

平成17年度
研究開発成果報告書

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18年4月

情報通信研究機構

平成17年度 研究開発成果報告書

「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	3
2-3	研究開発の年度別計画	4
3	研究開発体制	
3-1	研究開発実施体制	5
4	研究開発実施状況	
4-1	光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究開発	6
4-1-1	はじめに	6
4-1-2	光サイドバンド変調方式の原理・特徴	7
4-1-3	シミュレーション	9
4-1-4	検証実験	11
4-1-5	まとめ	15
4-2	光ラベル処理による OTDM 高速アクセスの研究開発	16
4-2-1	はじめに	16
4-2-2	16 チャンネル最適符号パターンの抽出	16
4-2-3	可変符号器の設計パラメータ抽出	20
4-2-4	光 MUX の課題抽出	26
4-2-5	今後の課題	33
4-3	総括	34
5	参考資料・参考文献	
5-1	研究発表・講演等一覧	

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)

最近のアクセスネットワークは、光アクセスシステムである PON システムの普及が進んでいる。国内では 100Mbps から 1Gbps に速度アップした GE-PON (Gigabit Ethernet PON) の普及が進んでいる。北米では映像配信が規定されている G-PON (下り 2.5Gbps の PON、映像用とデータ通信用で異なる波長を使用する) の投入が予定されている。また、標準化では 10GE-PON の検討が始まっており、アクセスネットワークにおける更なる速度アップが進んでいる。

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ボーダー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

2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

研究開発項目	2004年度	2005年度	2006年度	2007年度	2008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リラベル発生の研究開発 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】 【光 MUX/DEMUX の研究】 【システム実証】	方式開発・デバイス開発・評価 						
	方式開発・デバイス開発・評価 						
			方式開発・デバイス開発・評価 				
					システム実証 		
間接経費							
合計							

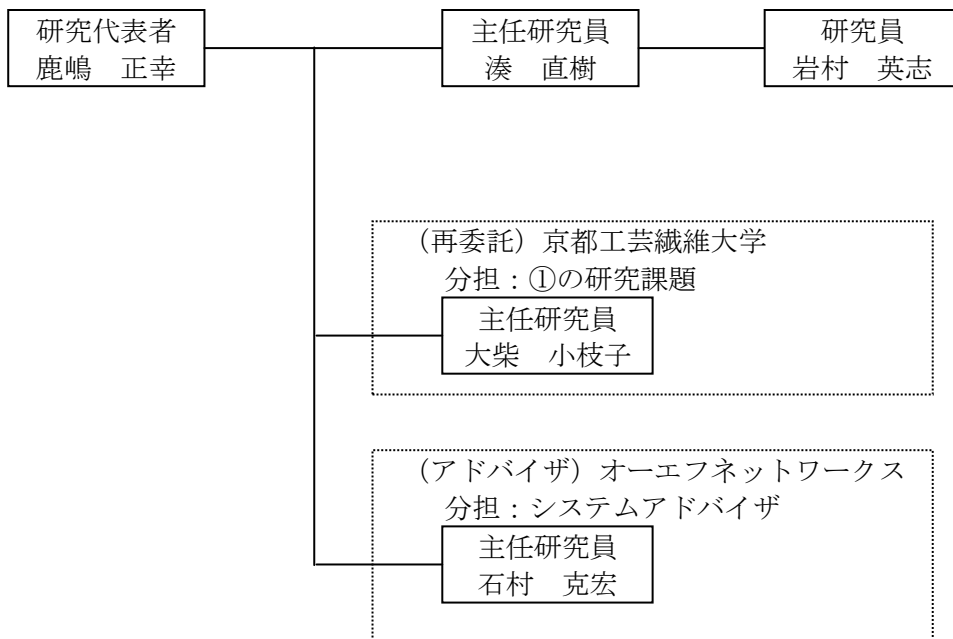
注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

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

4-1 光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究開発

4-1-1 はじめに

このサブテーマでは、パケット単位での挿入・引き落とし・経路切り替え（スイッチング）を可能とするために、光サイドバンド変調による符号発生器（ラベル付与）の研究開発を行う。具体的には、モードロックレーザによって発生した高速の光パルスを用いて、複数のサブ FBG（ファイバブラッググレーティング）などの光波長選択手段を用いて、光サイドバンド変調を加える。これによって複数の縦モードから構成されるモードロックレーザからの信号パルスはスペクトル分割され、位相変調および時間遅延によって光ラベルが付与された信号となる。所望の光ラベルが付与されたパケットを光領域において認識することで、パケットを選択的に処理することが可能となる。

今年度は、本テーマでは、モードロックレーザなどから発生された複数の縦モードから構成されるスペクトルを持つ高速のパルス信号に対して、昨年度の課題を踏まえて、以下の研究を実施する。

- ・ **最適符号の設計**：スペクトル分割および時間拡散符号での最適な符号設計を行う。具体的には、最適な符号設計では、MLLD の波形を、シミュレータに埋め込み、FFT ライブラリを用いて、時間波形・周波数領域変換を行う。波長ごとに時間遅延を行い、それによる自己相関と相互相関波形の強度比の変化を求めて、16 チップの最適符号を決定する。
- ・ **符号器の試作/評価**：設計した符号に基づき実際に FBG により符号器の試作を行い評価する。具体的には、符号器の試作では、従来、スペクトルフィルタ特性を大きく改善する新しい形成技術の開発に挑戦し、ユニフォーム素子のチップ長から制限されていた素子特性および実現符号数の拡大を目指す。

本年度は、5 本の縦モードと等間隔の遅延時間との組み合わせによる 14400 通りの符号パターンを求め、それら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で 6 d B 以上の消光比（自己相関と相互相関とのピーク比）を確認した。さらに、このシミュレーションで検討した符号パターンの中から 10 d B 以上の消光比が得られる符号パターンについて、FBG をベースとした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実験を行った。その結果、10 d B 以上の消光比（自己相関と相互相関とのピーク比）を実験的に確認した。以上の結果、最適な符号パターンの見通しが得られた。

4-1-2 光サイドバンド変調方式の原理・特徴

4-1-2-1 光ラベル認識処理の流れ

本研究で用いた光サイドバンド変調方式の流れを図 4.1.1 に示す。光源として、モードロックレーザ (Mode-Locked Laser Diode ; MLLD) を用いる。MLLD はパルス幅が狭く、かつ高周波なので、複数の狭い線幅の縦モードから構成されるスペクトルをもつ光パルスを発生させる。このスペクトルのうち、中心波長付近にある 5 本の縦モードを用いて、それぞれを時間軸上において遅延させる事によりラベルを生成する。遅延を与える encoder にはファイバブラッググレーティング (Fiber Bragg Grating ; FBG) を用いる。この FBG は各グレーティングにおいて、ある特定の波長を反射させるように設計されている。したがって、各縦モードの波長と対応するグレーティングにおいて縦モードは一つずつ遅延される。このように各縦モードをずらすことにより、ピークの揃っていない、広がった波形となる。これが符号化波形である。復号による場合も同様の手法である。decoder も各グレーティングにおいてある特定の波長を反射させるように設計されているので、decoder に encoder と同じ符号パターン of FBG を用い、符号化時とは逆の方向から符号化されているパルスを入力する。そうすると、符号化時と逆の遅延時間が各モードにかかるため、ピークが戻り、元の波形が再現されることになる。これが自己相関時における自己相関波形である。また、decoder に encoder と違う符号パターン of FBG を用いた場合には、復号してもピークが揃わないため、広がった波形が出力される。これが、相互相関時における相互相関波形である。これらの自己相関波形と相互相関波形のピーク強度比を用いることによりラベル認識を行う。

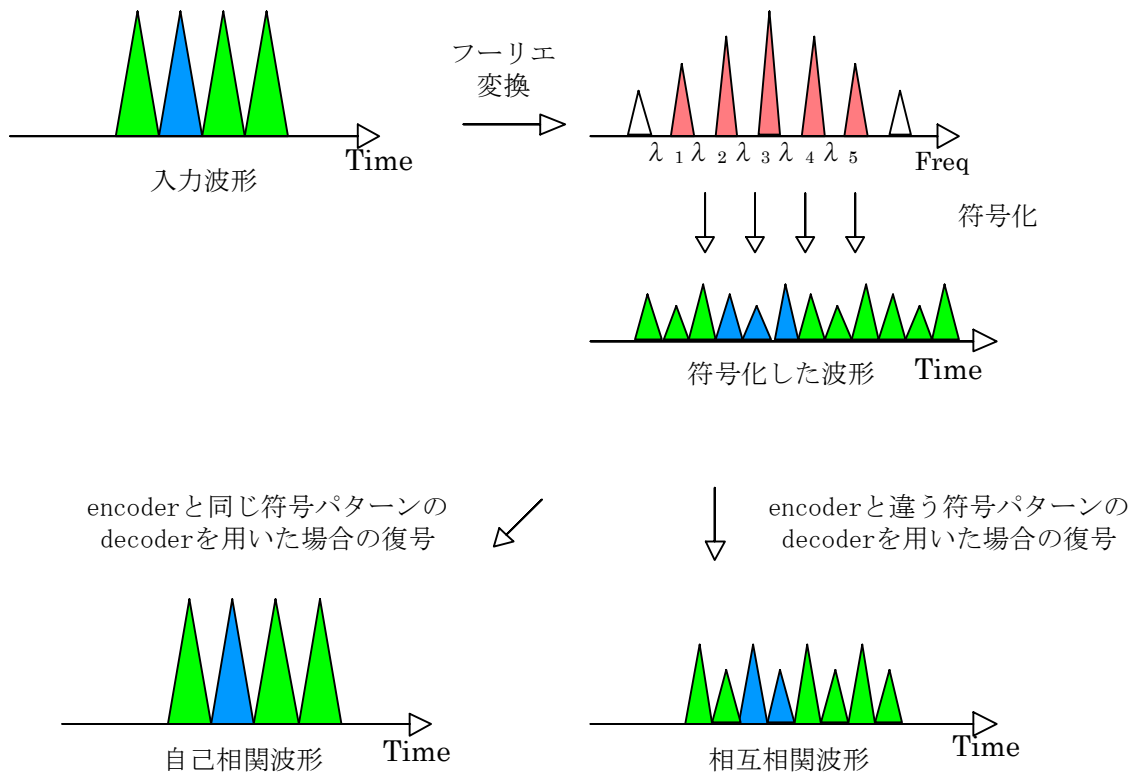


図 4.1.1 光サイドバンド変調方式

4-1-2-2 自己相関と相互相関

MLLD の各縦モードにかかる遅延時間について説明する。自己相関時と相互相関時の遅延を図 4.1.2、図 4.1.3 に示す。図 4.1.2、図 4.1.3 とともに λ_1 、 λ_2 、 λ_3 のモードを持つパルスを入力する。図 4.1.2 では、encoder/decoder とともに Code1 を用い、decoder 時には

encoder と逆方向から入力する。遅延時間間隔が 80[ps]である、相対遅延時間が 0, 80, 160[ps]の FBG を用いると、encoder に入力されたパルスは $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の順に 0, 80, 160[ps]と遅延される。次に decoder に入力すると、 $\lambda_3, \lambda_2, \lambda_1$ の順に 0, 80, 160[ps]と遅延されるので、合計 $[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]=[160, 160, 160]$ (ps)の遅延時間がかかるので、全てのモードに同じ遅延時間がかかり、元のパルスが再現される。図 4.1.3 では、encoder には図 4.1.2 と同じ Code1 を用いるが、decoder には符号パターンの違う Code2 を用いる。この Code2 は、相対遅延時間は同じであるが、反射される波長の位置が異なるもので、 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_1$ の順に 0, 80, 160[ps]と遅延される。これより、encoder に先ほどと同様に $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ のモードを持つパルスを入力すると、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の順に 0, 80, 160[ps]と遅延される。次に decoder に入力すると、 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_1$ の順に 0, 80, 160[ps]と遅延されるので、合計 $[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]=[160, 80, 240]$ (ps)の遅延時間がかかり、各モードにかかる遅延時間が異なる。これより、元のパルスが再現されず、ピーク値の戻っていない、広がった波形になってしまう。

