

平成18年度
研究開発成果報告書

高速電気信号処理技術に基づく適応制御
光トランスポートネットワークの研究

委託先： 三菱電機(株)

平成19年4月

情報通信研究機構

平成18年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「高速電気信号処理技術に基づく適応制御光トランスポートネットワークの研究」

目次

1 研究開発課題の背景	3
(ア) 分散フリートランスポンダの研究開発	4
(イ) MEMS 駆動光スイッチの研究開発	4
(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発	4
(エ) システム実証・評価の研究開発の研究開発	5
2 研究開発の全体計画	
2-1 研究開発課題の概要	5
2-2 研究開発目標	6
2-2-1 最終目標	6
2-2-2 中間目標	6
2-3 研究開発の年度別計画	8
3 研究開発体制	
3-1 研究開発実施体制	9
4 研究開発実施状況	
4-1 分散フリートランスポンダの研究開発	
4-1-1 概要	10
4-1-2 プリコーディング回路方式設計方	10
4-1-3 統合環境シミュレータ開発	11
4-1-3-1 統合環境シミュレータ概要	11
4-1-3-2 プリコーディング用 FIR フィルタに対する必要性能	11
4-1-3-3 送受協調等化方式検討	12
4-1-4 トランスポンダ基本機能部試作	14
4-1-4-1 基本機能部試作	14
4-1-4-2 光変調器駆動方式検討	15
4-1-4-3 光変調器制御精度検討	17
4-1-5 実施計画に対する達成状況	19
4-2 MEMS 駆動光スイッチの研究開発	
4-2-1 概要	20
4-2-2 研究開発成果	20
4-2-2-1 半田接合のための、ポリマ導波路へのメタル形成の検証	20
4-2-2-2 駆動機構である微小圧電素子の動作確認	22

4-2-2-3	ポリマ導波路に形成したメタルへの半田接合技術	25
4-2-2-4	光スイッチ基本ユニットのスイッチング動作試作検証	26
4-2-3	実施計画に対する達成状況	27
4-3	自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発	
4-3-1	概要	28
4-3-2	オプティカルパスレンジング機能	28
4-3-2-1	波長分散測定方式検討とカード試作	29
4-3-2-2	オプティカルパスレンジング制御プロトコル	32
4-3-3	分散フリー全光パス最適設定機能	34
4-3-3-1	分散フリー全光パス選択アルゴリズム	34
4-3-3-2	プロトコル実装設計	37
4-3-4	プラットフォーム構築	39
4-3-5	実施計画に対する達成の状況	41
4-4	システム実証・評価の研究開発	42
4-4-1	分散フリートランスポンダ	42
4-4-2	自律適応型ネットワーク制御モジュール	42
4-4-3	実施計画に対する達成の状況	43
4-5	総括	
(ア)	分散フリートランスポンダの研究開発	44
(イ)	MEMS 駆動光スイッチの研究開発	44
(ウ)	自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発	44
(エ)	システム実証・評価の研究開発	45

5 参考資料・参考文献

5-1	研究発表・講演等一覧	46
	参考文献	47

1 研究開発課題の背景

平成17年度総務省重点施策である u-Japan 計画にもあるとおり、次世代のユビキタスネットワークを支える基盤ネットワーク技術の一つの特徴は、通信トラフィック需要の急激な変化に対応できるような柔軟な回線設定が可能で、且つ異なるシステム間の相互接続性を確保する点である。この実現に向けて本研究開発課題は、複数のリングが接続されたネットワークの各ノードを最適配置された波長パスで接続することで、接続の自由度向上と任意ノード間接続、トランスペアレントなサブネットワーク間接続をそれぞれ可能とする適応性に富んだ光トランスポートネットワークの実現を目指すものである。

図 1-1 には本研究開発課題が実現しようとする適応制御光トランスポートネットワークの概要を示す。ベースとなる概念は、将来の光ネットワークのあるべき姿としてこれまでも国内外から提案があり、いくつかの重要な要素技術開発が行われつつあるが、最新状況としては、その一適用分野とも言える ROADM (Re-configurable Optical Add/Drop Multiplexing) ネットワークに関する研究が非常に活発化している[1-7]。ROADM ネットワークでの波長パスによる複数リング間接続の主目的は、ルータにおけるパス計算時間の爆発的増加やルート再構築遅延を回避し、ルータの削減およびそれに伴うコスト低減を図ることにある。現状の研究開発の盛り上がりは、デバイス技術の進歩と合わせて、本目的に対する要求が切実となりつつあることを受けたものであり、今後の研究開発および市場動向が注目される。

これに対して、図 1-1 で示す適応制御光トランスポートネットワークは、高速の電気信号処理技術によって分散補償ファイバとその損失を補償する光アンプを廃して初期コストを低減し、建設時やノードの増減設等の適応的再構成を自動的に処理し、高速に光パスを設定可能な適応制御光トランスポートネットワークを研究開発するものであり、(ア)分散フリートランスポンダ、(イ) MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 駆動光スイッチ、(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの3つを主要開発テーマとする。

また、(エ) システム実証・評価においては、分散フリートランスポンダ、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールの連携動作を確認すると共に実フィールドにおける機能の実証や性能評価のため、これらの機能を実装・搭載したプロトタイプシステムを開発し、エミュレーション環境、実験室環境、および実フィールド環境の3段階において実証・評価実験を行う。以下、各開発課題の背景および現状について述べる。

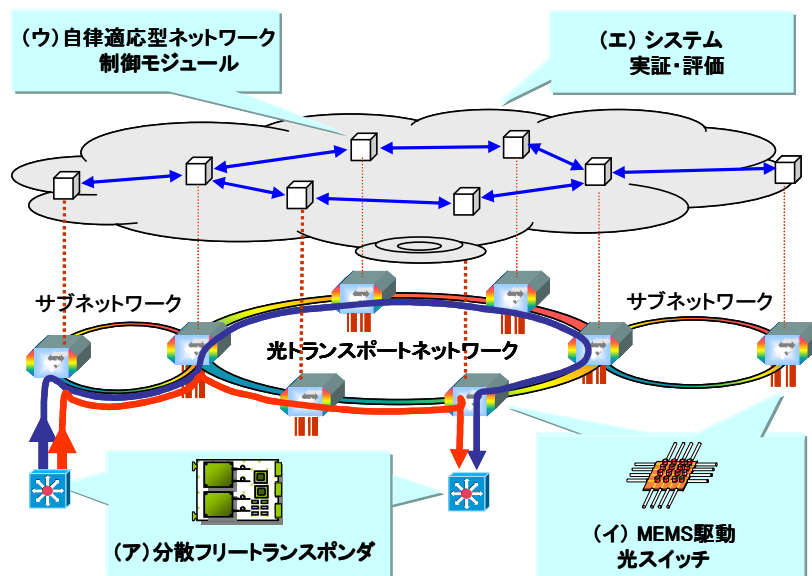


図 1-1 提案する適応制御光トランスポートネットワークの全体図

(ア) 分散フリースポンドの研究開発

光トランスポートネットワークの装置コスト低減と伝送距離の延伸の両立が求められている。そのため、分散によって生じる波形歪みを送信側の高速電気信号処理プリコーディングによって等化する試みに注目が集まっている。これまでに基本原理の検証が進み、最近では同方式の非線形耐力[8-10]、変調方式依存性[8, 11]などについて精力的な研究開発が行われている。また、WDM 伝送トライアル[12]や周回伝送系を用いた長距離伝送 [13]など、実システムを見据えた技術検討も始まっている。送信側プリコーディングを実現する光送信器構成技術に関しては、これまでは演算ブロックの回路規模や基礎パラメータなどの原理検討[14, 15]が主流であったが、光変調器の構成検討[16]などへと検討の範囲が広がってきている。

しかしながら現時点の送信側プリコーディング技術には未成熟の点も多く、実用化までには、ネットワーク設計と連携したシステム要求条件の明確化、ターゲットに適した回路方式の確立、光変調器の駆動方式の開発などが不可欠である。本研究開発ではプリコーディング回路方式設計、統合環境シミュレータ開発、トランスポンダ基本機能部試作によって、これらの課題に取り組んでいく。

(イ) MEMS 駆動光スイッチの研究開発

現在開発されている光スイッチの主な方式としては、熱光学効果を用いた導波路型、および MEMS 機構による微小ミラーを用いて光路を 3 次元的に切り替える空間光学系型 (3D-MEMS 型) が挙げられる。導波路型としては、1×2 スイッチを多段に接続し、N×N スイッチを構成したものがあある[17]。このタイプは小規模マトリクススイッチとしては完成度が高く、石英導波路、ポリマ導波路などをベースに、開発が進んでいる。また、大規模光スイッチとしては 3D-MEMS 型光スイッチが海外を中心に盛んに開発されている[18, 19]。しかしながら我が国においては、中～大規模の光スイッチを実現するための有力な技術が確立されておらず、この点において海外勢に先行されているというのが現状である。

本研究にて開発する MEMS 駆動光スイッチは、3D-MEMS 型等の他の光スイッチとは異なる提案者独自の光経路切り替え原理に基づくものであり、本開発により日本独自の光スイッチ技術を確立する。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発

ITU-T、IETF (the Internet Engineering Task Force)、OIF (the Optical Internetworking Forum) などによる標準化活動の結果、SONET/SDH に基づく時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing) パスや光伝送特性を考慮しない波長パスの動的確立・解放の手順が光ネットワーク制御プロトコル GMPLS (Generalized MultiProtocol Label Switching) として規定され、多くの相互接続実験によって相互運用性が確保されている[20-23]。さらに Ethernet パスについても、UNI (User Network Interface) における動的パス確立プロトコルの標準化が OIF によって進められており、IETF においては GMPLS を拡張してノード間で Ethernet パスを設定するシグナリング手順が議論されている[24]。我が国においても、JGN II や NICT けいはんな情報通信オープンラボにおいてマルチキャリア GMPLS 接続・ASON (Automatically Switched Optical Networks)/GMPLS 接続のフィールド実験が実施され、標準の検証・相互運用性確立へ貢献している[25]。

一方、OEO 中継を伴わず光のまま中継される全光パスの動的な確立・解放については、GMPLS 標準化当初に光伝送特性情報の GMPLS ルーティングプロトコルへの搭載[26, 27]や波長選択への GMPLS シグナリングプロトコルの適用[28]が検討された。しかし、全光パスの確立可能性を判断するために参照する光伝送特性の絞り込みが進まず、また光伝送や光デバイスの制約に起因して全光パスを確立可能な領域 (全光ドメイン) を拡大することが容易でないと認識され、その後標準化団体における検討は進んでいなかった。ところが最

近になって、全光パスを実現するために、GMPLS シグナリングメッセージへ波長情報を格納するための提案[29]や、より現実的な ROADM ネットワークにおける方路決定の制約条件をルーティング情報へ格納するための提案[30]が行われており、この分野の研究開発が活発化しつつある。

本研究開発では、従来の GMPLS では実現できない波長分散量の学習や波長分散補償を考慮した経路選択など次世代の全光ネットワーク向けの光伝送特性制御を可能とするため、GMPLS を全面的に拡張したプロトコルを使用する自律適応型ネットワーク制御モジュールを実現する。GMPLS 拡張の基本コンセプトは、自律分散制御に基づき自動的に最適化を図りつつ全光パスを動的に確立する方式であり、GMPLS-Plus (GMPLS Photonic layer usability support) と呼ぶ。

自律適応型ネットワーク制御モジュールは GMPLS-Plus を用い、分散フリースポンドアの適用によって距離や波長分散の制約が大幅に緩和される全光パスを、オペレータやユーザの要求に基づいてトポロジーに依存せずダイナミックにかつ自動的に確立可能とする。

(エ) システム実証・評価の研究開発

本研究開発課題は、サブテーマとして実施する三つの研究開発課題（分散フリースポンドア、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュール）の連携動作を確認するとともに、機能の実証や性能の評価を行い、その評価結果を各サブテーマの研究開発にフィードバックするためのものである。動的な全光パスの確立に対応して、受信側の可変分散補償デバイスを最適に設定するため、GMPLS シグナリングプロトコルを拡張する提案やその実験[31-33]が行われているが、送信側プリコーディング技術と GMPLS プロトコルとの連携については行われていない。そのため、本研究開発では、エミュレーション環境、実験室環境、および実フィールド環境の三段階において、サブテーマ間の連携動作について実証・評価実験を行う。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究開発の課題は、複数のリングが接続されたネットワークの各ノードを最適配置された波長パスで接続する適応制御光トランスポートネットワークを実現することである。従来の固定波長パスに比べ、接続の自由度が増すだけでなく、サブネットワーク間をトランスペアレントに接続することが可能になるため、例えば異なる通信キャリアが複数のリングをまたいで相互乗り入れすることが可能になる。また、通信トラフィック需要の変化に応じた回線の増減設や設定変更を、既存の回線に影響を与えることなく実施することができる。さらに、ネットワークの障害時に別ルートへ切り替えるプロテクションやリストラレーションも波長レイヤで任意に実施することができる。ベースとなる概念は、将来の光ネットワークのあるべき姿としてこれまでも国内外から提案があり、いくつかの重要な要素技術開発が行われつつある。しかしながら、既存の研究は、デバイス・装置レベルのみのアプローチか、またはネットワークオペレーションのみの開発のどちらかであり、両者を統合する研究には至っていない。

本研究開発では、(ア) ファイバの分散で生じる波形歪みを高速電気信号処理により等化する分散フリートランスポンダ、(イ) 光ルーティングのキーとなるダイナミック光 ADM (Add Drop Multiplexing) 用の MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 駆動光スイッチ、および (ウ) オプティカルパスレンジング機能により自動で伝送路パラメータを学習する機能を GMPLS (Generalized MultiProtocol Label Switching) プロトコル上に拡張した新しい自律適応型ネットワーク制御モジュールの 3 つを開発する。これらにより、初期コストの高騰要因であった一切の分散補償ファイバとその損失を補償するアンプが不要になり、また小型・高集積光スイッチによる低コスト・高信頼・高速光ルーティングが可能になり、回線増設やプロビジョニング、リストラレーションもネットワーク制御モジュールからの制御により運用コストをかけずに実現でき、ネットワークの帯域利用効率を飛躍的に向上する差別化システムが提供可能になる。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標 (平成 22 年 3 月末)

(ア) 分散フリートランスポンダ

- (1) 国内ネットワークの大部分をカバーする 2,000km に相当する波長分散を補償できる光トランスポンダを開発する。
- (2) 自律適応型ネットワーク制御モジュールからの制御でネットワークの任意ノード間の回線接続ができることを実証する。

(イ) MEMS 駆動光スイッチ

光機能プラットフォームたる MEMS 駆動技術を開発し、スイッチング速度 1ms 以下で 40×40 の MEMS 駆動光スイッチを試作し、システム試験で実証する。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュール

- (1) 40 台からなるネットワークにおいて、全ノードが 10 秒以内に全光リンクの分散を自動学習できるオプティカルパスレンジング機能を開発する。
- (2) 学習した分散量は各ノードへ広告され、広告された情報に基づいて最適な分散フリー全光パスを設定できることを実証する。

(エ) システム実証・評価

分散フリートランスポンダ、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク

制御モジュールを搭載した試作システムにより、実フィールドでの実証・評価を実施する。

2-2-2 中間目標（平成20年1月末）

(ア) 分散フリースポンド

方式の確かさを見極め、LSI 開発が順調にスタートしていること

(1)10Gb/s に対し2,000kmの分散を補償できる光フリースポンドの実現可能性を、計算機上のエミュレーションにて実証すること。

(2)上記を実機にて実現するための高速 LSI 開発に着手し、論理設計を終えていること。

(イ) MEMS 駆動光スイッチ

デバイスとしてのスイッチ開発を完了していること。

(1)アド・ドロップ機能とマトリクス切替機能を兼ね備え、任意の波長パスを任意の経路に出力可能なダイナミック ADM 用としてのスイッチの試作を終える。40 x 40 のマトリクス構成で、1ms 以下のスイッチング動作を実現する。40 ポートの挿入損失は 10dB 以内で、光可変減衰器 (VOA) によりポート間の損失偏差を± 0.5dB 以下に安定化する機能をモノリシックに集積する。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュール

中間目標までに個々の機能試作、機能検証を完了させる。

(1)オプティカルパスレンジング機能として、自律的に光伝送路の分散量（精度 5% 以内）を学習できることを実験系において実証すること。

(2)分散フリー全光パス最適設定機能として、標準プロトコル (GMPLS) を拡張することにより、伝送路特性 (分散) 情報をノード間で広告することができ、適切な全光パスを選択でき、かつデバイス設定パラメータが導出できることを実証すること。

(エ) システム実証・評価

(1)実ネットワークを計算機で模擬したエミュレータ上で、分散フリースポンド、MEMS 駆動光スイッチ、自律適応型ネットワーク制御モジュールが連携して、適応制御光トランスポートネットワークが実現できることを実証すること。

