

平成17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 (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
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	5
	2-2-1 最終目標	5
	2-2-2 中間目標	6
	2-3 研究開発の年度別計画	7
3	研究開発体制	
	3-1 研究開発実施体制	8
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	9
	4-1-1 概要	9
	4-1-2 方式検討	10
	4-1-2-1 分散フリー光送信器シミュレータ開発	10
	4-1-2-2 変調方式依存性検討	15
	4-1-3 分散フリー端局評価設備開発	26
	4-1-4 実施計画に対する達成状況	27
	4-2 MEMS 駆動光スイッチの研究開発	28
	4-2-1 概要	28
	4-2-2 研究開発成果	28
	4-2-2-1 MEMS 駆動光スイッチ方式検討	28
	4-2-2-2 MEMS 駆動光スイッチ評価設備構築	32
	4-2-3 実施計画に対する達成状況	34
	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	35
	4-3-1 概要	35
	4-3-2 方式検討の状況	35
	4-3-2-1 オプティカルパスレンジングの方式	36

4-3-2-2	ルーティングプロトコルの拡張	39
4-3-2-3	波長分散を考慮した経路選択	41
4-3-3	プラットフォーム構築の状況	43
4-3-4	実施計画に対する達成状況	45
4-4	総括	
(ア)	分散フリートランスポンダの研究開発	45
(イ)	MEMS 駆動光スイッチの研究開発	46
(ウ)	自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発	46
5	参考資料・参考文献	
5-1	研究発表・講演等一覧	48
	参考文献	49

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[1-3]．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)分散フリーストランスポンダ，(イ) MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 駆動光スイッチ，および(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．以下，各開発課題の背景および現状について述べる．

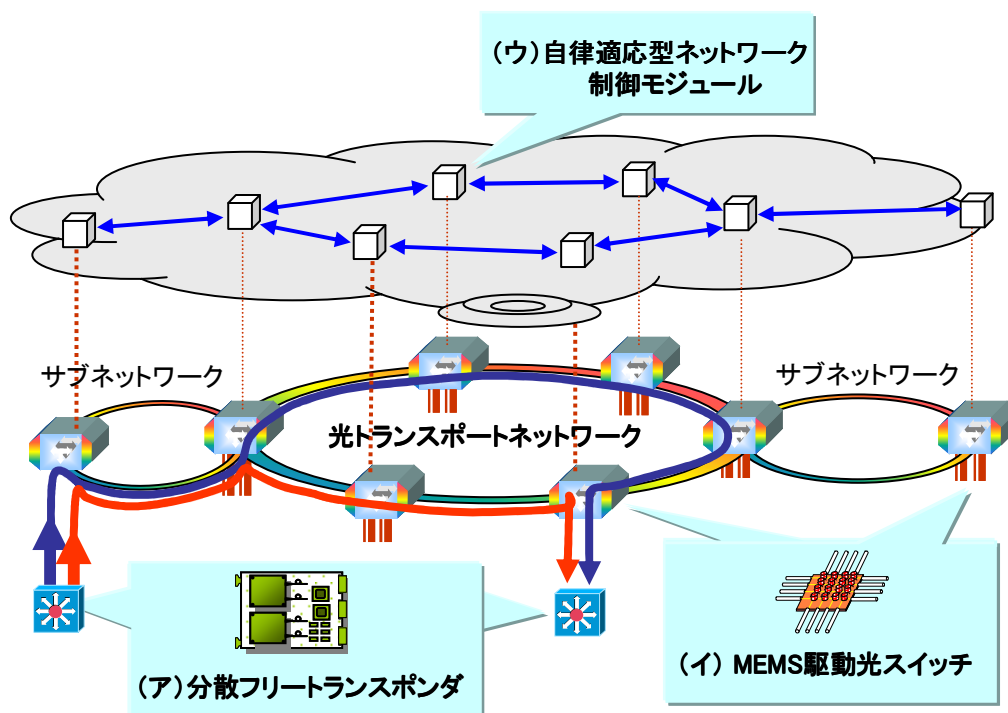


図 1-1. 提案する適応制御光トランスポートネットワークの全体図

(ア) 分散フリースポンドの研究開発

本サブテーマでは、光トランスポートネットワークでのシステム初期コストの低減を図りつつ伝送距離を延伸する目的で、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と受信側の高速電気信号処理適応等化の両方で送受協調して等化することを目指している。2005年以來、送信側プリコーディングによる基本概念については光伝送システム関連研究者の間で急速に関心が高まりつつあり[4]、現在、送信側プリコーディングの技術[5-7]、受信側電気等化の技術[8-11]の個別技術の研究開発が精力的に行われている。送信側プリコーディングの技術においては、その基礎検討の段階から実用化時の課題解決やより高性能な方式を求めた研究開発段階に進んでいるものと思われる。また、受信側電気等化技術については、近年の電気信号処理技術の進展を反映して、40Gbit/sシステムに適用可能な高速の等化器や、MLSE, Viterbi Equalizer などのより等化能力の高い方式の検討が進んでいる。

本開発課題においては、送信側プリコーディング技術と受信側適応等化技術を組み合わせた場合の最適動作条件と実用上の課題抽出・検討が不可欠であるため、専用の S/W シミュレータ、H/W シミュレータの立ち上げが重要であり、H17年度の開発課題としてとりあげる。

(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る [12, 13]。このタイプは小～中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、ポリマー導波路などをベースに、開発が進んでいる。本方式では機械的駆動部品がないという点がメリットとして挙げられる。

また、3D-MEMS 型光スイッチも盛んに開発されている [14, 15]。近年では 256 ポートに至る大規模性や低損失性能を実現しつつある。

本研究にて開発する MEMS 駆動光スイッチにおいては、コスト・サイズおよび消費電力の観点でメトロアクセス用の中規模光スイッチとして適合させることを目標とする。具体的には、40×40 規模までの拡張を可能とするべくスケラビリティ・量産性を向上し、低損失・高速動作といった高い性能と小型化・高信頼性を両立させることを目標とする。

(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 [16-19]。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 [20]、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 [21]。

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 [22, 23] や波長選択への GMPLS シグナリングプロトコルの適用 [24] 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い。なお、動的な全光パスの確立に対応して可変分散補償デバイスを最適に設定する制御のため、GMPLS シグナリングプロトコルを拡張する提案やその実験が行われている[25-27]。

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にかつ自動的に確立可能とする。

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) 分散フリートランスポンダ

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トランスポンダの実現可能性を、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。

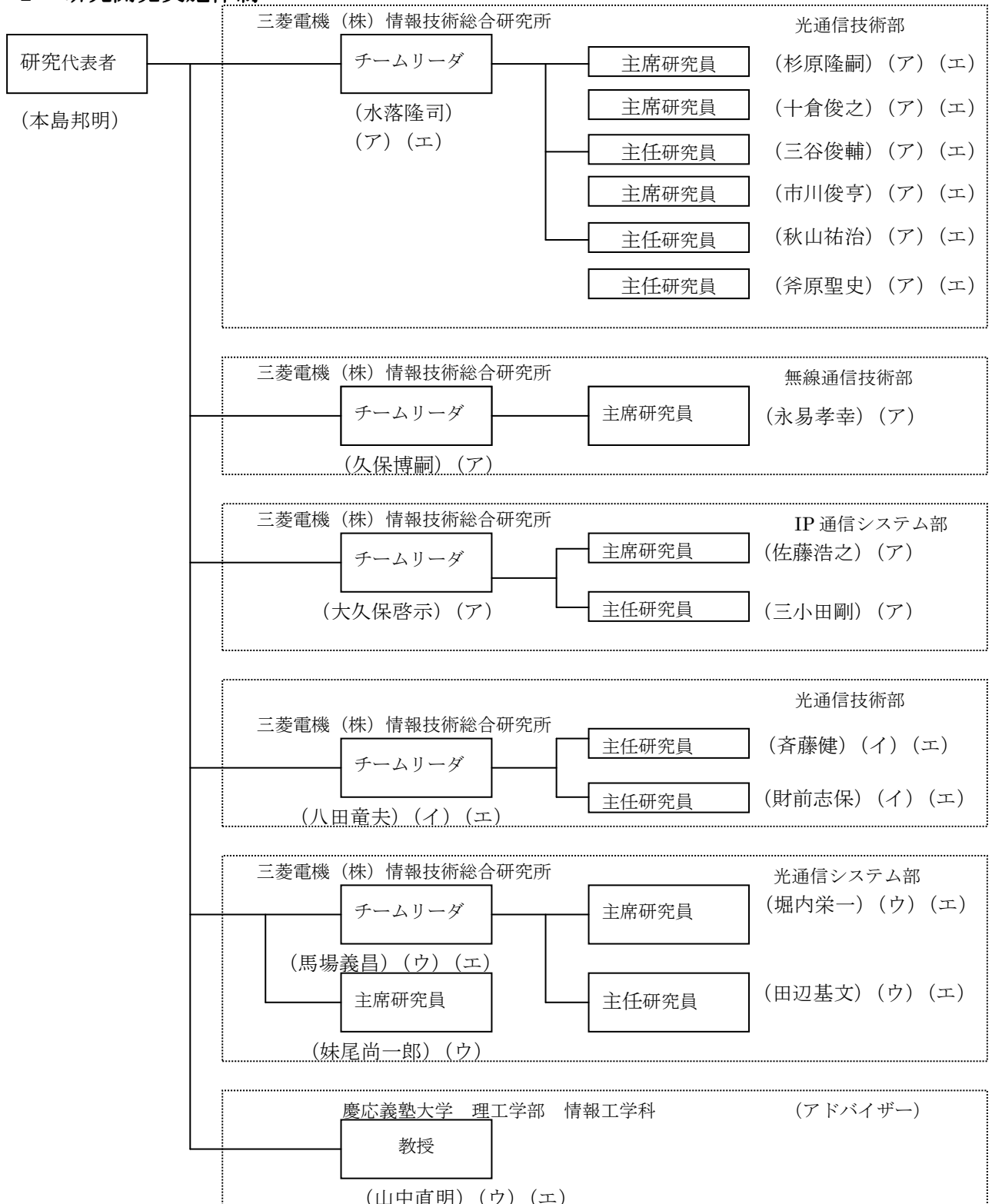
2-3 研究開発の年度別計画

(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 シ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



(ア) 分散フリース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 分散フリートランスポンダの研究開発

4-1-1 概要

提案する分散フリートランスポンダの実現においては、送信プリコード、受信適応等化の各機能ブロックおよびトランスポンダとしての構成といった各要素技術（図 4-1-1）検討が必要である。そこで、H17 年度では次年度以降の詳細検討へ向けたシミュレータ環境立ち上げを開始した。また、上記要素技術の一つである送信プリコーディング回路に着目し、任意変調フォーマットへの適用を視野に入れたプリコーディング回路部必要性能検討として、変調方式と分散補償量に対する必要データ長の見積もりを行った。さらに、分散フリートランスポンダカードを実機評価する際に必要となる H/W シミュレータ環境の一環として端局評価設備開発を行った。

以下、今年度行った各開発内容について記す。

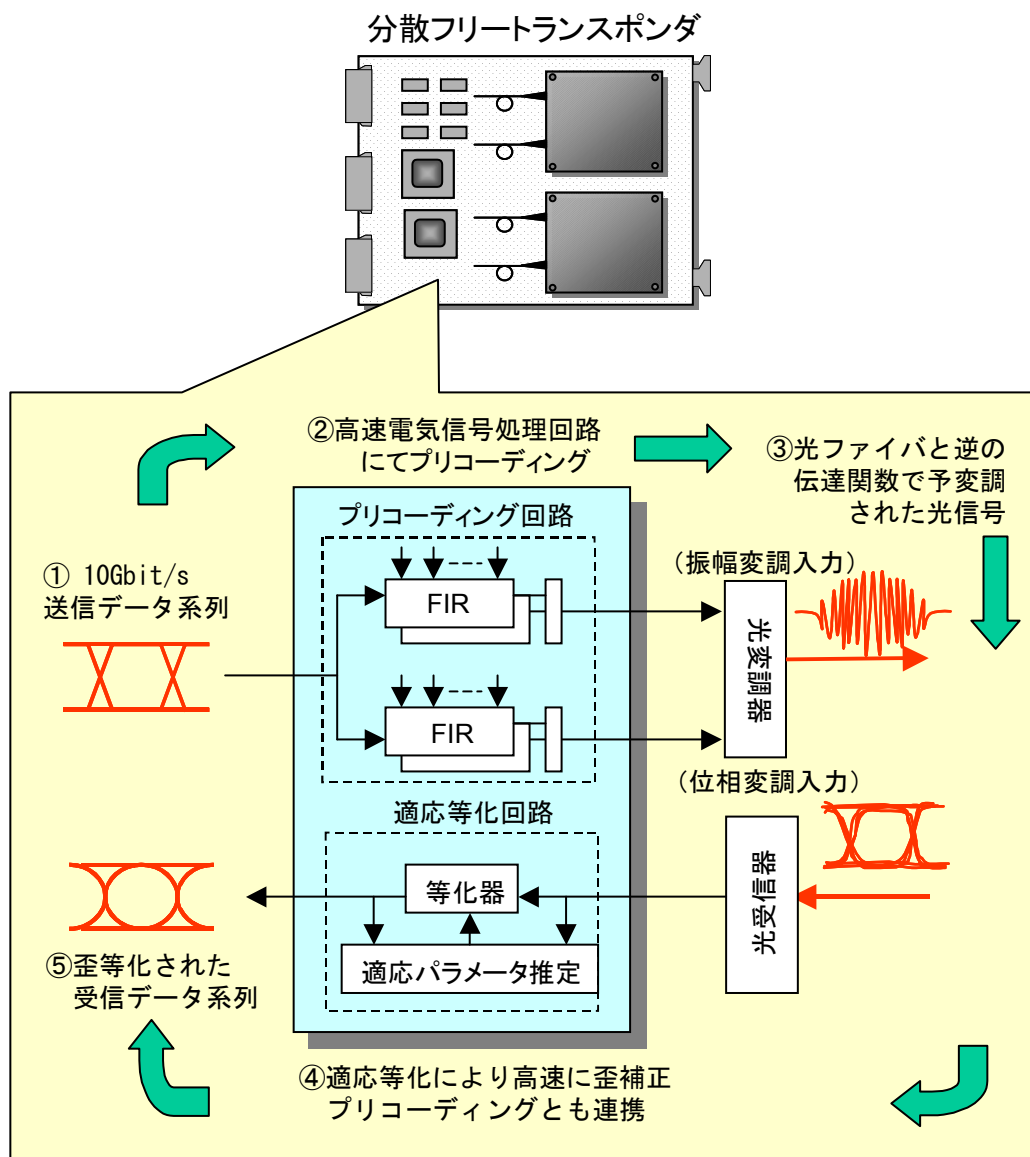


図 4-1-1. 高速電気信号処理を用いた分散フリートランスポンダ

4-1-2 方式検討

次年度予定しているプリコーディング回路方式設計および分散フリースポンド基本機能部設計・試作の元となる基礎データ取得および性能指標の明確化を行うため、H17年度では基本シミュレータの立ち上げおよび、それをを用いた10Gb/s-2000km 伝送時必要性能見積もりを行った。以下にて詳細報告を行う。

4-1-2-1 分散フリー光送信器シミュレータ開発

実際の光送信器を構成する上では、プリコード時の各種誤差や光変調器の構成・伝送路の雑音特性など多岐にわたるパラメータを勘案した上での方式詳細検討が必要不可欠となる。以下では、今後の詳細検討を目的として立ち上げるシミュレータの開発状況について述べる。

(1) 基本技術の説明

分散フリー光送信器を用いた通信システムは、送信側で伝送路歪の逆特性を与えるプリコーディングを行い、受信側で残留した伝送路歪成分を補償する適応等化を、送受協調して実施（送受協調等化）する。図4-1-2に、送受協調等化による通信システムの構成図を示す。なお、ここでの通信システムにおいては、議論を容易にするために、一般的な等価低域モデルの伝送路を想定することにする。

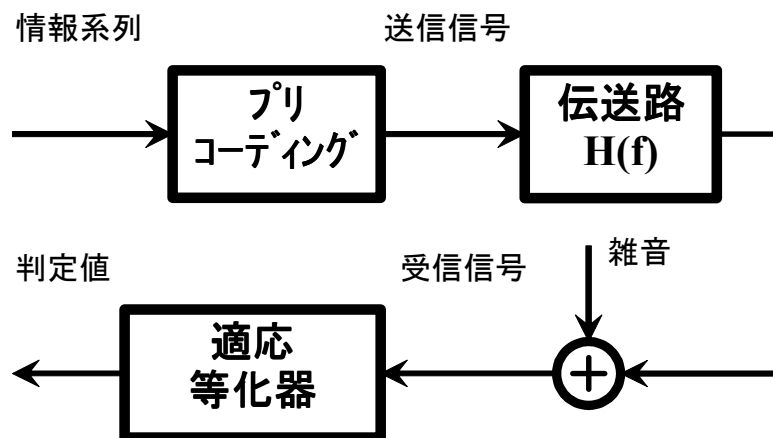


図 4-1-2. 送受協調等化による通信システム

ここで、プリコーディングは、図4-1-3に示すように一種の分数間隔タップのトランスバースフィルタにて実現する。

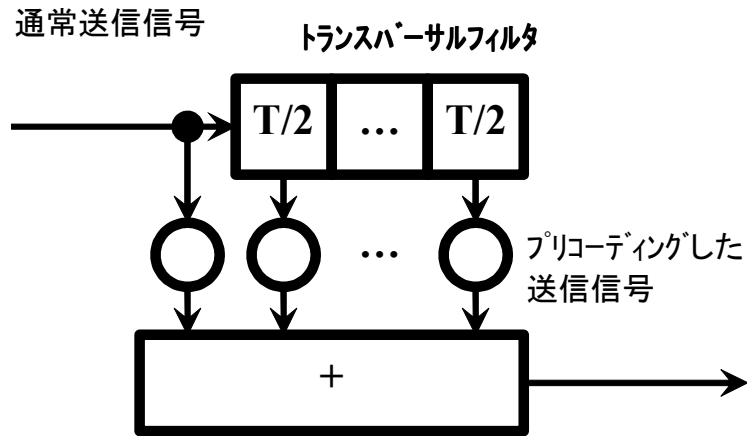


図 4-1-3. プリコーダの構成図

図 4-1-4 に、受信側での等化器である、分数間隔タップの判定帰還等化器の構成図を示す。フィードフォワードフィルタは、一種の前置フィルタであり、受信信号の波形整形や波形歪の抑圧を行う。フィードバックフィルタは、判定値をフィードバックする一種の非線形フィルタである。なお、フィードバックフィルタをなくした場合、本構成は、分数間隔タップの線形等化器と呼ばれる。