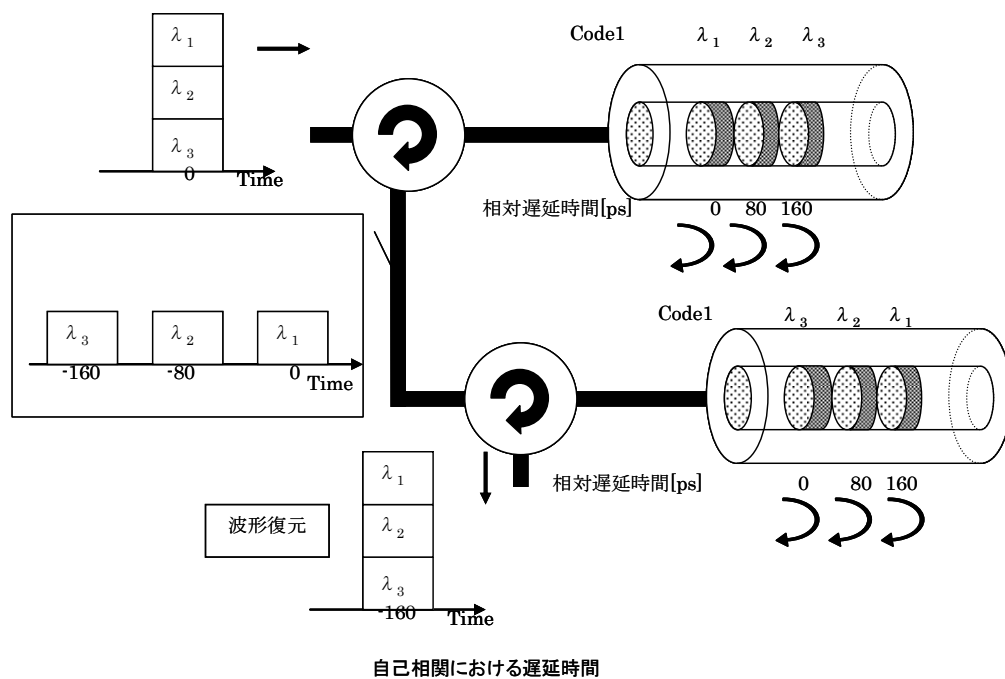
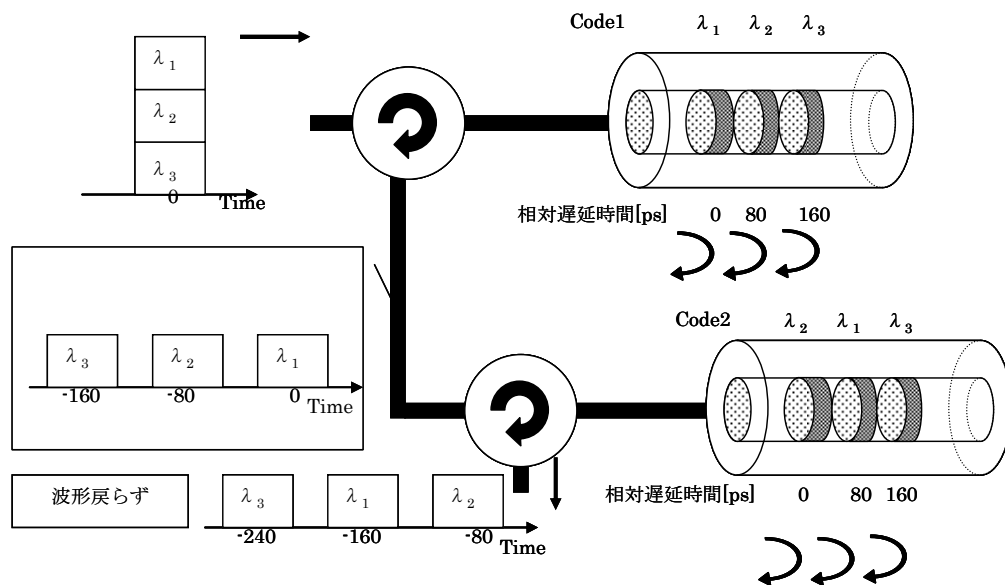


図 4.1.2 自己相関における遅延時間



これより、各モードにかかる遅延時間の合計が等しいものが自己相関、各モードにかかる遅延時間の合計が異なるものが相互相関と言える。

4-1-2-3 特徴

本方式では変調時に用いるモードが限定されるので、変調操作時に他モードの周波数の影響を受けることがない。また、モード数も遅延時間も任意に設定することができる。これにより、位相変調方式で問題であった変調時のスペクトルの広がりを解決することができ、不可能であった高速信号での変調が可能となる。そして、波長ホップ方式を代表とする符号理論に基づいた変調方式で問題であった符号パターン数の限定も解決される。例えば、縦モードを5本とした場合、最大で5!の120通りのencoder, decoderを作成でき、それらの相互の組合せである $120 \times 120 = 14400$ 通りもの符号パターンを生成できる可能性がある。

また、この方式の特徴として、FBG encoder/decoderの遅延時間間隔を任意に設定できるということがある。今回は、遅延時間間隔を80[ps]で固定し、等間隔でシミュレーションを行ったが、今後、遅延時間間隔を変えることで、さらに符号パターンを増やすことが可能となる。

4-1-3 シミュレーション

4-1-3-1 シミュレーション条件

シミュレーションパラメータを表4.1.1に示す。シミュレーションにおいては、時間短縮のため、各縦モードの時間波形が位相状態を含めた状態で保持される。時間波形での各縦モードは、それぞれ符号化時にシフトした量と復号した時にシフトした量の差し引き量、つまり符号化前と復号後のシフト量の差分だけシフトする。よって、時間波形を符号化前と復号後の差分だけシフトさせることにより計算する。これより、システムに忠実に計算を行った場合、高速フーリエ変換を用いたとしてもオーダー $n \log n$ の計算を遅延時間パターンの数だけ繰り返すことになる。しかし、本研究においては計算量の大幅な改善を図り、総当りでの符号計算を可能とした。

ラベルにはMLLDの縦モードを5本用い、それぞれ異なった遅延時間を各縦モードに施し、時間軸上で符号化、復号している。シミュレーションにおいては、MLLDの時間波形をサンプリングし、波形を電圧に関して入力する。そして、取得した時間波形を高速フーリエ変換(FFT; Fast Fourier Transform)することにより、スペクトル波形を取得する。ここで、ラベルに用いる5本の縦モードを選び出し、逆高速フーリエ変換(Inverse FFT)によって縦モード毎の時間波形を得る。次に、各モードがFBGencoderとFBGdecoderによってシフトされる量の差分だけシフトさせる。これより求められたFBGdecoder通過後の波形が最終波形となる。

encoder/decoderのパターン数は、FBGにおける各チャンネルで特定の波長が反射される特性を考慮すると、5つのチャンネルでそれぞれ5つの波長が遅延させられるので $5! = 120$ 通り考えられる。また、本方式の特徴により全てのencoder-decoderにおける相互ピーク比を求める必要があるため、 120×120 の14400通りのシミュレーションを行った。

表 4.1.1 シミュレーションパラメータ

シミュレーションパラメータ	値
サンプリング間隔[ps]	800[ps]
サンプリング間隔[pulse]	32[pulse]
サンプリング点数	1024[点]

4-1-3-2 結果

シミュレーション結果のピーク比を図 4.1.4 に示す。自己相関波形のピーク値を 0[dB] とすると、シミュレーションでのピーク比は認識に最低限必要と思われる 6 [dB] を全パターンにおいて満たす事ができた。

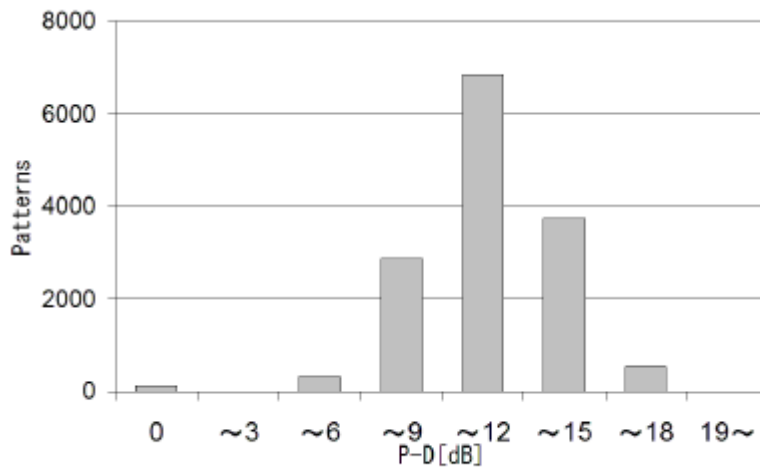


図 4.1.4 ピーク比強度のシミュレーション結果

4-1-4 検証実験

4-1-4-1 実験系

実験系を図 4.1.5 に示す。用いる実験器具は

- ・ モードロックレーザー
- ・ シンセサイザー (Synthesizer)
- ・ EA (Electric Absorption) 変調器
- ・ PPG (Pulse Pattern Generator)
- ・ サーキュレーター (circulator)
- ・ encoder (FBG)
- ・ decoder (FBG)
- ・ オシロスコープ (Oscilloscope)

である。

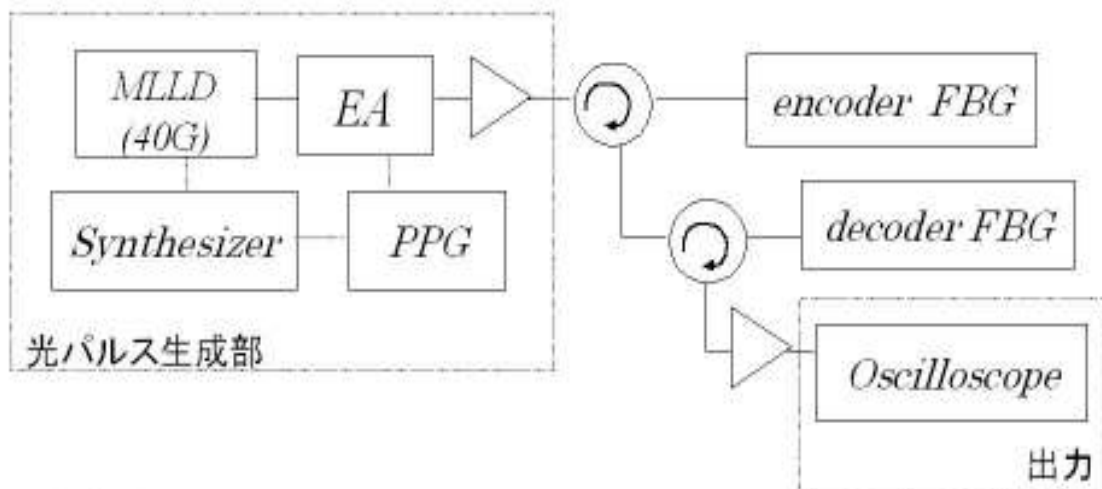


図 4.1.5 実験系

光源に 40G[bps]で動作する MLLD を用いる。時間波形とスペクトル波形を図 4.1.6. と図 4.1.7 に示す。MLLD から出力された連続パルス列の一部をヘッダとみなし、パルス列を基にラベルを作成するシステムを考える。パケットの 1 周期を 800[ps]と想定し、40G[bps]の MLLD(一周期 25[ps])の連続パルス列を出力する。これより、1 パケット 32 パルスとなる。そして、1 パケット内のヘッダとペイロードの割合を [Header:Payload]=[4:28 (pulse)]=[100:700(ps)]とし、10G[bps]で動作する PPG と EA 変調器を用いてパルス列を切り出す。これはラベル作成の際、Header の各縦モードを $80 \times n$ [ps] ($n=0, 1, 2, 3, 4$) とし、それぞれが遅延されるので、最大遅延時間 $80 \times 4=320$ [ps]の範囲に縦モードが拡散される。そのため、 ± 320 [ps]の範囲に次のヘッダがくると、パルスが重なり合ってしまう恐れがある。これより、ペイロード部分を $320 \times 2=640$ [ps] < 700[ps]より、700[ps]と設定した。変調後のパルス列を入力パルス列と呼ぶ。EA 変調器で切り出した波形を図 4.1.8 に示す。入力パルス列を FBG 符号器に入力し、各縦モードを遅延させることにより符号化する。これによって光ラベルが作成される。その後 FBG 復号器に入力することにより復号する。復号された波形をオシロスコープで観測し、時間波形による最大強度比を測定する。この時、ピーク強度は各相関波形の実ピーク値と 0 レベルの差で求め、自己相関波形のピーク値と相互相関波形のピーク値により、認識性能(どれだけ相互相関時にピークを落とすことができるか)を調べる。その指標として、Peak-Intensity Difference (以降、ピーク比と記す)を定義し、用いる。これは

$$P-D(\text{ピーク比}) = \frac{\text{相互相関波形ピーク値}}{\text{自己相関波形ピーク値}} [dB]$$

で表される。つまり、P-D(ピーク比)の数値が高くなればなるほど認識しやすい。

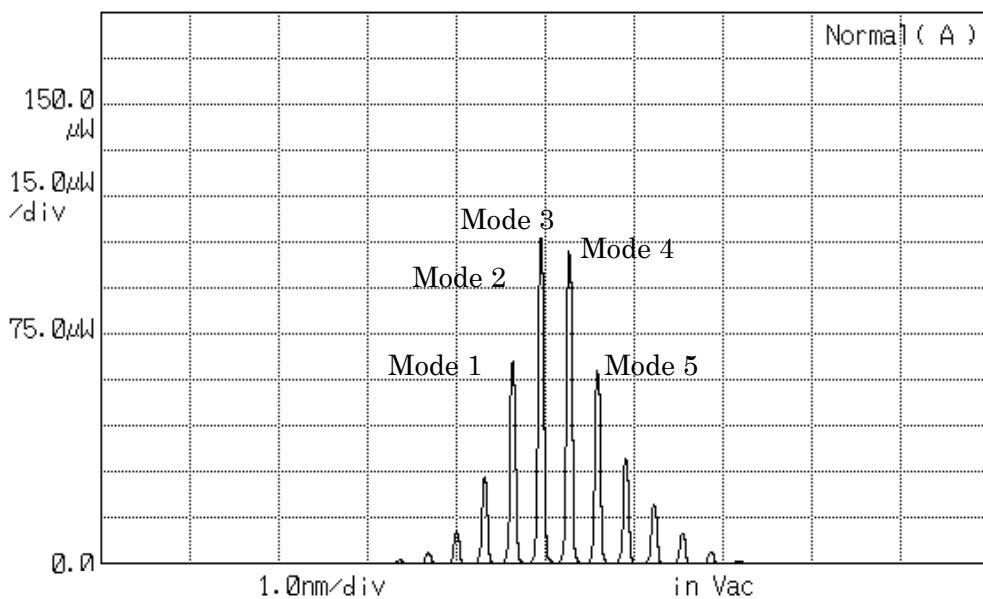
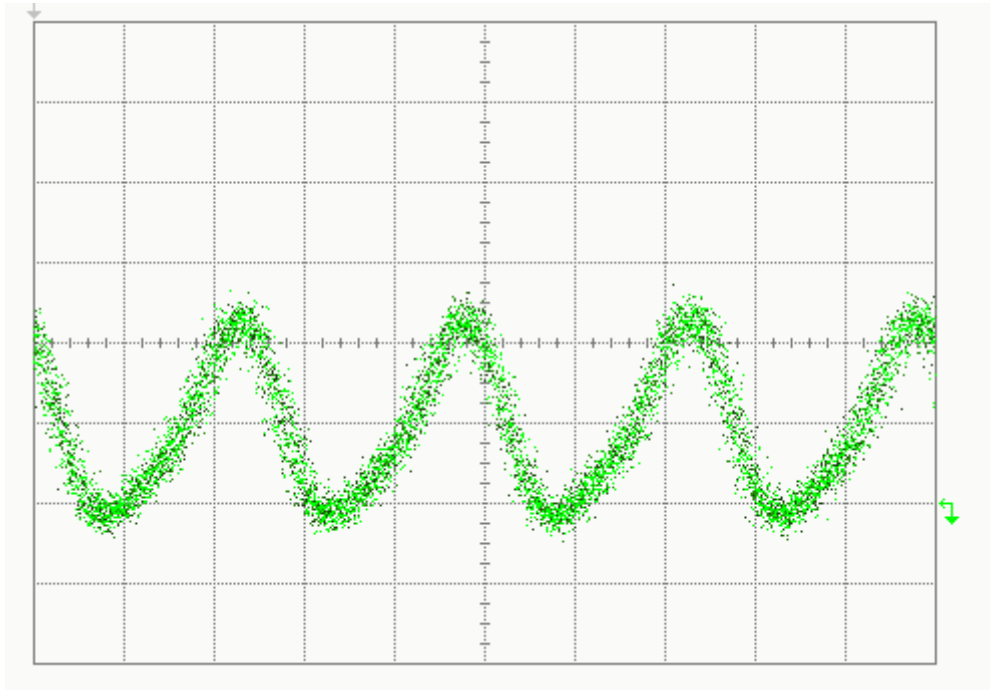