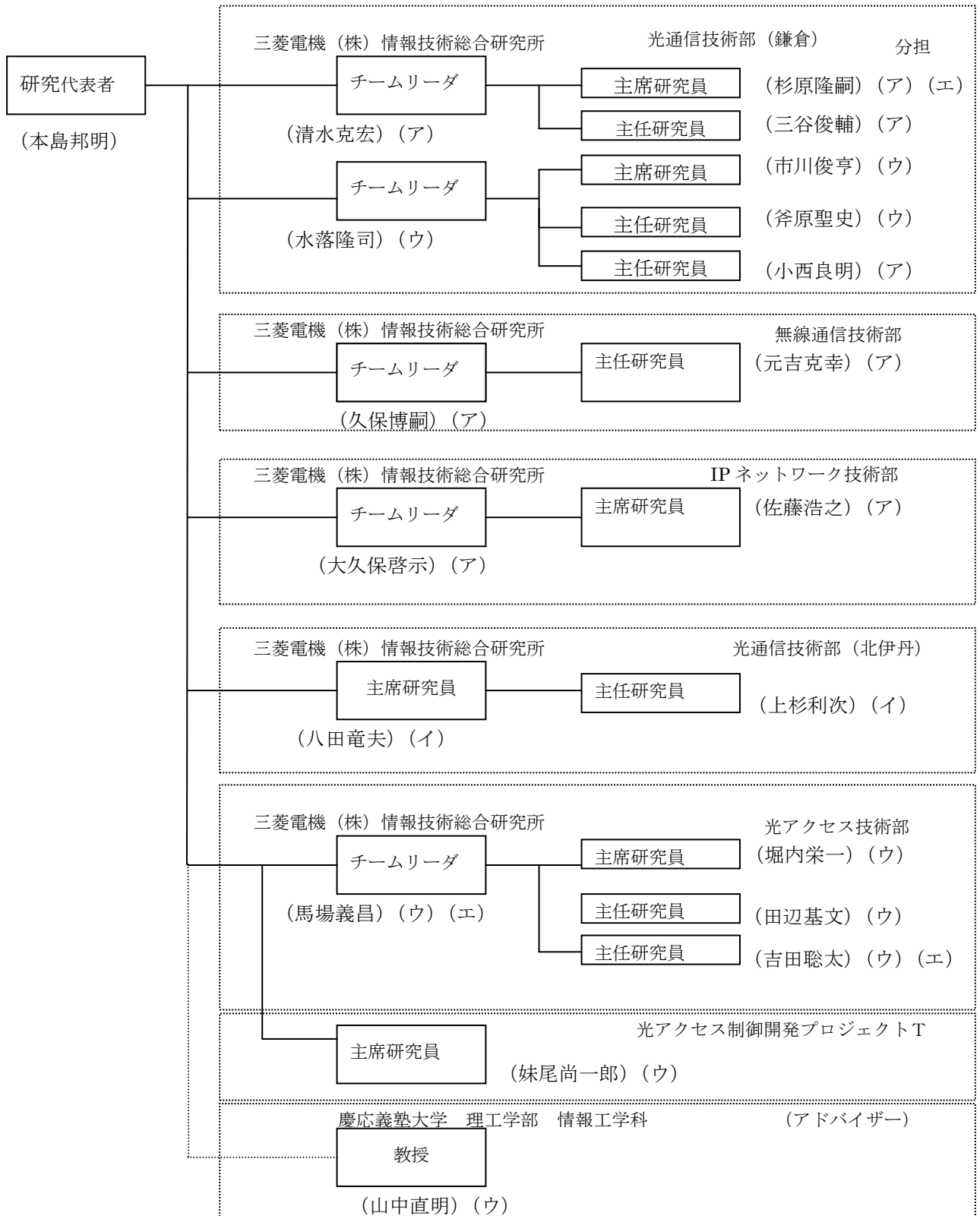
2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

研究開発項目	H17年度	H18年度	H19年度	H20年度	H21年度	計	備考
(ア) 分散フリーストランスポンダ 方式設計・エミュレーション LSI 試作・装置試作 実験室評価・フィールド試験	→	→	→	→	→		
(イ) MEMS 駆動光スイッチ MEMS 機構開発 スイッチ試作 改良試作 装置化・実フィールド評価	→	→	→	→	→		
(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュール 機能試作・機能検証 組合せ評価・フィールド試験	→	→	→	→	→		
(エ) システム実証・評価 エミュレーション評価 実験室・実フィールド評価	→	→	→	→	→		
間接経費額 (税込み)							
合 計							

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



分担： (ア) 分散フリートランスポンダの開発 (イ) MEMS 駆動光スイッチの開発
 (ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの開発 (エ) システム実証・評価

4 研究開発実施状況

4-1 分散フリースポンドの研究開発

4-1-1 概要

最終目標とする分散フリースポンドの実現には、①プリコーディング回路、②光変調回路、③受信等化回路の3点の方式と仕様を明確化した上でLSI開発を進める必要がある。特に、プリコーディング回路の規模と仕様は方式依存性が大きく、またプリコーディング回路の性能は伝送可能距離に直結するため、プリコーディング回路方式決定は本開発課題の最重要テーマとして位置づけられる。

上記を鑑み、平成18年度の開発においては、プリコーディング回路の実現手段の見極めを行うことを主目的として、以下の3つの開発を行った。

- (1) プリコーディング回路方式設計
- (2) シミュレータ開発
- (3) トランスポンド基本機能部試作

4-1-2 プリコーディング回路方式設計

図4-1-2-1にプリコーディング光送信器の構成例を示す。

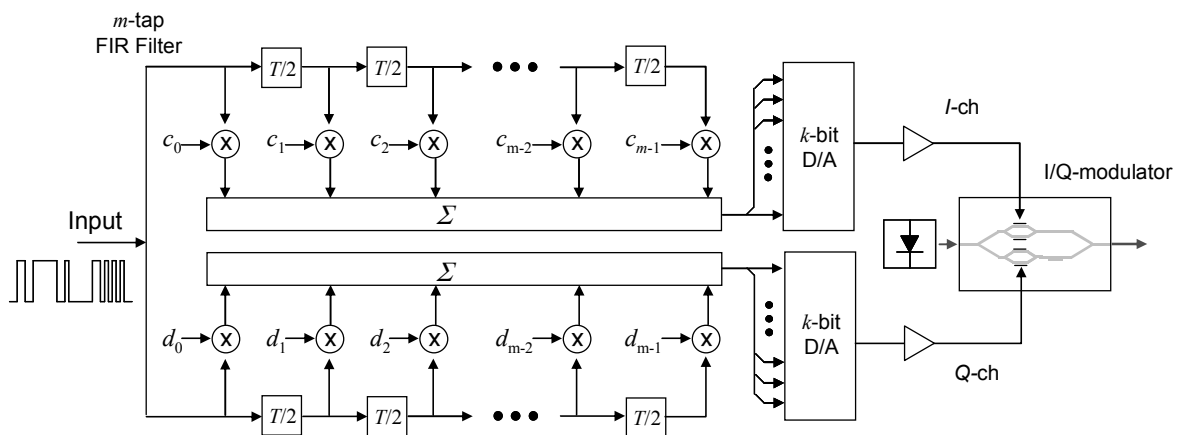


図4-1-2-1 プリコーディング光送信器構成例

図4-1-2-1は入力送信データ系列に対してタップ数 m のFIR (Finite Impulse Response) フィルタによるプリコーディング演算を行う機能を有する光送信器である。プリコーディングは、オーバーサンプリング (図4-1-2-1は2倍オーバーサンプリング時の構成) を前提とした演算を行う。光変調器駆動用のアナログ電気波形は k ビットの振幅分解能 (タップ係数の分解能) で生成する。波長分散を補償した光信号を出力するには、任意の複素光電界を生成できる必要があるため、プリコーディング光送信器ではI-ch、Q-chの2系列の信号で変調器を駆動する。ここでは、光変調器としてI/Q変調器に代表される、独立2軸駆動が可能な光変調デバイスを使用する必要がある。

大規模な分散補償を実現するためには、分散補償量増加に応じたプリコーディング回路の演算量増大 (タップ数 m の増大) が不可避であり、LSI化における課題となる。したがって、プリコーディング回路の実現には、演算部分の回路規模縮小技術が重要な役割を果たす。今年度は、上記演算部分への要求条件を明らかとし、回路規模縮小の可能性を検討するために、回路方式設計および特性検討に必要なトランスポンドの基本機能部の試作を行った。

4-1-3 統合環境シミュレータ開発

4-1-3-1 統合環境シミュレータ概要

光送受信器の機能およびプリコーディング部演算機能を盛り込んだ GUI ベースのシミュレータを開発し、統合環境シミュレータを構築した。本シミュレータの詳細を 4-4-1 節に示す。

次節に本シミュレータを用いた性能評価結果を示す。

4-1-3-2 プリコーディング用 FIR フィルタに対する必要性能

図 4-1-3-1~図 4-1-3-3 に、前節のシミュレータを用いた計算結果の一例として、FIR フィルタを分割実装した場合に得られる BER 特性取得結果を示す。伝送符号は 10Gb/s NRZ、伝送距離は SMF 2,000km (40,000ps/nm 相当)とした。また、各計算に対してトータルタップ長は 32、64、128 シンボルタップとし、プリコーディング時の振幅量子化を 5~8bit とした。なお、参考として量子化の影響がない場合 (図中、量子化 ∞ -bit) および波長分散による伝送路波形歪みがない場合 (図中、量子化 ∞ -bit、伝送路歪み無し) の結果を併記する。図 4-1-3-1~図 4-1-3-3 より、10Gb/s NRZ 変調、SMF-2,000km 伝送時には、プリコーディングによる過剰ペナルティが無視できるタップシンボル長は 64 以上であることが明らかとなった。また、量子化による過剰ペナルティを抑圧するには、量子化ビット数 7 以上とすることが好ましいことがわかった。

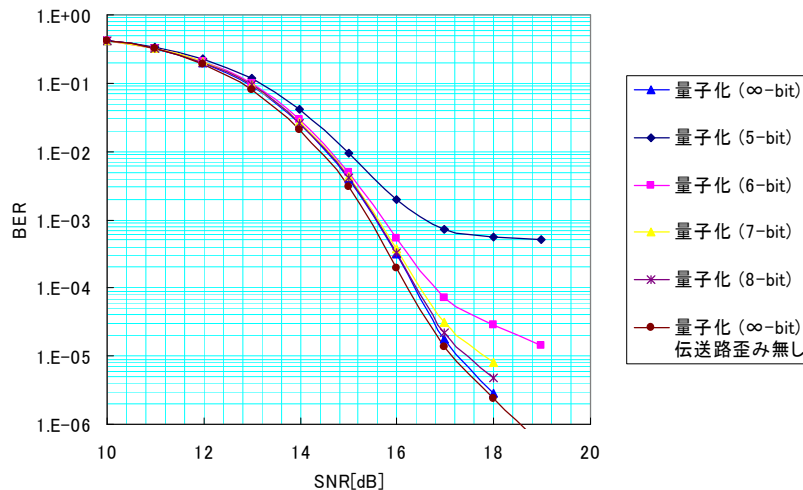


図 4-1-3-1 トータル FIR タップ数 128 の場合

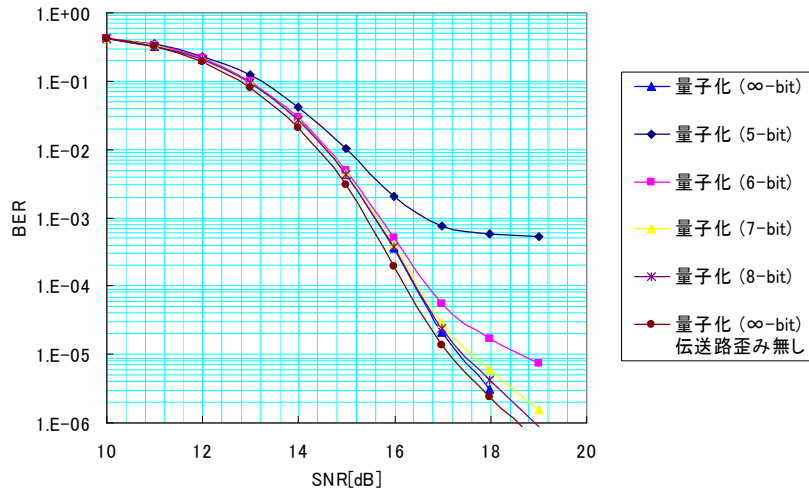


図 4-1-3-2 トータル FIR タップ数 64 の場合

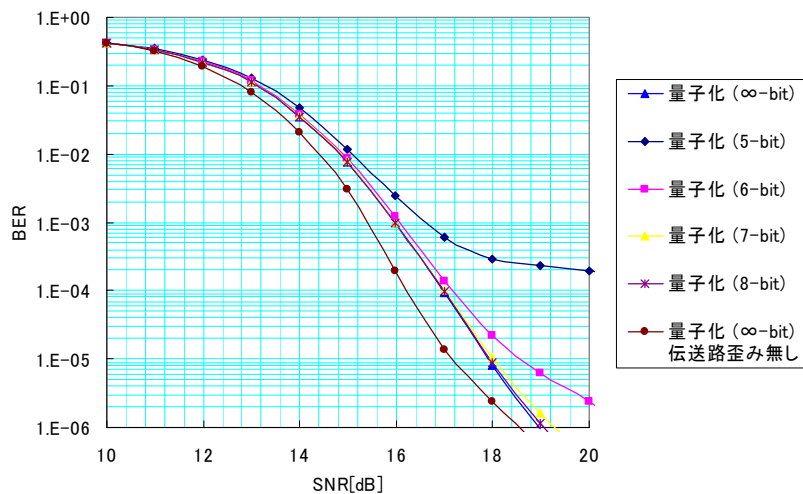


図 4-1-3-3 トータル FIR タップ数 32 の場合

4-1-3-3 送受協調等化方式検討

送信側プリコーディングでは、精密な補償量設定が難しく、温度変動などで分散量が経時変化する効果を吸収することも難しいため、プリコーディングで等化しきれない残留分散を受信側等化によって補償することが望ましい。

本節では、送信側プリコーディングで残留した分散に対する受信側等化の効果、および、復調方式の違いによる効果の差異を計算機シミュレーションによって検討した結果を示す。

図4-1-3-4にシミュレーションモデルを示す。変調方式として10Gsymbol/s Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)とQPSKの2つを比較した。プリコーディングは、タップ数 m の FIR フィルタと k ビット量子化 D/A コンバータ、および I/Q 変調器で行うものとし、処理速度は2倍サンプリングの20Gsample/sとした。復調方式はDQPSKに対しては1ビット遅延干渉計による差動検波を、QPSKに対してはホモダイン検波を行うものとした。受信側等化は $n=8$ タップの FIR フィルタとした。

図4-1-3-5は、DQPSKとQPSKそれぞれについて、プリコーディングの m と k の値とアイ開口ペナルティの関係をシミュレーションした結果である。40,000ps/nmの分散に対し、アイ開口ペナルティを2dB以下とするには両変調方式ともタップ数 m は105以上とすることが必要である。DQPSKは量子化誤差が前後ビットで加算されるため、QPSKに比べ1ビット多い

k=6 ビットの量子化が求められる。

図 4-1-3-6 は、0~2,000ps/nm の残留分散 ΔDL を受信側等化する場合の BER 特性をシミュレーションした結果である。 $\Delta DL=1,000\text{ps/nm}$ 、 $\text{BER}=10^{-4}$ で比較した場合、QPSK は受信側等化によって 3dB の改善が見られるのに対し、DQPSK の改善は 1dB に留まる。これは、QPSK は線形復調であるため線形フィルタ動作の FIR フィルタで等化できるが、DQPSK は前後ビットの干渉という非線形復調であるため、FIR フィルタで等化しきれないためと考えられる。改善には DFE (Decision Feed-back Equalizer) や MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimator) などの非線形等化が必須となろう。

以上より、送信側プリコーディングで残留した分散は、線形復調の QPSK では線形フィルタによる受信側等化で補完的に補償できるが、非線形復調の DPQSK では等化しきれないことが明らかとなった。

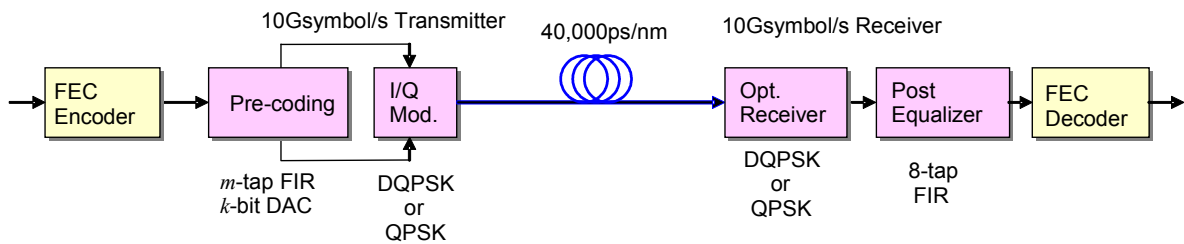


図 4-1-3-4 シミュレーションモデル

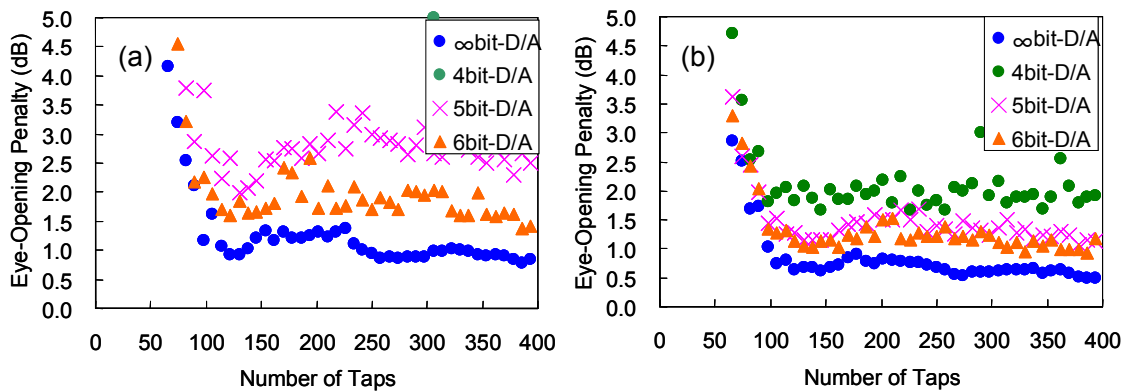


図 4-1-3-5 予等化に必要な送信タップ長 m と D/A コンバータ分解能 k
 ((a) DQPSK, (b) QPSK)

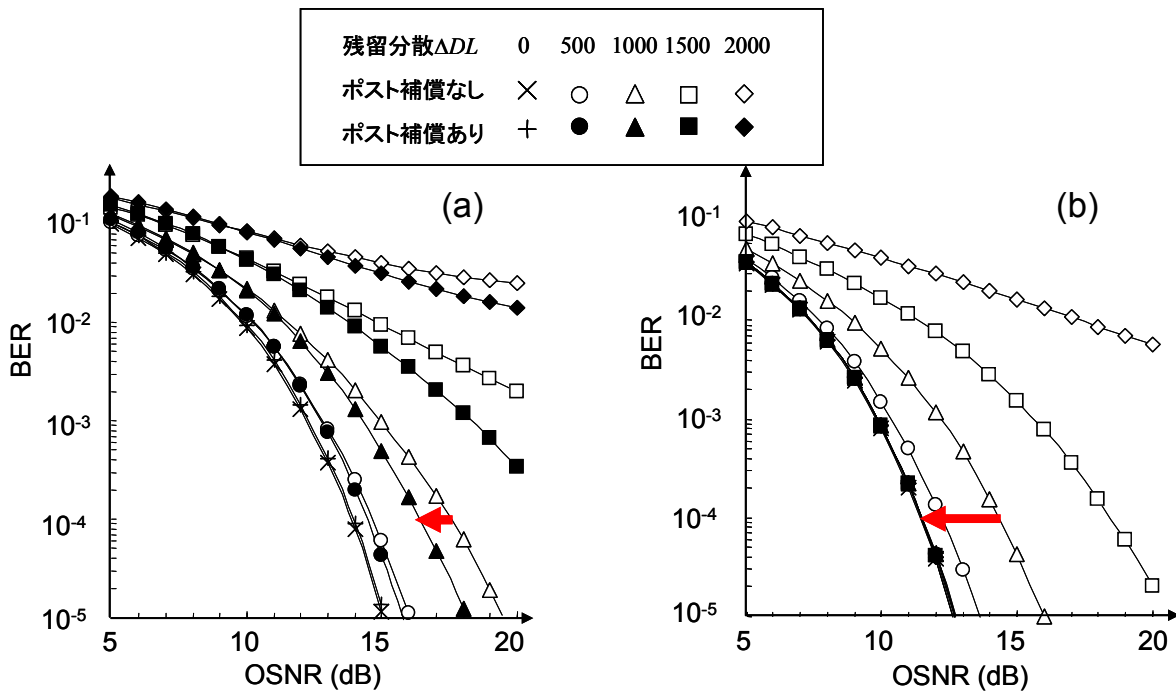


図 4-1-3-6 受信側等化による残留分散補償
 ((a) DQPSK, (b) QPSK)