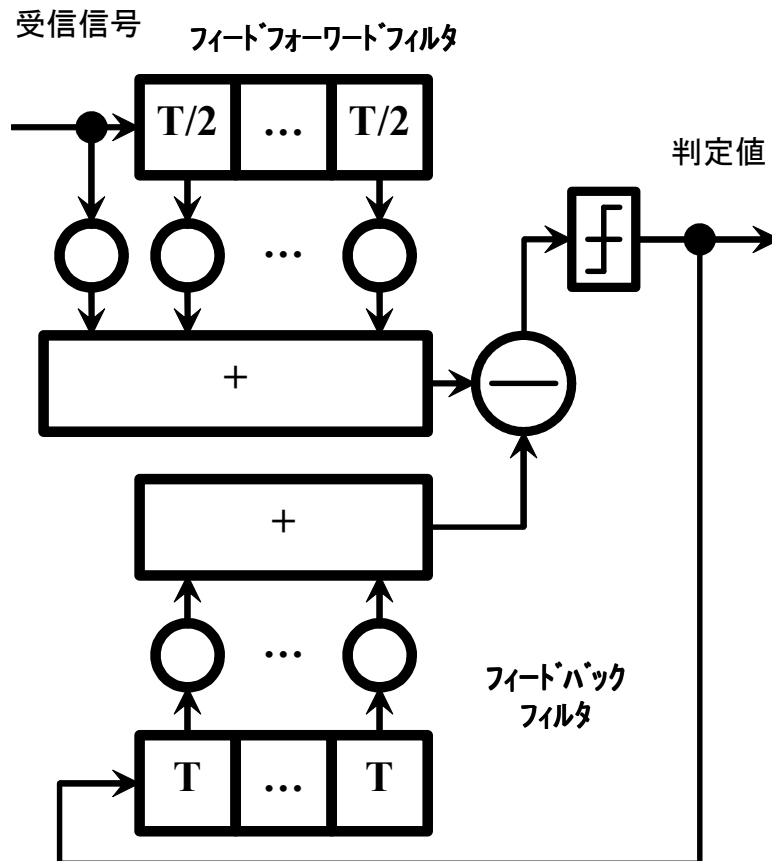


図 4-1-4. 分数間隔タップの判定帰還等化器の構成図

ここで、送信側プリコーディングと受信側等化器に重要な課題として、各タップ係数を如何に決定するかという項目が挙げられる。受信等化器のタップ係数の推定に関しては、良く知られた適応等化器の技術を活用すればよい。ここでは、伝送路特性が、

$$H(f) = \exp(jAf^2)$$

という形で予め分かっている場合に関して議論する。この場合の送信側プリコーディングのタップ係数の推定手法として、次の2通りの手法を検討する。

- ①伝送路特性の逆特性を解析的に導出し、有効タップ長に打ち切りを行う。
以降、タップ数打ち切り法と呼ぶ。
- ②既知系列を送信し、擬似逆行列を使って設定タップ数に対応する係数を算出する。
以降、擬似逆行列法と呼ぶ。

ここで、タップ数打ち切り法は、全タップ係数電力の α 倍より小さいタップ係数は0とみなし、実タップ長を打ち切るものである。一方、擬似逆行列法は、一般的な適応等化器のタップ設定法をプリコーディングに応用し、少ないタップ数の場合の特性劣化を抑圧するものである。

(2) シミュレーション結果・数値計算結果

今回は、シミュレーションや数値計算の有効性を確認するために、一般的な等価低域モデルにて、伝送路特性が

$$H(f) = \exp\left(j \frac{\pi DL\lambda^2}{c} f^2\right)$$

と表記される場合に関して検討した。ここで、 c は光速、 D は波長分散のパラメータ、 L は光ファイバ長、 λ は光波長である。なお、パラメータとしては $c=3.00e+8$ [m/s]、 $\lambda=1550$ [nm]とする。また、送信プリコーディングにより生じる設定誤差を次のように定義する。

$$\Delta H(f) = \exp\left(j \frac{\pi \Delta DL\lambda^2}{c} f^2\right)$$

通信システムとしては、送信信号は信号伝送速度が10Gb/sの50%ルート余弦ロールオフにて波形整形を実施したBPSKとし、受信側で50%ルート余弦ロールオフの受信フィルタを準備する。なお、適応等化器としては、フィードフォワードフィルタのタップ係数が8の場合（受信等化器あり）と、タップ数が1（受信等化器なし）の場合に関して検討する。

表4-1-1に、各種DL[ns/nm]値に対して、プリコーディングに要するタップ数とパラメータ α の関係を示す。DL[ns/nm]値が大きくなるに従って、所要タップ数が増加すること、 α を大きく取りすぎるとタップ数を適切に設定できないことが示される。

表 4-1-1. プリコーディングに要するタップ数

DL 値	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.005$	$\alpha=0.001$	$\alpha=0.0001$
0	1	1	1	1	1
10	1	31	33	41	55
20	1	59	63	71	91
40	1	113	121	133	157
80	1	1	233	255	285

図4-1-5に、DL[ns/nm]値をパラメータとして、伝送路推定量に残留誤差がない場合のBER特性を示す。ここで、送信プリコーディングに関しては、タップ数打ち切り法にて α を0.001に設定した。図より、送信プリコーディングにより、受信等化器の有無に拘らず、伝送路歪がない理想条件の場合と同等の特性となることが示される。

図4-1-6に、DLを40[ns/nm]、 $E_b/N_0=8$ dBとした場合のタップ数がBERに与える影響を示す。ここで、タップ係数の推定は、タップ数打ち切り法と擬似逆行列法の2種類を検討す

る. 図より, 擬似逆行列法の方が少ないタップ数で良好な特性を実現することが示される.

図 4-1-7 に, DL を 40[ns/nm]とし, 残留誤差 ΔDL [ns/nm]をパラメータとして, 受信等化器の有無による BER 特性を比較する. 図より, 残留誤差を受信等化器が補償できていることが示される.

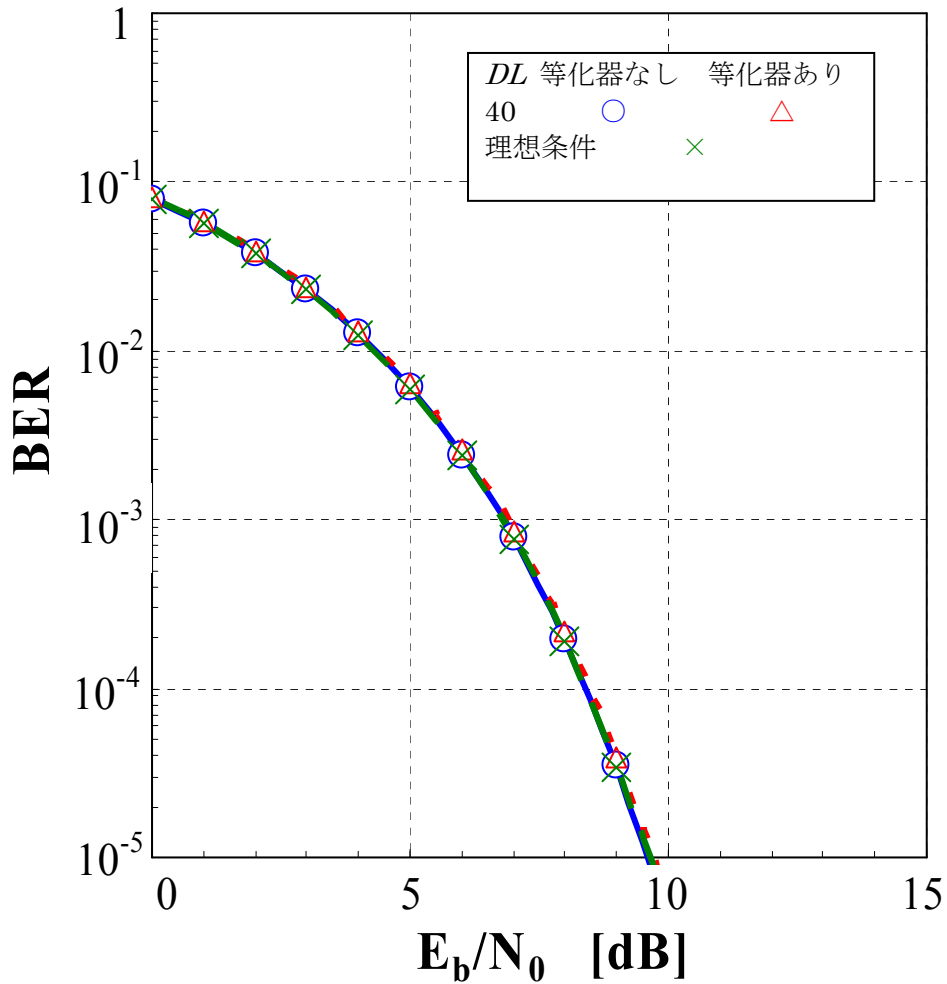


図 4-1-5. 十分にタップ数を取った場合の BER 特性

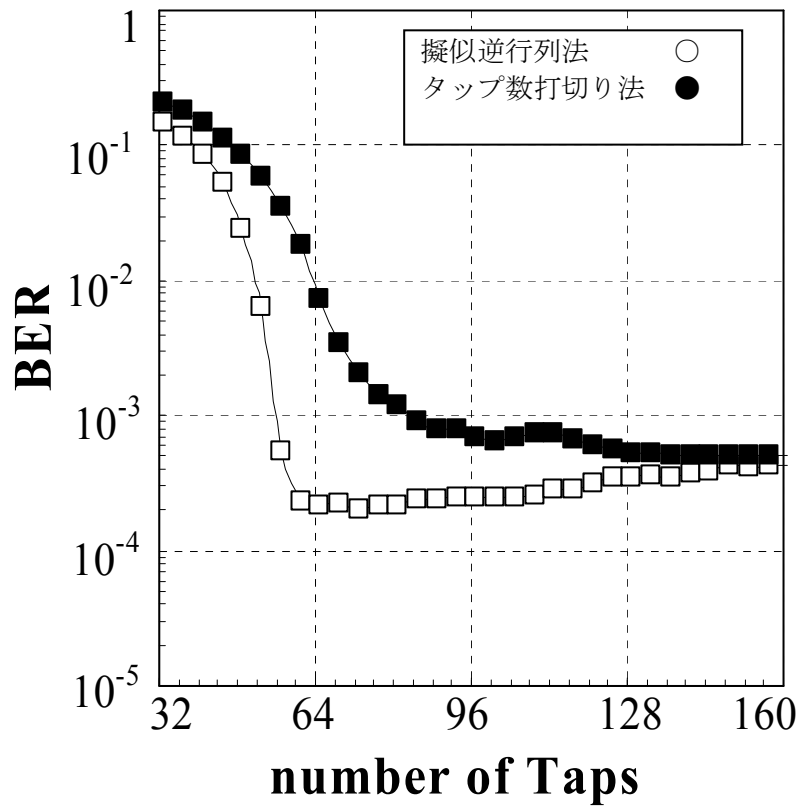


図 4-1-6. タップ数推定法と BER 特性の関係

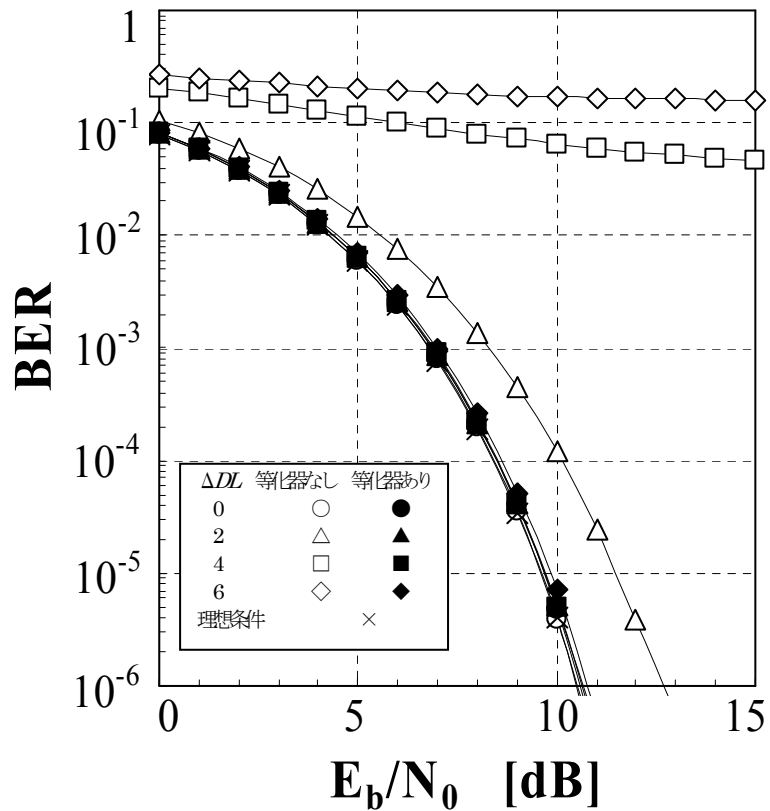


図 4-1-7. 伝送路推定誤差がある場合の BER 特性

4-1-2-2 変調方式依存性検討

前項で示したトランスバーサルフィルタを用いたプリコーディングを行う場合において、必要タップ数は採用する変調方式によって異なることが予想される。以下では、上述のシミュレータの送信部を用いてプリコーディング回路の変調方式依存性検討を行った結果を示す。

(1) シミュレーション条件

以下では、作成したシミュレータで10Gb/s伝送でのプリコーディング部基本必要性能を求めた結果を示す。シミュレーションでは理想状態を考え、以下の条件設定とした。

- optical line-rate: 10Gb/s
- 受信帯域 signal-rate x 0.8
- 雑音無付加
- 使用データ系列: PRBS9
- 変調フォーマット: NRZ, DPSK, DQPSK, DSB-RZ, DPSK-DSB-RZ, DQPSK-DSB-RZ, CS-RZ, DPPSK-CS-RZ, DQPSK-CS-RZ

(NRZ: Non-Return-to-Zero, DPSK: Differential Phase-Shift Keying, DQPSK: Differential Quadrature Phase-Shift Keying, CS-RZ: Carrier Suppressed Return-to-Zero)

(2) ターゲット分散量に対する必要ビット数

ここでは、必要タップ数導出の元となるデータとして、一つのビットの逆分散付与波形を生成するために何ビット分の情報が必要かについて、ターゲットの分散量に対するアイ開口ペナルティの関係を求めた。尚、計算では量子化誤差を無視している。以下に、各変調方式に対する計算結果を示す。

