速なネットワークを実現するため OTDM に求めるパルス幅を示す。表 5.2 から分かるように、20Gb/s の OTDM には RZ-OOK 信号のパルス幅は 20ps 以下で要求される。そして、40Gb/s の高速を超える超高速化ネットワークを実現するため、10ps 以下のパルス幅が求められる。その反対、RZ 信号のパルス幅が広すぎると、信号光が時間軸上で重なり、強度雑音となって信号品質を悪化する可能性がある。本研究の第三章におけるパルス圧縮なしの一括動作で、OTDM から分離された単チャンネルのパルス幅はそれぞれ 16.75ps となったため、パルス幅は OTDM 信号品質の劣化を招く原因ではないと考えられる。

表 5.2: OTDM に求めるパルス幅

| Bit rate[Gb/s] | Time slot[ps] | Pulse width[ps] |
|----------------|---------------|-----------------|
| 20 | 50 | <20 |
| 40 | 25 | <10 |
| 80 | 12.5 | <5 |
| 120 | 6.25 | <2.5 |

また、第三章における一括動作（パルス圧縮あり）において、表 3.2 に示すように、EDFA の出力を 1dB ずつ増えることにつれて、パルス幅は約 2ps ずつ圧縮されることが分かる。そして、図 3.13 から図 3.15 から見ると、パルス圧縮後、パルス幅が小さくなっており、スペクトル幅は反対に拡大していくことがわかる。そこで、スペクトルの拡大を四光波混合への影響を探るため、パルス圧縮されたクロック光を用いた四光波混合の単一動作を検証した。変換後の信号品質は、パルス幅が約 15ps の場合のパワーペナルティは約 -3dB、パルス幅が約 13ps の場合のパワーペナルティは約 -2.8dB、パルス幅が約 11ps の場合のパワーペナルティは約 -1.9dB、パルス幅が約 9ps の場合のパワーペナルティは約 -1.7dB、パルス幅が小さくなるものの、変換後の信号が劣化していることがわかる。その原因は、同じ条件で異なるパルス幅のクロック光を用いて四光波混合を行う際に、入力信号の間に相互位相変調がかけられ、スペクトル幅大きい方が相互位相変調による影響を受けやすく、隣接する信号光のスペクトルも拡大し、フィルタリングすることで信号光を切り出す時、隣接するチャンネルの成分が含まれていることで、信号品質を劣化させる可能性がある。最も狭いパルス幅を持つクロック光を利用する場合、四光波混合における各信号のスペクトルが最も拡大しているが図 3.2 中の (a) から確認できる。

5.2 今後に向けての提案

本研究における励起光を全て RZ クロック光を用いられた。今後の課題として、CW 光を励起光として用いて、RZ-OOK 信号に対する WDM-to-Multi-OTDM 変換について検証したい。図 5.2 には CW 光を用いた WDM-to-Multi-OTDM 変換の一括動作の実験構成を示す。

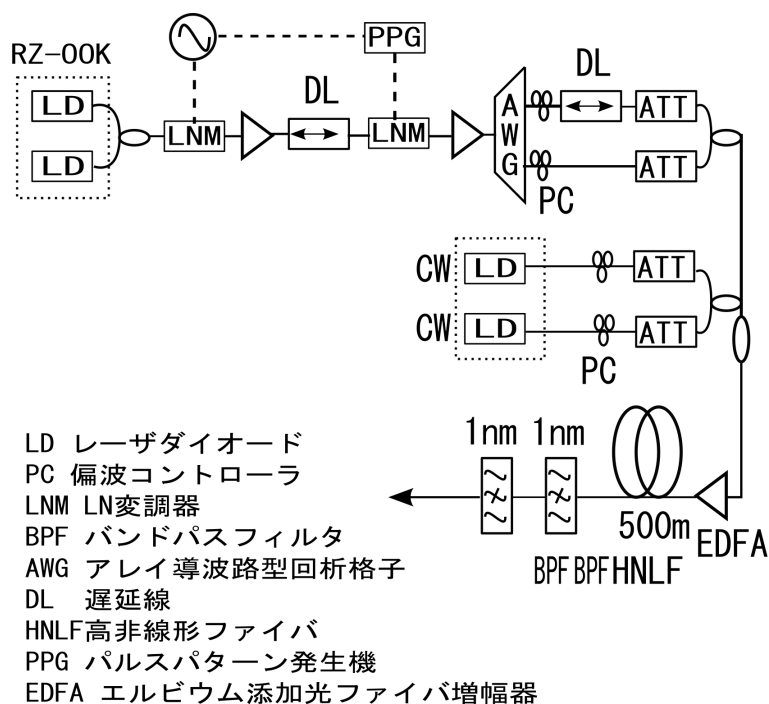


図 5.2: CW 光を用いて RZ-OOK 信号に対する WDM-to-OTDM 変換の実験構成

図 5.2 に示すように、CW 光の生成には変調器を使わず、LD から直接生成するため、構成が比較的簡単になる。しかしながら、第二章で説明した通り、CW 光は連続光なので、波形変換には応用することができないため、入力信号を RZ 信号にする必要がある。また、本研究では OOK 信号に対して一括動作を行ったが、DPSK 信号と OOK 信号の変調方式が違うので、今後、DPSK 信号に関しても同じ実験構成で一括動作を行いたい。