4-1-4 トランスポンダ基本機能部試作

4-1-4-1 基本機能部試作

詳細なプリコーディング回路方式検討を行うために平成17年度より S/W シミュレータの開発を進めている。今年度はさらに H/W 検証を目的として分散フリートランスポンダ基本機能部設計・試作を実施した。

S/W シミュレータを用いた検討の結果、10Gb/s、40,000ps/nm の分散等化を送信側プリコーディングにて実現するためには、比較的長いデータ系列 (RZ パルスに対しては 90~100bit) に対してビットレート速度以上の高速の信号処理が必要となることがわかった。また、対応する光変調フォーマットによって上述のプリコーディング回路に対する要求性能が非常に大きく変化することが明らかになった。

S/W シミュレータによって、プリコーディングを用いた光信号伝送品質は、光変調器の構成ならびに変調器の制御誤差・駆動誤差に大きく依存することもわかった。このため、光変調方式の構成手段および制御方式の検討が必要となり、方式比較に適したトランスポンダ基本機能部を試作した。

試作したトランスポンダ基本機能部のブロック図と主要機能をそれぞれ図 4-1-4-1、表 4-1-4-1 に示す。

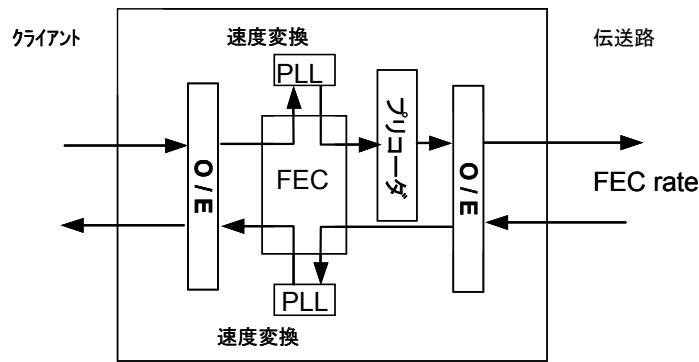


図 4-1-4-1 試作したトランスポンダ基本機能部の機能ブロック図

表 4-1-4-1 トランスポンダ基本機能部の主要機能

機能	内容
対応変復調方式	I/Q 変調, OOK 変調
ライン/クライアント側送受信部	搭載
プリコーディング部	未搭載
電源/バックボード	収容シェルフに実装

トランスポンダ基本機能部は専用バックボード、専用ファンを搭載し、制御用カード及び分散フリートランスポンダ評価カードを収容可能なカード収容シェルフに実装して使用できるように設計試作を行った。

4-1-4-2 光変調器駆動方式検討

プリコーディング光送信器では、変調器駆動系の I-ch、Q-ch のそれぞれに複素光電界の実部および虚部を割り当てる。一般的なプリコーディング演算部の構成を図 4-1-4-2 に示す。分散補償量ゼロでは Q-ch は存在せず I/Q 変調器の Q-ch 側を消光の状態で使用することになるため、変調器で 3dB の過剰挿入損失が発生してしまう。

上記問題を解決するために、図 4-1-4-3 に示す座標変換を用いたプリコーディング演算方式を考案した。従来の I-ch、Q-ch データ $D_r(t)$ 、 $D_i(t)$ に対して、座標変換後のデータである

$$(I\text{-ch}) = \frac{1}{\sqrt{2}} D_r(t) + \frac{1}{\sqrt{2}} D_i(t), \quad (Q\text{-ch}) = -\frac{1}{\sqrt{2}} D_r(t) + \frac{1}{\sqrt{2}} D_i(t)$$

を用いて変調器を駆動することで、 $D_r(t)$ 、 $D_i(t)$ の大きさによらず、両チャンネルの同振幅駆動を実現する。このため、図 4-1-4-2 の従来構成で問題となった光変調器の Q-ch 側の過剰損失は発生せず、システムの信号対雑音比を改善する。

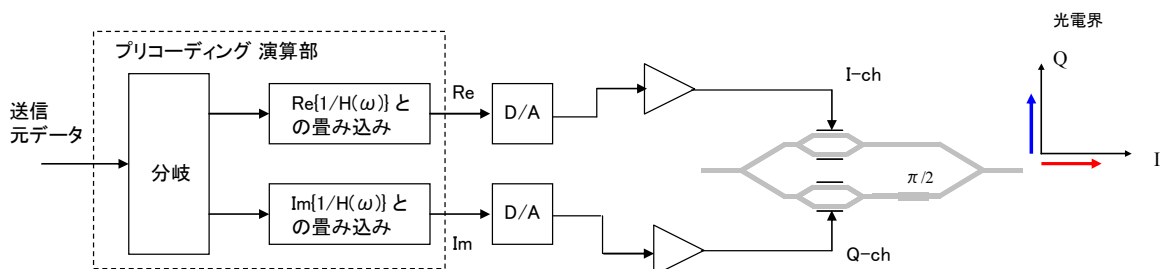


図 4-1-4-2 従来のプリコーディング演算部の構成

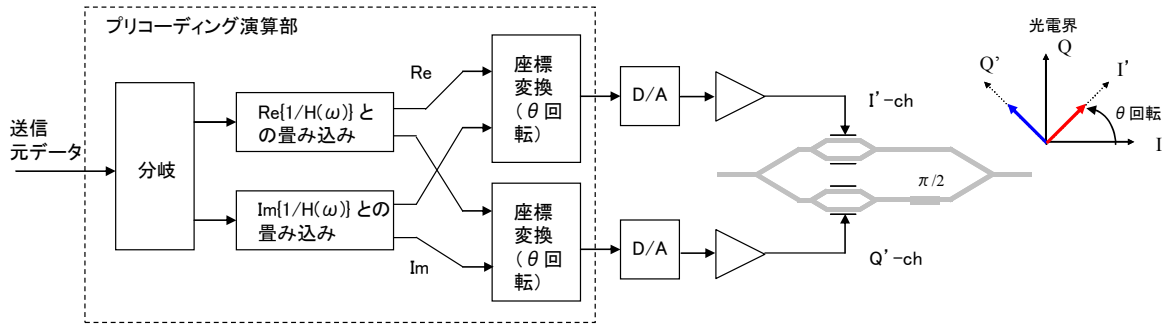


図 4-1-4-3 座標変換動作を行うプリコーディング演算部の提案構成

図 4-1-4-3 の提案構成において、光送信パワーおよび挿入損失を計算した結果を図 4-1-4-4～図 4-1-4-6 に示す、図 4-1-4-4 は分散補償量に対する I/Q チャンネルのパワー比の変化、図 4-1-4-5 は I/Q チャンネルパワー比の座標回転角依存性、図 4-1-4-6 は過剰挿入損失の座標回転角依存性をそれぞれ計算した結果である。ここで伝送符号は 10Gb/s NRZ とした。プリコーディング部は 65 シンボルタップの FIR フィルタで構成し、D/A コンバータは 2 倍オーバーサンプリング、6bit 分解能とした。図 4-1-4-4、図 4-1-4-5 は、座標回転角度が $\pi/4$ の場合に分散予等化量によらず I/Q パワー比が約 1:1 となることを示している。また、図 4-1-4-6 より、最大の挿入損失を 3dB 改善できることが明らかとなった。

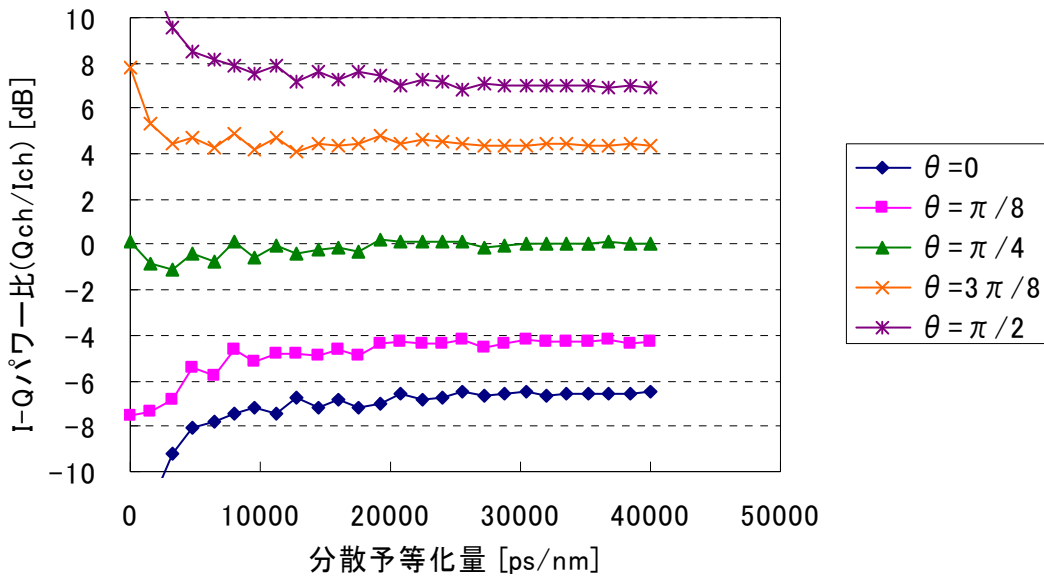


図 4-1-4-4 分散補償量に対する I/Q チャンネルパワー比の変化

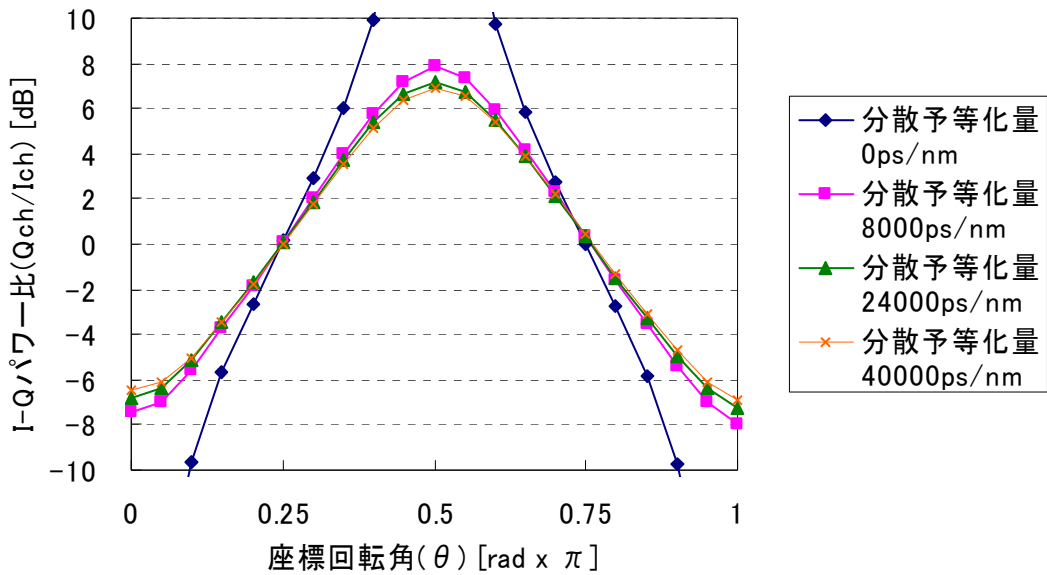


図 4-1-4-5 I/Q チャンネルパワー比の座標回転角依存性

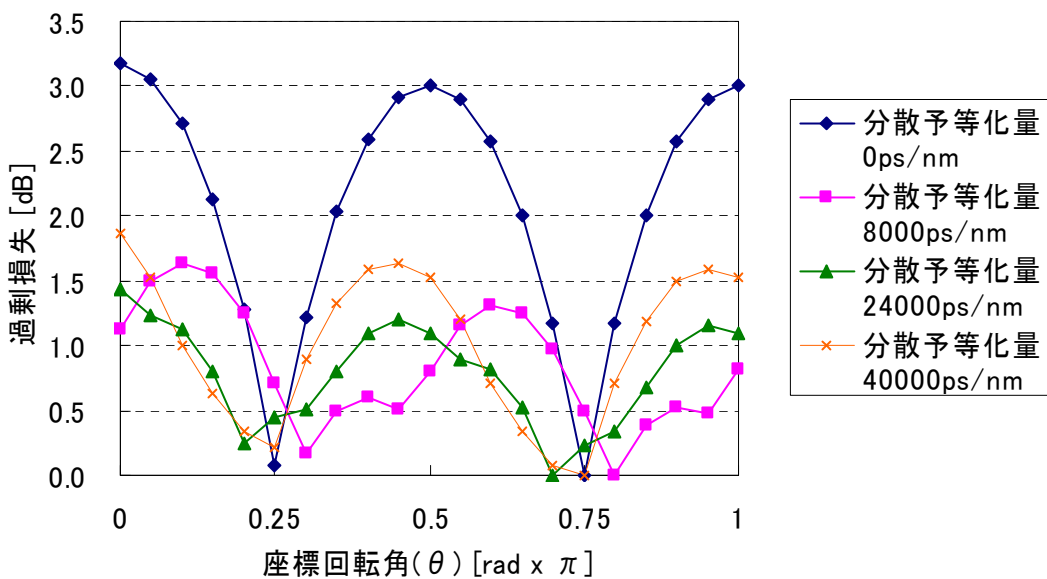


図 4-1-4-6 変調器過剰損失の座標回転角依存性

4-1-4-3 光変調器制御精度検討

プリコーディング光送信器の実現には一般的に光の I/Q 変調器を使用する(図 4-1-4-2、図 4-1-4-3)。予め伝送路波長分散の逆特性を求めるプリコーディング演算部と、I-ch・Q-ch の電気光変換を行うマッハツェンダー干渉計 (MZI: Mach-Zehnder Interferometer) が主構成要素となる。ここで、プリコーディングの性能を引き出すには、各 MZI の動作点安定化と、I-ch・Q-ch 間の相対光位相安定化が不可欠となる。

本節では、送信側プリコーディング技術における変調器動作点変動の影響について、シミュレーションした結果を示す。

図 4-1-4-7 に、各 I-ch、Q-ch 変調用 MZI のバイアスずれ量とアイ開口ペナルティの関係を示す。送信光信号は 10Gb/s NRZ とした。D/A コンバータは 2 倍オーバーサンプリング動

作とし、振幅分解能は4~6、 ∞ bitとした。プリコーディング演算時のターゲット分散等化量は40,000ps/nmである。波形生成プロセスではタップ数65シンボルのFIRフィルタを使用した。図4-1-4-7の結果から、MZI変調部のバイアスずれによって発生する過剰ペナルティはD/Aコンバータの分解能にはあまり依存せず、制御精度に対する許容幅を 0.05π rad以下とすれば、過剰ペナルティを0.5dB以下にできることがわかった。

図4-1-4-8に、I-ch・Q-ch間の光信号の相対位相ずれによって生じるアイ開口ペナルティの評価結果を示す。光位相ずれによる過剰ペナルティについてもMZIバイアスずれ同様にD/Aコンバータ分解能依存性は小さい。過剰ペナルティを0.5dB以下とするためには、相対光位相差の許容幅は 0.08π radである。また、MZIバイアスずれと比較して光位相ずれに対して要求される制御精度は緩く、同一の過剰ペナルティに対する許容幅は約1.6倍である。

以上の検討結果より、送信側プリコーディング技術を用いたNRZ変調に求められるバイアス制御必要精度は、ターゲットの過剰ペナルティを0.5dBとした場合、各部の要求制御精度はMZI部 $< 0.05\pi$ rad、光位相調整部 $< 0.08\pi$ radであることが明らかとなった。