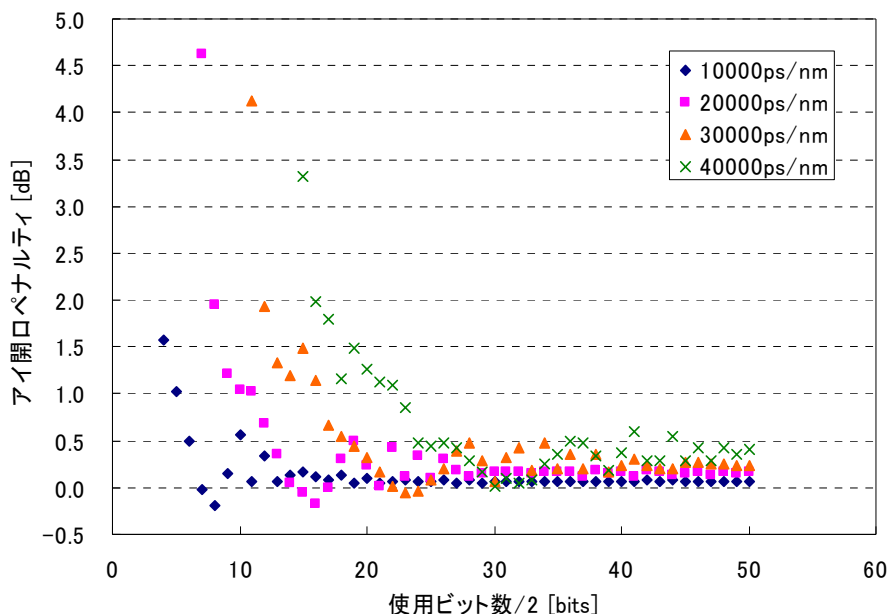


図 4-1-8. NRZ 変調の場合

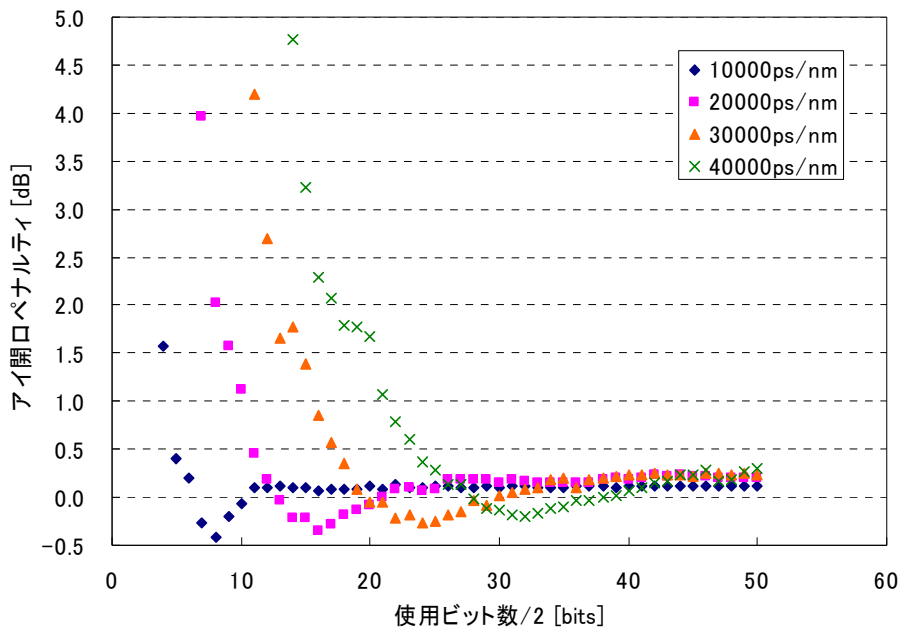


図 4-1-9. DPSK 変調の場合

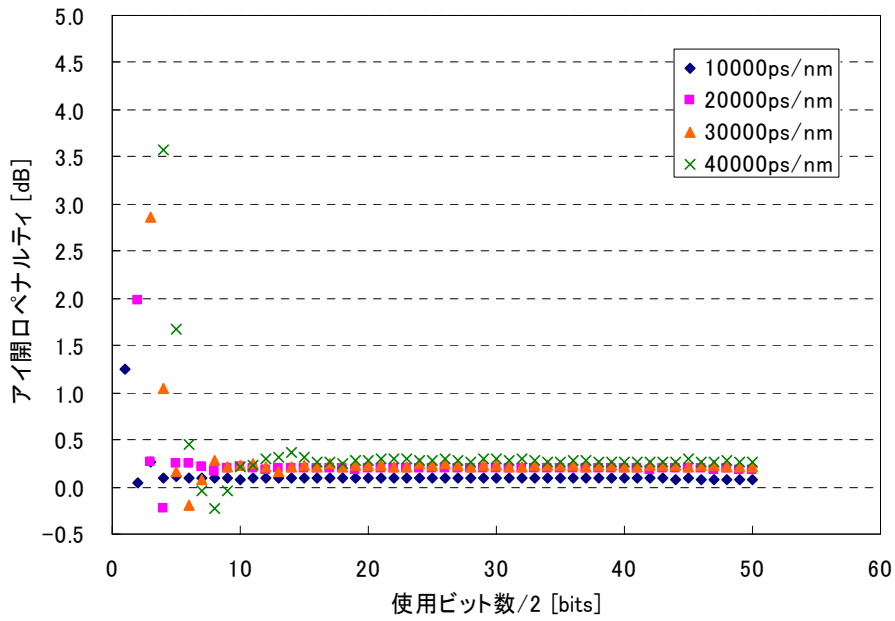


図 4-1-10. DQPSK 変調の場合

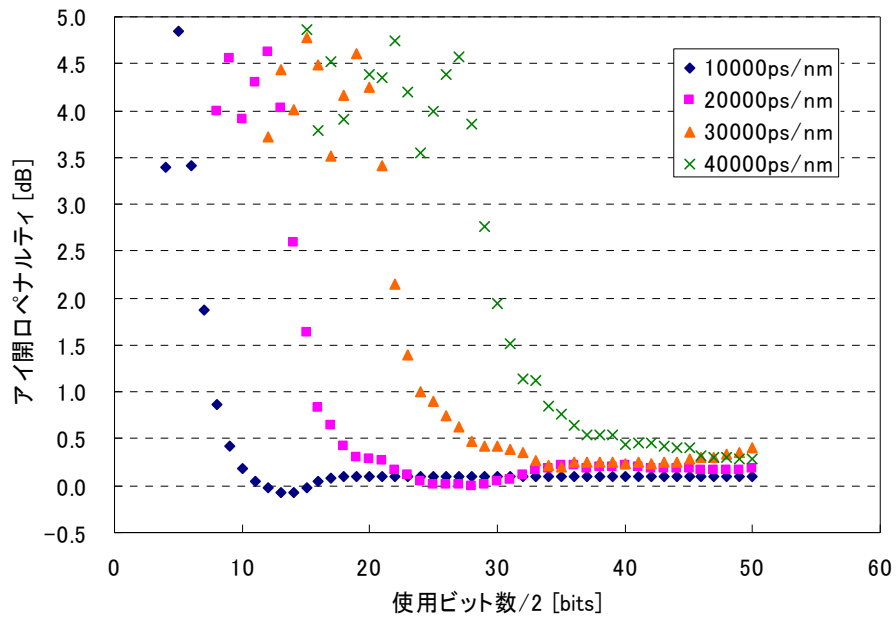


図 4-1-11. DSB-RZ 変調の場合

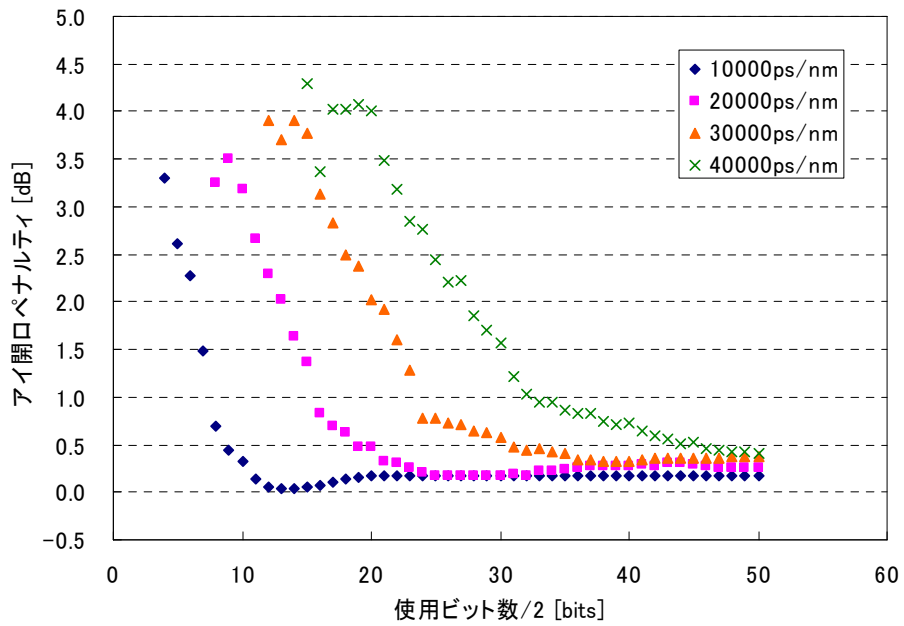


図 4-1-12. DPSK-DSB-RZ 変調の場合

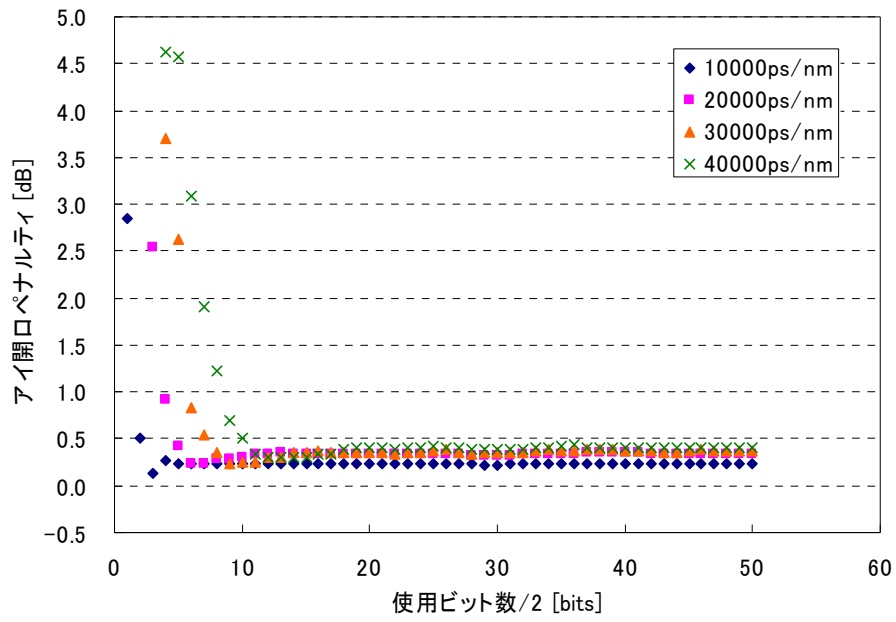


図 4-1-13. DQPSK-DSB-RZ 変調の場合

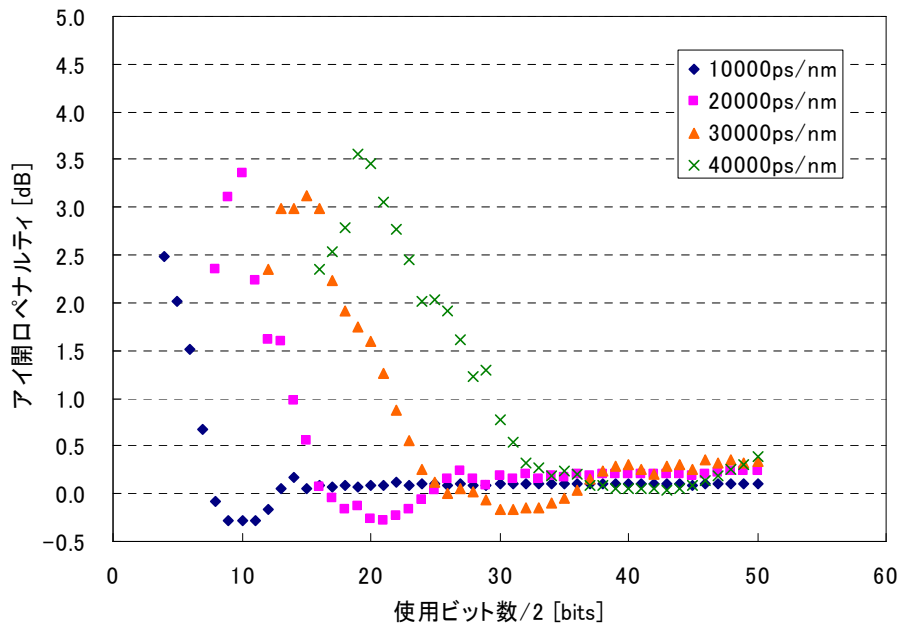


図 4-1-14. CS-RZ 変調の場合

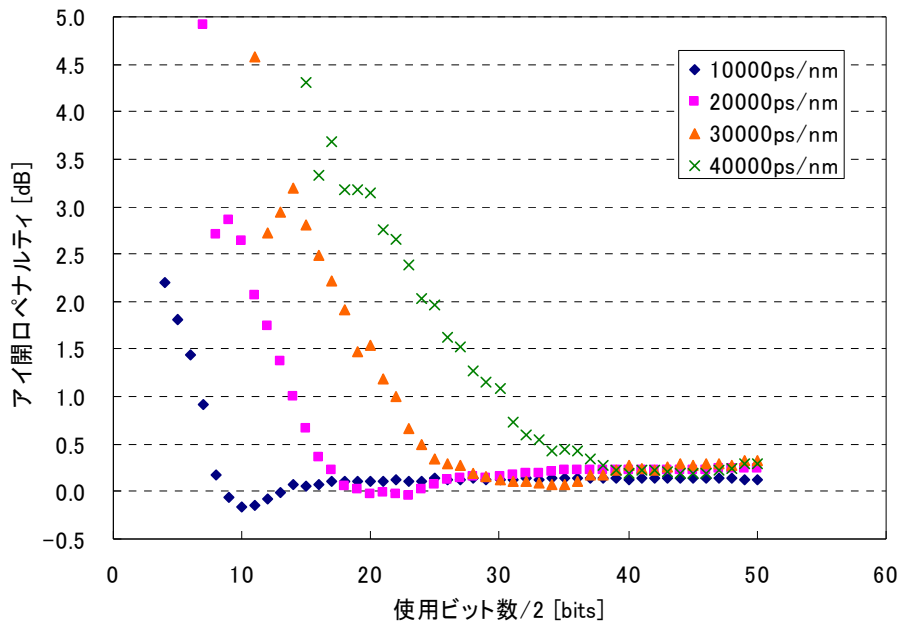


図 4-1-15. DPSK-CS-RZ 変調の場合

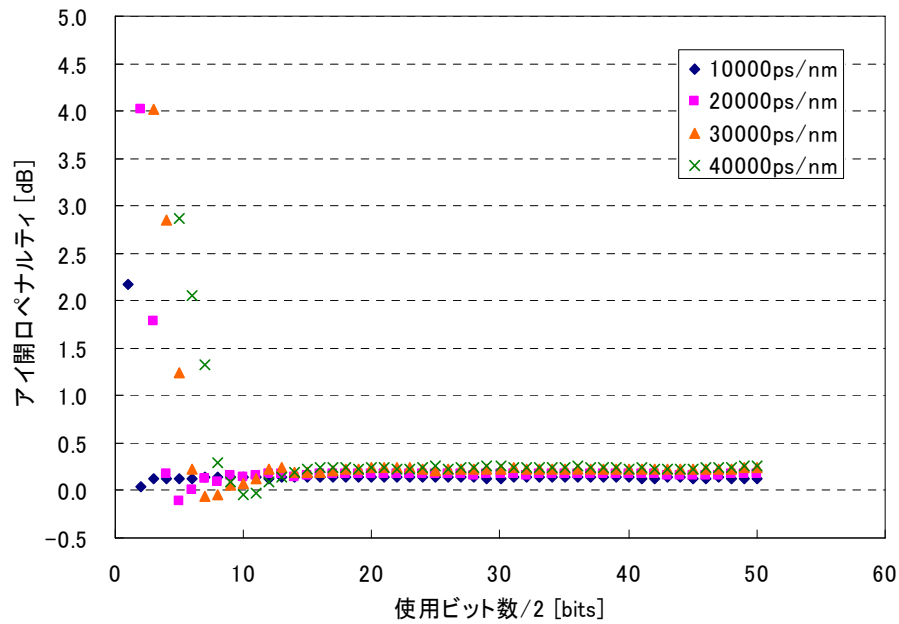


図 4-1-16. DQPSK-CS-RZ 変調の場合

上記結果より、分散値にほぼ比例して必要となるビット数は増加することがわかる。また、10Gb/s（情報レート）の信号を 40000ps/nm 伝送させる条件では、RZ パルス状信号を含む変調方式までサポートするとした場合の必要ビット数は 90~100bit ある。また、図 4-1-8 から、NRZ 変調でペナルティが無視できる領域は前後約 30bit のデータが必要であるが、図 4-1-17、図 4-1-18 の NRZ 変調シングルパルスでの+40000ps/nm 伝送前後の光電界の様子からも片側必要ビットは約 30-bit でまかなえることが見てとれ、上記計算結果は妥当であることがわかる。

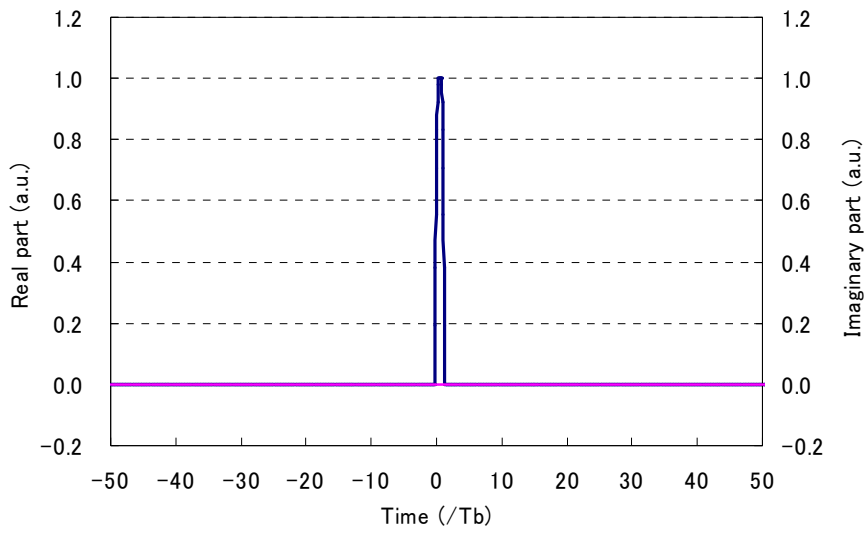


図 4-1-17. NRZ シングルパルス送信波形に対する複素電界

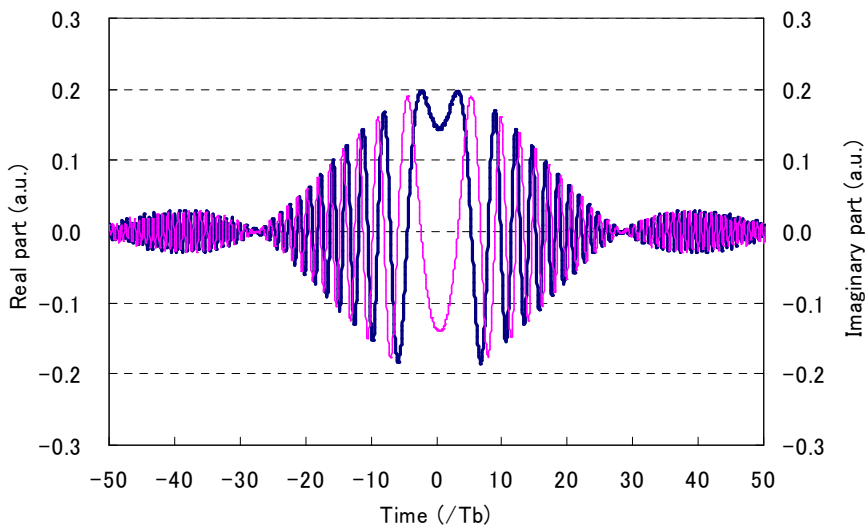


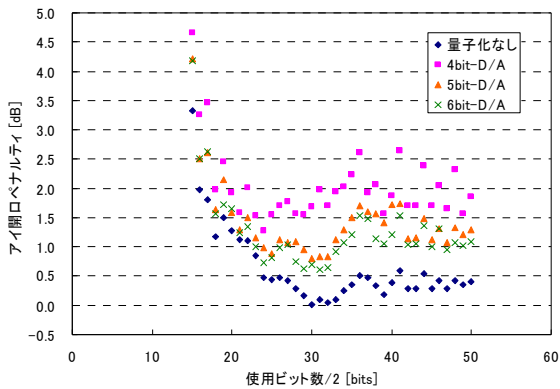
図 4-1-18. NRZ シングルパルス +40000ps/nm 伝送後の複素電界

(4) 量子化の影響

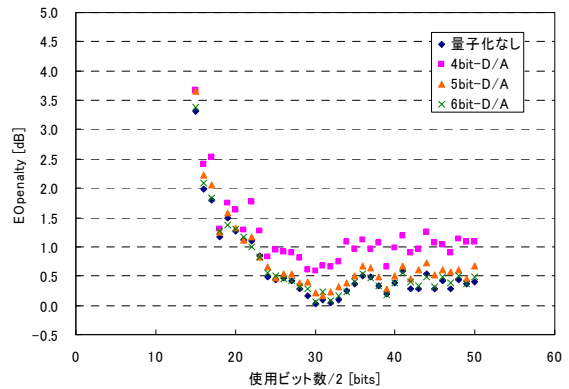
プリコーディング回路中のトランスバーサルフィルタの動作設定では、タップ間隔が離散化され、振幅設定に D/A コンバータを使用することが想定されるために、時間／振幅の量子化時の過剰ペナルティを考慮する必要がある。以下では、量子化によって発生する過剰ペナルティの変調方式依存性についての検討結果を示す。