図 4.1.6 MLLD スペクトル特性

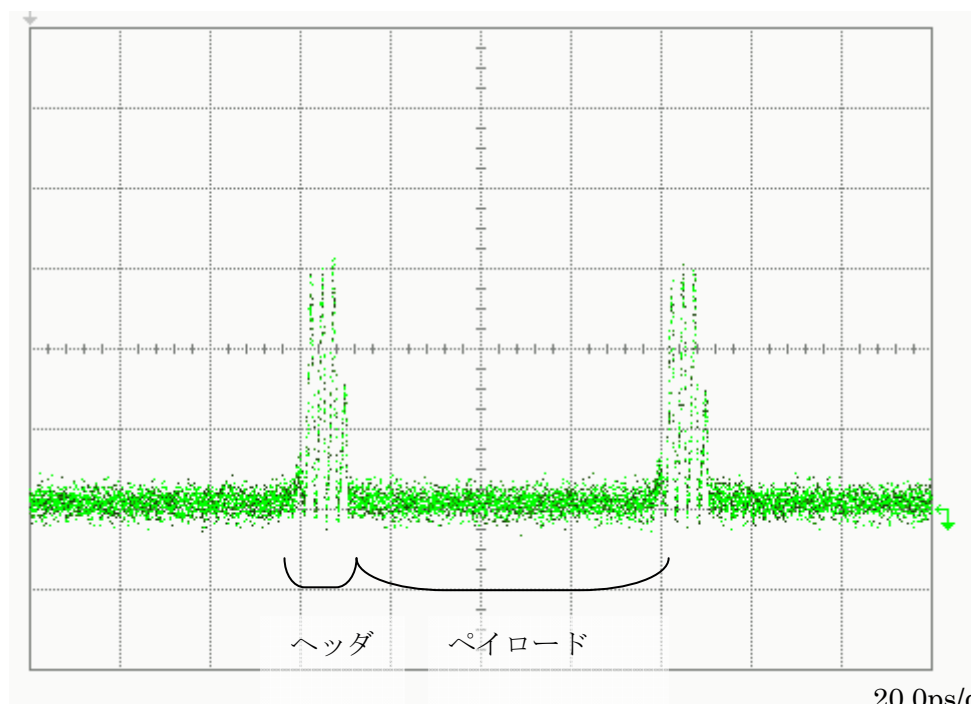
500 μ W/div



10.0ps/div

図 4.1.7 MLLD 時間波形

500 μ W/div



20.0ps/div

図 4.1.8 EA 変調器切り出し後の波形

4-1-4-2 実験結果

表 4.1.2 において、パターン 1 では自己相関波形となり、元の波形が再現されるはずである。パターン 2, 3, 4 においては encoder と相対遅延時間が違う FBG を使用するため相互相関波形となり、ピーク値は低いままのはずである。実験・シミュレーションより得られた波形を図 4.1.9、図 4.1.10 に示す。ここで、(a)が自己相関波形、(b), (c), (d)が相互相関波形となっている。また、それぞれにおけるピーク比、計算機シミュレーションにより算出されたピーク比を表 4.1.3 に示す。(a)の自己相関波形に比べ、(b), (c), (d)の相互相関波形はピークが戻らず波形が広がったままである。また、符号パターンの違いにより波形が異なっていることもわかる。(d)は、満遍なく波形が広がっており、ピーク値は低いが、(b)は少しパルスの重なりが見られるのかピーク値が出ている。ピーク比はそれぞれ (b), (c), (d)において 10.08[dB]、13.45[dB]、16.59[dB]となっている。

表 4.1.2 FBG encoder/decoder の遅延時間パターン

コード番号	遅延時間パターン
Code1	1-3-4-5-2
Code2	5-2-3-4-1
Code3	2-3-5-3-1
Code4	1-4-3-2-5

※各モードの相対遅延時間は順に(0-80-160-240-320)[ps]

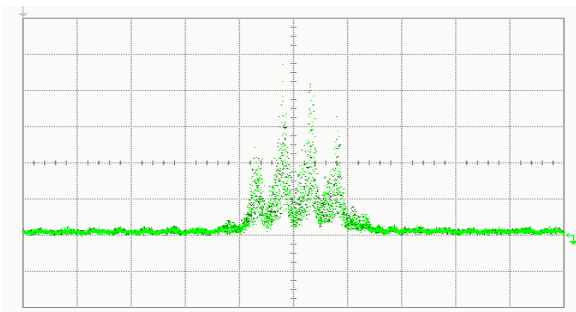


図4.1.9(a) 自己相関波形(パターン1)

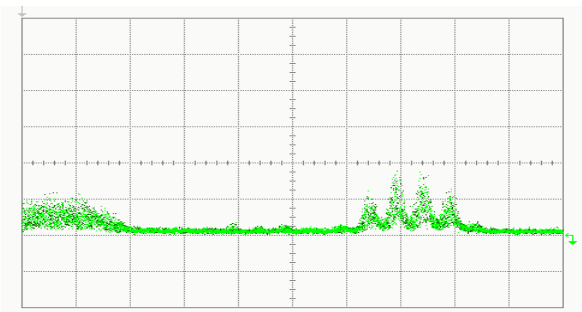


図4.1.9(b) 相互相関波形(パターン2)

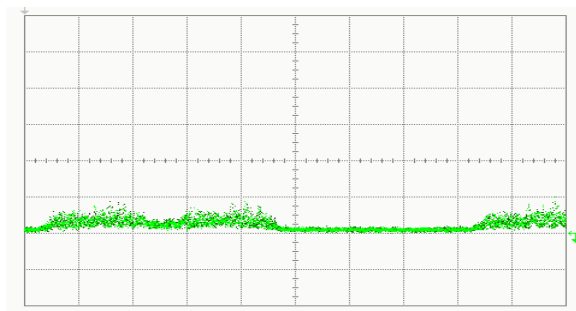


図4.1.9(c) 相互相関波形(パターン3)

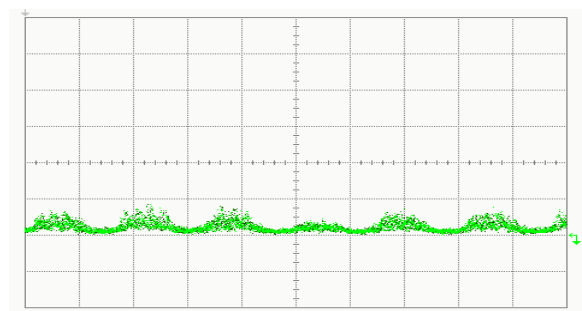


図4.1.9(d) 相互相関波形(パターン4)

図 4.1.9 相関波形(実験値)

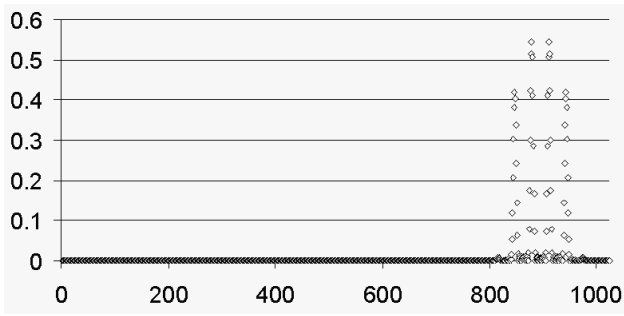


図4.1.10(a) 自己相関波形(パターン1)

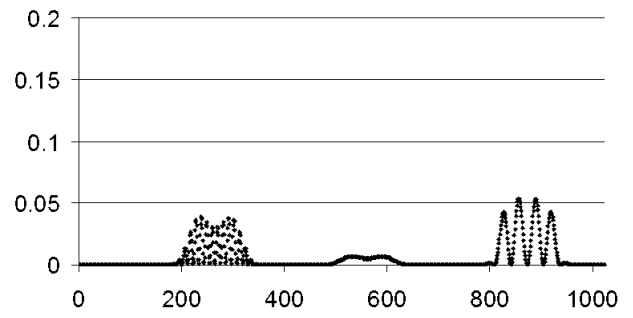


図4.1.10(b) 相互相関波形(パターン2)

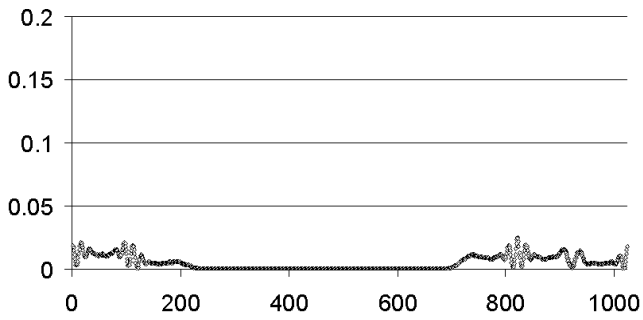


図4.1.10(c) 相互相関波形(パターン3)

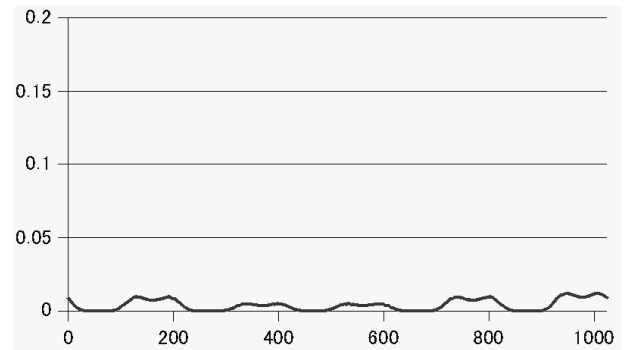


図4.1.10(d) 相互相関波形(パターン4)

図 4.1.10 相関波形(シミュレーション値)

表 4.1.3 FBG encoder/decoder の組み合わせとシミュレーションにおけるピーク比

パターン番号	encoder	decoder	ピーク比[dB]
パターン 1	Code2	Code2	0.00
パターン 2	Code2	Code1	10.08
パターン 3	Code2	Code3	13.45
パターン 4	Code2	Code4	16.59

4-1-5 まとめ

今年度は、5本の縦モードと等間隔の遅延時間との組み合わせによる14400通りの符号パターンを求め、それら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で6dB以上の消光比（自己相関と相互相関とのピーク比）を確認した。さらに、この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をベースとした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実験を行った。その結果、10dB以上の消光比（自己相関と相互相関とのピーク比）を実験的に確認した。以上のように、最適な符号パターンの見通しが得られた。

今後は、中間目標である「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」を達成するために、以下の研究を実施する予定である。

- **データ信号へのラベル付与による認識特性の検討**：最適な符号設計では、MLLDの波形を、シミュレータに埋め込み、FFTライブラリを用いて、時間波形・周波数領域変換を行う。波長ごとに時間遅延を行い、それによる自己相関と相互相関波形の強度比の変化を求めて、最適符号を決定する。さらに、それをデータ変調された信号に付与した場合の特性について検討し、良好な認識特性が得られる符号の絞込みを行う。
- **符号器の試作時における波長分散およびスペクトルフィルタ特性による雑音の評価**：設計した符号に基づき実際にFBGにより符号器の試作を行い評価する。試作した符号器での実験では、波長分散およびスペクトルフィルタ特性による雑音や、光源のモードロックレーザの位相雑音による雑音が生じる。それらについて評価し、実際のシステムを構成する際の課題を明らかにする。