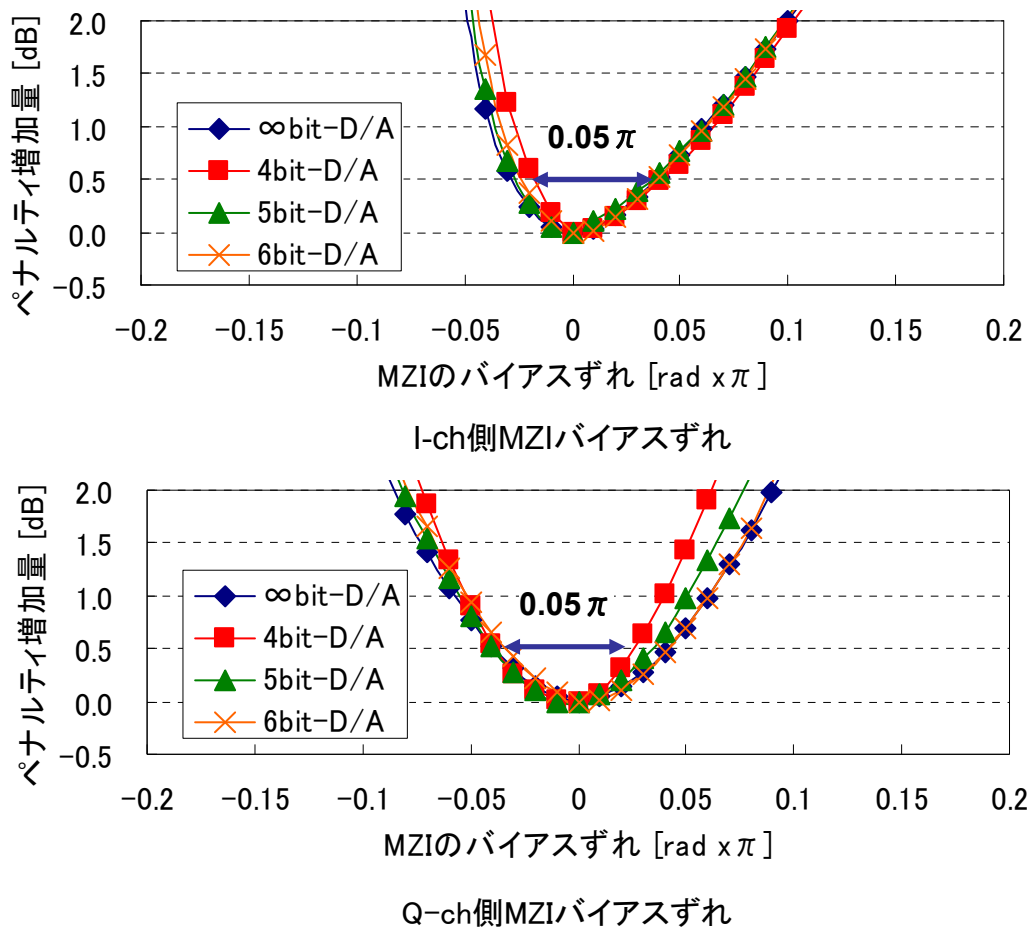


図4-1-4-7 MZIバイアスずれに対するアイ開口劣化

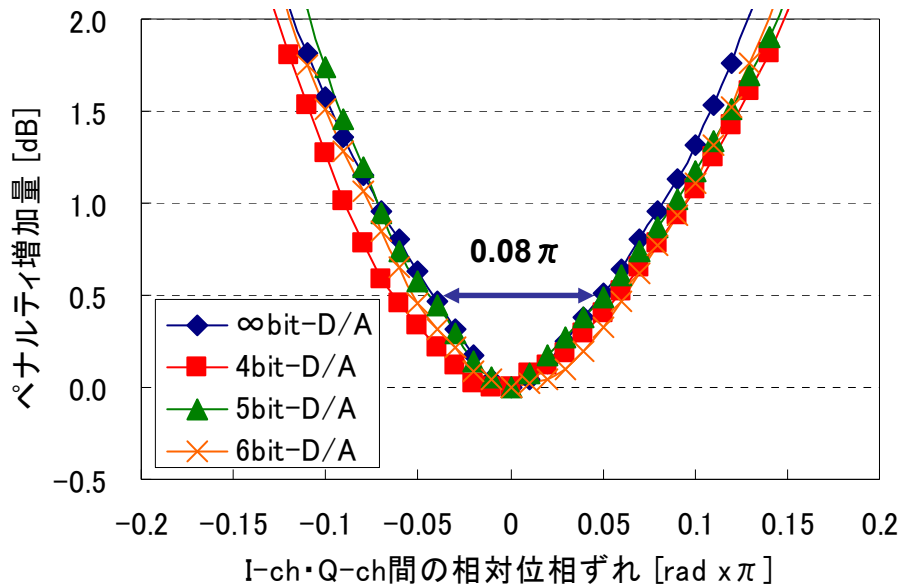


図 4-1-4-8 I-ch・Q-ch 間光位相ずれに対するアイ開口劣化

4-1-5 実施計画に対する達成状況

上記より、平成18年度での開発計画に対する達成状況は下記のとおりである。

【開発計画】

- (1) プリコーディング回路方式設計：10Gb/s 2,000km 伝送対応のプリコーディング回路実現方式の検討。
- (2) 統合環境シミュレータ開発：光送受信器の機能およびプリコーディング部演算機能を盛り込んだ GUI ベースのシミュレータを開発。
- (3) トランスポンダ基本機能部試作：プリコーディング回路と接続可能な光変調部を有する基本機能部試作。

【達成状況】

- (1) 10Gb/s 2,000km 伝送対応のプリコーディング回路実現方式を検討し、プリコーディング回路方式設計を完了した。達成度：100%。
- (2) 光送受信器の機能およびプリコーディング部演算機能を盛り込んだ GUI ベースのシミュレータを開発し、統合環境シミュレータを構築した。達成度：100%。
- (3) トランスポンダ基本機能部試作を完了した。達成度：100%。

4-2 MEMS 駆動光スイッチの研究開発

4-2-1 概要

本研究開発にて提案する MEMS 駆動光スイッチの駆動機構として、まず圧電バイモルフ素子を用いた構成を検討した。本構成ではこの微小圧電素子の実現とそのポリマ導波路への実装技術がキーポイントとなる。こうした観点から、平成18年度には、駆動機構である微小圧電素子の試作、動作確認と解析、およびそれらをポリマ導波路上の各切り替えポイントに一つずつ配置し、半田リフロー工程により多数ポイント一括で接合するための半田形成の検討を行った。その結果、ポリマ導波路上の所望の微小メタルパッド上に良好な半田を形成でき、駆動機構である微小圧電素子を接合するに十分な結果を得た。また、微小圧電素子を試作しその基本特性を確認した。以上の結果に関しては当初の計画通りであったものの、微小圧電素子による駆動に関して3次元構造解析を用いて詳細な検討を行ったところ、応力開放穴による所要駆動力低減の工夫を施しても光スイッチング動作に必要な力が想定値を超えて大きく、微小圧電素子の駆動力が不足することが明らかになった。そこで、駆動機構の抜本的な見直しに着手し、切り替えポイントの動作を再度、総合的に見直したところ、光スイッチ動作に必要な駆動力が得られる可能性の高い駆動方式の代替案を見出した。駆動機構の動力として汎用品の電気機械式リレーを用いて回転駆動する方式であり、当初想定していた微小圧電素子駆動機構よりも低コスト、高信頼化を達成できる可能性があり、その基本的な動作を確認した。以下、これらの詳細を報告する。

4-2-2 研究開発成果

4-2-2-1 半田接合のための、ポリマ導波路へのメタル形成の検証

提案する MEMS 駆動光スイッチでは、駆動機構である圧電バイモルフ素子を半田接合するため、スイッチ部溝近傍の導波路上の一部にメタライズパターンが存在する設計となっている（図4-2-2-1参照）。

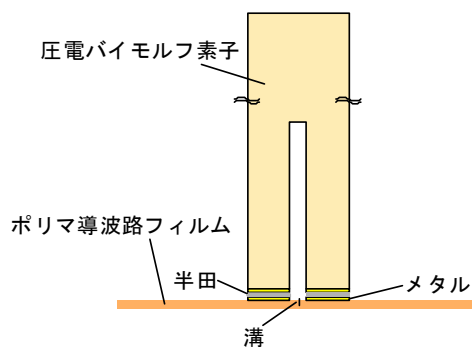


図4-2-2-1 圧電バイモルフ素子の半田接合の模式図

したがって、メタルによる光吸収や、メタル形成に伴うフィルムへの応力が光学特性に影響を与える可能性があるため、実際にポリマ導波路上へのメタル形成を行い、その光学的影響について評価した。メタル形成した試料の構造模式図を図4-2-2-2に示す。

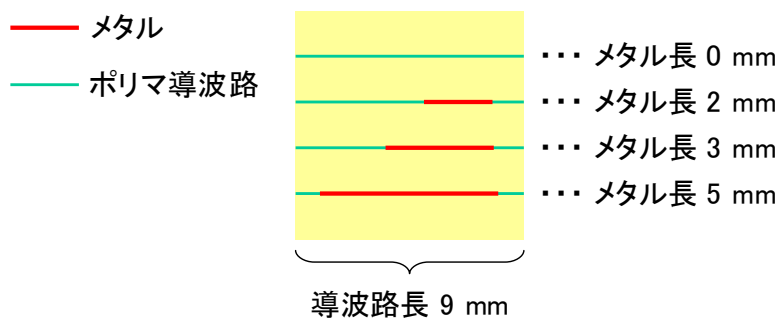


図 4-2-2-2 マタル形成した試料の構造模式図

全フッ素化ポリイミドフィルムに導波路とメタライズパターンを設けたものであり、同一長さ（9 mm）の導波路に対し異なる長さのメタライズパターンを施している。導波路は表面より 0.02 mm の深さにあり、導波路幅 0.009 mm に対しメタル幅は 0.03 mm 幅で、完全に導波路上を覆っている。光スイッチではメタル配置の設計により導波路を覆う領域幅を小さくしているが、ここでは光吸収・応力の両観点から最も光学的影響が大きい場合を想定している。この試料の導波路に入力した光強度に対して出力の光強度を測定し、透過損失を評価した。使用した波長は 1544.0 nm 及び 1306.1 nm である。図 4-2-2-3 に結果を示す。

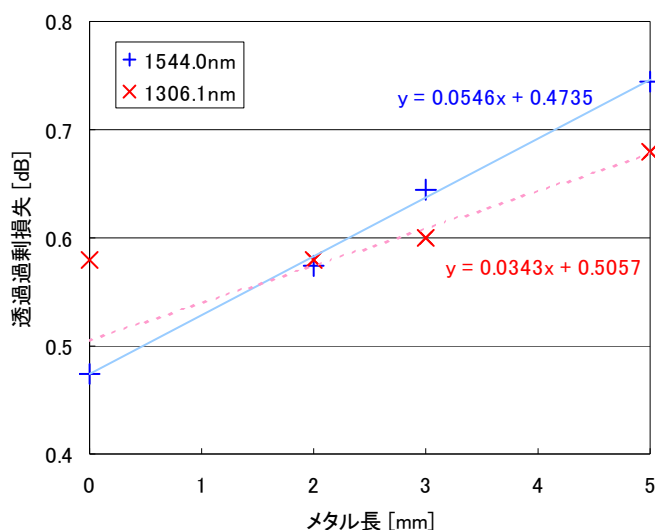


図 4-2-2-3 透過過剰損失のメタル長依存性

波長 1306.1 nm においては、メタル長が 0 mm と 2 mm では透過過剰損失が同程度であったが、メタル長が 2 mm より長くなるにつれて徐々に損失が大きくなる。メタル単位長さ当たりの損失は 0.034 dB/mm である。一方、1544.0 nm においては、メタル長が 2 mm でも損失が増加しており、0.055 dB/mm となる。

以上から透過過剰損失にメタル長依存性が存在し、1.3 μm 帯と比較して 1.55 μm 帯の方が損失が大きくなることを明らかにした。導波路とメタライズパターンが重なる溝近傍の圧電素子搭載パッド部分の長さは、1 経路あたり 0.1 mm × ポート数程度となり、ポート数を 40 まで拡張した場合でも、損失が大きくなる 1.55 μm 帯において 0.22 dB 程度の損失に抑えられ、十分な光学特性が得られることを明らかにした。

4-2-2-2 駆動機構である微小圧電素子の動作確認

駆動機構として用いる微小圧電バイモルフ素子を試作し、その動作確認として変位量と発生力の関係、及び応答特性を実測した。また発生力がスイッチングに十分か確認するため、3次元構造解析による詳細な検討を行い実測値と比較した。

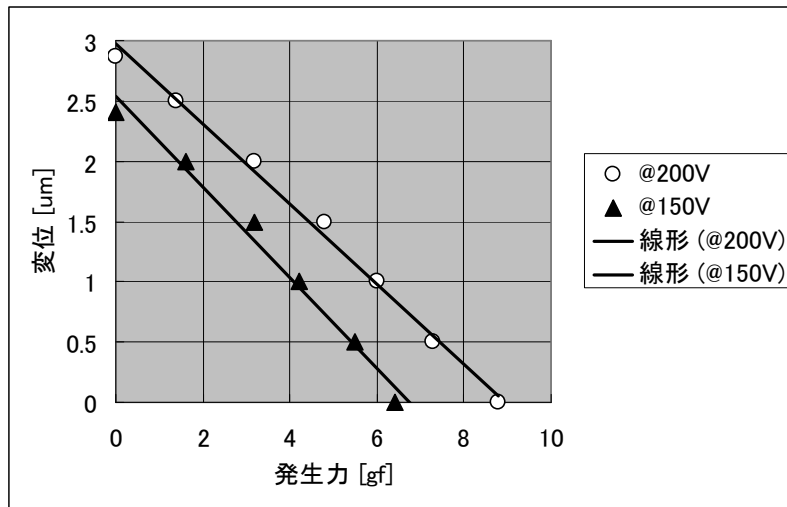
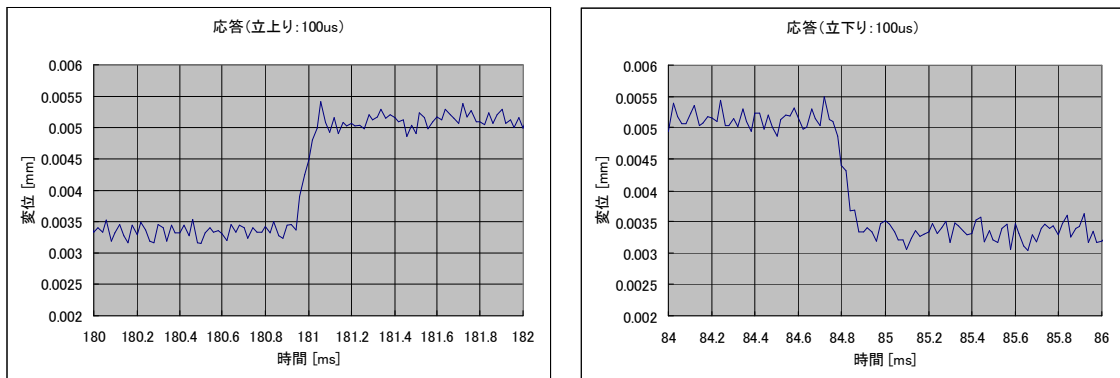


図 4-2-2-4 圧電バイモルフ素子の変位量と発生力

図 4-2-2-4 は、圧電バイモルフ素子の発生力と変位量の関係を素子の片足（図 4-2-2-1 の模式図においてフィルムと接合している二股の片側）に対して実測したグラフである。スイッチングを行うためには片側 1 μm 程度の変位が必要であり、そのときの発生力は駆動電圧 200 V において 6 gf 程度となることを明らかにした。また図 4-2-2-5 に応答特性を示す。



(入力電気波形の上り/下り時間100μsと設定)

図 4-2-2-5 圧電バイモルフ素子の応答特性

実験結果から、100 μs 程度の高速なスイッチングが可能であることを明らかにした。

次に、溝の開閉に必要な力を見積もるため、溝部の圧電バイモルフ素子による開き幅を 3 次元構造解析により求めた。解析モデルを図 4-2-2-6 に示す。

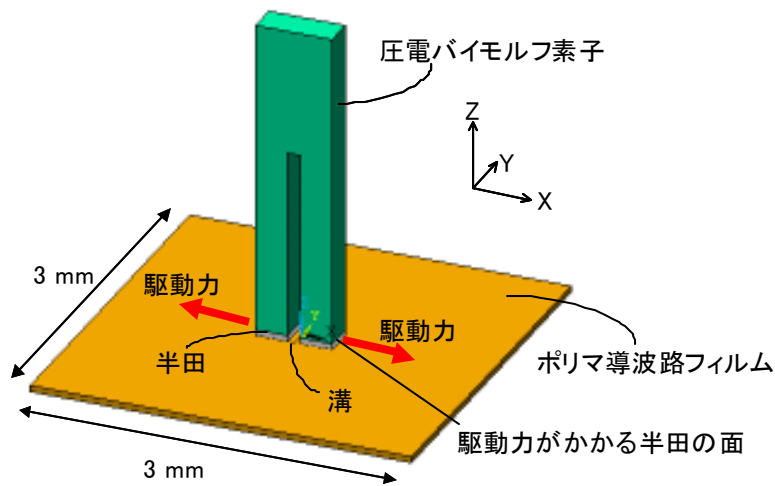


図 4-2-2-6 駆動機構の解析モデル

ポリマフィルムの厚みは 0.05 mm、3 mm 角の大きさである。溝の深さはフィルム表面から 0.03 mm、コア位置は深さ 0.02 mm である。溝の両脇には圧電バイモルフ素子を実装するための半田がそれぞれ溝から 0.05 mm 離れたところに 0.25 mm 角、0.05 mm 厚で配置されている。なお、圧電素子の駆動力は、図に示すように半田の両外側面の法線方向にかかるとした。圧力を 0~64 N/mm² と変化させたときのコア開き量を図 4-2-2-7 に示す。

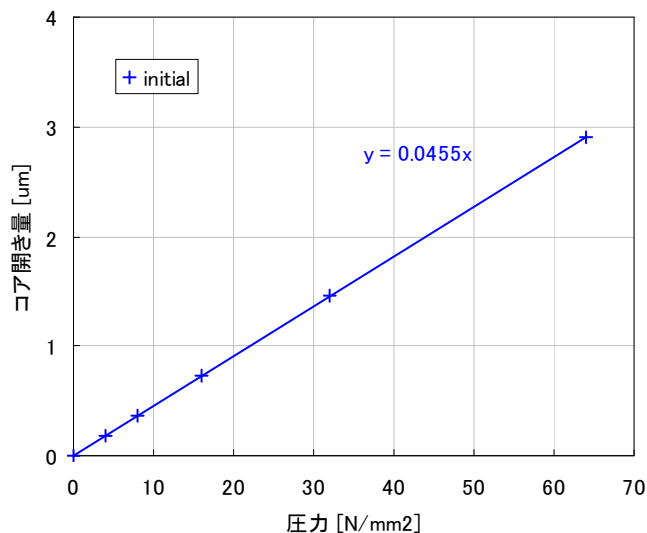


図 4-2-2-7 駆動力とコア開き量の関係

図 4-2-2-7 より、圧力に比例して溝が開いていくことがわかる。2 μm (全反射を実現するのに十分な値) だけ溝を開くことを考えた場合、44 N/mm²、すなわち 56 gf の力が圧電素子に要求される。圧電素子の発生力 (実測値) は、図 4-2-2-4 に示したように片側 1 μm 変位の場合で 6 gf であったことから、10 倍近い力が必要となる。

この課題を解決するために、フィルムや接合部に工夫をして溝を開きやすくすることを次に検討する。比較検討パターンを下記に示す。

- (0) スwitchingに必要な力の低減検討前の初期モデル (図 4-2-2-6)
- (a) パッドの両脇に応力解放穴を設ける (穴中心は溝から 0.866 mm、穴半径は 0.3 mm)
- (b) パッドの両脇に応力解放穴を設ける (穴中心は溝から 0.866mm、穴半径は 0.45 mm)
- (c) (a) において、パッドサイズ (Y 方向) を大きくする (全幅 0.25 mm → 0.5 mm)

- (d) (a) において、パッドサイズ (Y 方向) を小さくする (全幅 0.25 mm → 0.1 mm)
 (e) 応力開放穴の大きさとパッドとの相対位置は (a) と同じで、パッド位置を溝から離す (0.05 mm → 0.15 mm)