(4-1) オーバーサンプリング

図 4-1-19, 図 4-1-20 に、NRZ 変調と DSB-RZ 変調について、2 倍オーバーサンプリングと 4 倍オーバーサンプリングでの発生ペナルティの違いを示す。

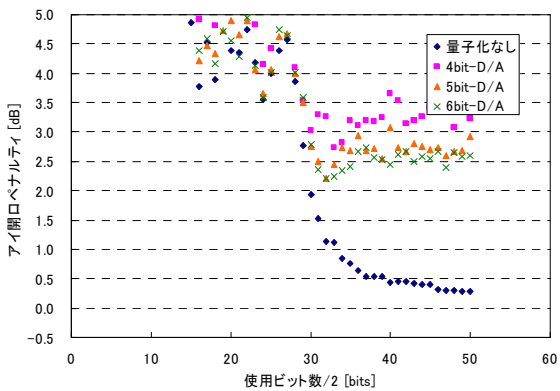


(a) 2 倍オーバーサンプリング

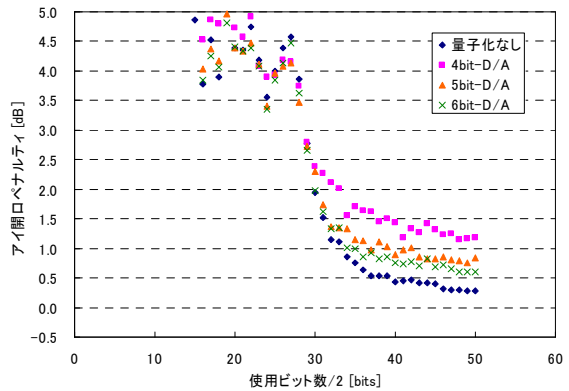


(b) 4 倍オーバーサンプリング

図 4-1-19. NRZ 変調の場合



(a) 2 倍オーバーサンプリング



(b) 4 倍オーバーサンプリング

図 4-1-20. DSB-RZ 変調の場合

計算結果より、RZ パルス状の光波形への適用まで考えた場合には、4 倍オーバーサンプリング程度までを視野に入れればよいことがわかる。

(4-2) 振幅の分解能

図 4-1-21～図 4-1-29 には、4 倍オーバーサンプリングの条件にて、振幅の分解能と過剰ペナルティの関係について計算した結果を示す。

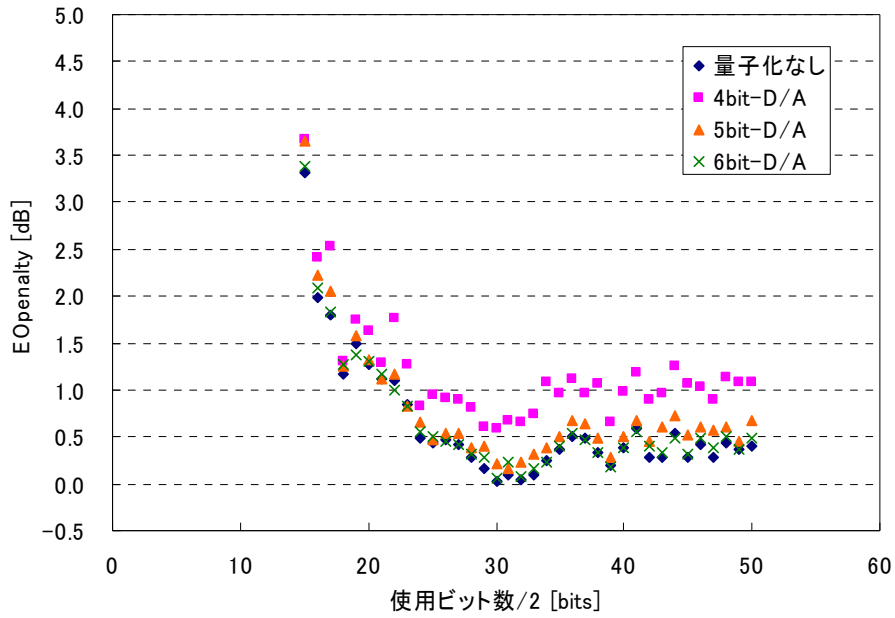


図 4-1-21. NRZ 変調の場合

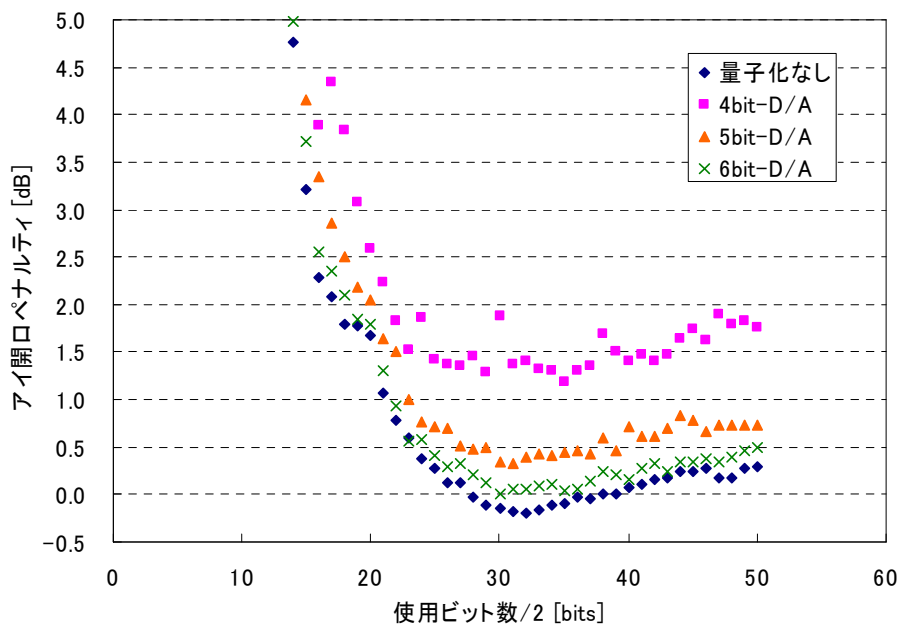


図 4-1-22. DPSK 変調の場合

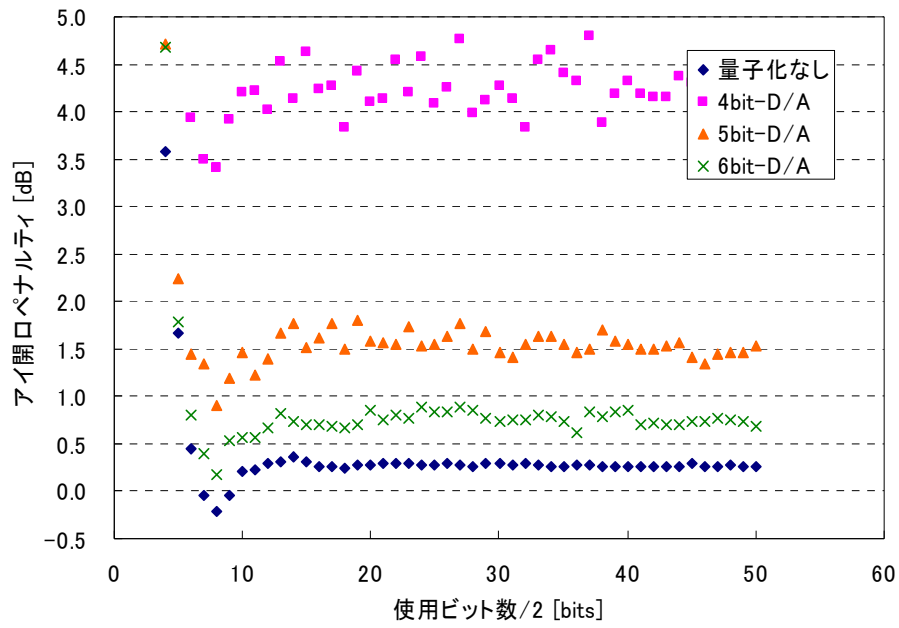


図 4-1-23. DQPSK 変調の場合

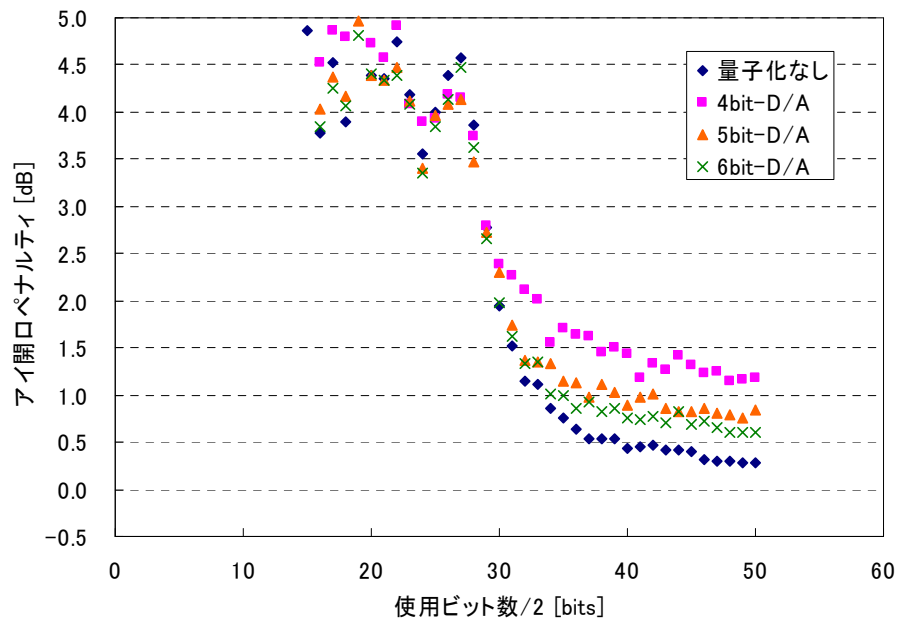


図 4-1-24. DSB-RZ 変調の場合

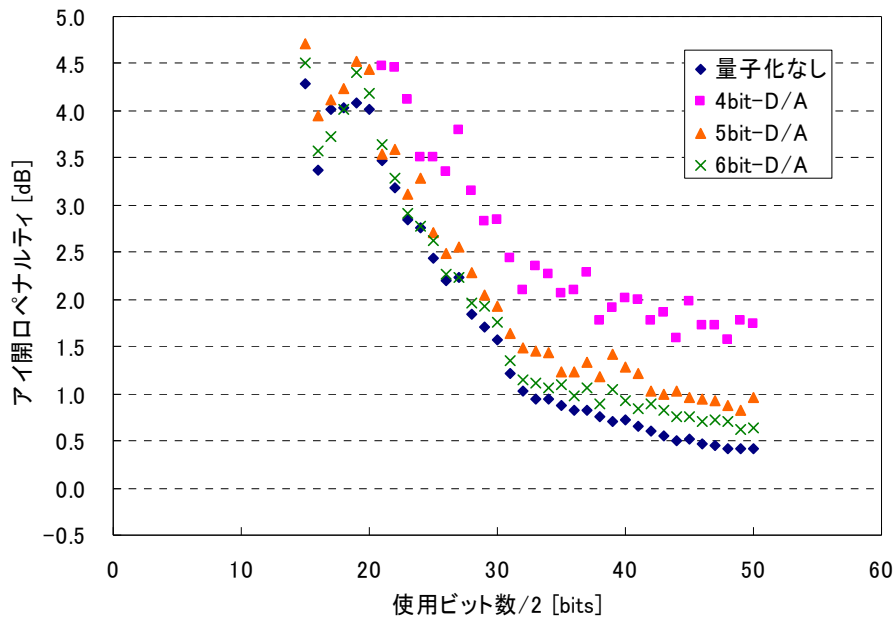


図 4-1-25. DPSK-DSB-RZ 変調の場合

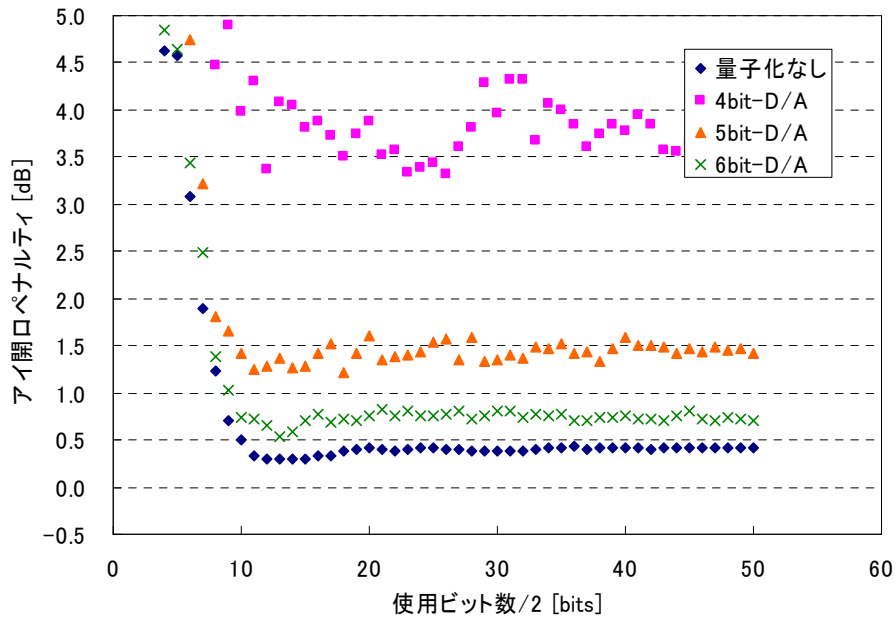


図 4-1-26. DQPSK-DSB-RZ 変調の場合

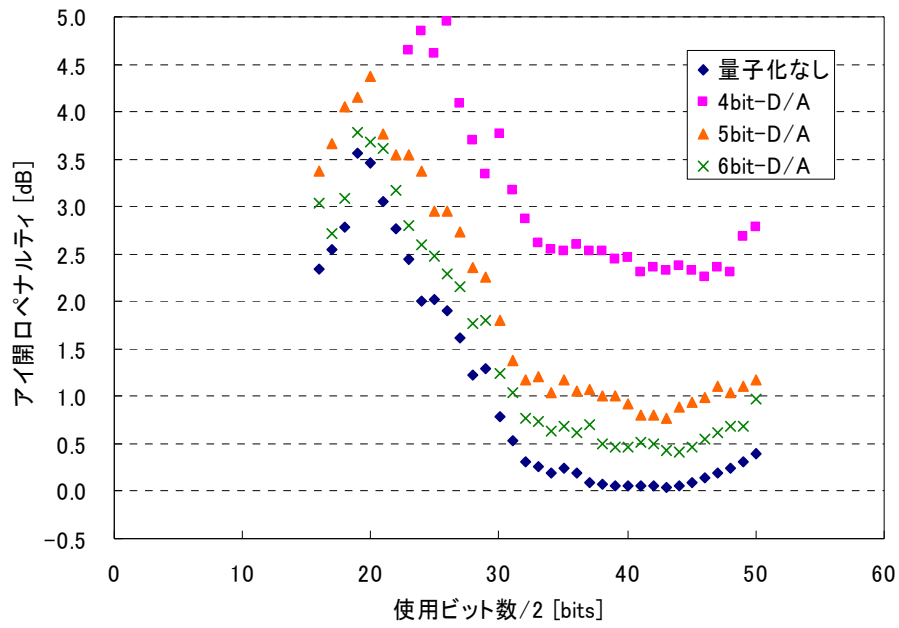


図 4-1-27. CS-RZ 変調の場合

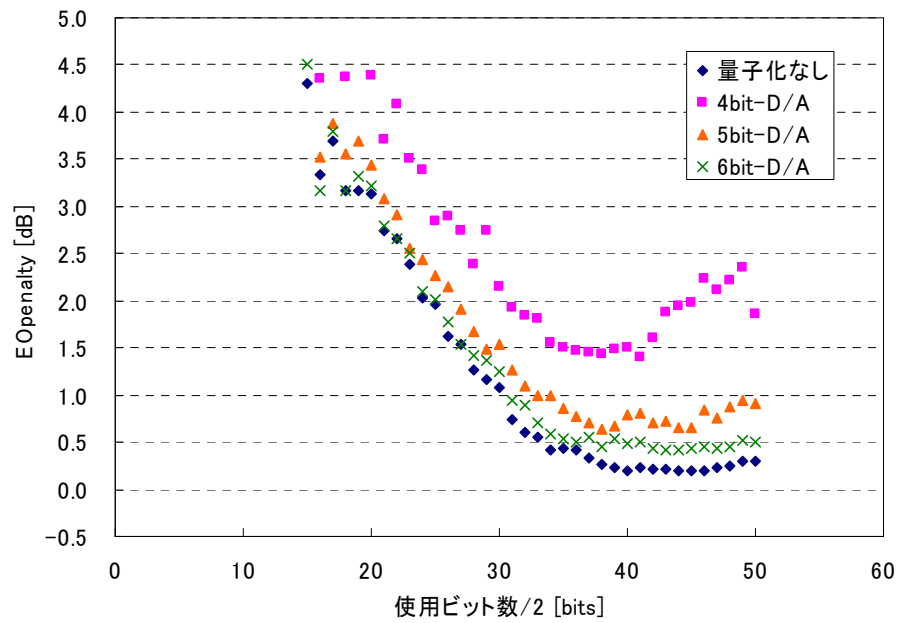


図 4-1-28. DPSK-CS-RZ 変調の場合

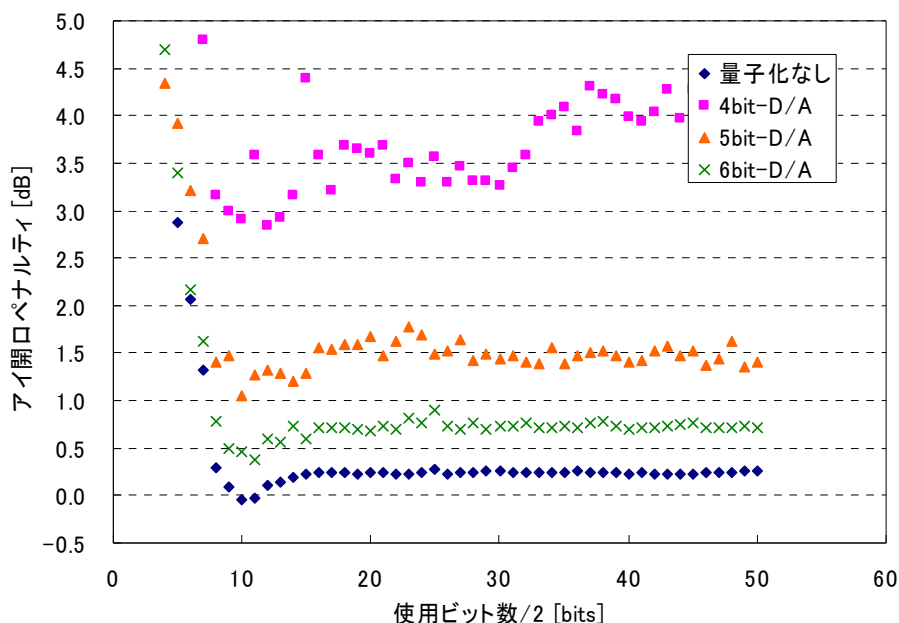


図 4-1-29. DQPSK-CS-RZ 変調の場合

計算結果より、10Gb/s（情報レート）の信号を 40000ps/nm 伝送させる場合について、量子化による過剰ペナルティを 0.5dB 程度に抑えるためには、6bit-D/A による振幅分解能が必要であることがわかる。また、この際に必要なビット数は量子化なしの場合とほぼ同等程度であり、変調方式によって最大 90~100bit 程度となる。