4-2 光ラベル処理による OTDM 高速アクセスの研究開発

4-2-1 はじめに

このサブテーマの目標は、光ラベル処理を行った 10~40Gbps の信号を 160Gbps に光時分割多重を行うための光 16MUX/光 16DEMUX 装置の研究開発及び光ラベルを任意に識別する可変復号器の研究開発を行うものである。具体的には、あて先にあわせて信号 1 ビットごとに符号ラベル処理を行ってから光 MUX する。このとき 1 タイムスロット内に拡散信号を閉じ込める必要がある。DEMUX 時にはタイムスロットごとに信号を取り出し逆拡散して、光ラベル認識し、自ノード宛の信号がどうかを全光学的に判定する。これを実現するための課題としては、【可変符号器の研究】、【光 MUX の研究】、及び【システム実証】である。上記を解決するために、今年度は、【可変符号器の研究】において、16 年度の課題を踏まえて以下の研究を実施する。

- **16 チップ最適符号パターンの抽出:** 光 16MUX が可能な論理符号パターンを抽出する。具体的には、16 年度の課題を踏まえて、光 16MUX が可能な最適な符号パターンを導き出し、シミュレーションを行うことにより評価を行う。
- **可変符号器の設計パラメータ抽出:** 可変デバイスの方式及び構造選定および設計パラメータを抽出する。具体的には、可変デバイスの特性、構造を調査することにより方式を検討し、前記符号パターンにデバイス特性データを加味することで相関シミュレーションを実施し、デバイス特性を考慮した最適符号パターンを導出する。また、既存デバイスによる基本実験を行うことにより設計パラメータを抽出する。
- **光 MUX の課題抽出:** 光符号信号を OTDM (光 MUX) するための課題を抽出する。具体的には、「トータル光通信技術開発」で開発した光 MUX を用いて、光符号信号による基本実験を行い、課題を抽出する。

4-2-2 16 チャンネル最適符号パターンの抽出

(1) 符号方式の検討

本研究テーマの目的は 160Gbps の光時分割多重 (TDM) スロットに対応した光符号器および、符号可変性能を有する復号器の開発である。符号器をこの TDM スロットに対応させるためには、符号拡散時間を 6.25ps 以下に設計する必要がある。また、この符号拡散時間で 16MUX を実現するためには、(1 符号器あたりの符号チップ数を 16 として、) 約 0.4ps/chip と極小な符号器を設計する必要がある。この設計値は、従来方式である波長ホップ符号方式 (図 4.2.1(a)) と位相符号方式 (図 4.2.1(b)) のいずれの方式を用いても作製が難しい。さらに、復号器に可変性を与えるためには、波長ホップ符号方式では各ユニットグレーティングの反射中心波長もしくは配置を、位相符号方式ではユニットグレーティング間の位相状態を可変にする必要があるが、いずれの方式を用いても極小な符号器では符号制御が困難である。

そこで本研究では、波長ホップ符号方式と位相符号方式の両方式を併用することで 16MUX を実現するような符号器を検討した。図 4.2.1(c) にこの方式による符号器の概略図を示す。この符号器は、複数のユニットグレーティングにより構成された単位位相符号器を複数有し、これらを直列に接続した構成とする。これらの単位位相符号器は、それぞれ反射中心波長が異なるものとし、波長ホップ符号方式による符号パターンに従って配置される。

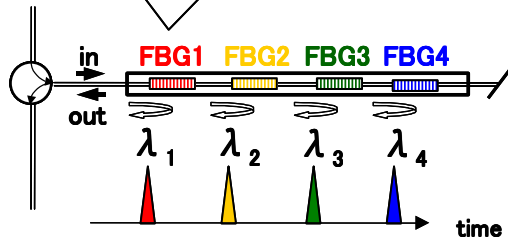
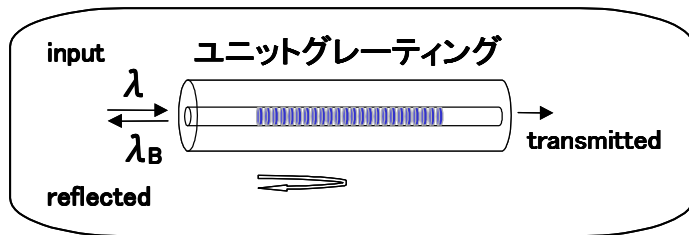


図 4. 2. 1 (a) 波長ホップ符号方式

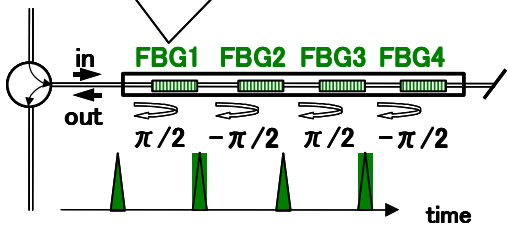
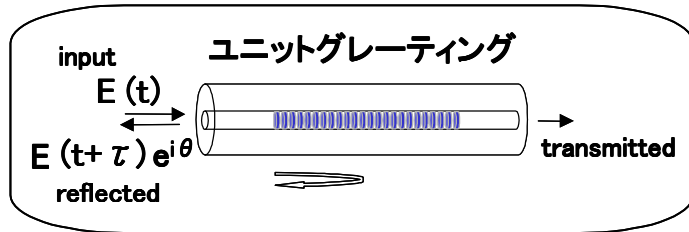


図 4. 2. 1 (b) 位相符号方式

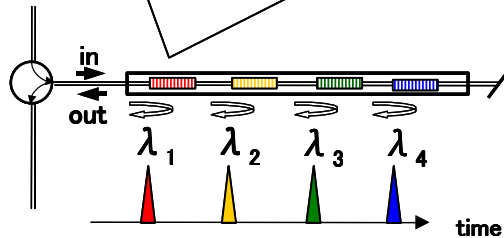
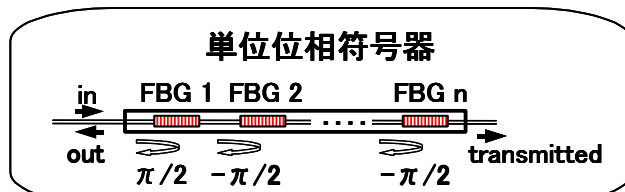


図 4. 2. 1 (c) 併用方式

図 4. 2. 1 各符号方式の概略図

(2) Gold-like 系列の生成

併用方式によって 16MUX を可能とするために、4 種類の符号と 4 波長成分を選択する。本研究では、15 チップの Gold-like 系列のなかから相関特性の良い 4 種類の符号を選択した。選択した符号(CodeA~D)を表 4. 2. 1 に示す。

表 4. 2. 1 選択した Gold-like 系列の符号

	Gold-like 符号														
CodeA	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1
CodeB	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
CodeC	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
CodeD	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0

(3) 自己相関・相互相関波形

表 1 に示す符号パターンを用いて FBG 型位相符号器を構成したときに、自己相関・相互相関の識別が可能であることを確認するため、シミュレーションを行った。この位相符号器は、二値位相符号方式 ($\pi/2, -\pi/2$) とし、chip-duration を 1.6ps、拡散時間を 25ps と設計した。これらの符号器にパルス幅 1ps の短パルスを入力したときの自己相関・相互相関波形を図 4. 2. 2 に示す。図 4. 2. 2 に示すように、各符号器とも S/N 比約 6dB 以上で符号識別可能であることが確認できた。

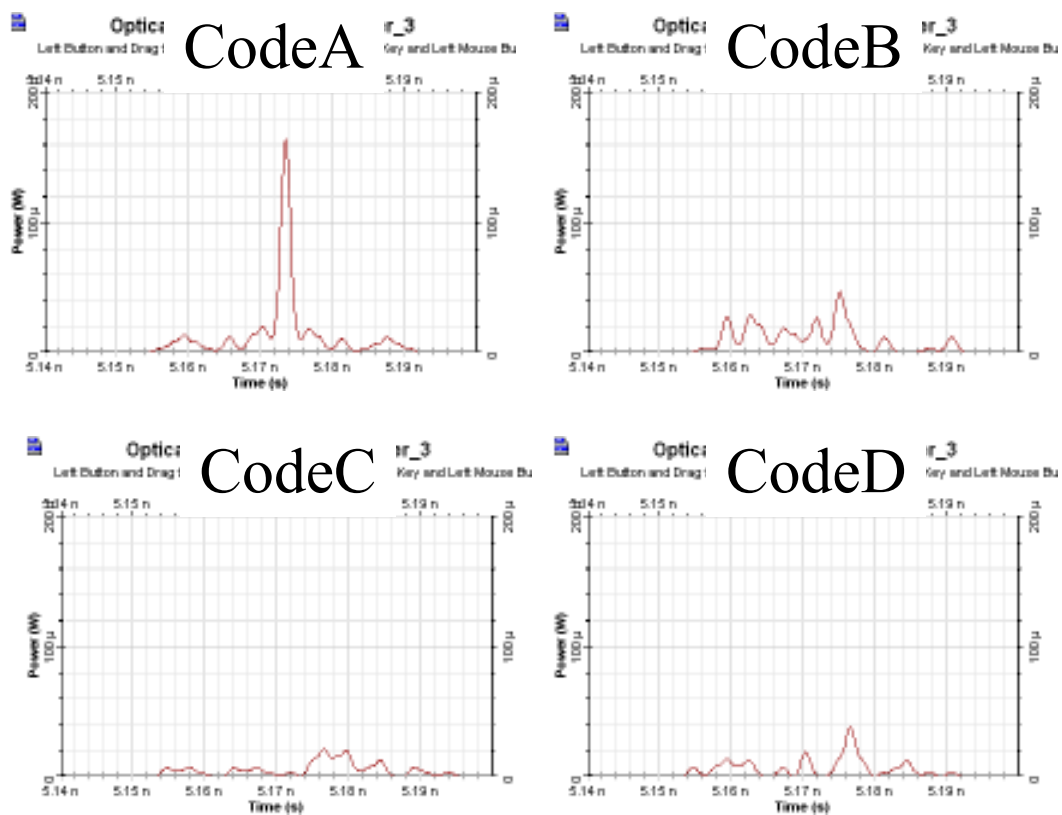


図 4. 2. 2 (a) CodeA の符号器による相関波形

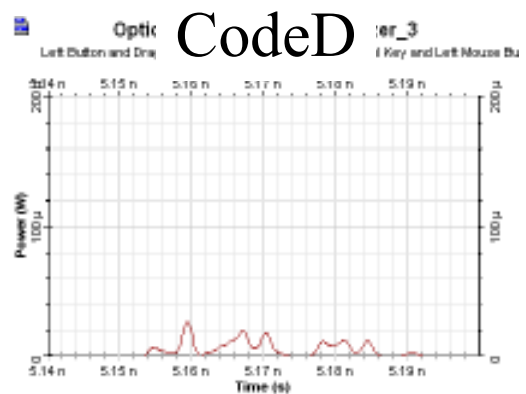
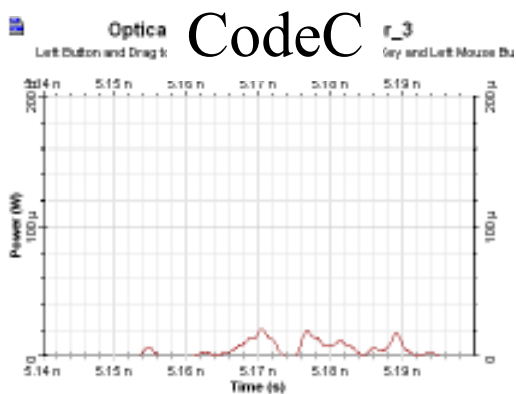
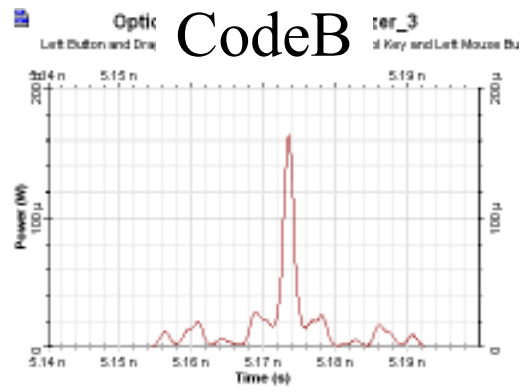
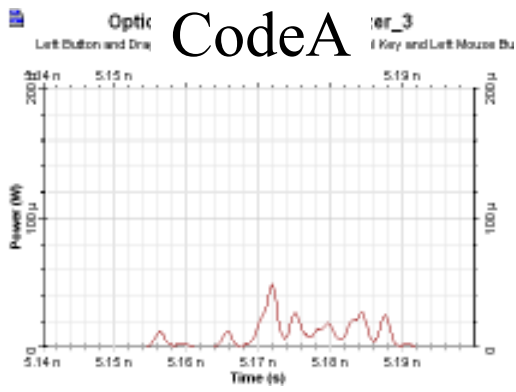