まず、同じパッドサイズである (a)、(b)、(e) をこれらの工夫を行う前の初期モデル (0) と比較する。加える圧力に対するコア開き量の変化を図 4-2-2-8 に示す。

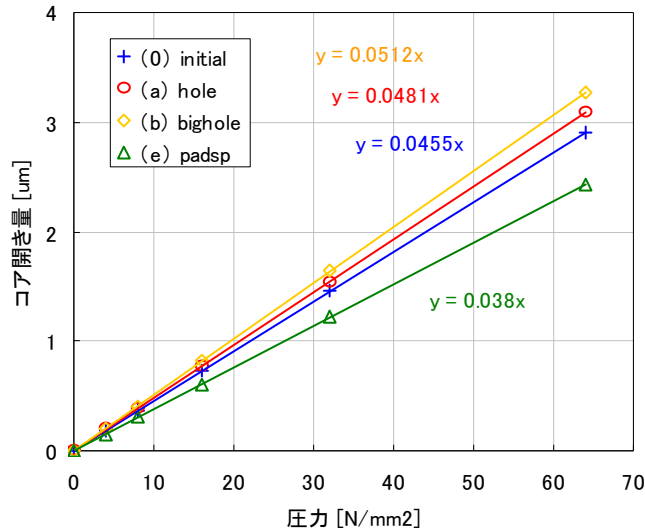


図 4-2-2-8 駆動力とコア開き量の関係 (横軸 : 圧力)

応力開放穴を開けた (a) では、穴が無い場合 (0) より溝が開きやすくなる (1.06 倍) ことがわかる。また、(b) のように穴を大きくすればさらに開きやすくなるが、穴径を 1.5 倍にしても開きやすさは 1.5 倍ではなく 1.06 倍と効果は小さい。一方、パッド位置を溝から離れた (e) は、パッドからの距離がある分、フィルムの変形を可能にする領域が増えて開きやすくなるように思えるが、実際には逆に閉じる方向の変形を招き、開きやすさは 0.84 倍となった。

次に、同じ穴仕様でパッドサイズを変えた (a)、(c)、(d) を比較する。図 4-2-2-6 の圧電素子は、厚さ (Y 軸方向) を変えると、変形量はそのままだに発生力を厚さに比例して変えることができる。すなわち、Y 軸方向に大きい圧電素子を搭載すると、同じ駆動条件 (電圧) でより大きな力が発生する。図 4-2-2-8 は圧力指定のためパッドサイズが異なると力の大きさが異なるため、横軸を力に変換した場合のコア開き量を図 4-2-2-9 に示す。

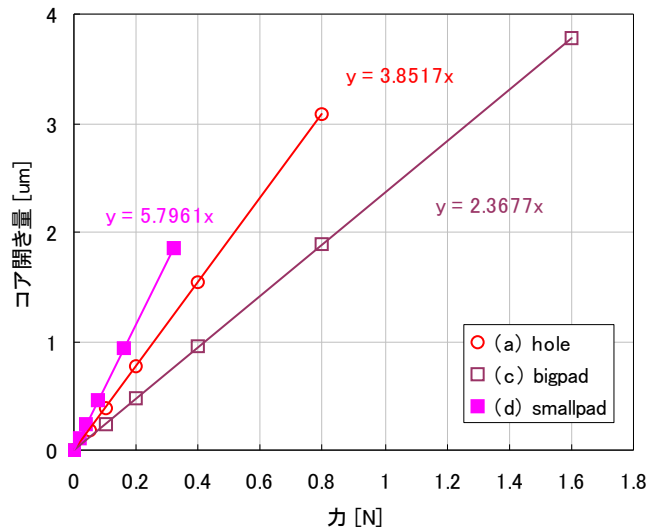


図 4-2-2-9 駆動力とコア開き量の関係（横軸：力）

なお、各マーカーは前の解析と同様に圧力が 4、8、16、32、64 N/mm² のときのものである。パッドサイズを変えると、圧力のかかる面積が大きくなる(c)の方が溝幅は大きくなる。しかし力に換算すると、2 μm 開くのに 86 gf と非常に大きな力が必要になる。すなわち、(c)では溝（切れ目）が無い部分にもパッドがあり、フィルムが繋がっている部分でも両脇から引っ張っていることから、4 割ほどの力が(a)の状態より無駄になってしまう。一方、パッドサイズの小さい(d)では、溝のある部分を集中して両脇に引っ張るため、力に対する溝の開き幅は最も大きくなる。しかしながら、このパッドサイズに合うサイズの圧電素子では発生力が小さくなってしまふ。

以上の検討を元に考えると、小さなパッドに大きな圧電素子を搭載すれば、小さな領域に大きな力がかかり、2 μm の溝幅を実現できる可能性がある。例えば、圧電素子の厚み（図 4-2-2-6 の Y 軸方向）を 3 倍にすると発生力は 3 倍になり、幅方向（X 軸方向）の層数を片側アームあたり 1 層ずつ増やす（幅 1.25 倍）ことで発生力は 1.5 倍になる（ただし変位量は低下）。また、圧電素子の自由長（二股の足の長さ）を 1/2 にすると発生力は 2 倍（ただし変位量は低下）となり、これら全てを採用すると現状の 9 倍の発生力となり、力に関しては所望の値が得られる見込みがある。しかしながら実際には変位量の低下を伴うことに加えて、現状の 3.75 倍の底面積をもつ圧電素子を現状サイズ以下のパッドに実装しなくてはならないため、例え現状よりスイッチの反射点間隔を広げて大きな圧電素子の搭載が可能になったとしても、このような狭い領域への半田実装では十分な接合強度が得られない。したがって、この圧電素子を用いた駆動方式では、仕様を満足するのに十分な溝の開閉が不可能であると結論する。

4-2-2-3 ポリマ導波路に形成したメタルへの半田接合技術およびリフロー工程による接合技術の検証

駆動機構である微小圧電素子と導波路フィルムを接合するための半田搭載は、小さなメタル面積に高い位置精度で適切な半田量を実現しなければならない。そのためにインクジェット原理を応用した溶融半田吐出法を用いた。本方式は、任意の位置に容易に半田供給が可能（マスク不要）、フラックス処理なしに接合可能（洗浄不要）、鉛フリー半田に対応しているという特長がある。メタルパッドに半田搭載した様子を図 4-2-2-10 に示す。

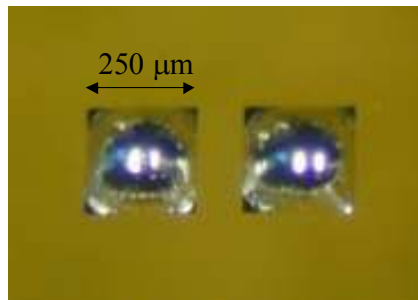


図 4-2-2-10 微小メタルパッドへの半田搭載

250 μm 角の微小メタルパッドに精度良く半田が搭載できており、微小圧電素子と導波路フィルムの半田接合を行うに十分と考えられる。

次に各スイッチ部に圧電素子を一括実装するためのリフロー工程の検討を行う予定であったが、前項での結論より、本検討での微小圧電素子では発生力の不足のためスイッチング動作が実現できないため、微小圧電素子の搭載を前提としたリフロー工程の検討は行わなかった。

4-2-2-4 光スイッチ基本ユニットのスイッチング動作試作検証

4-2-2-2 項での結論より、計画当初に提案した圧電バイモルフ素子は光スイッチの駆動機構として検討継続を断念せざるを得ないとの判断に至った。そこで代替案の検討に移り、ポリマフィルムの駆動方法を総合的に再検討した結果、新たに回転駆動方式を考案した。原理説明のためのポリマフィルム断面図を図 4-2-2-11(a)に、原理検証実験の結果を同図(b)に示す。

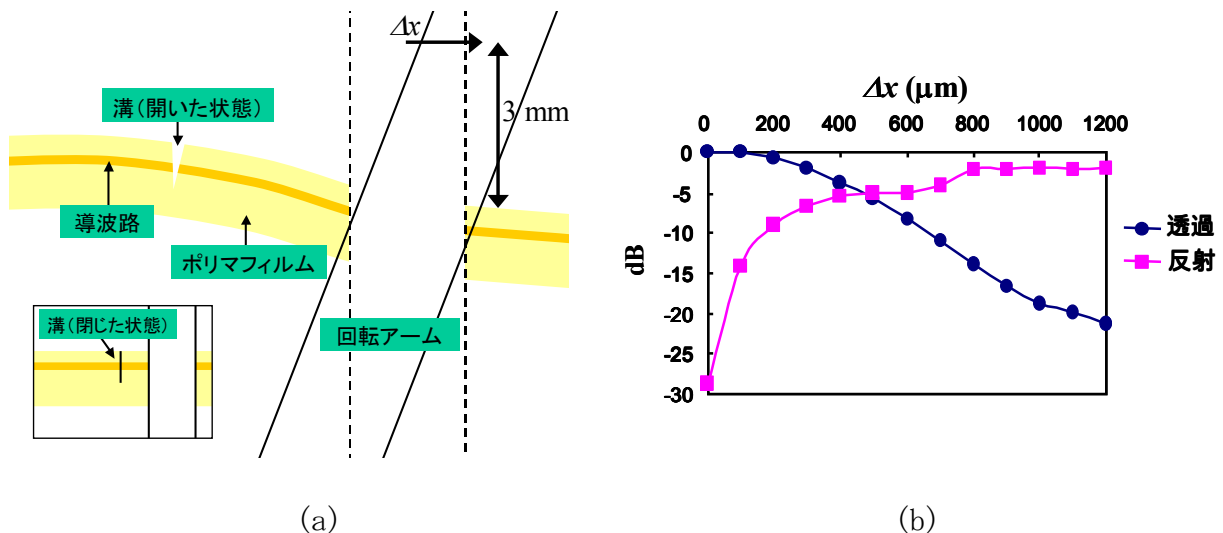


図 4-2-2-11 回転駆動方式 (a)原理断面図 (b)原理検証実験結果

(a)に示すように、ポリマフィルムに直交して挿入した回転アームを溝近傍に配置し回転力を利用して溝を開閉する。挿入図に示す溝が閉じた状態（透過状態）から回転アームを図中の矢印方向に回転させることで溝壁に回転モーメントを与えて溝を開き反射状態へと切り替える。原理検証実験として、フィルムから高さ 3 mm の位置で回転アームの水平変位量 Δx を変化させながら透過光と反射光の変化を測定したところ、同図(b)に示すようにスイッチング動作を確認することができた。この回転駆動のための機構として、安価で高

信頼な汎用部品である電気機械式リレーを回転アームに接続しリレーのスイッチングによりアームを回転させる方式を検討しており、従来方式に勝る製品競争力を生み出せる可能性がある。

4-2-3 実施計画に対する達成状況

平成18年度の開発計画に対する達成状況は下記の通りである。

【開発計画】

- (1) 半田接合のための、ポリマ導波路へのメタル形成の検証
- (2) 駆動機構である微小圧電素子の動作確認
- (3) ポリマ導波路に形成したメタルへの半田搭載技術およびリフロー工程による接合技術の検証
- (4) 光スイッチ基本ユニットのスイッチング動作試作検証

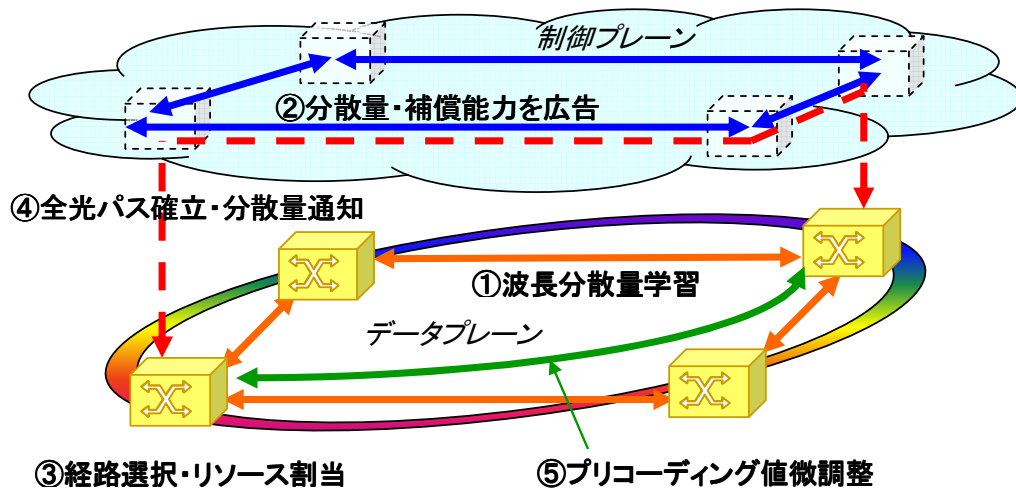
【達成状況】

- (1) ポリマ導波路上部にメタルを形成し、導波ロスには影響ないことを検証した。
達成度：100%
- (2) 微小圧電素子試作を行い、変位・力等の基本特性の動作実験および解析を行った。その結果、応力開放穴による所要駆動力低減の効果が想定より小さいことが明らかとなり、ポリマ導波路と組み合わせても所望のスイッチング動作が期待できないことが判った。
達成度：100%
- (3) ポリマ導波路に形成したメタルへの半田ボール搭載を行い良好な結果を得た。上記(2)の結論より、微小圧電素子を前提としたリフロー工程は実施しなかった。達成度：50%
- (4) 上記(2)の結論を受け、新しい駆動機構としてリレーを用いた回転駆動式光スイッチを新規考案し、スイッチングの基本動作を確認した。達成度：40%

4-3 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発

4-3-1 概要

自律適応型ネットワーク制御モジュールは GMPLS を拡張し、自律分散制御に基づき自動的に分散フリートランスポンダによる波長分散補償を最適化しつつ全光パスを動的に確立する。自律適応型ネットワーク制御モジュールにて使用する GMPLS の拡張を、GMPLS-Plus (GMPLS-Photonic layer usability support) と呼ぶ。GMPLS-Plus の概略の手順を図 4-3-1-1 に示す。



- ①設置時にオプティカルパスレンジングにてリンク波長分散量を学習 (LMP 拡張)
- ②波長分散量・分散補償能力を広告 (OSPF-TE 拡張)
- ③広告情報に基づき全光パスの経路、波長分散補償リソースの割当を選択
- ④全光パス確立時にその波長分散量を通知 (RSVP-TE 拡張)
- ⑤全光パスの端点ノード間でプリコーディング値を微調整し最適に設定

図 4-3-1-1 GMPLS-Plus の概略手順

自律適応型ネットワーク制御モジュールは、GMPLS-Plus を適用しつつ上記の 5 つのステップを実行し、分散フリートランスポンダの適用によって距離や波長分散の制約が大幅に緩和される全光パスを、オペレータやユーザの要求に基づいてトポロジーに依存せずダイナミックかつ自動的に設定可能とする。

平成 18 年度は、上記ステップ①～⑤に対応して、オプティカルパスレンジング機能の設計・実装・評価、および波長分散量・分散補償能力を広告するルーティングプロトコル拡張・経路選択アルゴリズム・全光パスを確立するシグナリングプロトコル拡張の実装設計を行うと共に、GMPLS-Plus を実証検証するためのプラットフォーム構築 (フェーズ II) を実施した。

4-3-2 オプティカルパスレンジング機能

オプティカルパスレンジング機能は隣接ノード間のリンク波長分散量を自動的に学習する機能であり、図 4-3-2-1 に示すように、測定用の光信号を送受信して波長分散量を測定するオプティカルパスレンジングカード (OPR) と、測定手順を制御するオプティカルパスレンジング制御プロトコルによって実現される。

平成 18 年度は、波長分散測定方式の検討を実施し、オプティカルパスレンジングカードのハードウェア設計、カード試作を行った。また、波長分散量測定動作を制御するオプ

ディカルパスレンジング制御プロトコルの設計を行い、評価用プラットフォーム上での基本動作を評価した。

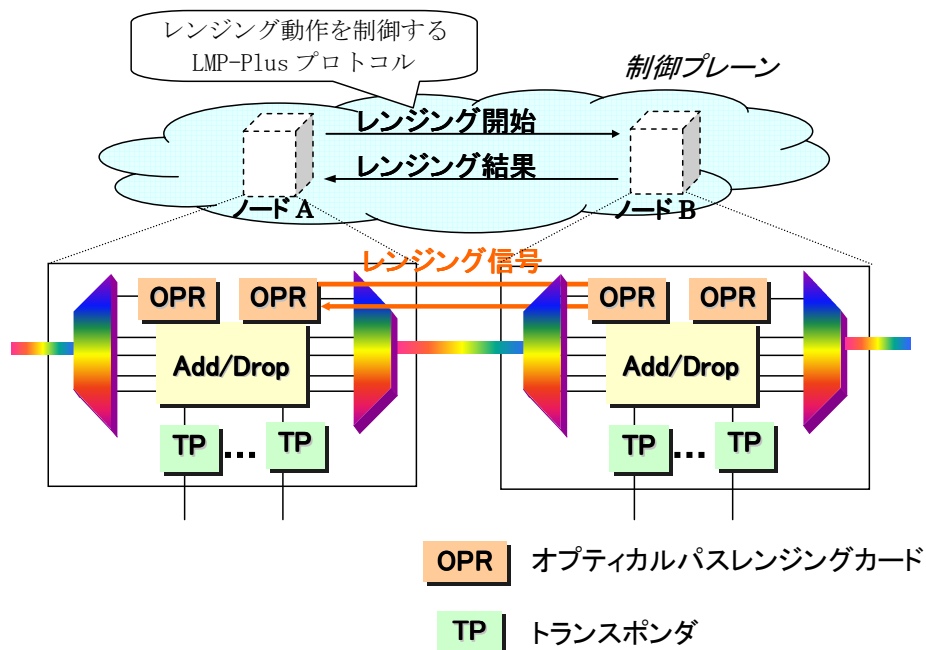


図 4-3-2-1 オプティカルパスレンジングの動作

4-3-2-1 波長分散測定方式検討とカード試作

(1) 波長分散測定方式検討

波長分散測定方式の検討を進めるに当たり、平成18年度は、波長分散測定機能を有するカードの基本検討、回路設計、タイミングシミュレーションから着手した。

オプティカルパスレンジングカードは、フレーム、光信号生成部、波長合波部、波長分波部、光電変換部、フレーム同期部、波長分散測定部より構成され、送信ノードおよび受信ノードに配置することにより伝送路の波長分散を測定することが可能になる。波長分散測定に広く使用されているフレームを使用することで、低コスト化が計れる。