本検討より、10Gb/s にて 40000ps/nm という分散の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る。今後、実現可能な LSI 技術と伝送時の得失、トランスポンダ実現上の得失などをトータルに評価して実使用上最適な方式への絞込みが必要であると考えらる。

4-1-3 分散フリー端局評価設備開発

分散フリー端局装置評価設備開発として、H18 年度以降に試作する分散フリートランスポンダを評価するための架、シェルフ、制御用カードにて構成される評価設備の構築を実施した。

H17 年度の分散フリー端局装置評価設備開発は、分散フリー端局評価設備及び監視制御系評価装置を調達し、それらを組み合わせることにより、分散フリートランスポンダを評価する設備を構築するものである。

分散フリー端局評価設備は、分散フリートランスポンダの機能・性能を評価するための設備である。分散フリー端局評価設備は、架、シェルフ、制御用カードから構成される。

主たる構成要素である架、シェルフ、制御用カードについて次に説明する。

①分散フリー端局評価設備の架には、複数のシェルフを収容することが可能なラックマウント型の EIA 規格準拠シェルフ収容架を適用した。

②シェルフは、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することが可能なカード収容シェルフである。シェルフの機構設計、バックボードの電気設計を実施し、専用シェルフの製作を行った。

③制御用カードは、シェルフに收容され、制御カード内に実装されている CPU を用いて、同一シェルフに收容される他のカード類の制御、監視などをおこなう。制御用カードは、CPU、メモリコントローラ、各種メモリを搭載する。CPU はメモリコントローラを介して制御用カード上の各種デバイスに対して、各種の設定、情報の収集、データの書き換えを行う。また、イーサネットポートを有し、外部端末との通信をおこなう。

監視制御系評価装置は、監視制御系プラットフォームの機能評価、性能評価を実施するための設備である。評価結果は、分散フリー端局装置評価設備の監視制御系 S/W に反映していく。

今後、分散フリートランスポンダを試作し、その性能を評価する計画である。分散フリー端局評価設備の整備により、試作分散フリートランスポンダを評価カードに実装し、その評価カードをシェルフに收容し、制御用カードにより制御、監視することにより、試作分散フリートランスポンダの特性評価を効率よく実施できる環境を整えることができた。

4-1-4 実施計画に対する達成状況

上記より、H17 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) 方式検討：伝送波形のシミュレーション
- (2) 分散フリー端局装置評価設備開発（フェーズ I）：H18 年度以降に試作する分散フリートランスポンダを評価するための架、シェルフ、制御基板の製作

【達成状況】

- (1) デジタル FIR フィルタ係数を導出するシミュレータ作成。光変調部を組み込んだシミュレーションツール作成。OOK, DPSK, DQPSK 変調に対して、10Gb/s 2000km 伝送用に必要な FIR タップ数初期見積もりを実施。達成度：100%。
- (2) 分散フリートランスポンダカード評価用に用いる架、シェルフおよび制御用カードを作製。達成度：100%。

4-2 MEMS 駆動光スイッチの研究開発

4-2-1 概要

メトロアクセスネットワークにおいては、数十程度の波長で1本の光ファイバを共有し、波長パスの動的な切替によって光レイヤでピア・ツー・ピア型の通信をサポートする必要がある。そのような通信では光源は波長可変光源が主流となり、送信側で波長を選択することにより任意の行き先を選択する。このような形態において、大きな電源設備や高度な空調設備を準備せずとも搭載でき、且つ任意の経路への接続を可能とすることのできる、高速・小型なマトリクス型の光スイッチが望まれる。

こうした背景から、高速・小型なマトリクス型の MEMS 駆動光スイッチを開発する。具体的には、まず、光の伝送路として用いるポリマー導波路を機械的に駆動する超小型 MEMS 駆動機構、及び、この駆動機構とポリマー導波路との高精度・高信頼接合技術を開発する。このことで、LSI ライクなスケーラビリティ・量産性と高性能・小型・高信頼を両立させ、光レイヤ処理の適用範囲を拡大する。

さらに、高機能集積に関する基盤技術を確立するため、マトリクス構成の導波路にVOAを集積し、損失等化をモノリシックに実現する。MEMS 機構による高速なメカニカル動作では、超低消費電力駆動を維持しながら1ms以下の高速性を実現する。

本研究開発にて提案する MEMS 駆動光スイッチ実現上のキーポイントは、駆動機構である圧電素子の実現、および圧電素子とポリマー導波路との実装技術にある。これまでに、ポリマー導波路を用いた光スイッチに関して開発を行い、高い光学性能が得られることを確認しているが、量産性も考慮した上での駆動機構およびその実装技術の確立が課題である。こうした観点から、H17年度には、駆動機構である微小圧電素子に関する検討、およびそれらをポリマー導波路上の各切替ポイントの一つずつ配置し、半田リフロー工程により多数ポイント一括で接合する方式の基本検討を行った。本節では、それらの検討内容について報告する。また、最後に MEMS 駆動光スイッチ評価設備構築の内容について報告する。

4-2-2 研究開発成果

4-2-2-1 MEMS 駆動光スイッチ方式検討

(1) MEMS 駆動光スイッチ用駆動機構の検討

図4-2-1に、今回提案する MEMS 駆動光スイッチの光路切替部分についての模式図を示す。本光スイッチにおいては、ポリマーフィルム内にて導波路コアが交差する構成となっており、その交差部に溝を設け、この溝を閉じた場合には光が溝を透過し、この溝を開いた場合にはそこに生じる空気層との屈折率差から光が全反射することによって光路の切替を行う。

MEMS 駆動光スイッチを動作させるために、導波路交差点に形成した溝をどの程度開閉すれば所望の性能が得られるかを計算した[28]。本計算は委託契約以前の成果であるが仕様明確化のため記載する。

図4-2-2に、 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ に対して、空気ギャップ幅を変数として透過/反射損失の計算を行った結果を示す。なおこの計算においては、入・出射角 $=45^\circ$ として計算した。計算結果から、例えば透過損失を0.05dB以下とするためにはギャップ幅 l_1 は $0.04\mu\text{m}$ 以下とする必要があり、反射損失を0.1dB以下とするためにはギャップ幅 l_1 を $1.6\mu\text{m}$ 以上とする必要があることが分かった。従って、透過/反射の切替を行うためには、溝部分のギャップを $0\mu\text{m}$ 、および $1.6\mu\text{m}$ 以上、の2値に制御できればよい。

このような動作を行うため、従来は、溝の両脇部分に固定点を設け、溝部分をフィルム

面に垂直な方向から加圧し、溝直下のつながっている部分をヒンジとして作用させ溝を開閉するという方法を取ってきた。図 4-2-3 にその様子を示す[29]。この場合、上記のように $2\mu\text{m}$ 程度のギャップを生じさせるためには $10\mu\text{m}$ 程度の押し上げ/下げが必要となる。そのための駆動機構を考えた場合、従来用いてきた圧電素子では、その変位を得るために素子長が変位量の 1000 倍程度の長さ、すなわち 1cm 以上となってしまいうため装置が大型化してしまい、例えば 19 インチラック内の基板に搭載することを考えた場合実装が困難になる。

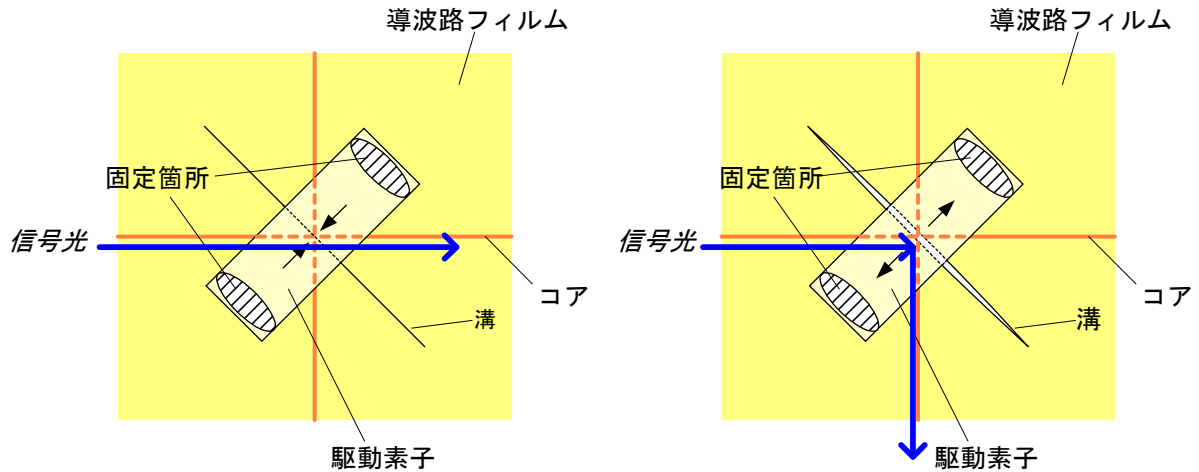


図 4-2-1. MEMS 駆動光スイッチにおける光路切替イメージ

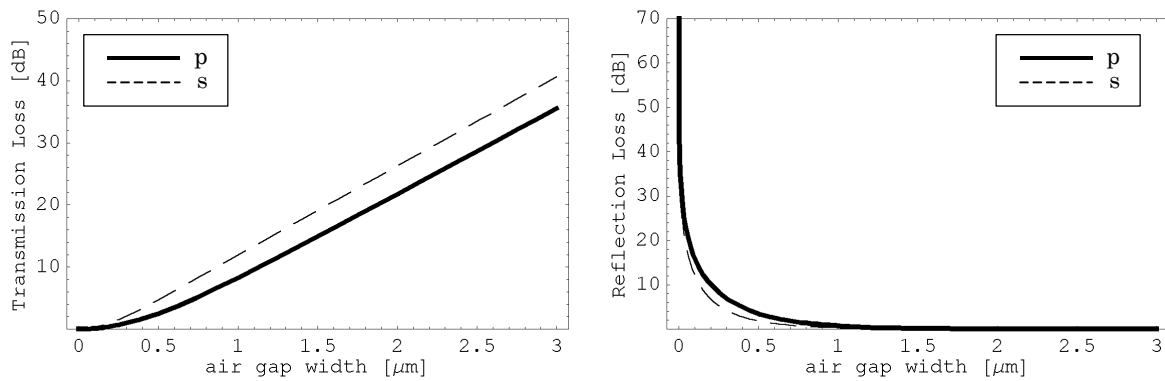


図 4-2-2. 溝部分の空気層間隔に対する透過特性 (左)、反射特性 (右) ($@ \lambda = 1.55\mu\text{m}$)

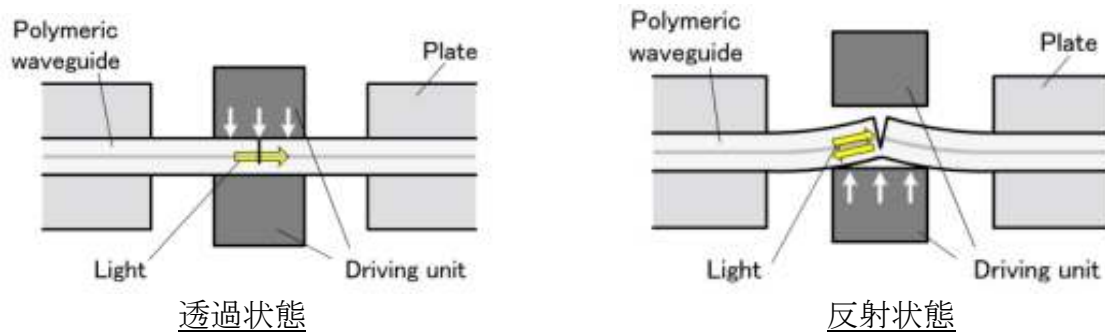


図 4-2-3. 従来の駆動構造断面図

今回、装置の小型化をはかる観点から、比較的大変位の取れる圧電バイモルフ対を用いた構成について検討することとした。図 4-2-4 に、現在検討している圧電バイモルフ対の概略図を示す。二股に分かれた各部分が、それぞれ、外側あるいは内側に向かって変位する。この、二股に分かれた部分の中心にポリマー導波路フィルムの溝が位置するように素子を実装し、溝部分を直接フィルム面に平行な方向に動かして溝の開閉を行う。

この方式において、まず寸法的な制約から、圧電バイモルフ対の形状設計を行った。導波路コア間のピッチとしては、1mm 以下とし、このピッチで並んだ導波路が交差する配置を考えている。この仮定から、駆動素子の占める領域としては、およそ 0.7mm × 0.3mm 以下とする必要があると考えた。

高さ方向の所要長さを見積もるため、圧電バイモルフの自由長に応じて得られる変位量についての計算を行った。図 4-2-5 に、今回検討している圧電バイモルフ対の片側の駆動部分について、想定する寸法において自由長をパラメータとして変化させたときに得られる変位量を計算した結果を示す。条件として、圧電バイモルフのうち電圧印加される部分の層厚 0.1mm、幅を 0.25mm とし、電圧として 200V を印加した場合を考慮した。結果、自由長 1mm 以上とすれば、1.6 μ m 以上の変位を得ることが出来ることが分かる。バイモルフ対の構成では、この倍の 3.2 μ m の変位となり、この通り動けば溝の開閉を行うに十分であると考えられる。また、自由長 1mm であれば、その上部のつながっている部分を同程度の長さとしても素子全長として 2mm 程度であり、従来 1~2cm あった素子長の約 10 分の 1 程度に小型化することが可能になると考えられる。また、合わせてその際の発生力についても計算を行った。自由長 1mm の際の発生力はおおよそ 0.06N と見積もられる。

また、次項で述べるように、導波路フィルムと圧電バイモルフ対の固定は半田付けにより行う。そのための金属膜を、この素子の上面と底面に形成する。そして上面と底面の間に電圧を印加することにより変位を得る構造とした。圧電バイモルフに必要な発生力は固定方法および構造に依存するため、前述の圧電バイモルフの発生力が充分かどうかも含め H17 年度に行った上記検討に基づいて圧電バイモルフ対を試作し、H18 年度に評価を行う予定である。

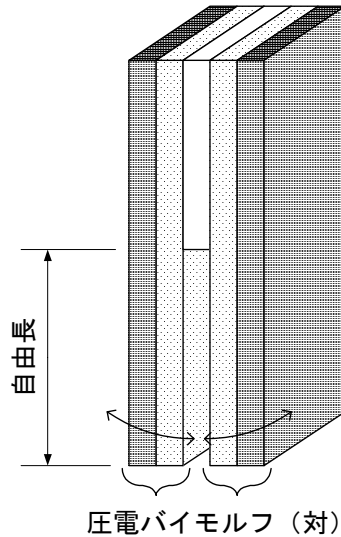


図 4-2-4. 圧電バイモルフ対のイメージ図

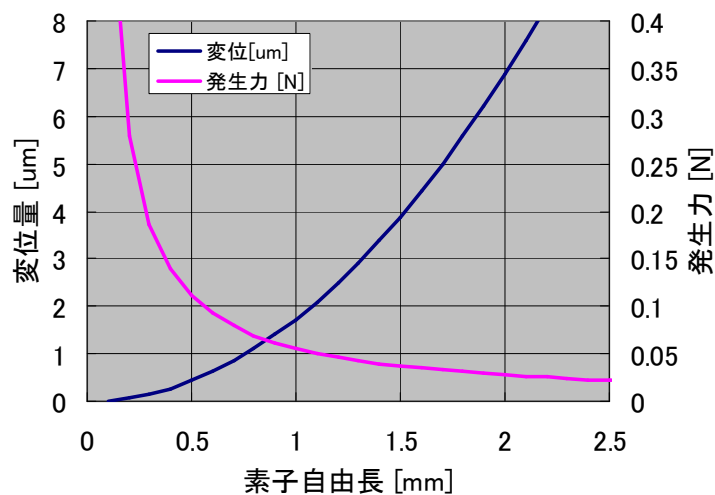


図 4-2-5. 圧電バイモルフの自由長と変位量の関係

(2) MEMS 駆動機構実装方法の検討

前項に示した圧電バイモルフ対と導波路フィルムとは、半田により接合する。図 4-2-6 に、そのイメージ図を示す。導波路フィルムの、溝を挟む両脇部分に金属膜および半田ボールを形成しておき、その上に駆動素子である圧電バイモルフ対を配置して、周囲温度を上昇/下降させ、半田溶融/凝固させることにより固定を行うことを考えている。駆動素子をアレイ化する必要がないため、そのアレイ化にかかるコストを低減することが出来、また拡張性についても制約がないというメリットがある。さらに一括リフローでの実装が実現できれば、さらなる低コスト化を実現できると見込まれる。

半田搭載は、インクジェットの原因を応用した溶融半田吐出法により行うことを考えている。本方式では、任意の位置に容易に半田供給が可能であり（マスク不要）、フラックス処理なしに接合可能であり（洗浄不要）、鉛フリー半田に対応していることが特長である。特に、溝加工を施した後で半田付けを実施することを考えると、洗浄工程を行うことは現実的には許容できないため、洗浄不要である本方式は今回の実装上最適であると考えられる。

この検証のため、圧電素子およびポリマーフィルムを形状サンプルを準備し、半田搭載を行って、半田接合実験を行った。半田としては鉛フリー半田であるスズ銅半田を用い、室温から 250℃までの温度昇降を行うことで、シヤ強度 150gf 以上と十分な強度を得ることが出来ることを実験的に確認した。