図 4. 2. 2 (b) CodeB の符号器による相関波形

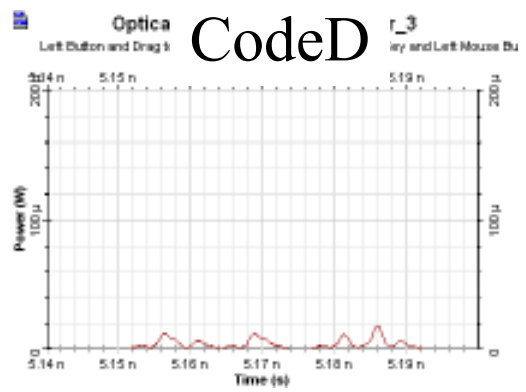
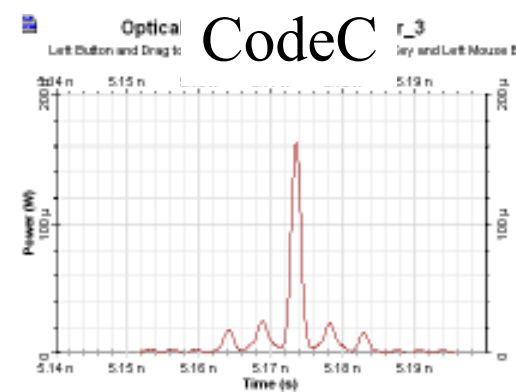
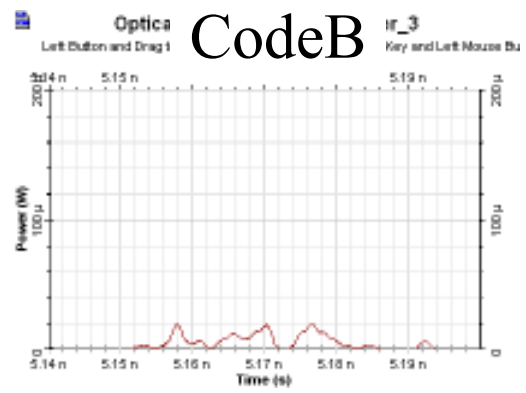
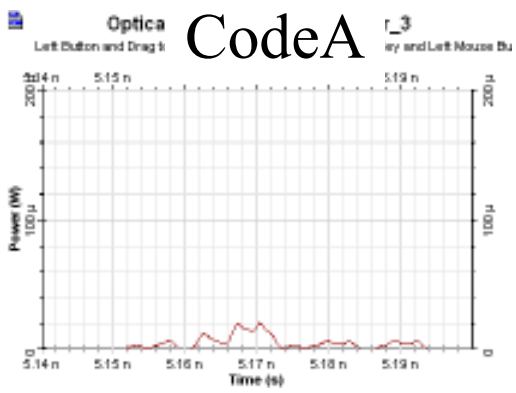


図 4. 2. 2 (c) CodeC の符号器による相関波形

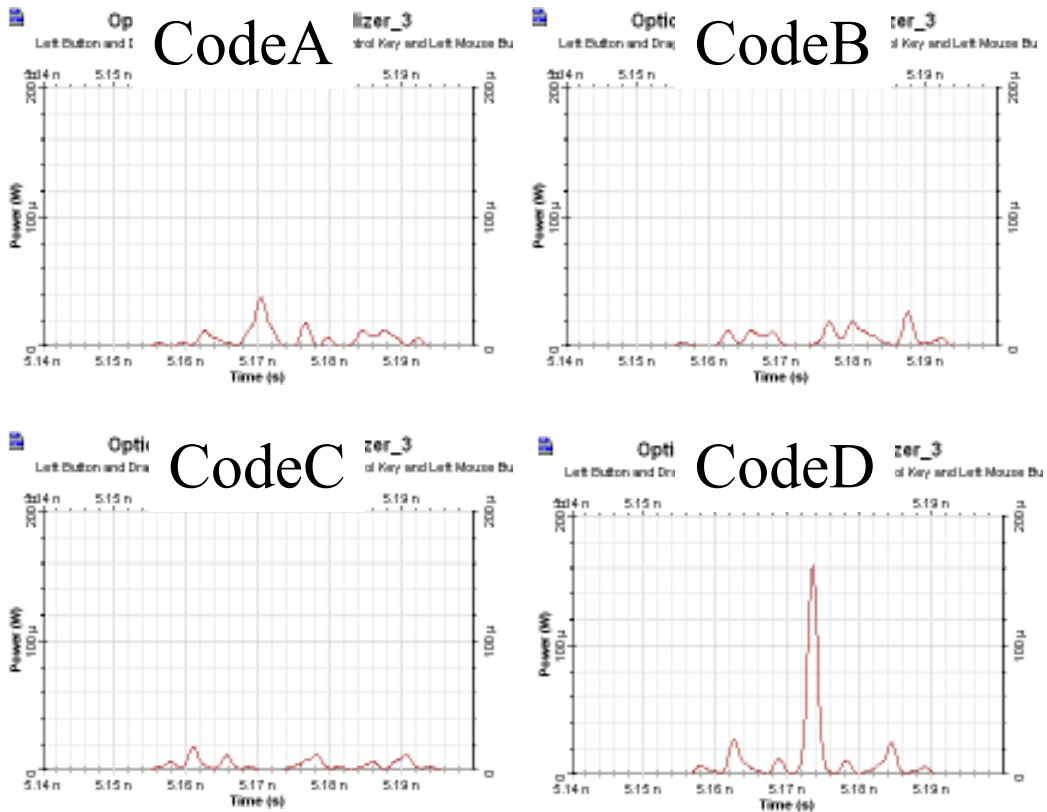


図 4. 2. 2 (d) CodeD の符号器による相関波形
 図 4. 2. 2 位相符号器の自己相関・相互相関波形

(4) 16 チャンネル最適符号パターン

選択した位相符号(CodeA~D)および、4 波長成分からなる波長ホップパターンを用いることにより、16 チャンネル最適符号パターンを抽出した。波長ホップパターンとしては、1 チャンネルにつき 3 波長を割り当てる方式を用いた。表 4. 2. 2 に抽出した符号パターンを示す。1 例として、チャンネル 1 の符号を用いて符号化を行った場合の拡散波形を図 4. 2. 3 に示す。符号器に入力された 4 波長の多重信号は、各波長成分とも異なる単位位相符号器により TDM スロット内に符号拡散される。 λ_1 成分は Code-A による符号化、 λ_2 成分は Code-B による符号化、 λ_3 成分は Code-C による符号化が行われ (λ_4 成分は破棄される。)、波長ホッピングパターンに従って拡散される。

表 4. 2. 2 16 チャンネル最適符号パターン

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
チャンネル1	Code-A	Code-B	Code-C	
チャンネル2	Code-D	Code-A	Code-B	
チャンネル3	Code-C	Code-D	Code-A	
チャンネル4	Code-B	Code-C	Code-D	
チャンネル5	Code-C	Code-A		Code-B
チャンネル6	Code-B	Code-D		Code-A
チャンネル7	Code-A	Code-C		Code-D
チャンネル8	Code-D	Code-B		Code-C
チャンネル9	Code-B		Code-A	Code-C
チャンネル10	Code-A		Code-D	Code-B
チャンネル11	Code-D		Code-C	Code-A
チャンネル12	Code-C		Code-B	Code-D
チャンネル13		Code-C	Code-B	Code-A
チャンネル14		Code-B	Code-A	Code-D
チャンネル15		Code-A	Code-D	Code-C
チャンネル16		Code-D	Code-C	Code-B

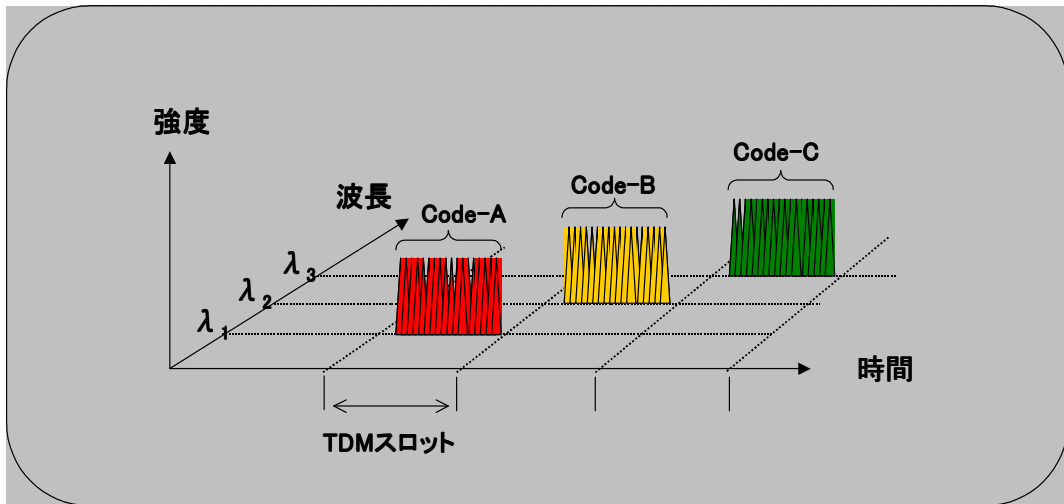


図 4.2.3 拡散波形 (チャネル 1)

4-2-3 可変符号器の設計パラメータ抽出

(1) 可変符号方式

位相符号方式および波長ホップ符号方式の各方式において符号可変性を与えるためには、位相符号方式ではユニットグレーティング間の位相状態を、波長ホップ符号方式では各ユニットグレーティングの反射中心波長もしくは配置を可変にする必要がある。これらの方法の中で、符号可変動作の実用化を考慮すると、波長ホップ符号方式における各ユニットグレーティング配置を可変にする方法が最も有効である。そこで今回、図 4.2.4 に示すように、反射中心波長および拡散符号の異なる複数の単位位相符号器 (位相符号化部) を、光遅延線を介してカプラで結合 (波長ホップ符号化部) した構成の可変符号器を検討した。(この方式については、現在特許出願中である。) 図 4.2.4 では、一例として、4 波長、4 符号の単位位相符号器によって構成した可変符号器を示している。符号可変動作は、波長ホップ符号化部を構成する光遅延線 (D1~D4) を調節することにより、各位相符号化部の配置を自由に変更することで実現する。

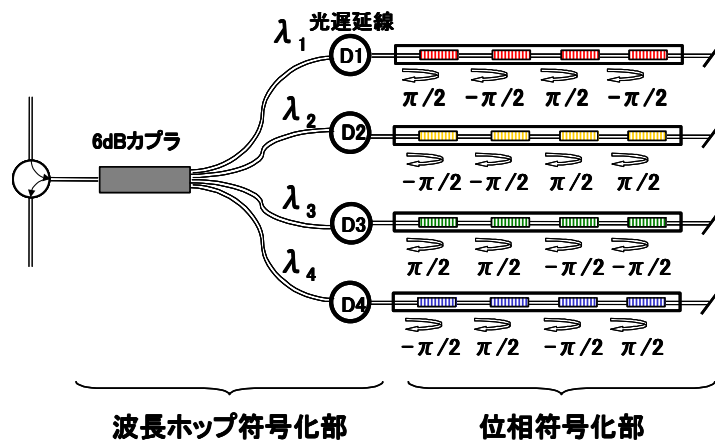


図 4.2.4 可変符号方式の概略図

(2) 符号/復号器のシミュレーションモデル

この可変符号方式を用いて、FBG 型符号器を構成した場合に、自己相関・相互相関の識別が可能であることを確認するため、シミュレーションを行った。一例として、各符号器は、図 4.2.5(a) に示すように、2 波長 (λ_1, λ_2)、2 符号 (前記の Code-A, Code-B, Code-C, Code-D から 2 種選択) の単位位相符号器によって構成し、光遅延線を介して 3dB カプラで結合し

た構成とした。表 4.2.3 に符号器の各パラメータを示す。例えば符号器①に短パルスが入力されると、 λ_1 の波長の信号は Code-A により拡散され、 λ_2 の波長の信号は Code-B により拡散される。これらは、75ps の間隔をもって拡散される。可変復号器は、図 4.2.5(b) に示すように、2 波長、4 符号の単位位相符号器によって構成した。これらの単位位相符号器は、符号の違いにより 50ps の遅延間隔を与えるように配置されており、光遅延線 (D1, D2) を調整することによりすべての符号器に対して復号できる。

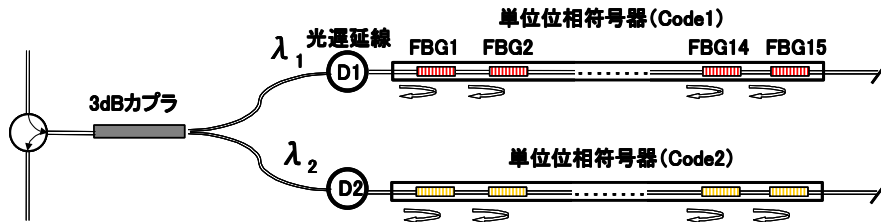


図 4.2.5(a) 符号器

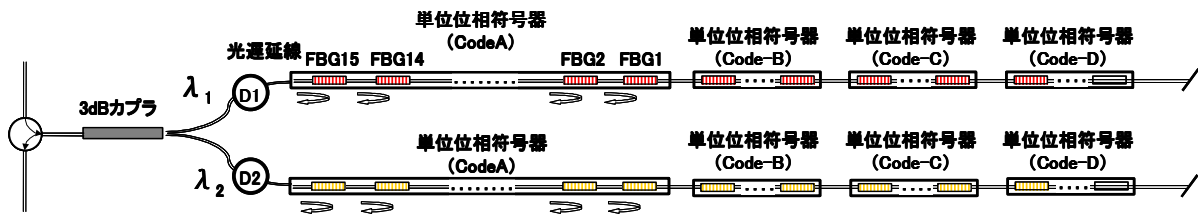


図 4.2.5(b) 可変復号器

図 4.2.5 符号/復号器のシミュレーションモデル

表 4.2.3 符号器の各パラメータ

	光遅延線		位相符号	
	D1	D2	Code1 (λ_1)	Code2 (λ_2)
符号器①	0ps	75ps	CodeA	CodeB
符号器②	75ps	0ps	CodeB	CodeA
符号器③	50ps	25ps	CodeC	CodeD
符号器④	25ps	50ps	CodeD	CodeC

