

超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発 (課題 I (b)光多値伝送向け高性能信号処理技術)

研究代表者 坂本 健一(日立製作所)

研究分担者 菊池 信彦(日立製作所)

石井 啓之(日本電信電話株式会社)

研究開発期間 平成24年～27年(3年間)

目次

- 背景
- 研究開発の内容
- 研究開発の成果
 - ア) 400Gbps多値伝送技術
 - イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術
 - ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術
- 成果展開と波及創出の取り組み
- まとめ

目次

- **背景**
- **研究開発の内容**
- **研究開発の成果**
 - ア) 400Gbps多値伝送技術
 - イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術
 - ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術
- **成果展開と波及創出の取り組み**
- **まとめ**

1.背景 - 通信トラフィックの拡大と消費電力

- インターネットの通信トラフィックは今後も指数関数的に増大
- ネットワーク機器の消費電力の急激な増加が予測
(うち50%がアクセス系由来、さらにその約2割を光IFが占める)
→ 省電力かつ高速大容量の光IFの開発が重要

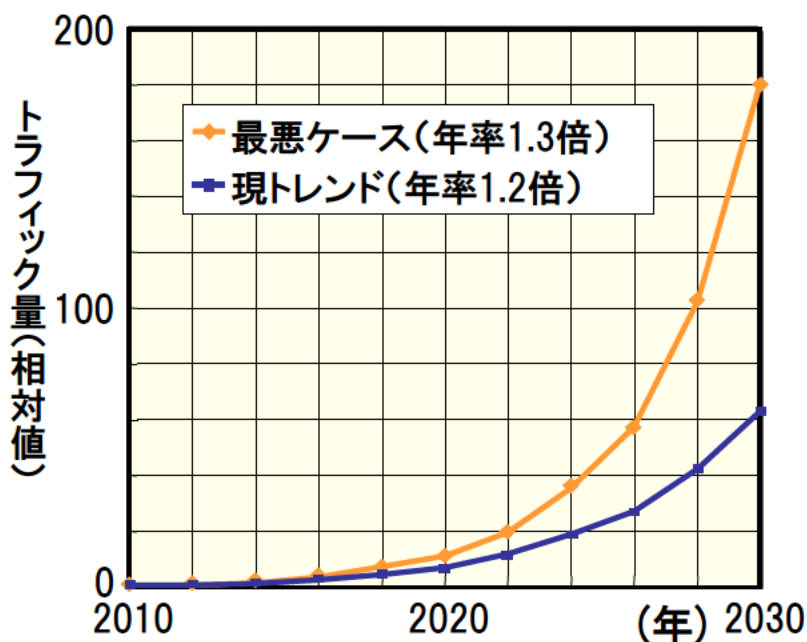


図. インターネットトラフィック量の予測

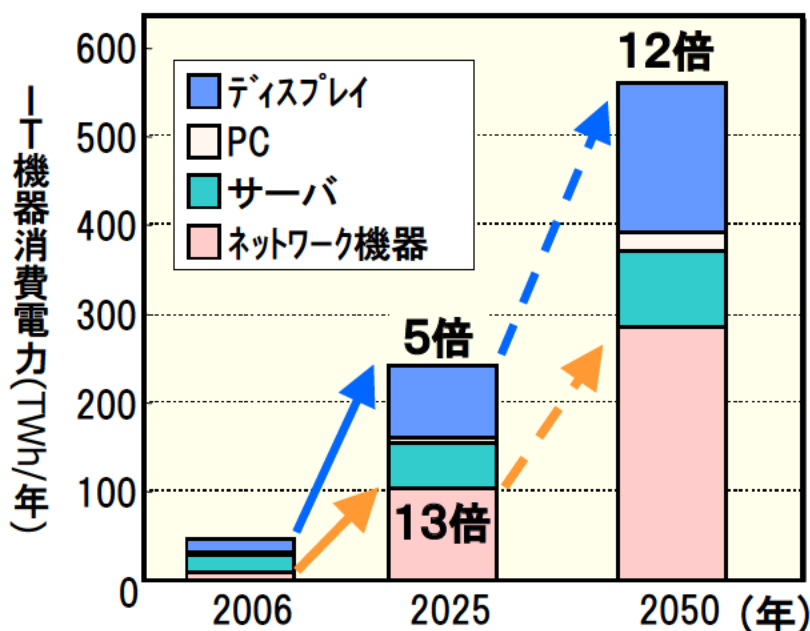


図. IT機器の消費電力の予測 (最悪時)

1.背景 - 従来技術と400G化への課題

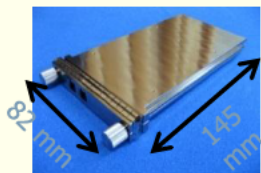
■ 100Gbit/s光インタフェース

- 短距離用途(～40km)
- 長距離用途(数100～数1000km)

- … 100Gイーサ
- … 100Gコヒーレント方式

短距離向け(100Gイーサ)