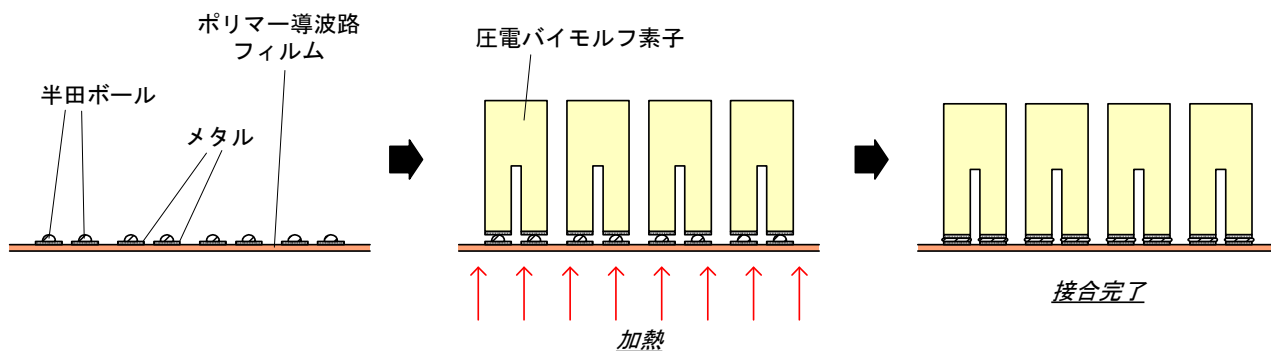


図 4-2-6. 駆動素子の実装イメージ図

4-2-2-2 MEMS 駆動光スイッチ評価設備構築

今後開発する MEMS 駆動光スイッチの評価を効率的に行うことが出来るようにするために、評価設備を導入し系の構築を行った。本年度は、評価系の一部である、光ポート切替装置の手配・導入を実施し完了した。

図 4-2-7 及び図 4-2-8 に、評価系ブロック図の例を示す。図 4-2-7 においては、波長の異なる任意複数台の光源を今回導入した光ポート切替装置 type.A の入力ポートに接続し、光ポート切替装置 type.A の出力ポートから今回開発する MEMS 駆動光スイッチの入力ポートに接続する。そして MEMS 駆動光スイッチの出力ポートを再び光ポート切替装置 type.A の別な入力ポートへと接続する。さらに、再びこの光ポート切替装置 type.A の出力ポート複数種複数台の測定装置へと接続する。一方、図 4-2-8 においては、波長の異なる任意複数台の光源を光ポート切替装置 type.B の入力ポートへと接続し、この光ポート切替装置 type.B の出力ポートから MEMS 駆動光スイッチの入力ポートに接続する。そして MEMS 駆動光スイッチの出力ポートを別の光ポート切替装置 type.B の入力ポートへと接続し、出力ポート複数種複数台の測定装置へと接続する。測定装置としては、光パワーメータ、光オシロスコープ等の装置を配置できる。

このような配置とすることにより、試作する MEMS 駆動光スイッチのポートごとの損失や応答特性の波長依存性などを効率的に評価することが可能となり、今後の評価に活用する予定である。なお、必要に応じ、上記要領で複数台の MEMS 駆動光スイッチを同時に接続し測定することも可能である。

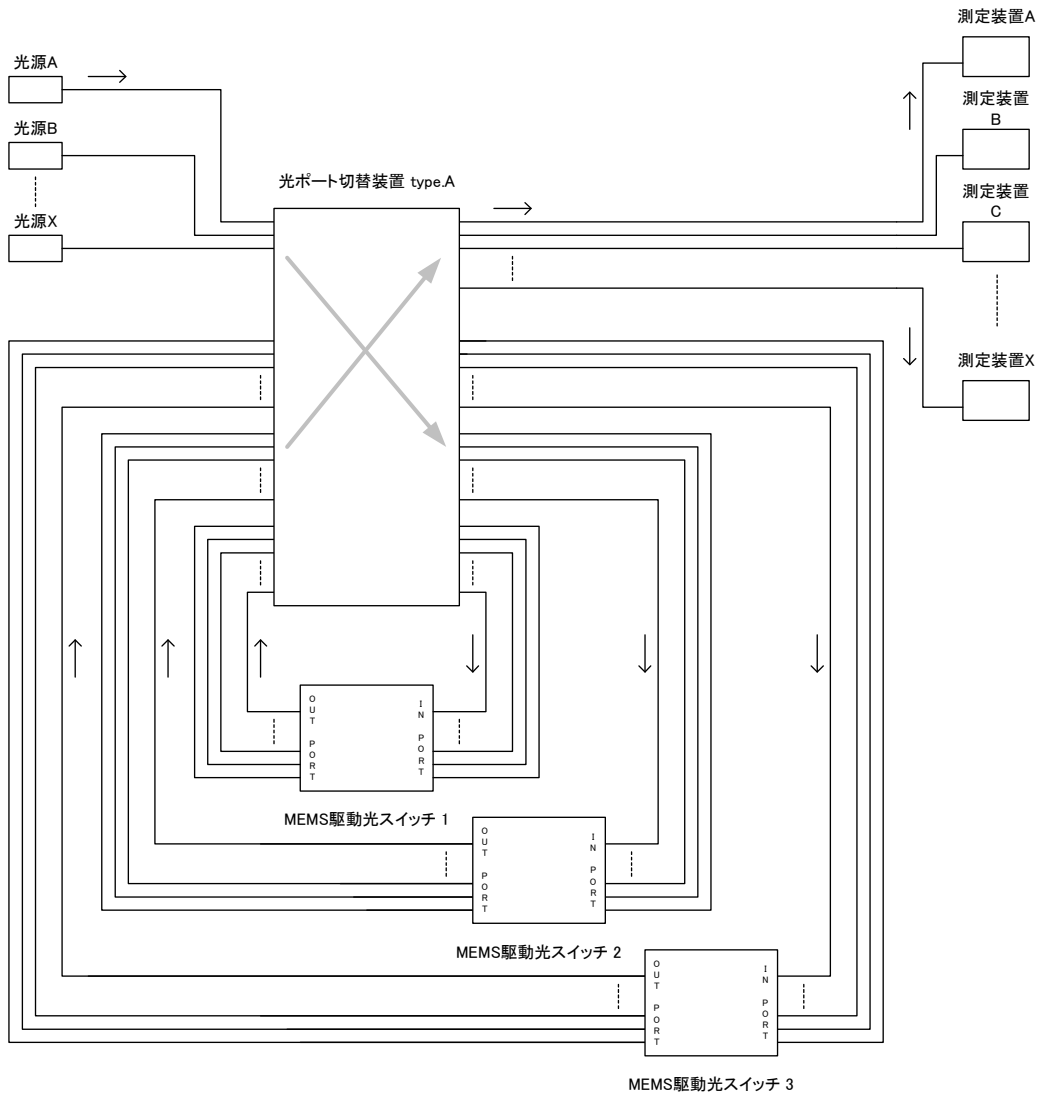


図 4-2-7. MEMS 駆動光スイッチ評価系ブロック図の例 (その 1)

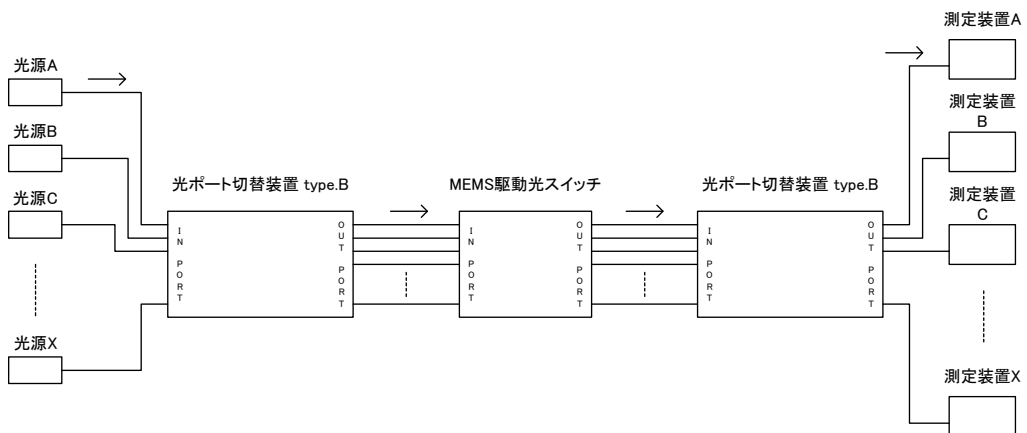


図 4-2-8. MEMS 駆動光スイッチ評価系ブロック図の例 (その 2)

4-2-3 実施計画に対する達成状況

H17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) 方式検討 : MEMS 駆動光スイッチ方式検討
- (2) MEMS 駆動光スイッチ評価設備構築 : H18年度以降に試作する MEMS 駆動光スイッチの機能, 性能を評価するための評価設備構築

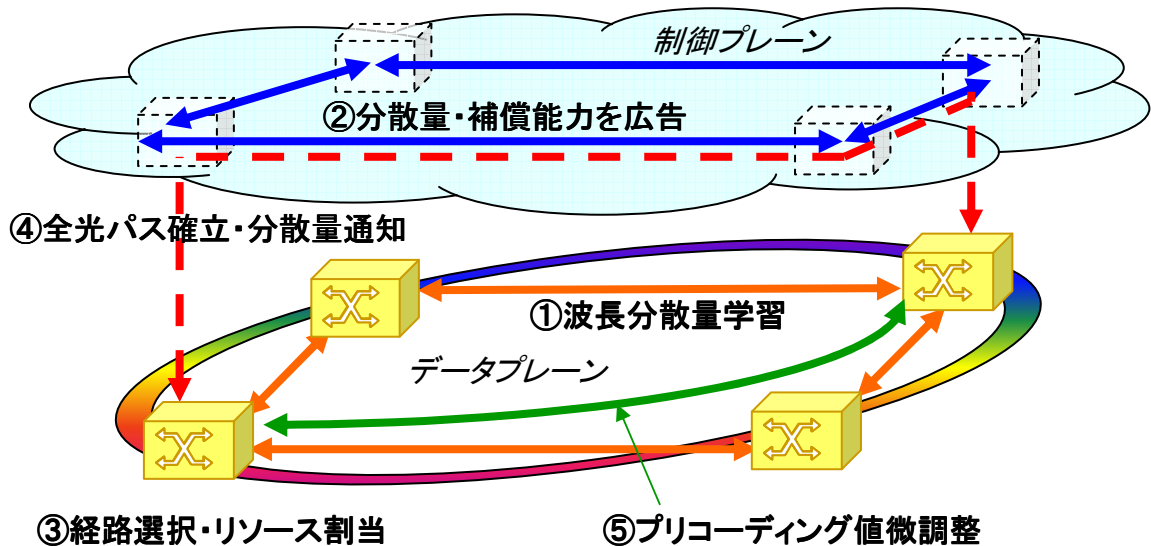
【達成状況】

- (1) MEMS 駆動光スイッチを実現する実装形態・実装手段について検討, 主要構成部品の設計, および半田接合技術についての検討を実施, 達成度: 100%
- (2) MEMS 駆動光スイッチの機能評価設備を構築した, 達成度: 100%

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 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. 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。

H17 年度は、上記ステップのうち①～③に対応した、オプティカルパスレンジングやルーティングプロトコル拡張・経路選択の方式検討を行うと共に、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 I) を実施した。

4-3-2 方式検討の状況

オプティカルパスレンジング実現のための方式検討を実施し、ノード間光リンクの波長分散量の測定についてトポロジー・方向性等を考慮した最適な測定方式を検討するとともに、測定自動化のための光リンク管理プロトコル LMP の拡張方式を検討した。さらに伝送路特性 (波長分散) 情報を広告するためのルーティングプロトコルの拡張方式と、広告された波長分散情報を考慮した経路選択についても検討した。

4-3-2-1 オプティカルパスレンジングの方式

オプティカルパスレンジングは、ノード設置時や新たなリンクの開通時にリンクの波長分散量を学習する機能である。オプティカルパスレンジングを実現するには波長分散量の測定手段と測定手段を制御する手順が必要であり、前者は図 4-3-2 に示すオプティカルパスレンジングカード (ORC) によって、後者は GMPLS の LMP (Link Management Protocol) を拡張した制御プロトコル、LMP-Plus によって実現する。

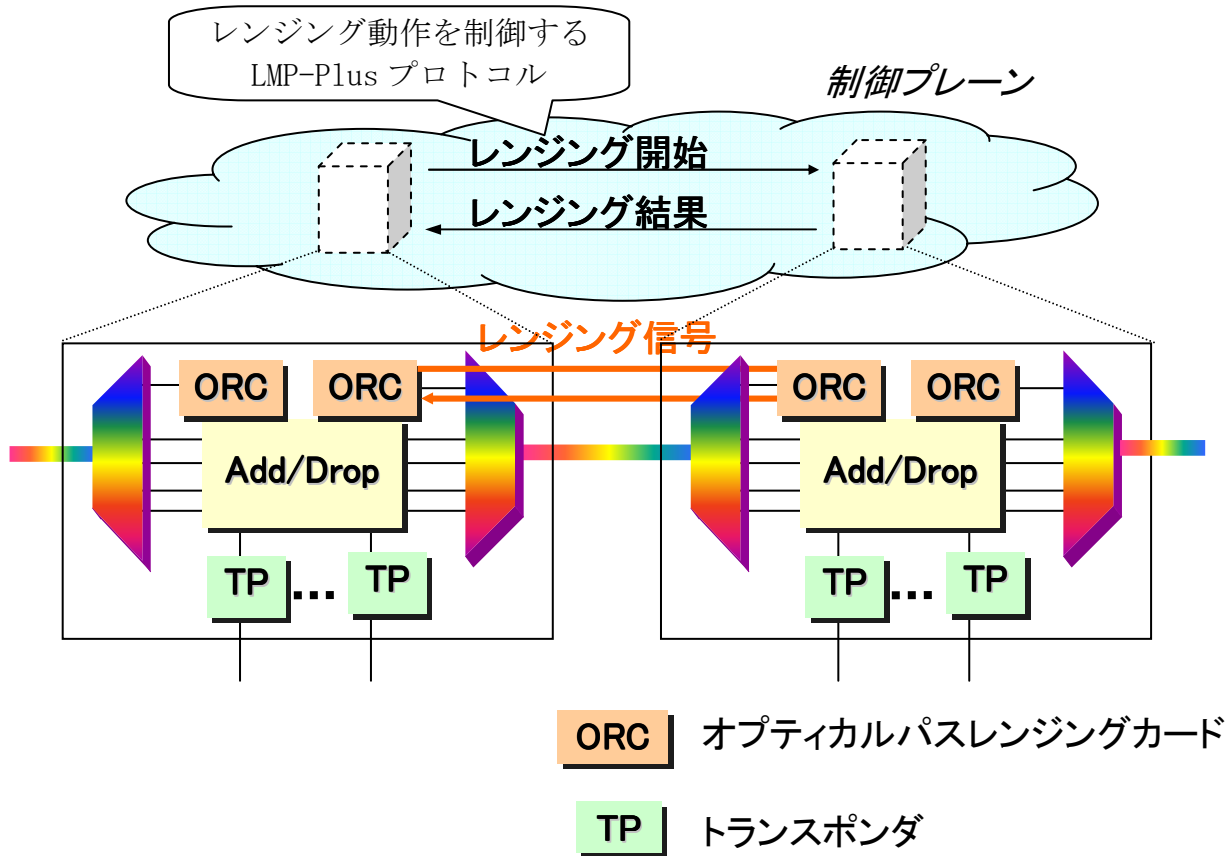


図 4-3-2. オプティカルパスレンジングの動作

(1) 測定方式の検討

オプティカルパスレンジングカードによる測定方式を検討した。

波長分散量は異なる波長により伝送される光信号の伝送遅延の差として定義されるので、オプティカルパスレンジングのレンジング信号として異なる波長の2つの光信号を送信し、受信側で時刻差を計測する方法を考える。送信する光信号の波長を λ_1, λ_2 [nm] (ただし $\lambda_1 < \lambda_2$)、それぞれの受信時刻を t_1, t_2 [ps] とすると、リンクの波長分散 D [ps/nm] は次式で与えられる。

$$D = (t_2 - t_1) / (\lambda_2 - \lambda_1) \dots \dots \dots (1)$$

波長分散測定における誤差について考察する. λ_1, λ_2 が $\pm \Delta \lambda$, t_1, t_2 が $\pm \Delta t$ の誤差を含むとすると, $\lambda_2 - \lambda_1 \gg \Delta \lambda$ の場合, D の測定誤差 $\pm \Delta D$ は次式により表わされる.

$$\Delta D \doteq 2(D \Delta \lambda + \Delta t) / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad \dots \dots \dots (2)$$

SMF (Single Mode Fiber) の波長分散量を $17[\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}]$ として, 測定波長の波長差, リンク距離, 波長および時刻の誤差によって, 波長分散量の誤差がどう変化するか, (2)に基づいて調べる. 図 4-3-3 は測定波長の波長差が 30 nm の場合の波長および時刻の誤差と波長分散量の誤差の関係を表すグラフであり, リンク距離 R を 80 km および $2,000 \text{ km}$ として波長誤差を $0.1 \sim 0.001[\text{nm}]$, 時刻誤差を $100 \sim 10,000[\text{ps}]$ と変化させた場合のプロットを示している. また図 4-3-4 は測定波長の波長差が 2 nm の場合の同様のグラフである.