(3) 4ch-MUX シミュレーション

図 4.2.6 に評価シミュレーションのモデルを示す。超短パルス光源から各符号器(①～④)へパルス幅 1ps の短パルスを入力し、可変符号器を用いて復号した波形を光オシロで確認した。各符号器からの拡散波形を図 4.2.7 に示す。このように、各符号器を構成する単位符号器の位相符号パターンに従って、符号化されていることが確認できた。また、各符号器から出力される 2 種類の符号パターンが、それぞれ光遅延線によって設定された遅延間隔で出力されていることも確認できた。これらを 6dB カプラーで多重したときの多重波形を図 4.2.8 に示す。多重のタイミングは、各符号器から出力される同一波長成分の信号が重なり合わないよう設定する。この多重化された信号を、可変復号器へ入力する。その際、例えば符号器①に対応する信号を復号するならば、可変復号器の遅延線 D1 を 125ps に、D2 の値を 0ps に設定する。これにより、符号器により拡散された λ_1 と λ_2 の信号成分が元の同一タイミングへ調整され、符号器①に対応する信号のみ自己相関ピークが得られる。

また、復号動作は、各符号器の設計値に合わせて可変復号器の光遅延線の遅延量を調整することにより実現できる。各符号器に対応する復号波形を図 4.2.9 に示す。このように、いずれの符号器を用いた場合でも自己相関ピークが得られることが確認できた。

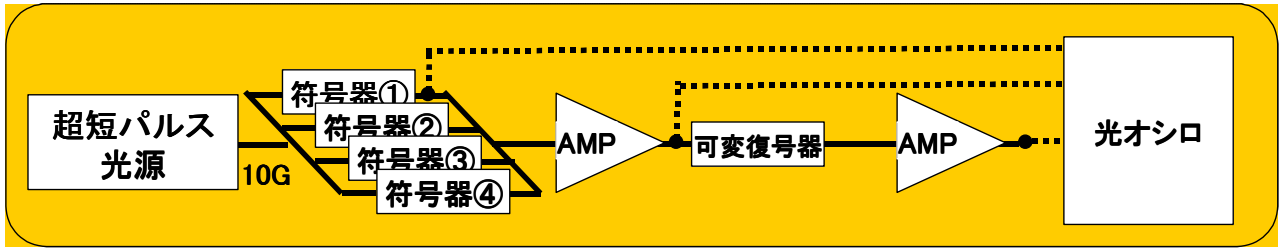


図 4.2.6 評価シミュレーションのモデル

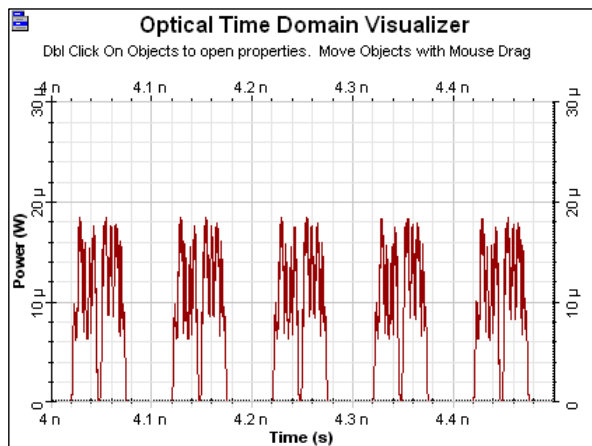


図 4.2.7 (a) 符号器①からの拡散波形

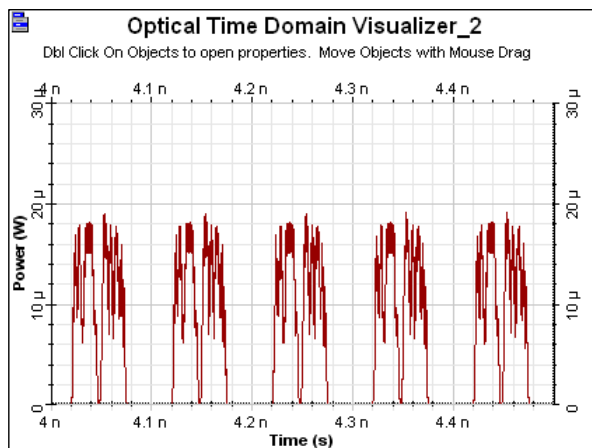


図 4.2.7 (b) 符号器②からの拡散波形

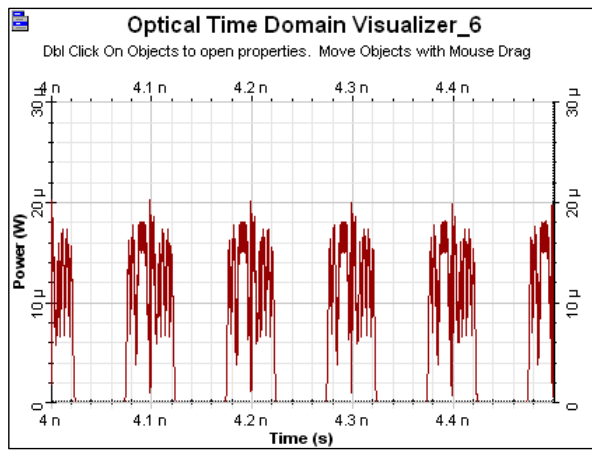


図 4.2.7(c) 符号器③からの拡散波形

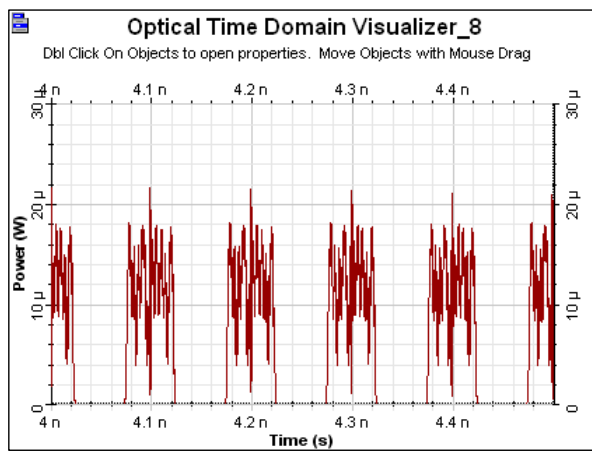


図 4.2.7(d) 符号器④からの拡散波形

図 4.2.7 各符号器からの拡散波形

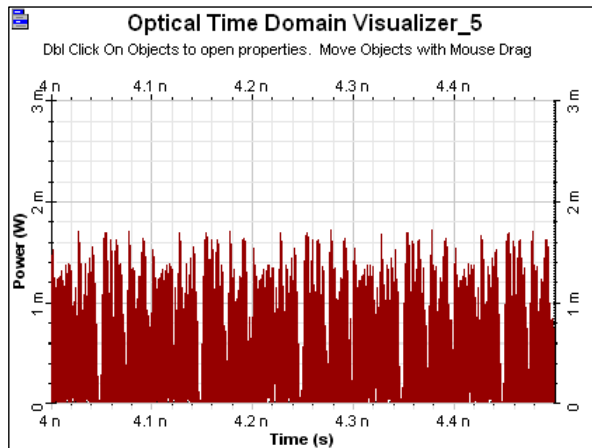


図 4.2.8 多重波形

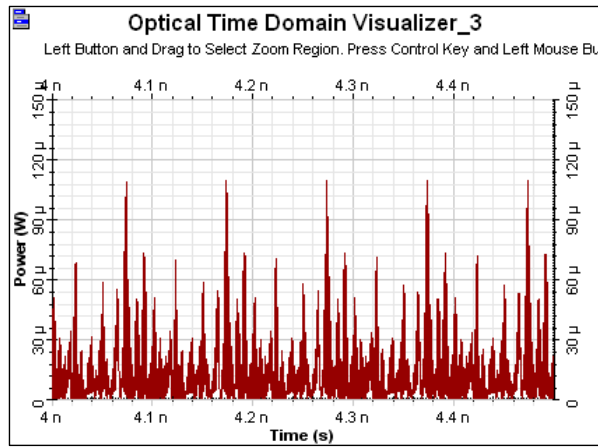


図 4. 2. 9 (a) 符号器①に対応

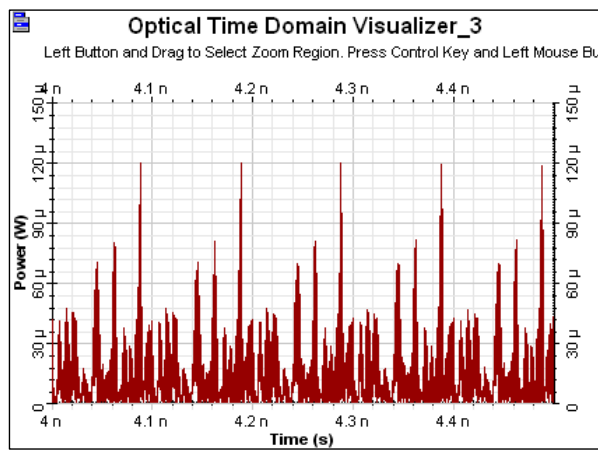


図 4. 2. 9 (b) 符号器②に対応

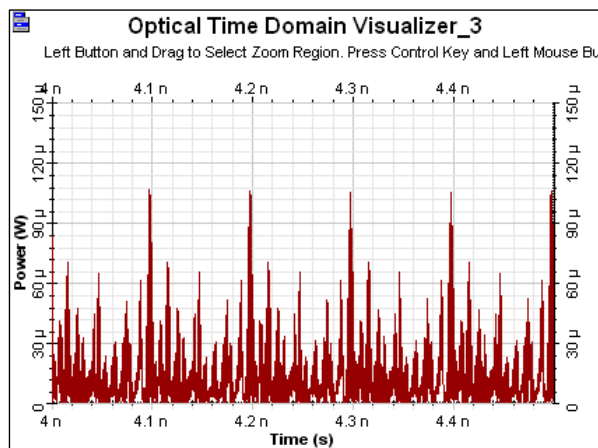


図 4. 2. 9 (c) 符号器③に対応

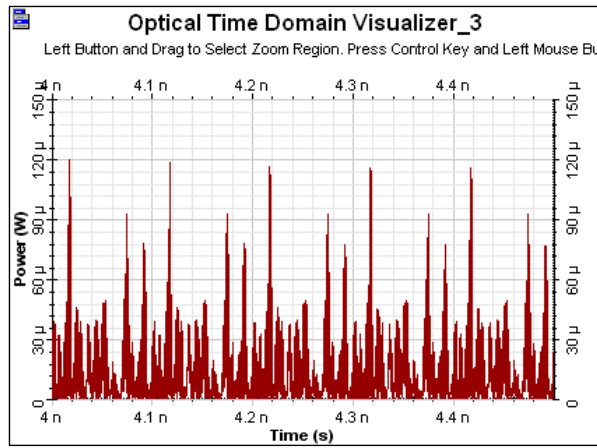


図 4. 2. 9(d) 符号器④に対応

図 4. 2. 9 復号器の光遅延線の設定を各符号器の設計値に対応させたときの復号波形

4-2-4 光 MUX の課題抽出

前記した Code-A, Code-B, Code-C, Code-D の各符号について、40Gbps の TDM スロットに対応した拡散時間を有する位相符号器 (chip-duration 約 1.6ps, 符号チップ数 15chip) を試作し、固定符号器を用いた光 MUX の実験を行った。今回行った実験項目を以下に示す。

- (1) 反射スペクトル測定
- (2) 拡散波形測定
- (3) 復号波形測定
- (4) 4ch-MUX

(1) 反射スペクトル測定

符号器が設計どおりに試作されていることを確認するため、反射スペクトル測定を行い、シミュレーション結果と比較した。図 4. 2. 10 に実験系を示す。ASE 光源からの出力を符号器に入力し、その反射光を光スペアナで観測した。図 4. 2. 11 に、各符号器についてシミュレーション結果と実測結果を重ねて示す。シミュレーション結果と比較して、実測結果ではピーク反射率が約 4dB 低減しているが、波形を比較するといずれも相似形であり、同等なスペクトル波形が得られていることが確認できた。従って、符号器はいずれも設計どおりに試作されていると判断した。