フレームでは、波長 λ_1 および λ_2 用それぞれのフレームを生成する。光信号生成部では、フレームで生成された信号を光強度変調し、光信号合波部で合波する。変調信号は光ファイバ伝送路を伝播する際に、光ファイバの持つ波長分散の影響を受け、波長に依存した群遅延を生じる。受信部では、まず分波器で2つの波長を分離したあと、それぞれの光信号を光電変換部で電気信号に変換し、フレーム同期部でフレーム同期を行う。フレーム同期部で生成したフレームパルス波形を波長分散測定部に入力する。波長分散測定部では、受信したフレームパルスにより両者の信号の遅延差を測定する。もし伝送路に波長分散がなければ、両者の信号のタイミングは全く同一となるが、実際は光ファイバの持つ波長分散のために、両者のタイミングにずれが生じる。推定した群遅延時間から波長分散を求めるには次式を用いる。

$$D_\lambda = \frac{nt}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

ここで、 D は波長分散、 $\lambda \cdot$ は中心波長、 t はビット間隔、 n ($n=1, 2, 3 \dots$)はビットシフト数である。すなわち nt は群遅延時間差となる。本方式では、フレーム同期

後に FPGA 内部の PLL 回路を用いることで、測定する群遅延時間の誤差を小さくしている。

(2) 回路設計とカード試作

オプティカルパスレンジングカードを実現するための回路設計と測定誤差を評価するために行った FPGA 評価ツールによるタイミングシミュレーションの結果について説明する。今年度は、その結果に基づいてオプティカルパスレンジングカード試作を行った。

(a) 回路ブロック

オプティカルパスレンジングカードは、光信号を送受信する光送受信部、受信した信号を分岐するバッファ部、クロック再生を行う CDR 部、受信終端、および送信生成を行う受信終端/送信生成部、フレームから各種情報を受信および送信する信号制御部、波長分散の測定を行う波長分散測定部、制御 S/W からの測定開始信号を受信および測定結果を送信するバス制御部、測定に際して必要となる波長などの各種パラメータを格納する NVRAM 部より構成される。このうち、受信終端/送信生成部、信号制御部、バス制御部は FPGA を適用する。

(b) タイミングシミュレーション結果

図 4-3-2-2 に波長分散測定部のタイミングシミュレーション結果の例を示す。入力クロックを 155MHz、フレームパルスの到着時間差を 100ns としてシミュレーションを行い、群遅延時間の測定誤差が 400ps 以内、すなわち波長分散値として 20ps/nm に抑えられることを確認した。

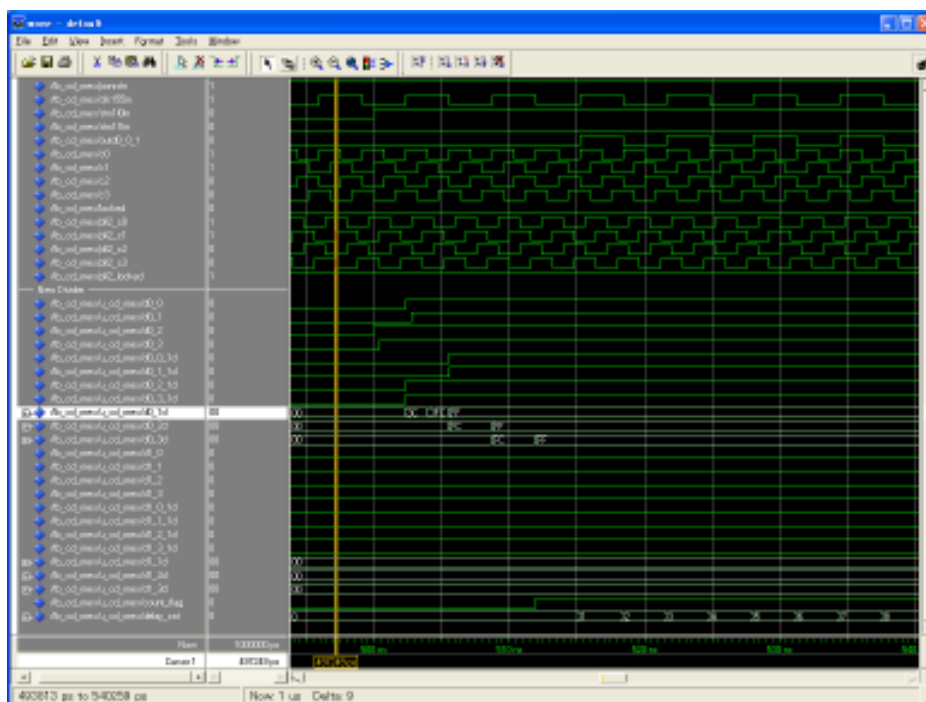


図 4-3-2-2 タイミングシミュレーション結果

4-3-2-2 オプティカルパスレンジング制御プロトコル

光リンクの波長分散量を自動的に学習するオプティカルパスレンジングの制御手順として、GMPLSにおける光リンク管理プロトコル（LMP）をベースにLMP標準との整合性や測定時の障害などからの回復手順を備えたオプティカルパスレンジング制御プロトコル（LMP-Plus）を設計した。

LMP-Plusの設計に先立ち、前提条件と要求条件を次のように整理した。これらは、既存LMP標準との整合性の保持、および実装の容易性や拡張性を考慮して抽出したものである。

【前提条件】

LMP-PlusはLMPと重複する機能は持たず、波長分散量の自動学習に適した簡潔な方式とする。

【要求条件】

(a) 対象とするリンクの特定

波長分散量の自動学習の対象となるリンクを、レンジング信号の送信ノードと受信ノードとの間で一意的に指定する。

(b) レンジング信号の送信タイミングの指定

レンジング信号の送信ノードは、測定手法やレーザ安全性の要請から、常時レンジング信号を送信するのではなく、受信ノードがレンジング信号を受信する準備が出来ている時のみ送信するものとし、そのタイミングはオプティカルパスレンジング制御プロトコルによって指定する。

(c) レンジング信号の受信タイミングの指定

レンジング信号の受信ノードは、測定手法や測定動作の安定性の要請から、常時レンジング信号を受信しようとするのではなく、送信ノードがレンジング信号を送信する時のみ信号を待ち受けるものとし、そのタイミングはオプティカルパスレンジング制御プロトコルによって指定する。

(d) 測定結果（成功、失敗）や測定中断の通知

光ファイバの誤接続やレンジング信号送受信デバイスの故障などによって測定が失敗することがあり得るため、測定結果の成功と失敗を切り分け、受信ノードから送信ノードへ通知する手順を設ける。また送信ノードや受信ノードが測定動作を中断する手順も設ける。

(e) プロトコルの耐障害性、安定性

オプティカルパスレンジング制御プロトコルは、メッセージの紛失や手順の不完了から回復し、安定した運用を可能とする。

(f) 測定した波長分散量の交換

波長分散量は片方向毎に測定するので、リンクを構成する光ファイバ対に対してはリンク両端のノードがそれぞれ波長分散量の片方向の測定値を得ることになる。そこで片方向毎の測定値の整合性確認のため、リンク両端のノードは波長分散量の測定値を相互に通知する。

(g) オプティカルパスレンジングの実行可否の折衝

LMPからの上位互換性を確保しLMP-Plus非サポート機器との共存を可能とするため、LMPの初期折衝手順においてオプティカルパスレンジングの実行可否の折衝を可能とし、リン

ク両端のノードがオプティカルパスレンジングを実行可能な場合のみこれを実行するものとする。

(h) 設定済み光パスへの干渉防止

設定済み光パスに対してオプティカルパスレンジングが実行されデータ中継へ悪影響を及ぼすことを防止する。

上記の前提条件、要求条件に基づき、オプティカルパスレンジング制御プロトコル LMP-Plus を設計した。表 4-3-2-2 に波長分散量の測定を制御するため LMP-Plus において新たに追加したメッセージの例を、図 4-3-2-4 に波長分散量の測定シーケンス例を示す。本図において、オプティカルパスレンジングを実行する 2 つのノード、ノード A とノード B は、まず LMP の制御チャネル管理手順に従って制御チャネルを確立し、次にオプティカルパスレンジングを実行する。オプティカルパスレンジングの実行フェーズでは、制御チャネル上での LMP-Plus メッセージのやり取りに応じて、光ファイバ上でレンジング信号（図中では RangingSignal）が送受信され、受信側における測定結果が送信側へ通知される。

表 4-3-2-2 LMP-Plus の波長分散量測定制御メッセージの例

番号	メッセージ名	機能
1	Ranging	レンジング開始を通知する
2	RangingAck	レンジング開始へ肯定応答する
3	RangingSuccess	レンジング結果を通知する
4	RangingSuccessAck	レンジング結果通知へ肯定応答する

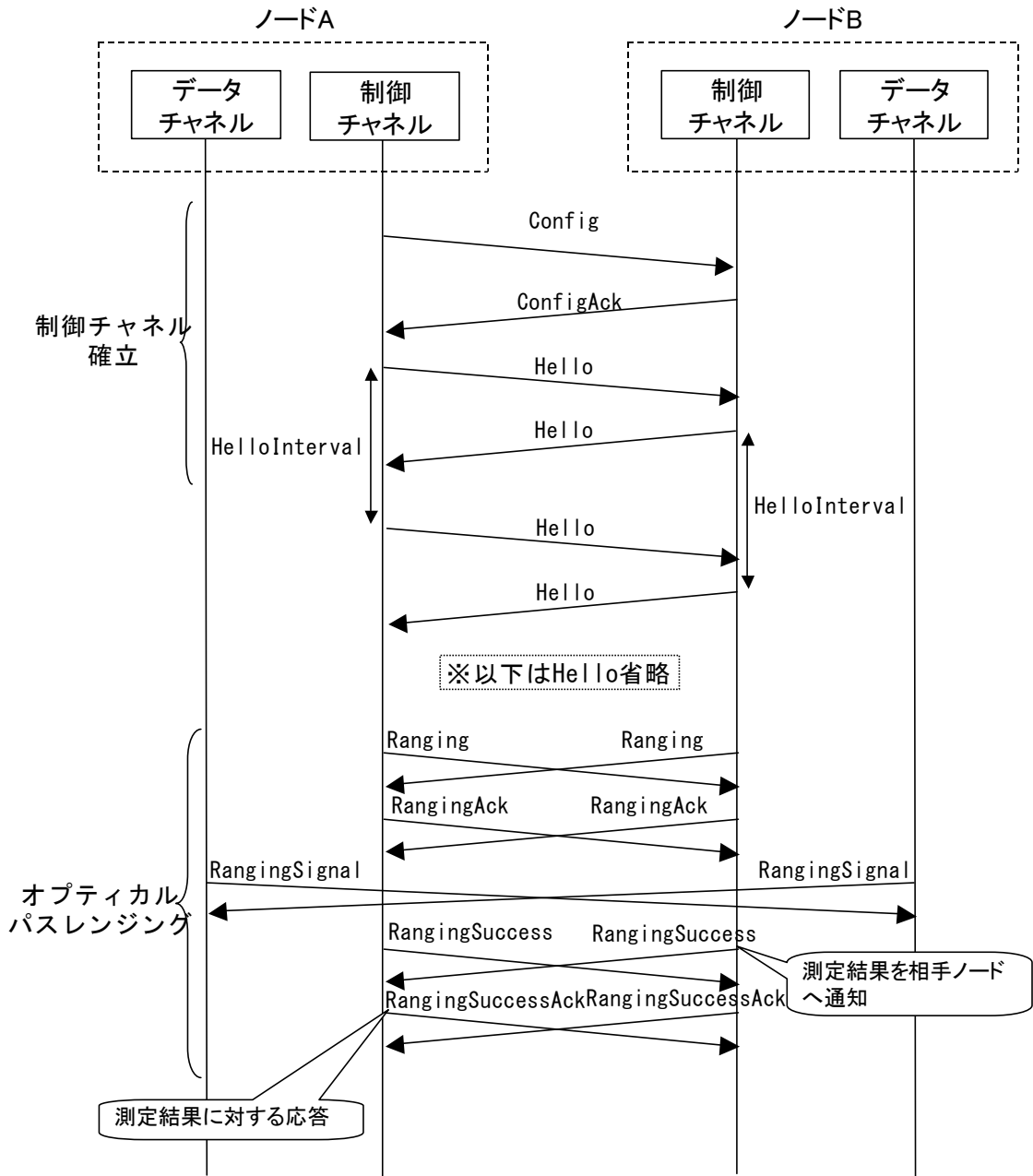


図 4-3-2-4 波長分散量の測定シーケンス例

ここに述べたオプティカルパスレンジング制御プロトコル、LMP-Plus の基本部分を評価用プラットフォーム上に実装し、ノード間の光リンク（ポイントツーポイント）の波長分散量測定動作を評価した。

4-3-3 分散フリー全光パス最適設定機能

分散フリートランスポンダを適用する全光パスに対し経路上の総波長分散量が適切な範囲に収まる経路を選択するアルゴリズムを設計すべく、分散フリー全光パスの経路選択アルゴリズムの特性評価を行った。また GMPLS-Plus プロトコルのスケーラビリティを評価し、これらを反映して GMPLS-Plus の実装設計を実施した。

4-3-3-1 分散フリー全光パス選択アルゴリズム

与えられた始点ノード装置・終点ノード装置を結び波長分散量が補償可能範囲にある全光パスの経路を選択する経路選択アルゴリズムを検討した。次のようなアルゴリズム候補の特性を評価した。

(a) 最短経路アルゴリズム (MinLength)

リンク長 L_i に対し経路長 $\sum L_i$ が最小となる経路を選択

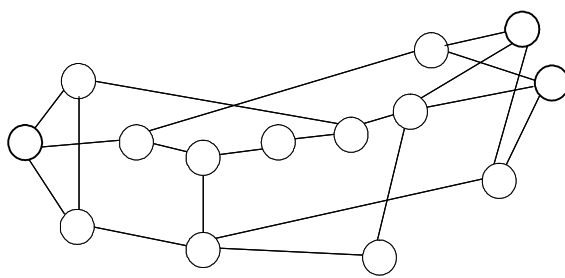
(b) 最小分散量アルゴリズム (MinDispersion)

リンク分散量 D_i に対し総波長分散量 $\sum D_i$ が最小となる経路を選択

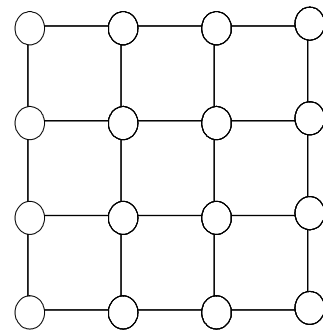
(c) ハイブリッド・アルゴリズム

(a)と(b)の折衷であり、経路コスト $\alpha \sum L_i + (1 - \alpha) \sum D_i$ が最小となる経路を選択 ($0 < \alpha < 1$)

図 4-3-3-1 にシミュレーションに用いたネットワークのトポロジーを、表 4-3-3-1 にシミュレーション条件を示す。ネットワークのトポロジーとして NSF ネットワークと格子ネットワークの 2 種類を用い、ノード間のリンクは全て同一多重度で複数の波長を収容するものとした。入力トラヒックはポアソン分布にて到着する指数分布保留時間の光パス設定要求によって模擬し、光パスの経路となる各リンクでは同一波長を割当て、光パスの確立が成功すると保留時間の間波長が占有されるとした。波長分散量がアルゴリズムへ与える影響を評価するため、リンクの一定の割合 (0/3, 1/3, 2/3) を、通常用いられるファイバ SMF (Single Mode Fiber) でなく波長分散量の小さいファイバ NZF (Non-Zero dispersion shifted Fiber) とした。



(a) NSF ネットワーク



(b) 格子ネットワーク

図 4-3-3-1 シミュレーションに用いたネットワークトポロジー

表 4-3-3-1 シミュレーション条件

パラメータ	値	備考
ノード数	NSF:14、格子:16	
リンク数	NSF:21、格子:24	
リンク長	リンクによらず同一	経路長をホップ数で代替
リンク波長分散量	SMF: 750, NZF: 250	単位:ps/nm
NZF リンクの割合	0/3, 1/3, 2/3	ランダムに配置 (200 通り)
波長多重数	4~20	各リンク同一
パス設定要求	20 アーラン (ポアソン到着、指数分布保留時間)	送信元ノード、宛先ノードはランダムに選択

図 4-3-3-2 に最短経路アルゴリズム (MinLength) および最小分散量アルゴリズム (MinDispersion) によって導出された経路の平均パス波長分散量を、図 4-3-3-3 に同じく平均ホップ数を示す。図のキャプションにおいて、NSF 0、NSF 1、NSF 2 は NSF ネットワークトポロジーにて NZF ファイバの割合が 0/3, 1/3, 2/3 それぞれの場合を示し、lattice 0、lattice 1、lattice 2 は格子ネットワークトポロジーにて NZF ファイバの割合が 0/3, 1/3, 2/3 それぞれの場合を示している。

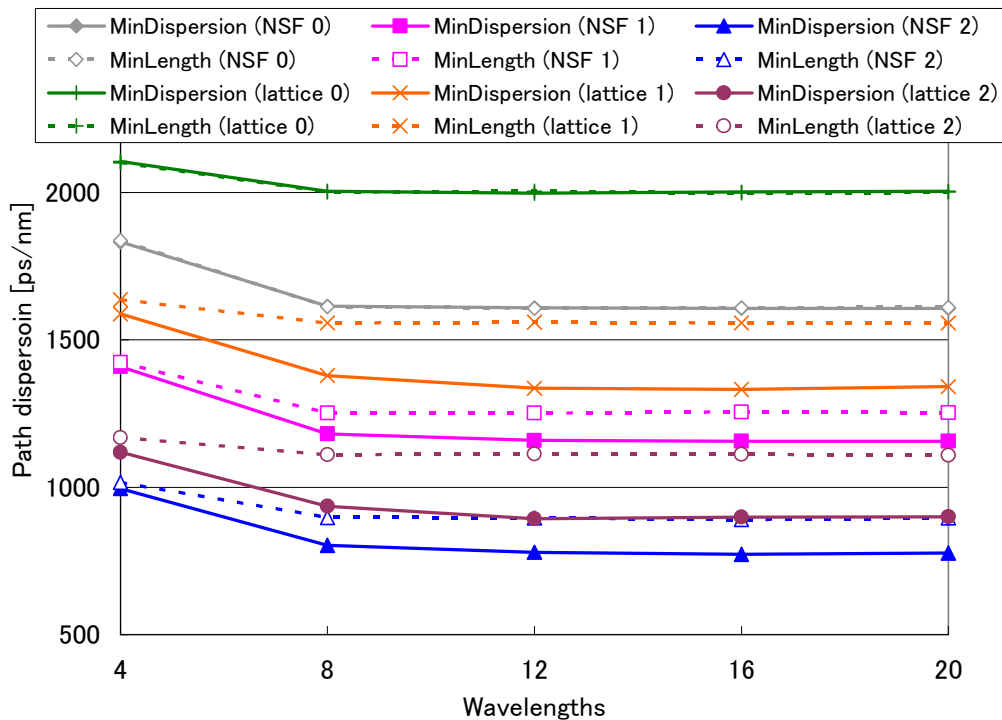


図 4-3-3-2 各アルゴリズムによる経路の平均パス分散量

図 4-3-3-2 より、NSF ネットワーク・格子ネットワークとも、全てのリンクが SMF ファイバの場合最短経路アルゴリズムと最小分散量アルゴリズムでパス波長分散量に差は無いが、NZF ファイバの割合が増えると最小分散量アルゴリズムは最短経路アルゴリズムに比べパス波長分散量の小さい経路を選択することが分かる。ただし波長数が 4 の場合は、最短経路アルゴリズム・最小分散量アルゴリズムともパス波長分散量が大きくなり両者の差が小さくなっているが、これは波長数が少ないため遠回りの経路を選択せざるを得ないケースが多くなることに起因すると考えられる。