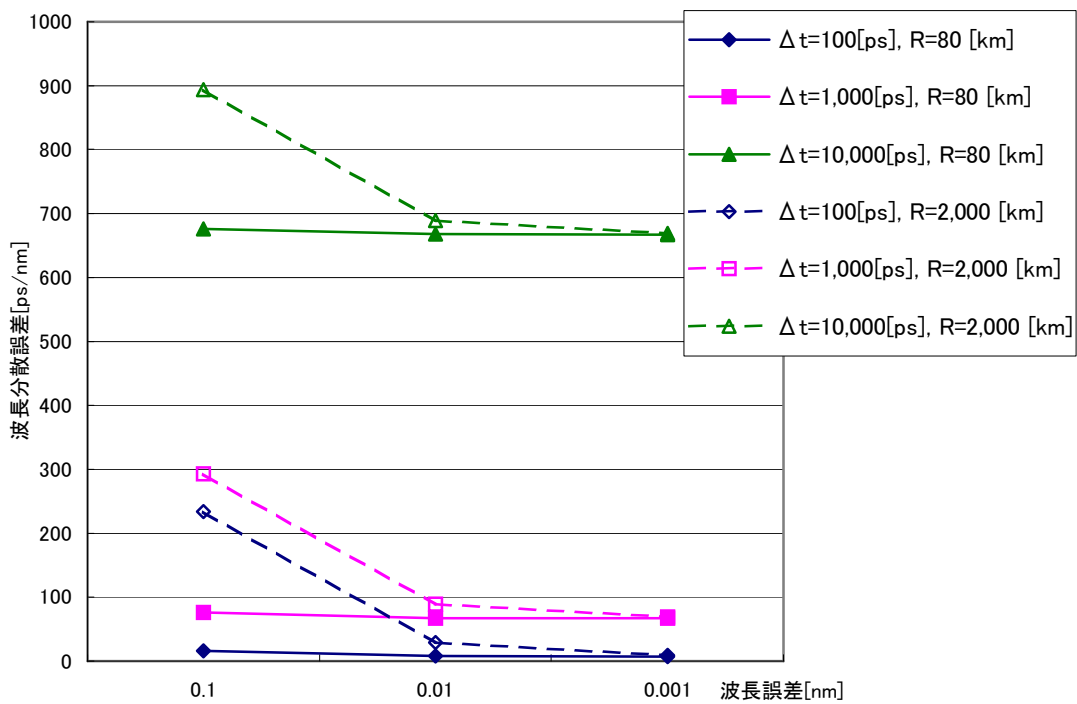


図 4-3-3. 波長差が 30 nm の場合の波長分散誤差

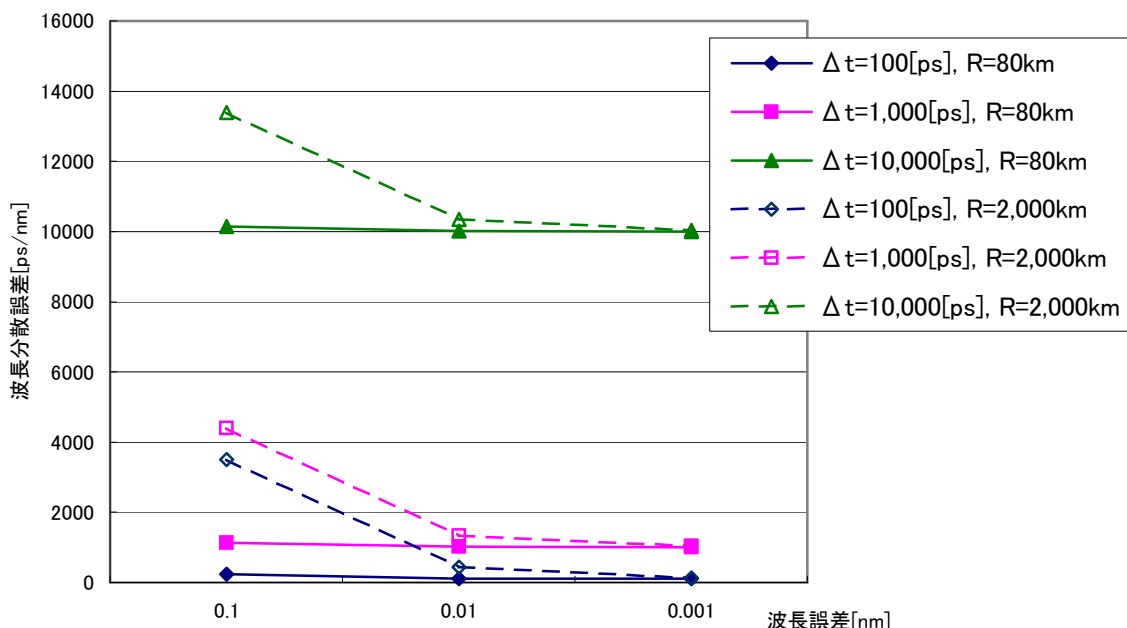


図 4-3-4. 波長差が 2 nm の場合の波長分散誤差

リンク距離が 80 km および 2,000 km の場合の波長分散量の計算値は 1,360[ps/nm] および 34,000[ps/nm] なので、上記グラフから、測定波長の波長差が 30 nm であれば波長精度が 0.01[nm] 以内かつ時刻精度が 1,000[ps] 以内の時に波長分散量を 5% 以下の誤差で測定でき、リンク距離が長い方が相対的な誤差を小さくできることが分かる。一方測定波長の波長差を 2 nm とすると、波長精度および時刻精度を 0.001[nm] および 100[ps] と高めてもリンク距離が 80 km と短い場合は測定値の誤差が 10% を超え、十分な精度で波長分散量を測定することはできない。

以上の検討より、レンジング信号として波長の異なる 2 つの光信号を用いる場合は、波長差を十分大きくし、それに応じた波長精度および時刻精度を確保してリンクの波長分散量を測定する方式が適切であることが導かれた。

(2) LMP-Plus 手順の検討

オプティカルパスレンジングカードの測定動作を制御する LMP の拡張、LMP-Plus の手順について検討した。

上記にて検討したリンク波長分散の測定方法をオプティカルパスレンジングカードから実行するには、LMP-Plus に次の機能を持たせることが必要である。

- ①上位互換性 (LMP-Plus をサポートしない機器と共存できること)
- ②ノード間の測定動作の同期・実行
- ③ノード間の測定結果の通知
- ④測定動作の中継データへの干渉の防止

LMP では制御チャネル管理 (CCM: Control Channel Management) と呼ぶ初期折衝手順が規定されており、ノード間で制御チャネルを確立し、相互にサポート可能なパラメータや機能についての情報を交換する。そこで①の上位互換性については、CCM に隣接ノードがオプティカルパスレンジングを実行可能か否か確認する情報を追加し、可能な場合のみ測定

動作へ進むようにする。

また LMP では、リンク接続性確認 (LV: Link Verification) と呼ぶ手順にて、ノード間のリンクの接続関係を学習したり確認したりする機能が規定されている。LV はデータプレーン上でテスト信号を送信し受信側ノードから受信結果をフィードバックする手順であり、送信側ノードからのテスト信号送信タイミングの通知や受信側ノードによる受信結果の通知を行う LMP のメッセージ・手順が規定されている。オプティカルパスレンジングにおいても、データプレーン上でレンジング信号（波長分散量の測定に用いる信号）を送信し受信結果をフィードバックすることが必要なので、LV と同様の手順を用いることが妥当と考えられる。すなわち、②の測定動作の同期・実行については LMP に LV 類似の手順を追加することで対応する。

さらに LMP は、リンク属性関連付け (LPC: Link Property Correlation) と呼ぶ手順にてノードが持つリンク情報を交換し、相手ノードの情報を学習したり情報の不一致を検出したりする機能をサポートしている。LMP-Plus において LPC に波長分散測定に関連する属性情報を追加すれば、③の測定結果通知をまとめて実行できる。

④の中継データへの干渉の防止についても、LMP にて交換されるリンク情報を参照し、データが通っているリンクに対し誤って波長分散測定を実施することがないようにする。

4-3-2-2 ルーティングプロトコルの拡張

オプティカルパスレンジングを用いて学習したリンクの波長分散量とノードの分散補償能力を広告するよう、GMPLS のルーティングプロトコル OSPF-TE (Open Shortest Path First - Traffic Engineering) を拡張する方法を検討した。

(1) 波長分散量の広告

波長分散量はリンクの属性であるので、GMPLS の Link Protection Type などと同様に、リンク属性を広告する TE LSA (Traffic Engineering Link State Advertisement) の Sub-TLV (Type, Length, Value) として定義することが可能と思われる。よって、この方向で OSPF-TE の拡張を検討する。ただし、波長分散量が異なる光ファイバを束ねて1つの TE-Link としないよう注意が必要である。

(2) 分散補償能力の広告

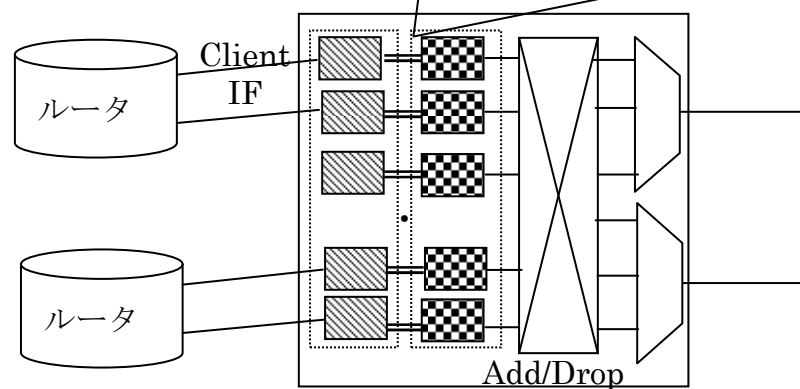
ノードが具備する分散フリートランスポンダの分散補償能力の広告は、補償能力の異なるノードが混在する場合などにおいて、分散フリートランスポンダの割当を最適化するのに有効である。ただし分散補償能力の広告に当たっては、ノード内における分散フリートランスポンダの配置を考慮する必要がある。図 4-3-5 に2つの選択肢を示す。図の構成(a)では、分散フリートランスポンダとクライアント装置を収容するリンクが1:1に対応するので、分散補償能力はクライアント収容リンクの属性として広告できる。一方、構成(b)では分散フリートランスポンダがクライアント側・ネットワーク側ともにスイッチを介して各リンクのインタフェースに接続されるため、分散フリートランスポンダとリンクの接続は固定でなく、分散補償能力をいずれかのリンクの属性として広告することは困難である。よって構成(b)の場合は、分散補償能力をノードの属性として広告することが適切と考えられる。

なお構成(a)は、光パスが固定的に設定される現在の WDM ノードで一般的な構成であるが、クライアント IF とネットワーク側の分散フリートランスポンダとの接続が固定的であるため、動的な光パスを収容するには柔軟性に欠けるという問題がある。すなわち、分散補償能力が低い分散フリートランスポンダと高い分散フリートランスポンダの両者をノード内に具備し、近距離で波長分散量の小さい光パスには分散補償能力が低い分散フリートラ

ンスポンダを適用し、長距離で波長分散量の大きい光パスには分散補償能力が高い分散フリートランスポンダを適用することで、波長分散量に応じた分散フリートランスポンダの使い分けを行おうとしても、構成(a)ではクライアント IF が任意の分散フリートランスポンダに接続できないため困難である。構成(b)はクライアント IF と任意の分散フリートランスポンダの接続が可能なので、そのような問題は起きない。動的な光パス確立をサポートする将来の WDM ノードでは、構成(b)が適用される可能性がある。

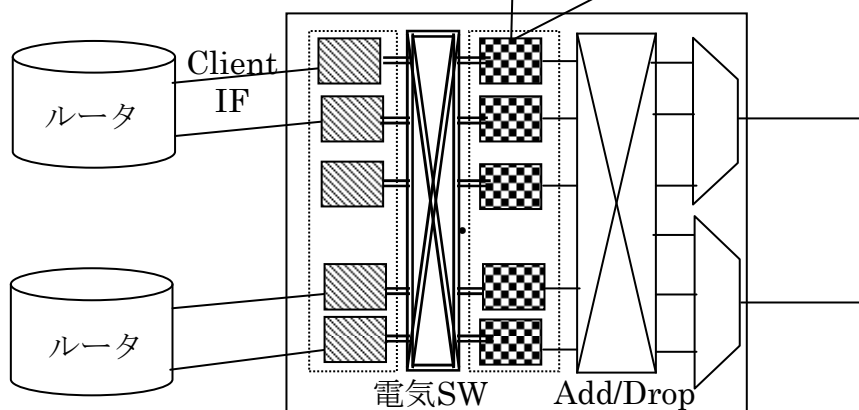
以上より、分散補償能力の広告については、構成(a)・構成(b)両方に対応することが望ましく、リンク属性を広告する TE LSA に分散補償能力の情報を追加する場合と、ノード毎の広告情報に分散補償能力の情報を追加する場合のそれぞれに適した OSPF-TE 拡張方法を検討していく。

分散フリートランスポンダと Client リンクが 1:1 に対応するので分散補償能力を Client リンク属性で広告



(a) Client と分散フリートランスポンダの接続が固定

分散フリートランスポンダに対応付け可能なリンクが無い



(b) Client と分散フリートランスポンダの接続が自由

Client IF 終端部
 分散フリートランスポンダ

図 4-3-5. 分散補償能力の広告方法

(3) プロトコル性能への影響

最後に、OSPF-Plus のルーティングプロトコル性能について検討した。

測定・広告されるリンク波長分散量は動的には変化せず測定元のノードから定期的に広告されるだけなので、ルーティングプロトコル性能への影響は少ない。一方、分散補償能力は分散フリースポンドの使用状況に応じて動的に変動する。使用状況が変動する要因は光パスの確立・解放であり、その時には TE LSA によって広告されるリンク帯域情報も変動する。よって OSPF-TE に分散補償能力の情報を追加しても LSA update パケット送信回数は増加せず、LSA update パケットにおいて、TE LSA にて分散補償能力を広告する場合は TE LSA 長が、またノード毎の広告情報によって分散補償能力を広告する場合はその広告情報が増大するに留まる。よって、OSPF-TE にリンク波長分散量と分散補償能力の情報を追加することによるルーティングプロトコル性能への影響は少ないと考えられる。

4-3-2-3 波長分散を考慮した経路選択

光パス確立の要求に応じて経路を選択する際、OSPF-Plus にて広告されたリンクの波長分散量をリンクコストとして Dijkstra のアルゴリズムを適用すれば最小分散経路が得られ、複数の光ファイバ種別が混在する光ネットワークにおいて低分散の経路を選択するのに有用である。また選択した経路にわたるリンク波長分散量の累計は光パス全体の波長分散量を表わし、分散フリースポンドにおけるプリコーディングの初期設定に適用できる。

上記より、複数の光ファイバ種別が混在する全光ネットワークへ GMPLS-Plus を適用し最小分散経路を選択可能にするこの効果を評価した。

図 4-3-6 に対象ネットワークの構成を示す。それぞれ 10 ノードから成る全光リングネットワークが全光クロスコネクタを介して 2 階層に接続され、ノード間リンクの光ファイバ種別は SMF (Single Mode Fiber) ないし NZF (Non-Zero dispersion shifted Fiber) としている。

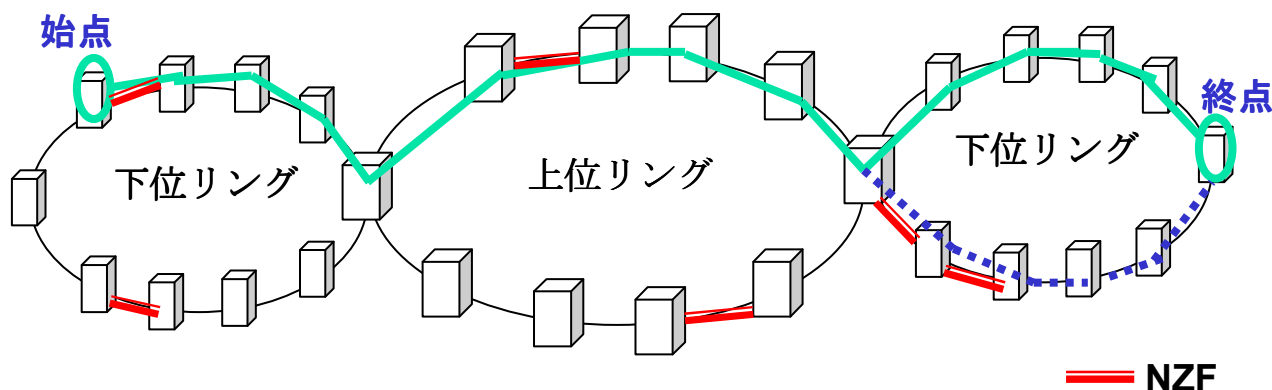


図 4-3-6. ネットワークモデル

下位リングのノードから他の下位リングのノードへの全光パス確立において、GMPLS-Plus を適用するとリンクの波長分散量が前もって広告されるため経路長が長くても波長分散量の小さい経路を選択可能だが、GMPLS-Plus を適用しないと常に最短経路が選択される。

最短経路 (図では MinLength) および最小分散経路 (図では MinDispersion) を通る光パスの波長分散量の平均と分布をシミュレーションによって求めた結果を、図 4-3-7 および図 4-3-8 に示す。シミュレーションには次の条件を用いた。

- ・NZF リンクの波長分散量は 227 ps/nm, SMF リンクの波長分散量は 850 ps/nm とした. これは 50 km の光ファイバ長に相当する.
- ・各リングにおいてランダムに選択した NZF, 残るリンクを SMF とした. NZF リンクの割合が 10%, 20%, 30%, 40%, 50% それぞれの場合に, 1,000 通りの NZF の配置についてシミュレーションを行った.
- ・左端の下位リングのノード (全光クロスコネクタを除く) と右端の下位リングのノード (全光クロスコネクタを除く) をランダムに選択し, 両者の間の光パス設定要求が与えられたものとして経路を選択した. 光パス設定要求は, NZF の各配置毎に 20 万回与えた.
- ・光パス設定要求に対する経路選択アルゴリズムとしては, 光パス端点ノード間を結ぶリンクの数を最小にする最短経路と, 経路全体にわたる波長分散量を最小にする最小分散経路の 2 通りを適用した.