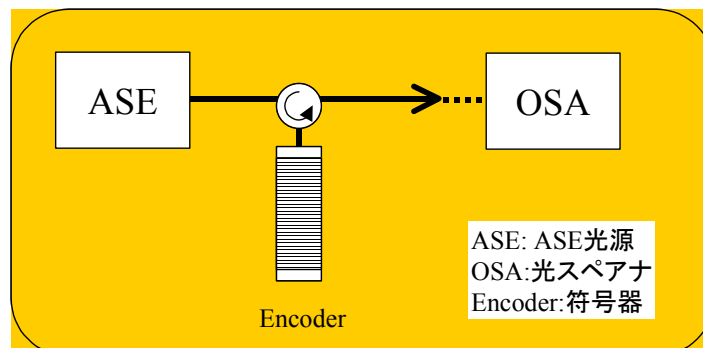


図 4. 2. 10 反射スペクトル測定の実験系

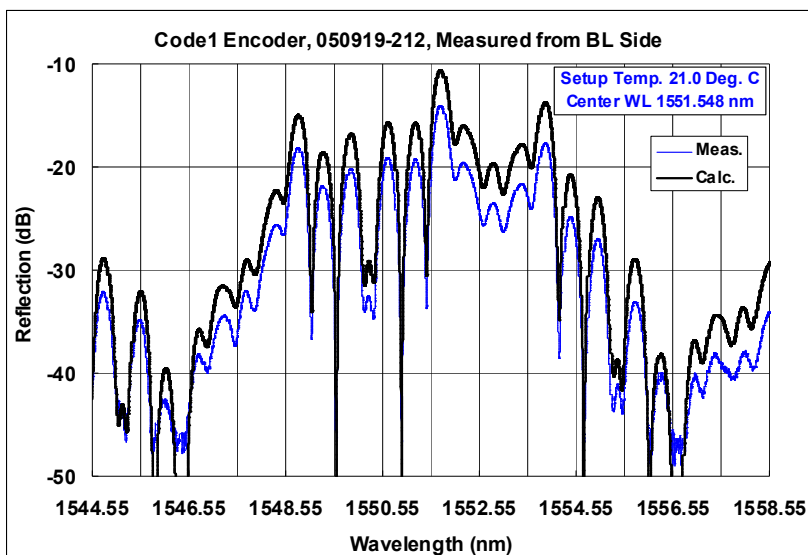


図 4. 2. 11 (a) Code-A の符号器

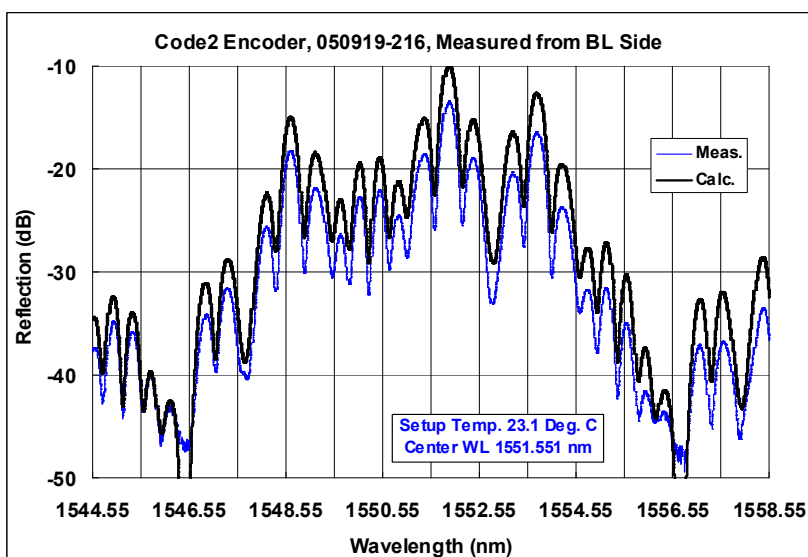


図 4. 2. 11 (b) Code-B の符号器

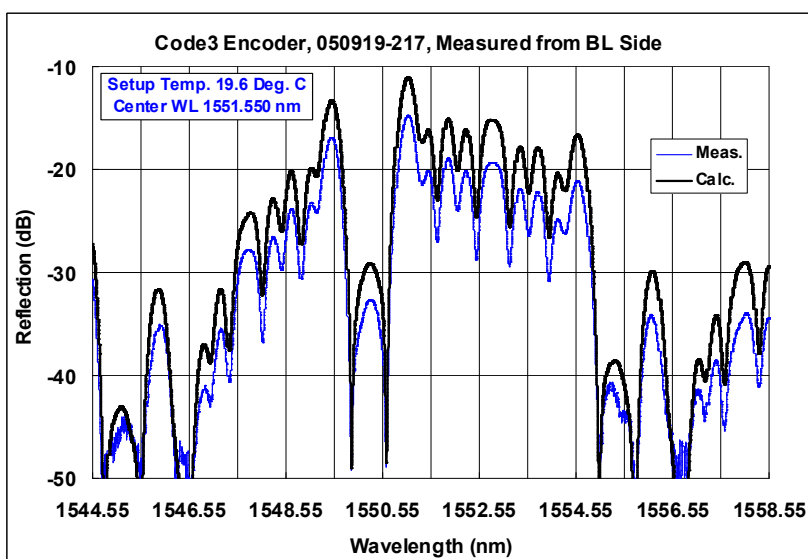


図 4. 2. 11 (c) Code-C の符号器

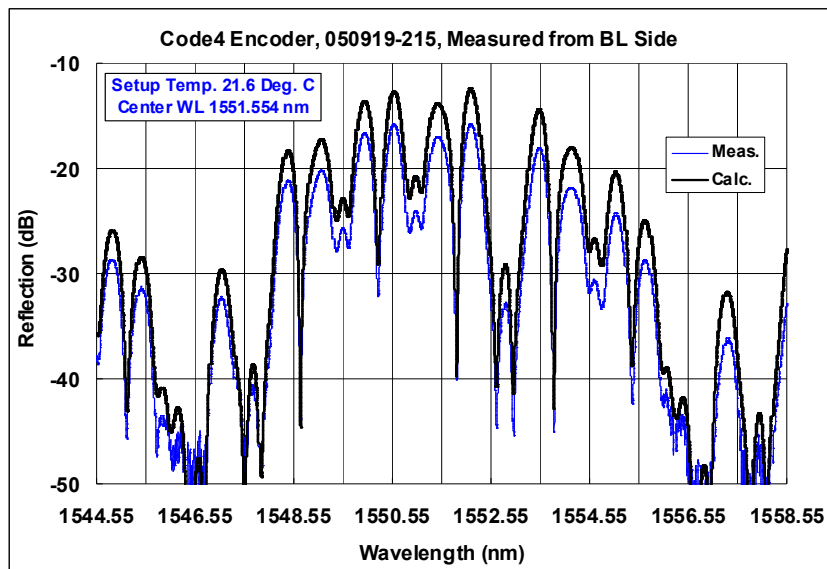


図 4. 2. 11 (d) Code-D の符号器

図 4. 2. 11 反射スペクトルの比較 (青線：計算値, 黒線：実測値)

(2) 符号拡散パルス波形測定

ファイバリングレーザから発振したパルス幅 2ps の短パルスを、各符号器に入力したときの応答波形を測定した。実験系を図 4. 2. 12 に示す。シンセサイザから出力された 10GHz の正弦波を 2 分岐し、一方をファイバリングレーザの動作クロックに、他方を光オシロのトリガに用いる。短パルスは、符号器にサーキュレータを介して入力され、符号拡散される。符号拡散は光アンプにより増幅され、復号器に入力される。本実験では、光オシロを用いて、この符号拡散波形を測定した。Code-A～D までの符号器を用いたときの測定結果をそれぞれ図 4. 2. 13(a)～(d) に示す。このように、それぞれ異なる符号で拡散されていることが確認できた。

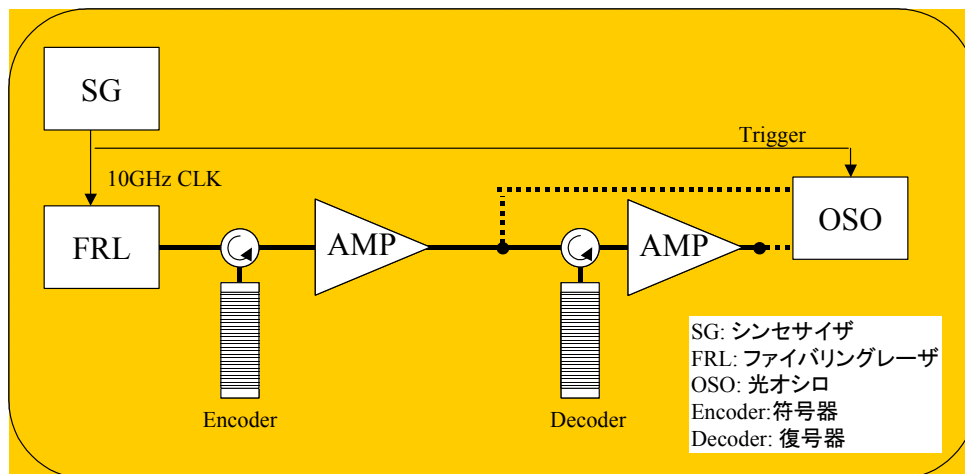


図 4. 2. 12 短パルス応答実験の実験系

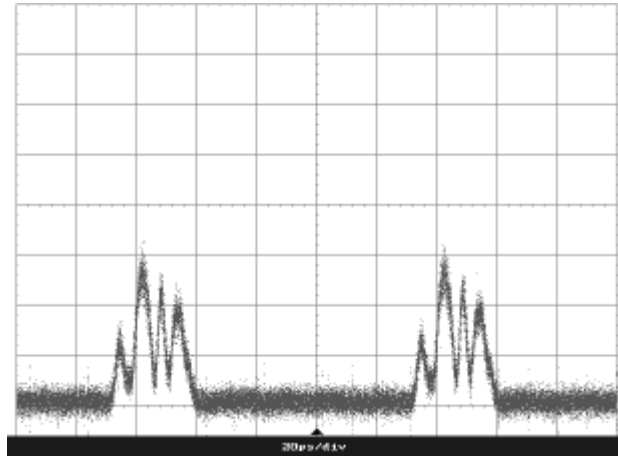


図 4. 2. 13(a) Code-A の符号器

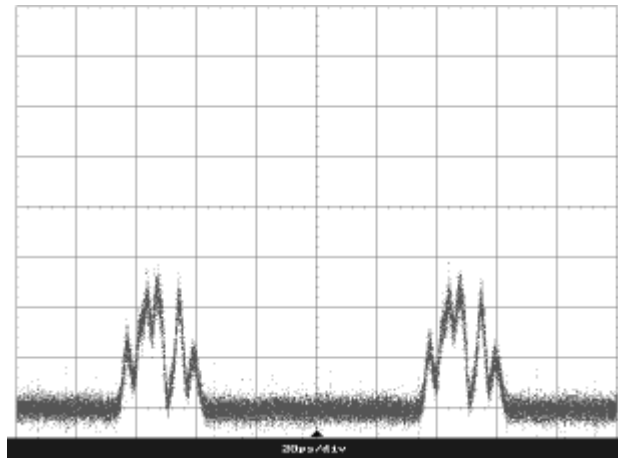


図 4. 2. 13(b) Code-B の符号器

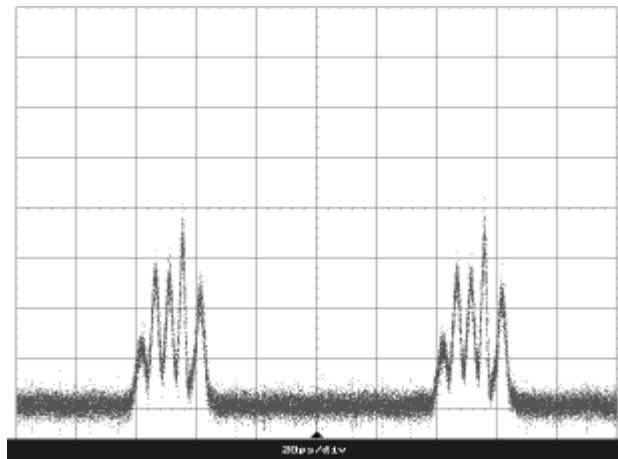


図 4. 2. 13(c) Code-C の符号器

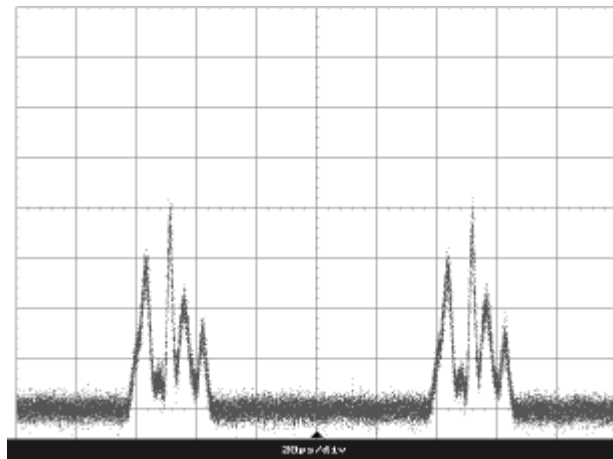


図 4.2.13(d) Code-D の符号器

図 4.2.13 符号拡散パルス波形

(3) 復号波形測定

自己相関・相互相関の識別が可能であることを確認するため、符号器として Code-A～D の 4 種を、復号器として Code-A および Code-C の 2 種を用いたときの相関特性（逆拡散）を観測した。結果をそれぞれ図 4.2.14(a), (b)に示す。Code-A の復号器を用いた場合、図 4.2.14(a)に示すような自己相関ピークが確認され、2nd ピークとの強度差は約 6 dB であった。また他 Code (B, C, D) による相互相関とのピーク強度差は、約 2 dB であった。Code-C の復号器を用いた場合、図 4.2.14(b)に示すような自己相関ピークが確認され、2nd ピークとの強度差は約 6 dB であった。また他 Code (B, C, D) による相互相関とのピーク強度差は、約 4 dB であった。以上の結果から、試作した符号/復号器は、いずれも自己相関・相互相関の識別が可能であることが確認できた。