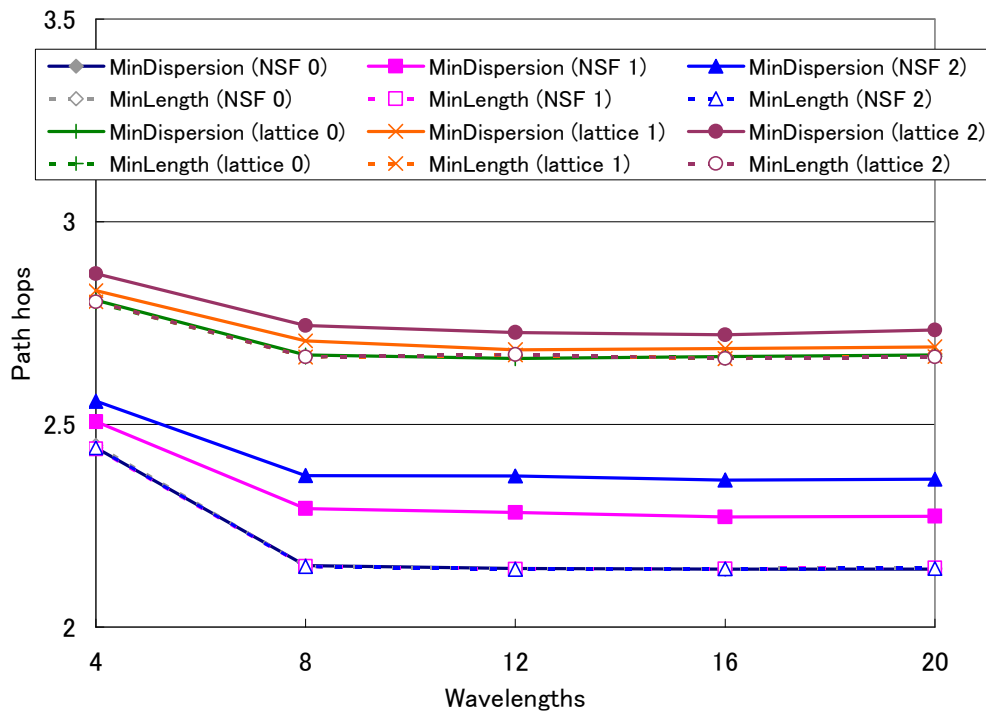


図 4-3-3-3 各アルゴリズムによる経路の平均ホップ数

次に図 4-3-3-3 においては、NSF ネットワーク・格子ネットワークとも、全てのリンクが SMF ファイバの場合最短経路アルゴリズムと最小分散量アルゴリズムでパスのホップ数に差は無いが、NZF ファイバの割合が増えると最小分散量アルゴリズムは最短経路アルゴリズムに比べパスのホップ数の多い経路を選択することが分かる。これは遠回りになって波長分散量の小さいリンクを経路に含めるためと考えられ、その程度は NZF ファイバの割合が大きい方が大きくなっている。なお格子ネットワークに比べ NSF ネットワークの方が最短経路アルゴリズムと最小分散量アルゴリズムによる光パスのホップ数の差が大きいのは、両者のトポロジーの差異に起因すると考えられる。

最後に、ハイブリッド・アルゴリズムのシミュレーション評価について述べる。図 4-3-3-4 に、NSF ネットワークの NZF ファイバの割合が 1/3 の場合（図中 NSF 1）および 2/3 の場合（図中 NSF 2）において、ハイブリッド・アルゴリズムのコスト $\alpha \sum Li + (1 - \alpha) \sum Di$ （ここで $0 < \alpha < 1$ ）に含まれる重み付け係数 α を 0 から 1 まで 0.25 刻みで変化させた時に選択された経路の平均パス分散量を示す。 $\alpha=0$ が最小分散量アルゴリズム、 $\alpha=1$ が最短経路アルゴリズムに対応しており、ハイブリッド・アルゴリズムによって得られる経路の平均パス分散量はその間に位置するが、 α の値との関係は線型でなく最小分散量アルゴリズムが反映される割合が大きいことが分かる。これは本シミュレーションでは、最短経路アルゴリズムの経路コストを構成するリンク長が均一であるため、経路コストにリンクのファイバ種別が SMF か NZF で差をつける最小分散量アルゴリズムの影響が反映されやすいためと考えられる。

以上のシミュレーション評価により、全光ネットワークの動的パス設定において、最小分散量アルゴリズムは最短経路アルゴリズムよりも一貫してパス波長分散量の小さな経路を選択することが示された。またこれら 2 つのアルゴリズムの折衷であるハイブリッド・アルゴリズムは両者の中間的な性質を示すが、重み付け係数 α と平均パス分散量の関係は必ずしも線型でないことが明らかになった。

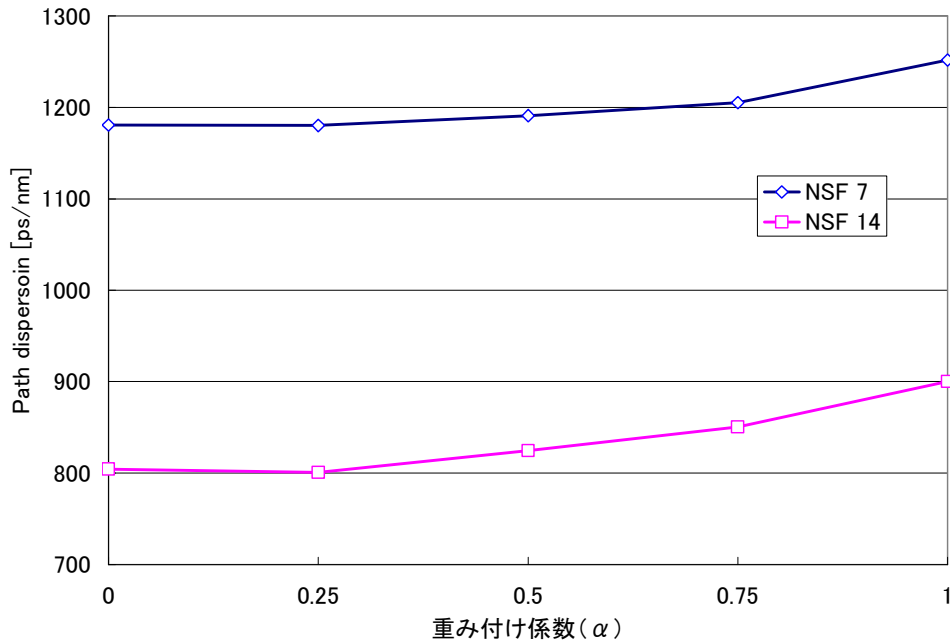


図 4-3-3-4 ハイブリッド・アルゴリズムによる経路の平均パス分散量

4-3-3-2 プロトコル実装設計

(1) ルーティングプロトコル OSPF-Plus

分散情報を搭載するための GMPLS ルーティングプロトコルの拡張方法を検討し、分散情報の搭載によって増大する広告量が制御プレーンのトラヒックに与える影響を、シミュレーションを用いて評価した。

さらに既存 GMPLS との整合性・将来的な拡張性・効率性・実装の容易性などを考慮し、次の機能を持つ GMPLS 拡張ルーティングプロトコル OSPF-Plus を設計した。

- リンクの波長分散量の広告
- 同一の波長分散量を持つリンクの集約による広告情報の削減
- 分散フリートランスポンダの利用状況を反映したノード装置の分散補償能力の広告

(2) シグナリングプロトコル RSVP-Plus

全光パス確立に際しての分散フリートランスポンダへの分散補償に関する設定には、光パス確立時に上記の経路選択アルゴリズムにて選択した経路のリンク分散量の総計をプリセットする初期設定手順と、全光パスを経由して分散フリートランスポンダ間でデータ信号を送受信し設定を最適化する補正（最適化）手順とがある。それぞれの手順に必要な分散補償情報を効率的かつ確実に伝達できるよう、GMPLS シグナリングの拡張方法を検討し、GMPLS 拡張シグナリングプロトコル RSVP-Plus を設計した。

(a) 初期設定手順

GMPLS のシグナリングプロトコル RSVP-TE にてパス設定に用いられる PATH メッセージおよび RESV メッセージに、プリセット用分散補償情報を追加する拡張方法を検討した。これらのメッセージにより分散補償情報を運ぶため、分散補償情報を格納するメッセージオブジェクトを追加した。

(b) 補正手順

GMPLS のシグナリングプロトコル RSVP-TE の REFRESH 手順を用いて、分散フリートランスポンダ間でのデータ信号送受信の通知および補正用分散補償情報の伝達を行う拡張方法

を検討した。REFRESH 手順のシグナリングはパス設定時と同じく PATH メッセージおよび RESV メッセージを用いるため、初期設定手順と同様のメッセージオブジェクトを用いて補正用分散補償情報を伝達するものとした。

以上を踏まえ、GMPLS プロトコル拡張と経路選択アルゴリズムのプラットフォームへの実装設計を行った。

4-3-4 プラットフォーム構築

自律適応型ネットワーク制御モジュールを評価するための評価用 S/W プラットフォームの構築について、昨年度実施したプラットフォーム構築（フェーズⅠ）に引き続いて、プラットフォーム構築（フェーズⅡ）を実施した。評価用 S/W プラットフォームの機能構成を図 4-3-4-1 に示し、フェーズⅡで実現した機能について記述する。

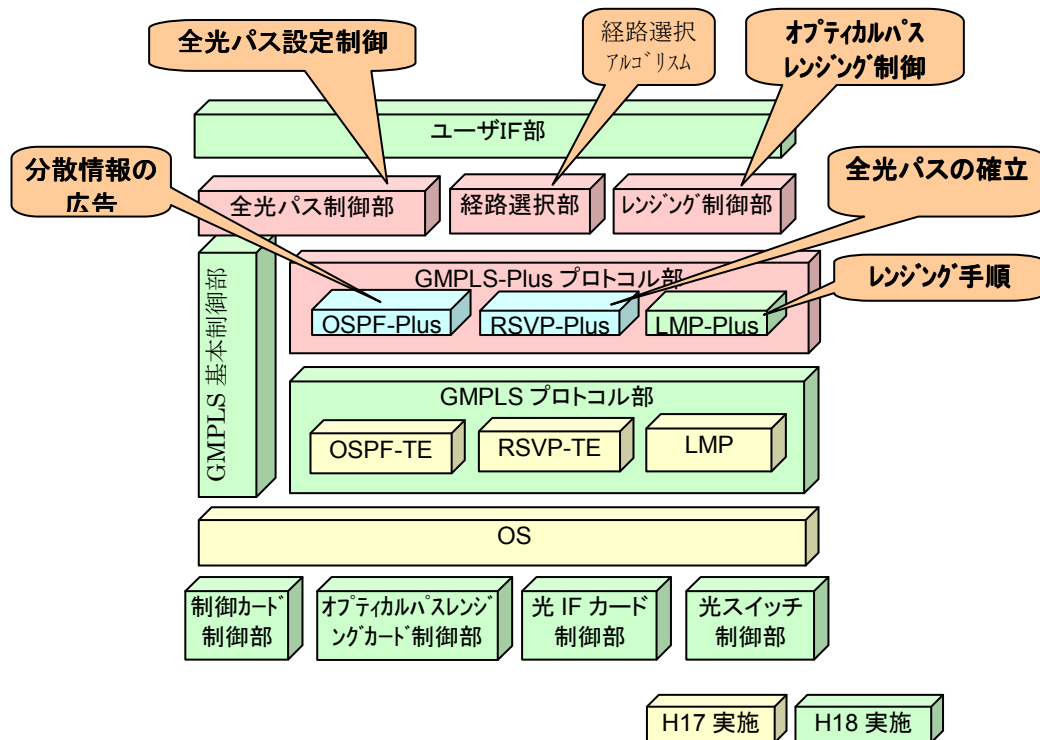


図 4-3-4-1 評価用 S/W プラットフォームの機能構成

(1) ユーザ IF 部

自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載したノードを使用するユーザが、提供される各機能を制御・管理するための手段として、ローカルコンソール機能とリモートコンソール機能を実現した。

- ・ ローカルコンソール機能

制御カードに搭載されているシリアルインタフェースを用いて、IP アドレス等の装置を立ち上げるための初期設定やデバックを行うためのインタフェース。

- ・ リモートコンソール機能

制御カードに搭載されているイーサネットインタフェースを用いて、リモートから装置へアクセスするためのインタフェース。

また、ユーザインタフェースとして、コマンドラインインタフェース（CLI）を提供し、telnet によるリモートからのアクセスを実現した。

(2) LMP-Plus

オプティカルパスレンジング制御プロトコル（LMP-Plus）として、波長分散量測定手順（レンジング手順）を実現した。

(3) GMPLS プロトコル部

GMPLS プロトコル部は、GMPLS の基本プロトコルであるリンク管理プロトコル（LMP）、シグナリングプロトコル（RSVP-TE）、ルーティングプロトコル（OSPF-TE）から構成される。

昨年度、リアルタイム OS 上での GMPLS プロトコルの基本動作を確認しているため、平成 18 年度は、各ノードが、制御プレーンを介して GMPLS 通信を行うための GRE (GRE: General Routing Encapsulation) トンネル機能を実現した。

GRE トンネル機能は、IP ネットワーク上でカプセリングを実現するためのものであり、図 4-3-4-2 に GRE のパケットフォーマットを示す。制御プレーン上では、LMP、RSVP-TE、OSPF-TE のデータはペイロード部分に格納され、GRE パケットの配送ヘッダ(delivery header)内の IP アドレス (配送アドレス) によりルーティングされる。その結果、ルータで構成される制御ネットワークにおいても、自律適応型ネットワーク制御モジュールを搭載した各ノードは、隣接するノードとして GMPLS 通信が実現される。

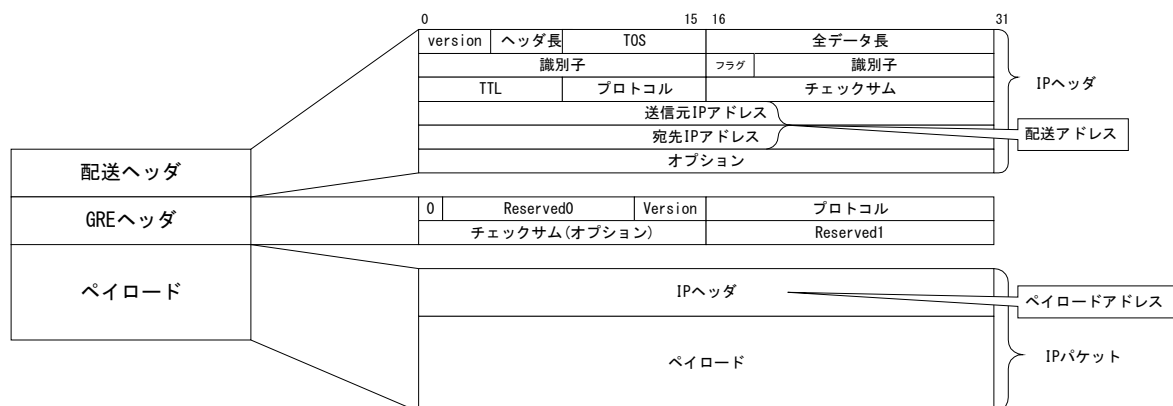


図 4-3-4-2 GRE パケットフォーマット

(4) GMPLS 基本制御部

GMPLS プロトコル部の各種制御を行うため、下記の機能を実現した。

- LMP パラメータ管理機能
- RSVP-TE パラメータ管理機能
- OSPF-TE パラメータ管理機能
- GMPLS 通信管理機能

(5) 制御カード制御部

ユーザ IF 部が使用するシリアルインタフェースやイーサネットインタフェース、および GMPLS プロトコル部が使用するイーサネットインタフェースの制御機能を実現した。

(6) オプティカルパスレンジングカード制御部

オプティカルパスレンジングカード (OPR) の制御機能として下記の機能を実現した。

- レンジング信号の送受信機能
- 波長分散量の読み出し機能

(7) 光 IF カード制御部

ノード間を接続する光ファイバを収容するための光インタフェース (IF) カードの制御機能として、光パワーモニタ機能を実現した。

(8) 光スイッチ制御部

1枚のオプティカルパスレンジングカードを用いて、自ノードが収容する複数の光ファイバの波長分散量を測定するため、光スイッチによる方路切替機能が必要となるため、光スイッチ制御機能を実現した。

また、上記各機能を、評価用 H/W プラットフォーム上で動作させ、機能および性能の評価を行った。

4-3-5 実施計画に対する達成の状況

上記より、平成18年度での実施計画に対する達成状況は下記のとおりである。

【実施計画】

(1) オプティカルパスレンジング機能の試作・評価

波長分散測定方式の検討、およびオプティカルパスレンジングカードの試作。オプティカルパスレンジング制御プロトコルの設計と評価用プラットフォーム上での動作評価。

(2) 分散フリー全光パス最適設定機能

GMPLS-Plus の実装設計。

(3) プラットフォーム構築（フェーズⅡ）

GMPLS 基本機能を動作させるための詳細設計・製造・評価。

【達成状況】

(1) オプティカルパスレンジング機能

波長分散測定方式の検討を実施し、オプティカルパスレンジングカードの試作を行った。また、オプティカルパスレンジング制御プロトコルの設計、評価用プラットフォーム上での動作評価を実施した。達成度：100%