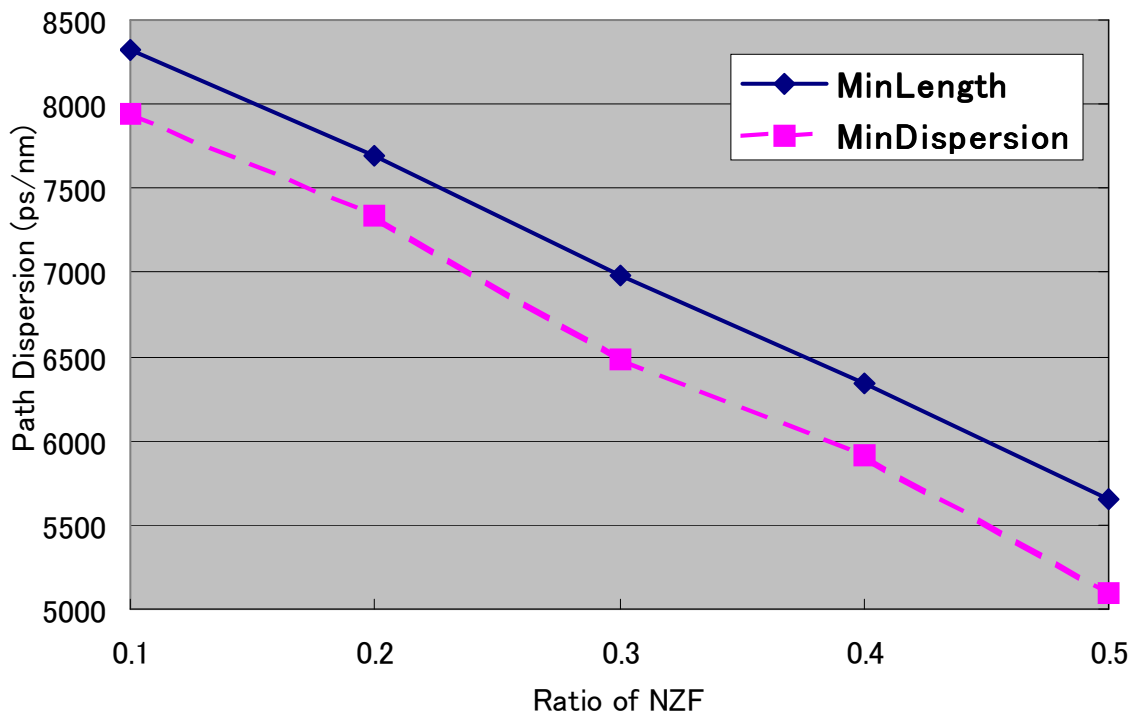


図 4-3-7. 光パスの波長分散量の平均

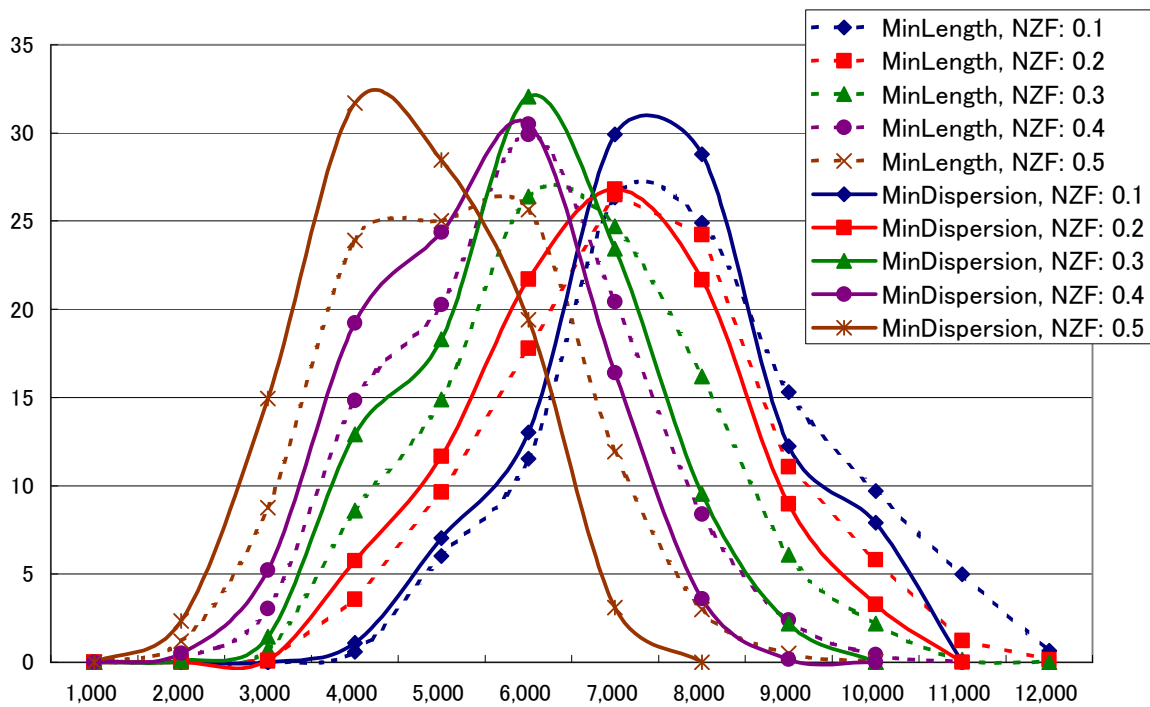


図 4-3-8. 光パスの波長分散量の分布

図 4-3-7 より、波長分散量の平均は最小分散経路が最短経路に比べ 445 ps/nm 小さく、NZF の割合が増えると両者の差は増大する傾向にあるが、NZF の割合が少ない場合でも一定の差がある。また図 4-3-8 より、最小分散経路に比べ最短経路は波長分散量が高域まで分布している。よって波長分散量が高域にかかる光パス確立要求が分散補償能力不足より呼損になるとすれば、最小分散経路は最短経路に比べ呼損率を低下させる効果がある。例えば分散量 10,000 ps/nm 以上を呼損とすると、NZF の割合が 10% の場合、最短経路の呼損率 31% に対し最小分散経路は 20% である。言い換えれば、最小分散経路は呼損を生じさせない分散補償能力の最小値を 1,000 ps/nm 程度低下させる効果があることが分かった。

4-3-3 プラットフォーム構築の状況

プラットフォーム構築（フェーズ I）として、H18 年度以降に試作するオプティカルパスレンジング機能及び分散フリー全光パス最適設定機能を評価するための S/W プラットフォームの構築に着手した。評価用 S/W プラットフォームの機能構成を図 4-3-9 に示し、それぞれに要求される機能仕様を記述する。

(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システムを使用するユーザが、提供される各機能を制御・管理するためのインタフェース（Web インタフェースやコマンドラインインタフェース等）を提供する。

(2) レンジング制御部

リンクの波長分散量を測定するオプティカルパスレンジング機能の制御を実施する。レンジング制御部は、LMP を拡張した LMP-Plus プロトコルを使用して、隣接ノードとの間でのレンジング制御のための制御チャネルを確立する。制御チャネルが確立すると、オプティカルパスレンジングカードを制御するオプティカルパスレンジングカード制御部を制御

して、隣接ノードとの間の波長分散量の測定を実施する。

(3) 経路選択部

分散フリー全光パスの確立要求があると、経路選択部における経路選択アルゴリズムにおいて最適な経路（波長分散量が最小な経路等）を選択する。また、全光パスの高信頼化のため、光ファイバ断などの障害発生時に現用系パスから切替えるための予備系パスについても、様々な障害切替え方式（プロテクション、レストレーションなど）に対応した最適な経路を選択する。

(4) 全光パス制御部

経路選択部において選択された経路に従って、RSVP-TE を拡張した RSVP-Plus プロトコルを使用して分散フリーな全光パスを設定する。

(5) ルーティング制御部

レンジング制御部により測定したリンクの波長分散量とノード（分散フリーストランスポンダ）の分散補償能力を、OSPF-TE を拡張した OSPF-Plus プロトコルを使用して広告する。

(6) GMPLS-Plus プロトコル部

GMPLS プロトコルを、自律適応型ネットワーク制御モジュールにて使用するために拡張したプロトコル部であり、リンクの波長分散量やノードの分散補償能力を広告するためにルーティング機能を拡張した OSPF-Plus、分散フリーな全光パスを設定するためにシグナリング機能を拡張した RSVP-Plus、オプティカルパスレンジング機能を実現するためにリンク管理機能を拡張した LMP-Plus からなる。

(7) H/W 制御部

各種 H/W リソースを制御するための個別の制御部を持つ。

H17 年度は、評価用 S/W プラットフォームに要求される上記機能仕様を実現するための基本設計を実施し、リアルタイム OS 上での各種 GMPLS プロトコル基本動作を確認した。

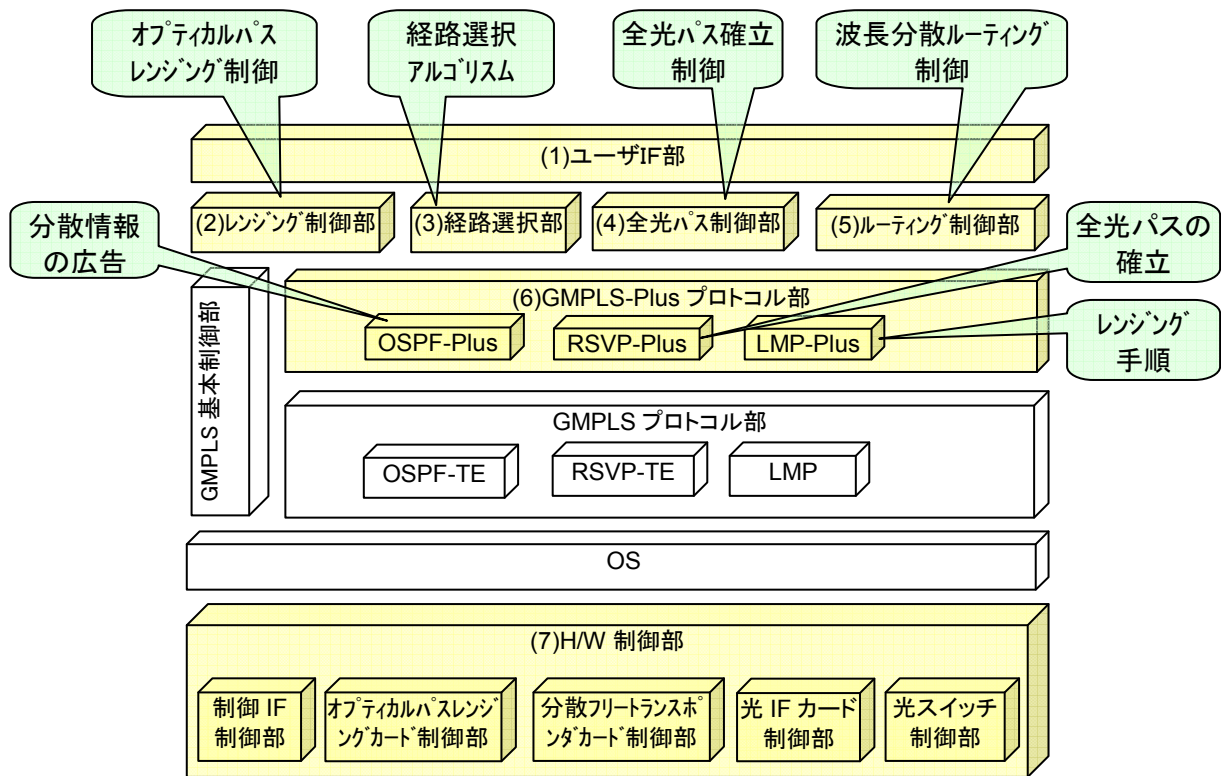


図 4-3-9. 評価用 S/W プラットフォームの機能構成

4-3-4 達成状況

上記より、H17 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) 方式検討：オプティカルパスレンズ機能実現のための方式検討
- (2) プラットフォーム構築（フェーズ I）：H18 年度以降に試作するオプティカルパスレンズ機能及び分散フリー全光パス最適設定機能実現のためのソフトウェアを実装するベースとなる OS，ミドルウェアプラットフォームの製作

【達成状況】

(1) 方式検討：オプティカルパスレンズ機能実現のための方式検討を実施。ノード間光リンクの波長分散量の測定について誤差を考慮した最適な測定方式を検討するとともに、測定自動化のための光リンク管理プロトコルの拡張方式を検討。さらに伝送路特性（分散）情報を広告するためのルーティングプロトコル拡張方式について検討を行った。達成度：100%。

(2) プラットフォーム構築（フェーズ I）：オプティカルパスレンズ機能及び分散フリー全光パス最適設定機能実現のためのプラットフォーム構築（フェーズ I）に着手。今年度は、プラットフォームに要求される機能仕様を明確化するとともに、基本設計を実施し、OS，ミドルウェアが動作するプラットフォーム製作を実施。達成度：100%。

4-4 総括

(ア) 分散フリートランスポンダの研究開発

H17 年度では次年度以降の方式詳細検討へ向けた S/W シミュレータ環境の立ち上げを開始するとともに、分散フリートランスポンダカードを実機評価する際に必要となる H/W シミュレータ環境の一環として端局評価設備開発を行った。

作成した基本シミュレータを元に、各変調方式に対するプリコーディング部必要タップ数見積もりのための必要データ長についての検討を行った結果、10Gb/sにて40000ps/nmという分散の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。したがって、実使用上最適な方式の決定には、実現可能なLSI技術と伝送時の得失、トランスポンダ実現上の得失などの各パラメータをトータルに評価することの重要となる。また、H/Wシミュレータとしては、分散フリー端局装置評価設備開発(フェーズI)として、H18年度以降に試作する分散フリートランスポンダを評価するための架、シェルフ、制御用カードにて構成される評価設備の構築を実施した。

次年度においては、今年度立ち上げ開始したS/Wシミュレータの機能拡大により詳細なプリコーディング回路方式検討を行うとともに、H/Wシミュレータに供する分散フリートランスポンダ機能部設計・試作を行う予定である。

(イ) MEMS 駆動光スイッチの研究開発

LSIライクなスケーラビリティ・量産性と高性能・小型・高信頼を両立させ、光レイヤ処理の適用範囲を拡大するべく、MEMS駆動光スイッチの開発を開始した。本年度は、MEMS駆動光スイッチを実現する実装形態・実装手段について検討を行い、主要部品である圧電素子の設計、および半田接合技術についての検討を実施した。駆動機構である圧電素子については圧電バイモルフ対による構成を検討し、0.7mm×0.3mm×2mm程度に素子を小型化できる見込を得た。また、半田接合技術については、圧電バイモルフ対を各ポイントにおいて半田接合することにより素子コストの低減、スケーラビリティの向上、一括プロセスによる低コスト実装を目標とするコンセプトについて検討を行った。またそのプロセスを用いて半田接合実験を行い、良好な接合が可能であることを確認した。

また、本MEMS駆動光スイッチを評価するための評価設備の構築も行った。以後、本評価系を用いてMEMS駆動光スイッチの評価を実施する予定である。

H18年度の開発においては、これらを踏まえ、より詳細な検討を行う予定である。

(ウ) 自律適応型ネットワーク制御モジュールの研究開発

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

H17年度は、上記のステップのうち①~③に対応した、オプティカルパスレンジングやルーティングプロトコル拡張・経路選択の方式検討を行うと共に、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I)を実施した。その結果、オプティカルパスレンジングにおける波長分散量測定に必要な波長やクロックの精度が明確になり、LMP拡張・OSPF-TE拡張についてもプロトコルの拡張箇所を特定できた。さらに波長分散情報

を広告することで可能になる光パスの最小分散経路の選択について簡単なモデルを用いて評価し、最短経路を選択する場合に比べ光パス全体の波長分散量を低減できることを示した。さらにプラットフォーム構築（フェーズ I）として、評価用 S/W プラットフォームの機能構成を定めて機能仕様を明確化すると共に、その機能仕様を実現するための基本設計を実施し、リアルタイム OS 上にて各種 GMPLS プロトコルの基本動作を確認した。

今後は上記のステップ④、⑤に対応した検討、および GMPLS-Plus のプロトコル拡張の実装設計を行う。そして評価用 S/W プラットフォームへの実装を進める。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

一般口頭発表 2件

[1] 妹尾尚一郎, 馬場義昌, 水落隆司, 杉原隆嗣, 本島邦明, プリディストーションによって設定自動化を実現する全光ネットワークの提案, 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, 信学技報 PN2005-107, 2006年3月

[2] 水落隆司, ダイナミック光ネットワークにおける電気信号処理技術の進展, 電子情報通信学会総合大会 BP-4-5, 2006年3月

参考文献

- [1] M. Mezhoudi, et al., "The value of multiple degree ROADMs on metropolitan network economics," OFC/NFOEC2006, NThA4, 2006.
- [2] I. Redpath, et al., "Metro WDM Networks Develop an Edge," OFC/NFOEC2006, NThC1, 2006.
- [3] B. Basch, et al., "DWDM System Architecture and Design Trade-Offs," OFC/NFOEC2006, NThC2, 2006.
- [4] D. McGhan, "Electronic Dispersion Compensation," OFC/NFOEC2006, OWK1, 2006.
- [5] R. -J. Essiambre, et al., "Impact of Fiber Nonlinearities on Advanced Modulation Formats Using Electronic Pre-distortion," OFC/NFOEC2006, OWB1, 2006.
- [6] R. I. Killey, et al., "Electronic dispersion compensation by signal predistortion," OFC/NFOEC2006, OWB3, 2006.
- [7] A. Klekamp, et al., "Nonlinear Limitations of Electronic Dispersion Pre-Compensation by Intrachannel Effects," OFC/NFOEC2006, OWR1, 2006.
- [8] S. Wada, et al., "Compensation for PMD-induced time-variant waveform distortions in 43-Gbit/s NRZ transmission by ultra-wideband electrical equalizer module," OFC/NFOEC2006, OWE2, 2006.
- [9] J. D. Downie, et al., "Flexible 10.7 Gb/s DWDM transmission over up to 1200 km without optical in-line or post-compensation of dispersion using MLSE-EDC," OFC/NFOEC2006, JThB5, 2006.
- [10] N. Alic, et al., "Experimental Demonstration of 10 Gb/s NRZ Extended Dispersion-Limited Reach over 600km-SMF Link without Optical Dispersion Compensation," OFC/NFOEC2006, OWB7, 2006.
- [11] A. Ghiasi, et al., "Experimental Results of EDC Based Receivers for 2400 ps/nm at 10.7 Gb/s for Emerging Telecom Standards," OFC/NFOEC2006, OTuE3, 2006.
- [12] L. Eldada, et al., "Intelligent Optical Cross-Connect Subsystem on a Chip," OFC' 05, NTuL2(2005).
- [13] T. Goh, et al., "Low-loss and high-extinction-ratio silica-based strictly nonblocking 16x16 thermo-optic matrix switch," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 6, pp. 810-812 (1998).
- [14] V. A. Aksyuk, et al., "238 x 238 micromechanical optical cross connect" IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, no. 4, pp. 587-589 (2003).
- [15] 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.
- [16] E. Mannie, ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture," IETF RFC 3945, Oct. 2004.
- [17] J. Lang, ed., "Link Management Protocol (LMP)," IETF RFC 4204, Oct. 2005.
- [18] K. Kompella and Y. Rekhter, ed., "OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching," IETF RFC 4203, Oct. 2005.
- [19] L. Berger, ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions," IETF RFC 3473, Jan. 2003.
- [20] OIF, "2005 OIF Worldwide Interoperability Demonstration: Dynamic Setup of Ethernet Services over Global Optical Networks," OIF White Paper, 2005.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] J. Strand and A. Chiu, ed., “Impairments and Other Constraints on Optical Layer Routing,” IETF RFC 4054, May 2005.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarengi, and P. Castoldi, “A Novel Signaling Approach to Encompass Physical Impairments,” Globecom 2004 Workshop, Dallas, USA, Nov. 2004.
- [28] 斎藤他, “跳ね橋型光スイッチにおける加工・実装技術” 信学技報, LQE2003-29, 2003年8月.
- [29] T. Saito et al., “Mechanical optical switch using flexible polymeric waveguide” OFC2002, Paper TuC2(2002).