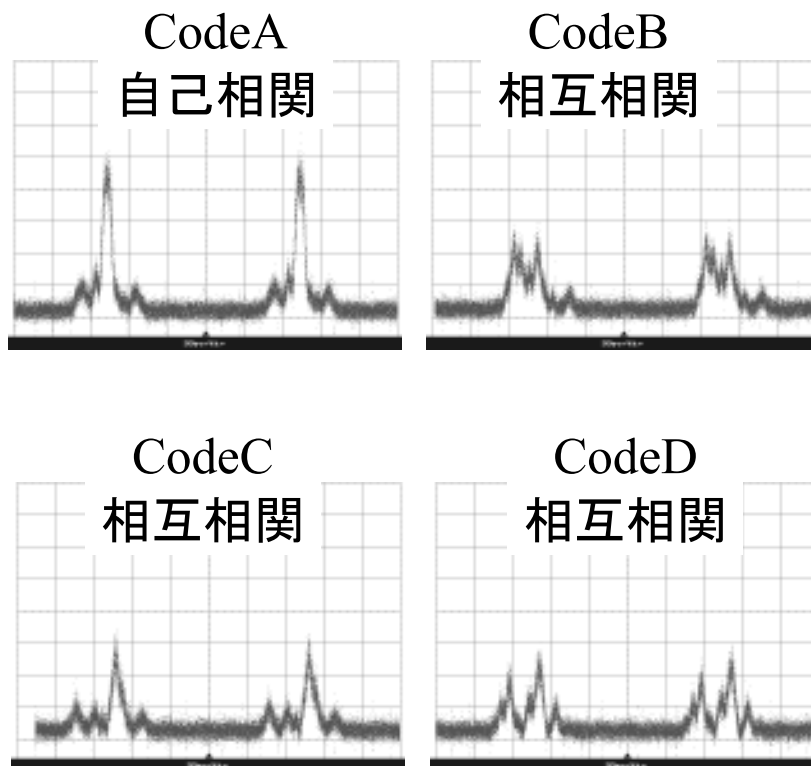


図 4.2.14(a) Code-A の復号器を用いた場合

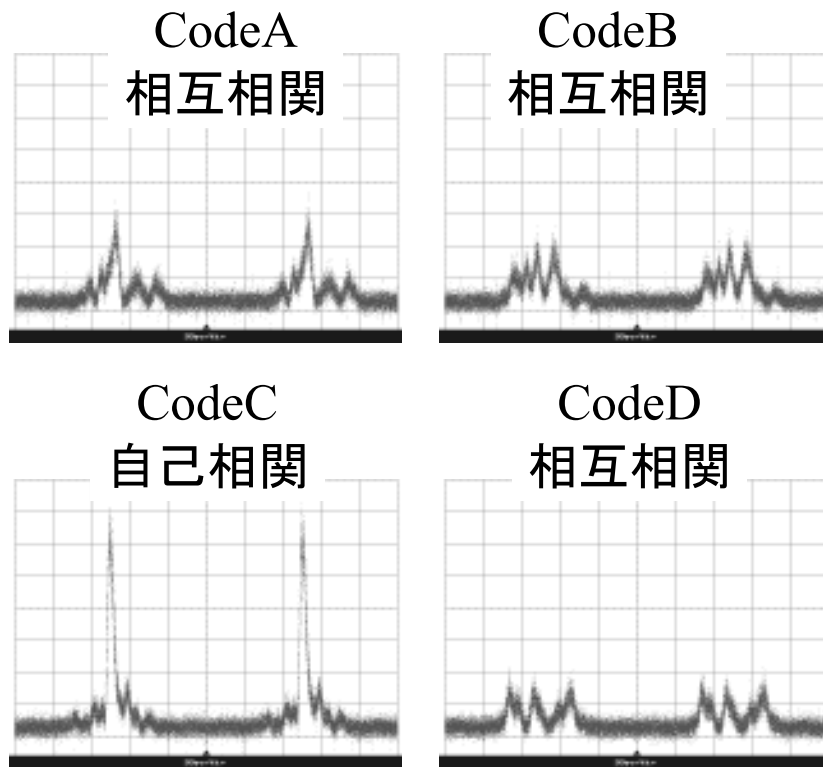


図 4. 2. 14(b) Code-C の復号器を用いた場合

図 4. 2. 14 復号波形

(4) 4ch-MUX

OCDM 符号器を用いた OTDM の DEMUX 動作を確認するため、4ch-MUX の実験を行った。実験系を図 4. 2. 15 に示す。各符号器と接続された光遅延線を調節することにより、符号器 (Code-A~D の 4 種) からの拡散波形を 40Gbps の TDM スロットにそろえて多重した。図 4. 2. 16 に 4ch-MUX の波形を示す。符号化された信号の拡散時間はいずれも約 30ps であり、25ps の TDM スロットに収まらないため、MUX した波形は図 4. 2. 16 に示すように連続した波形として確認された。この MUX した信号を、Code-A および Code-C の 2 種の復号器に入力したときの相関特性 (DEMUX) を観測した。波形を図 4. 2. 17(a), (b) にそれぞれ示す。Code-A の復号器を用いた場合は、図 4. 2. 17(a) に示すように、相互相関とのピーク強度差は約 1 dB であった。Code-C の復号器を用いた場合は、図 4. 2. 17(b) に示すように、相互相関とのピーク強度差は約 2 dB であった。従って、4ch-MUX をした場合は、拡散波形の端が隣接 CODE と重なる影響により自己相関ピークが低減するが、いずれの場合も自己相関・相互相関の識別が可能であることが確認できた。

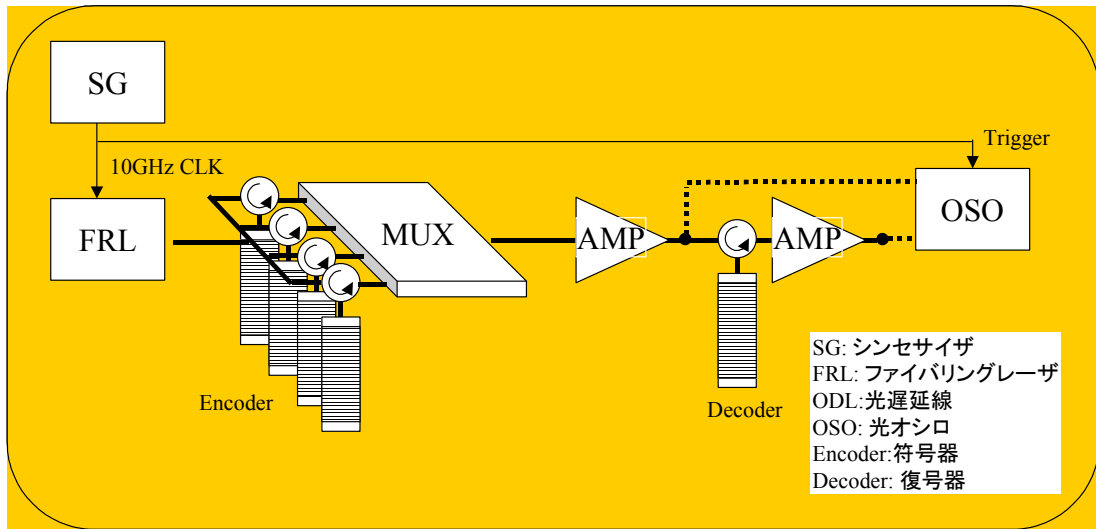


図 4. 2. 15 4ch-MUX の実験系

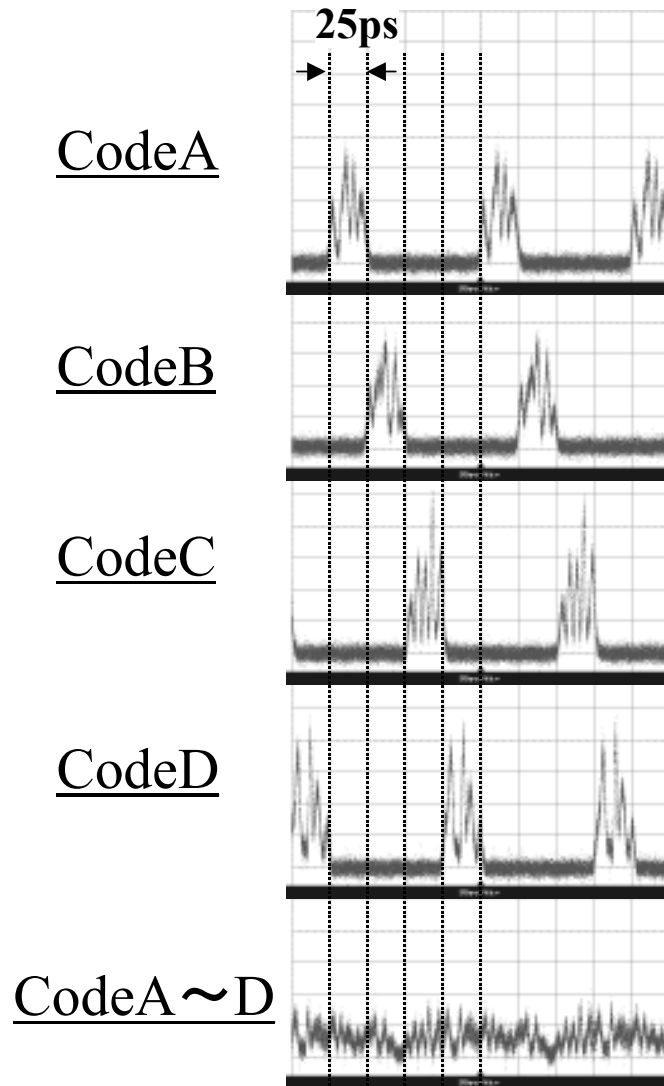


図 4. 2. 16 4ch-MUX の波形

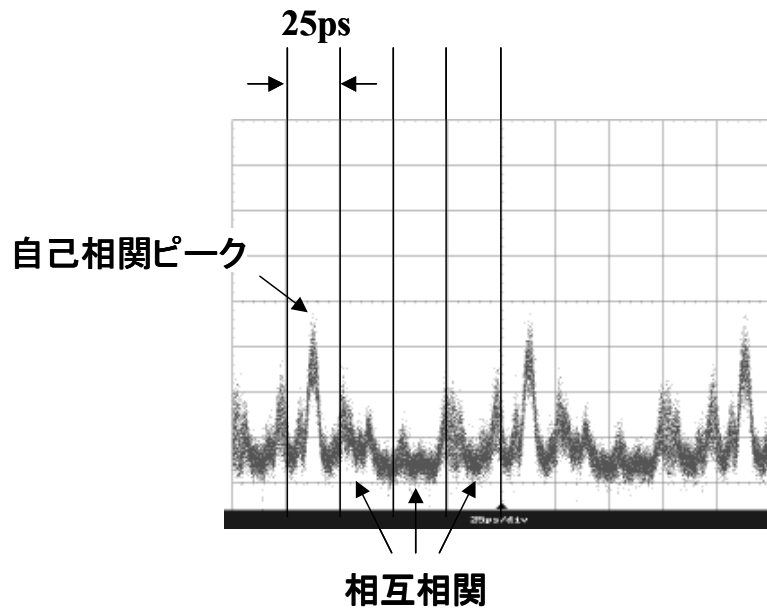


図 4.2.17(a) Code-A の復号器を用いた場合

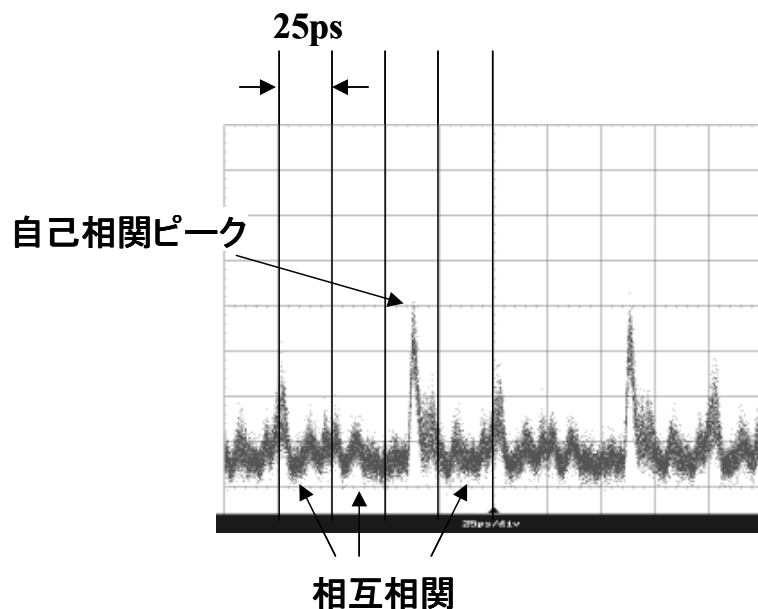


図 4.2.17(b) Code-C の復号器を用いた場合

図 4.2.17 4ch-DEMUX 波形

4-2-5 今後の課題

今後の課題を以下に示す。

- 閾値処理および時間ゲート処理：復号された信号から、自己相関と相互相関の判別を可能とするため、超短パルス信号に対応した閾値処理および時間ゲート処理の方式を検討する。
- 自己相関ピークの符号依存性改善：符号/復号器のデバイス特性を考慮して、入力パルスの最適動作条件を抽出する。
- 25ps の TDM スロットに適應した符号器の設計：光 MUX の実験結果から確認された符号器の拡散時間拡張の課題に対し、符号器の設計パラメータ変更を検討する。

4-3 総括

光サイドバンド変調による光ラベル発生の研究開発においては、以下の成果が得られた。

- イ) 5本の縦モードと等間隔と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)が達成できる見通しを得た。
- ロ) イ)で検討したパターンの中から10dB以上の消光比が得られる符号パターンについて、FBGをベースとした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実験を行った。その結果、実験的にも10dB以上の消光比(自己相関と相互相関とのピーク比)が達成できることを確認し、最適符号パターン実現の見通しを得た。

光ラベル処理によるOTDM高速アクセスの研究開発においては、以下の成果が得られた。

- ハ) 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、シミュレーションにより、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見通しを得られた。
- ニ) 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。シミュレーションにより、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で可変符号器が実現できる見通しを得られた。
- ホ) DEMUXの特性を確認するために、17年度3月末までに、160Gbps相当の短パルス、ロ)のシミュレーションの結果から試作した位相符号器(4種類)及び40Gbpsスロットの光MUXを用いて実験を行うことで、本方式による光MUX/DEMUXが可能な見通しを得た。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- ・ 辰巳大祐、他：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、ソサイエティ大会、9月2005年
 - ・ 辰巳大祐、他：スペクトル時間変調を用いた光符号ラベル生成に関する検討、PN研究会、1月2006年
 - ・ 辰巳大祐、他：A Study of Optical Label Generation Using the Spectrum-Time Modulation、CPP2006、1月2006年
- 辰巳大祐、他：ヘッダ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、全国大会、3月2006年