第6章 結論

全光信号処理における比較的簡単な構成を目的として、本論文では2波長のNRZ-OOK信号に対して波形変換及びWDM-to-OTDM変換の一括動作において、クロック光のパルス圧縮なし、クロック光のパルス圧縮あり、のそれぞれの場合について検証を行った。また、パルス圧縮なしの場合と同じ構成で、入力信号の波長を変えることにより波形変換及びWDM-to-Multi-OTDM変換の一括動作を検証した。いずれの場合においても、非線形現象の一つである四光波混合を利用し一括動作を実施した。

その結果として、クロック光のパルス圧縮なしの場合には、波形変換及び多重化変換の一括動作で得られたOTDM信号を多重分離し、抽出したいずれの単チャンネルも符号誤り率特性におけるエラーフリーを達成できた。それに対して、パルス圧縮ありの場合には波形変換及び多重化変換の一括動作までは成功したが、一括動作後のOTDM信号の波形が劣化してしまうことが見られ、多重分離を行うことができなかった。また、波形変換及びWDM-to-Multi-OTDM変換の一括動作では、 $2 \times 10 \text{ Gb/s WDM(NRZ-OOK)-to-} 2 \times 20 \text{ Gb/s OTDM(RZ-OOK)}$ 変換に成功し、OTDM信号のアイパターンから目視による波形の劣化は特に見られなかった。したがって、一括動作後有効なOTDM信号を得られたことと結論できる。

謝辞

本研究にわたって、このような研究の機会を与えて頂き、懇切なる指導と助言を賜りました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、來住直人教授に心から深く感謝を申し上げます。また、実験を進める際において適切な助言を賜りました、電気通信大学情報理工学研究科情報・通信工学専攻、松浦基晴准教授に深く感謝致します。最後、実験室のルール・機材の使用及び実験結果の検証に助言を頂いた研究室の先輩・同輩の皆様方に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Quang Nguyen, Hung Nguyen Tan, Motoharu Matsuura and Naoto Kishi, “ All-optical WDM-to-OTDM conversion using a Multiwavelength Picosecond pulse generation in Raman compression ”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, No.24, pp.2235-2239, 2012.
- [3] M. Hayashi, H. Tanaka, T. Otani, and M. Suzuki. “ OTDM transmitter using WDM-TDM conversion with an electro absorption wavelength converter ”, *Optical Society of America (OSA)*, Vol.20, pp.236-242, 2002.
- [4] Quang Nguyen, Motoharu Matsuura and Naoto Kishi, “ WDM-to-OTDM conversion using supercontinuum Generation in a highly nonlinear fiber ”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.26, No.18, pp.1882-1885.2014.
- [5] Bengt-Erik Olsson, Lavanya Rau, and Daniel J. Blumenthal, “ WDM to OTDM multiplexing using an ultrafast all optical wavelength conversion ”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.13, No.9, pp.1005-1007, 2001.
- [6] チョウインイ, 「OOK 信号を用いた波形変換と WDM-to-OTDM 変換」, 電気通信大学情報理工学部, 卒業論文, 2015.
- [7] 西村 憲一・白川 英俊 著, 「やさしい光ファイバ通信」改訂 3 版
- [8] M.Nakazawa et al., "1.28Tb/s-70km OTDM transmission using third and fourth order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator", *Electron.Lett.*, vol. 36, pp. 2027-2029, 2000.
- [9] S.Kawanishi et al., "3 Tb/s optical TDM and WDM transmission experiment", *Electron. Lett.*, Vol.35, pp 826-827, 1999.
- [10] 井上恭 著, 「ファイバ通信のための非線形光学」, 第三章, 2011.
- [11] 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.
- [12] Nguyen Quang Nhu Quynh, *Optical Wavelength Multicasting Technique for Wavelength Division Multiplexing and Optical Time Division Multiplexing Networks*, The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan., A dissertation submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, pp 19-20, 2016.

- [13] D.M. Patrick and R.J. Manning, "20Gbit/s wavelength conversion using semiconductor nonlinearity", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.30, pp 252-254, 1994.
- [14] 坂本 大季, 「高非線形ファイバを用いた複数光信号処理の一括動作方式」, 電気通信大学情報理工学研究科, 修士学位論文, 2016.
- [15] 鈴木亮太, 「DPSK 信号に対する波形変換及び多重化方式変換」, 電気通信大学情報理工学研究科, 修士学位論文, 2017 .