(2) 分散フリー全光パス最適設定機能

スケラビリティや経路選択アルゴリズムの特性評価を反映した GMPLS-Plus の実装設計を実施した。達成度：100%

(3) プラットフォーム構築

評価用プラットフォーム上で GMPLS-Plus を動作させるための基本機能を動作させ、機能・性能を評価した。達成度：100%

4-4 システム実証・評価の研究開発

4-4-1 分散フリートランスポンダ

光送受信器の特性を考慮したプリコーディング回路の方式検討を行うために、各種伝搬路に対応するパラメータ推定の機能検証、パラメータの誤差解析、光変調器の動作点変動などを繰り返すことが可能なシミュレータ環境を構築した。図 4-4-1-1 にシミュレータの概略構成ブロック図を示す。各機能ブロックはモジュール化され複数変調フォーマットへの対応、量子化機能の実装などが実現可能であり、光送受信器の構成要素変化に対応して柔軟なシミュレーションを行うことができる。

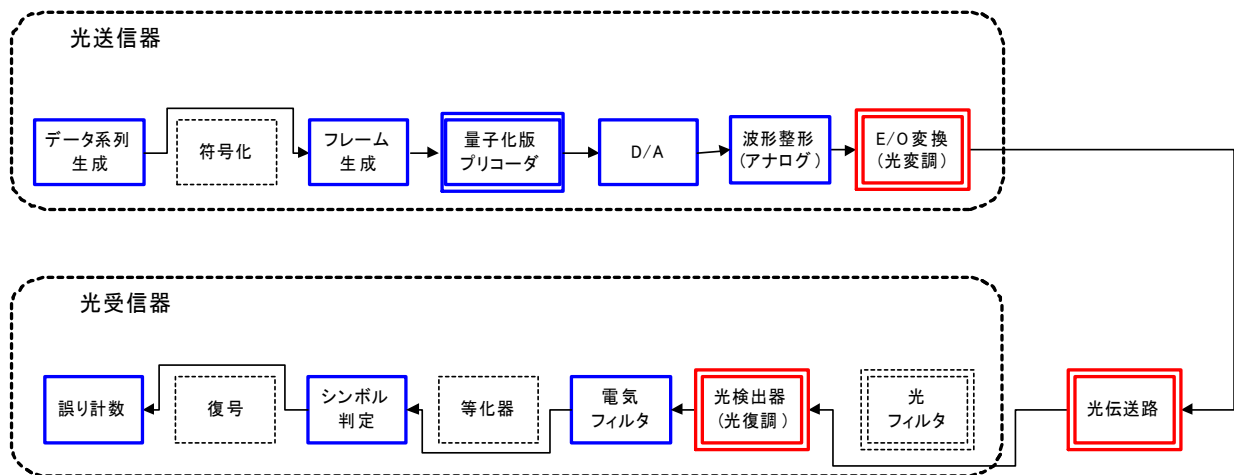


図 4-4-1-1 統合環境シミュレータの概略構成

4-4-2 自律適応型ネットワーク制御モジュール

自律適応型ネットワーク制御モジュールのシミュレーション環境として、PC (Linux) 上に GMPLS 基本プロトコルを搭載し、評価用プラットフォームとの連携動作確認を行った。

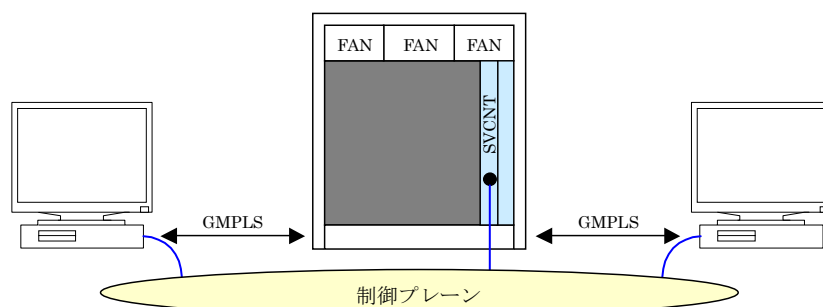


図 4-4-2-1 自律適応型ネットワーク制御モジュールのシミュレーション環境イメージ

4-4-3 実施計画に対する達成の状況

【実施計画】

分散フリートランスポンダ、および自律適応型ネットワーク制御モジュールのシミュレーション環境構築

【達成状況】

分散フリートランスポンダ、および自律適応型ネットワークモジュールのシミュレーション環境を構築した。達成度：100%

4-5 総括

(ア) 分散フリートランスポンダの研究開発

平成18年度には、次年度以降のLSI論理設計および中間評価時のエミュレーション実証に向けて、プリコーディング回路方式設計、統合環境シミュレータ開発、トランスポンダ基本機能部試作を実施した。プリコーディング回路方式設計においては、FIRフィルタをベースとした演算部構成により10Gb/s 2,000km伝送対応のプリコーディング回路方式設計・検証を行った。また、統合環境シミュレータ開発においては、光送受信器の機能およびプリコーディング部演算機能を盛り込むことで、現実の光送受信器の構成に即した設計が可能となる柔軟性に富んだシミュレータを実現した。さらに、トランスポンダ基本機能部試作によって各種要求性能に対する検討が可能となった。

(イ) MEMS 駆動光スイッチの研究開発

提案するMEMS駆動光スイッチの駆動機構として、まず圧電バイモルフ素子を用いた構成を検討した。駆動機構である微小圧電素子をポリマ導波路上の各切り替えポイントに配置するための半田形成の検討を行った結果、ポリマ導波路上の所望の微小メタルパッド上に良好な半田を形成でき、微小圧電素子を接合するに十分な結果を得た。また、微小圧電素子を試作しその基本特性を確認した。以上の結果に関しては当初の計画通りであったものの、微小圧電素子による駆動に関して3次元構造解析を用いて詳細な検討を行ったところ、応力開放穴による所要駆動力低減の工夫を施しても光スイッチング動作に必要な力が想定値を超えて大きく、微小圧電素子の駆動力が不足することが明らかになった。そこで、駆動機構の抜本的な見直しに着手し、切り替えポイントの動作を総合的に見直し、光スイッチ動作に必要な駆動力が得られる可能性の高い駆動方式の代替案を見出した。駆動機構の動力として汎用品の電気機械式リレーを用いて回転駆動する方式であり、当初想定していた微小圧電素子駆動機構よりも低コスト、高信頼化を達成できる可能性があり、その基本的な動作を確認した。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発

自律適応型ネットワーク制御モジュールは自律分散制御に基づき、自動的に分散フリートランスポンダによる波長分散補償を最適化しつつ全光パスを動的に確立する機能を実現するもので、GMPLSの拡張プロトコルGMPLS-Plusを使用する。

自律適応型ネットワーク制御モジュールは、GMPLS-Plusを適用して以下の5つのステップを実行し、分散フリートランスポンダの適用によって距離や波長分散の制約が大幅に緩和される全光パスを、オペレータやユーザの要求に基づいてトポロジーに依存せずダイナミックかつ自動的に設定可能とする。

- ①設置時にオプティカルパスレンジングにてリンク波長分散量を学習 (LMP 拡張)
- ②波長分散量・分散補償能力を広告 (OSPF-TE 拡張)
- ③広告情報に基づき全光パスの経路、波長分散補償リソースの割当を選択
- ④全光パス確立時にその波長分散量を通知 (RSVP-TE 拡張)
- ⑤全光パスの端点ノード間でプリコーディング値を微調整し最適に設定

平成18年度は、上記のステップのうち①～④に対応した機能試作や実装設計を行うと共に、GMPLS-Plusを実証・検証するためのプラットフォーム構築(フェーズII)を実施し

た。波長分散量を自動的に測定するオプティカルパスレンジング機能について、測定用の光信号を用いた低コストかつ要求精度を満たす波長分散測定方式の検討、およびオプティカルパスレンジングを制御し波長分散量を自動的に学習する制御プロトコル LMP-Plus 設計を行った。また、本基本コンセプトである GMPLS-Plus の実装設計、および実証検証するためのプラットフォーム構築（フェーズⅡ）を実施し、GMPLS-Plus を動作させるための基本機能（LMP、OSPF-TE、RSVP-TE）を動作させるとともに、評価用プラットフォーム上に LMP-Plus を実装し、機能評価を行った。

（エ）システム実証・評価の研究開発

平成18年度は、分散フリートランスポンダ、および自律適応型ネットワーク制御モジュールのシミュレーション環境を構築した。次年度は、これらのシミュレーション環境と、評価用プラットフォームを連携させ、適応制御光トランスポートネットワークが実現できることを、計算機をベースとするエミュレーション環境にて実証する予定である。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

- [1] 妹尾尚一郎, 馬場義昌, 水落隆司, 杉原隆嗣, 本島邦明, 井手口哲夫, Dynamic Compensation Control by GMPLS-Plus, OECC 2006, 2006年7月
- [2] 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, 三谷 俊輔, 電氣的プリ分散補償を用いた光伝送における変調方式依存性のシミュレーション検討, 電子情報通信学会, 光通信システム研究会, 2006年5月
- [3] 水落隆司, 光通信システムにおける分散補償- 光学的手法と電氣的手法-, 微小光学研究会, 2006年7月
- [4] 杉原隆嗣, プリディストーション技術の現状と今後, 電子情報通信学会, 光通信システム研究会, 2006年6月
- [5] 水落隆司, 超高速フォトニックネットワークに向けた誤り訂正と電氣信号処理技術, 第2回超高速フォトニクスシンポジウム, 2006年7月
- [6] 妹尾尚一郎, GMPLS-Plus - Extensions of GMPLS for Dynamic Optical Networking, IEICE PN/ OECC 2006 Joint Workshop, 2006年7月
- [7] 小西良明, 杉原隆嗣, 久保博嗣, 水落隆司, 光通信用分散補償プリコードにおけるメモリ構成方法の検討, 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, 2006年9月
- [8] 久保博嗣, 持田伸一, 元吉克幸, 水落隆司, 渋谷昭宏, Intersymbol Interference Compensation Scheme in Collaboration with Transmit Pre-coding and Adaptive Equalization, 国際会議 ISITA2006, 2006年10月
- [9] 杉原隆嗣, 久保博嗣, 水落隆司, 清水 克宏, A Study on Residual Distortion Equalization in Combination with Pre-distortion and Post-equalization, OFC/NFOEC2007, 2007年3月
- [10] 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, 電氣的プリディストーション技術を用いた光送信器性能に関する検討, レーザ学会第27回年次大会, 2007年1月
- [11] 水落隆司, 杉原隆嗣, 久保博嗣, 清水 克宏, 電氣的プリ・ポスト分散補償における復調方式依存性に関する検討, 電子情報通信学会, 2007年総合大会, 2007年3月
- [12] 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, 電氣的プリ・ポスト分散補償における光変調精度の影響, 電子情報通信学会, 2007年総合大会, 2007年3月
- [13] 上杉 利次, 財前 志保, 杉立 厚志, 八田 竜夫, ポリマ導波路光スイッチの回転駆動機構の検討, 電子情報通信学会, 2007年総合大会, 2007年3月
- [14] 久保 博嗣, 渋谷 昭宏, 広帯域通信システムのための適応等化技術に関する検討, 電子情報通信学会, ワイドバンドシステム研究会, 2007年3月
- [15] 久保博嗣, 元吉克幸, 杉原隆嗣, 水落隆司, 渋谷 昭宏, Intersymbol Interference Compensation in Collaboration with Pre-coding and Adaptive Equalization for Optical Communications, IEICE Trans. on EA, 2007年11月予定
- [16] 杉原隆嗣, 水落隆司, 久保博嗣, 清水 克宏, Proposal for Coordinate Transformed Electronic Pre-compensator and Investigation of its Robustness to Bias Error, OECC/I00C2007, 2007年7月予定
- [17] 上杉利次, 財前志保, 杉立厚志, 八田竜夫, Polymeric Waveguide Optical Switch Using Rotary Drive Mechanism, OECC/I00C2007, 2007年7月予定
- [18] 妹尾尚一郎, 馬場義昌, 水落隆司, 杉原隆嗣, 本島邦明, 井手口哲夫, A Study on Optimized Assignment of Dispersion Compensation Capability for Dynamic Optical Paths, OECC/I00C2007, 2007年7月予定

参考文献

- [1] N. Kataoka, et al., "Field Trial of 640Gbit/s-Throughput, Granularity-Flexible, 3-node Optical Network using Packet-Selective ROADM Prototypes," ECOC2006, Tu4.6.4, 2006.
- [2] S. Tibuleac, et al., "Field Trial of Metro DWDM System with ROADMs Based on 5x1 and 5x5 Wavelength-Selective Switches," ECOC2006, We3.P.140, 2006.
- [3] K. Grobe, "Applications of ROADMs and Control Planes in Metro and Regional Networks," OFC/NFOEC2007, NTuC1, 2007.
- [4] S. Melle, et al., "Network Planning and Architecture Analysis of Wavelength Blocking in Optical and Digital ROADM Networks," OFC/NFOEC2007, NTuC2, 2007.
- [5] D. Rader, "Telcordia OSS Support Enhancements for Multi-Degree ROADM," OFC/NFOEC2007, NWB1, 2007.
- [6] R. Bernhey, et al., "ROADM Deployment, Challenges and Applications," OFC/NFOEC2007, NWD1, 2007.
- [7] W. Imajuku, et al., "Multi-Area MPLS/GMPLS Interoperability Trial over 14-Vendor Packet/TDM/ROADM/OXC Network," OFC/NFOEC2007, OThQ2, 2007.
- [8] G. Goeger, "Modulation Format with Enhanced SPM-Robustness for Electronically Pre-Distorted Transmission," ECOC2006, Tu4.2.6, 2006.
- [9] C. Weber, et al., "Electronic Precompensation of Intra-Channel Nonlinearities at 40 Gbit/s," ECOC2006, We1.5.4, 2006.
- [10] C. Xie, et al., "Intra-Channel Nonlinearity Compensation in 40-Gb/s Systems by Combining Electronic Pre-Distortion and Optical Dispersion Compensation," ECOC2006, We3.P.82, 2006.
- [11] Y. Mauro, et al., "Impact of Modulation Format on the Performance of Fiber Optic Communication Systems with Transmitter-Based Electronic Dispersion Compensation," OFC/NFOEC2007, JWA44, 2007.
- [12] M. Birk, et al., "WDM technical trial with complete electronic dispersion compensation," ECOC2006, Th2.5.6, 2006.
- [13] Y. Benlachtar, et al., "Robust Long-Haul Transmission Utilizing Electronic Precompensation and MLSE Equalization," OFC/NFOEC2007, JWA52, 2007.
- [14] R. I. Killey, et al., "Electronic Dispersion Compensation by Signal Predistortion Using Digital Processing and a Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 17, no. 3, pp. 714-716, 2005.
- [15] P. J. Winzer, et al., "Electronic pre-distortion for advanced modulation formats," ECOC2005, Tu4.2.2, 2005.
- [16] H. Yang, et al., "Comparison of Practical Implementation Limitations for Different Electronic Pre-Distortion Transmitter Structures," ECOC2006, We1.5.2, 2006.
- [17] L. Eldada, et al., "Intelligent Optical Cross-Connect Subsystem on a Chip," OFC'05, NTuL2(2005).
- [18] V.A. Aksyuk, et al., "238 x 238 micromechanical optical cross connect," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.15, no.4, pp.587-589 (2003).
- [19] X. Zheng, et al., "Three-dimensional MEMS photonic cross-connect switch design and performance," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 9, no. 2, pp.571- 578, Mar./Apr. 2003
- [20] E. Mannie, ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)

- Architecture,” IETF RFC 3945, Oct. 2004.
- [21] J. Lang, ed., “Link Management Protocol (LMP),” IETF RFC 4204, Oct. 2005.
- [22] K. Kompella and Y. Rekhter, ed., “OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching,” IETF RFC 4203, Oct. 2005.
- [23] L. Berger, ed., “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions,” IETF RFC 3473, Jan. 2003.
- [24] L. Andersson and D. Papadimitriou, “Use of the Generalized MultiProtocol Label Switching control plane for point-to-point Ethernet Label Switching,” IETF Internet Draft, draft-andersson-gels-bof-prep-01.txt, work in progress, Oct. 2005.
- [25] S. Okamoto, “Field Trial of Signaling Interworking of Multi-Carrier ASON/GMPLS Network Domains,” ECOC 2006 Workshop on “ASON/GMPLS Implementations in Field Trials and Carrier Networks,” Sep. 2006.
- [26] J. Strand, A. Chiu and R. Tkach, “Issues for Routing in the Optical Layer,” IEEE Comm. Magazine, vol.39, no.2, pp.81-87, Feb. 2001.
- [27] J. Strand and A. Chiu, ed., “Impairments and Other Constraints on Optical Layer Routing,” IETF RFC 4054, May 2005.
- [28] E. Oki, D. Shimazaki, K. Shiimoto, N. Matsuura, W. Imajuku and N. Yamanaka, “Performance of Distributed-controlled Dynamic Wavelength-conversion GMPLS Networks,” Optical Comm. and Networks, no.1, pp.355-358, Nov. 2002.
- [29] R. Rabbat, T. Otani and L. Mao, “Generalized Labels of Lambda-Switching Capable Label Switching Routers (LSR),” IETF Internet Draft, draft-rabbat-ccamp-gmpls-lambda-labels-00.txt, work in progress, Oct. 2006.
- [30] W. Imajuku, Y. Sone and I. Nishioka, “Routing Extensions to Support Network Elements with Switching Constraint,” IETF Internet Draft, draft-imajuku-ccamp-rtg-switching-constraint-01.txt, work in progress, Oct. 2006.
- [31] 笠史郎, 八木幹雄, 里見秀一, 浅野正一郎, “超高速波長パスネットワークにおける波長分散補償,” 信学会ソ大会 BCS-1-1, Sep. 2004.
- [32] T. Hashimoto, M. Yagi, H. Koyano, S. Tanaka, A. Inomata, S. Satomi, H. Ishimatsu and S. Ryu, “Rapid Automatic Chromatic Dispersion Compensation Using GMPLS Signalling Enhancement for Dynamically Reconfigurable All-optical Network,” ECOC 2003, Mo4.7.6, Rimini, Italy, Sep. 2003.
- [33] F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, “A Novel Signaling Approach to Encompass Physical Impairments,” Globecom 2004 Workshop, Dallas, USA, Nov. 2004