- サイズ: 145 x 82 mm(CFP)
- 消費電力: ～35W
- 構成: 25Gbps x 4波長
- 方式: 強度変調+直接検波
- 伝送距離: 10～40km(LR4/ER4)



… シンプルな構成
だが高速化難

長距離向け(100Gコヒーレント)

- サイズ: 177 x 127 mm
- 消費電力: 50～80W
- 構成: 100Gbps x 1波長
- 方式: 偏波多重QPSK(100Gbps)
+コヒーレント検波
- 伝送距離: ～数1000km



… 性能は高いが、複
雑・高価・消費電力大

図. 従来の100G光インタフェースの例

■ 次世代短距離400G光インタフェースへの要求

- 大容量化 … 4倍の高速化
- 小型化 … 光IFの実装密度がIT機器大容量化のボトルネック
- 省電力化 … IT機器省電力化に必須、発熱で実装数に制限

1.背景 - 本研究の目標課題

■ 従来方式の拡張による400Gの実現

案1)短距離IFの波長数増(25Gx4波長→25Gx16波長)

- 波長数に比例してコスト/消費電力が増加
- 光源の波長間隔が狭く実用性低下

案2)100GコヒーレントIFの4波長化

- 偏波多重のため高周波・光部品数大、小型・低コスト化が困難
- 消費電力大(当初、約80Wx4)、低消費電力化に限界

→ 400G化には大きな技術革新が必要

■ 本研究の目標課題 「400G級イーサ向け省電力光多値伝送技術の開発」

- 目標伝送距離: 40km (IEEE標準化のLANの最長距離)
- 消費電力目標: 70W (従来 $\frac{1}{2}$ 以下)

目次

- 背景
- 研究開発の内容
- 研究開発の成果
 - ア) 400Gbps多値伝送技術
 - イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術
 - ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術
- 成果展開と波及創出の取り組み
- まとめ

2. 研究開発の内容 - 本研究のアプローチ

- 短距離伝送に適した簡易な400G光多値伝送技術を開発する
 - 1波長100G伝送 ... 波長数を1/4に低減
 - 光遅延検波16値伝送方式 ... 偏波多重不要、部品数~1/2
 - 半導体集積デバイス ... 小型・低コスト・低消費電力を図る
- 上記の検証に向け、リアルタイム100G送受信器を試作、さらに4波長化した400G光インタフェースを実証する

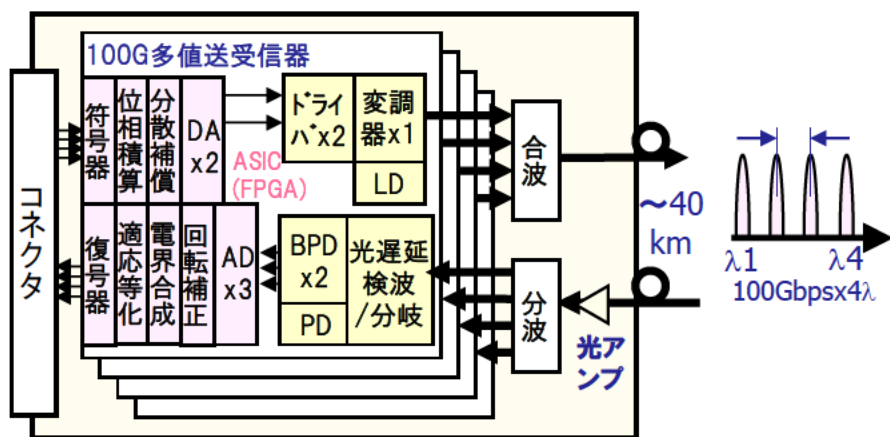


図. 提案する400GIFの構成 (100G直接検波x4λ)

【目標】

消費電力: 70W (ASIC実装時、現行~1/2)
サイズ: CFPx2倍相当 (現行~1/2)

【特徴】

- ・偏波多重を使わず、光部品や信号処理回路量をコヒーレント方式のおよそ1/2に縮減
- ・送信側デジタル信号処理(位相予積算・分散予等化)で伝送劣化を低減
- ・半導体集積デバイス利用で小型・省電力化

2.研究開発の内容 - 研究の体制

Ⅰ アクセスネットワーク高速大容量化・低消費電力化技術

(b) 光多値伝送向け高性能信号処理技術（本研究）

ア) 400Gbps多値伝送技術(日立)

【概要】1波長1偏波100G多値送受信器と400Gインタフェース(100G×4λ)の開発と実証

イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術(NTT)

【概要】小型・省電力の光送信インタフェース・光受信インタフェース集積化技術の開発と実証

ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術(日立)

【概要】半導体集積デバイス利用上の固有課題を抽出、補償方式などの接続技術を開発

目次

- 背景
- 研究開発の内容
- 研究開発の成果
 - ア) 400Gbps多値伝送技術
 - イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術
 - ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術
- 成果展開と波及創出の取り組み
- まとめ

3. 研究開発の成果 - 高精度多値変調

- 省電力の半導体光変調器を用いた高精度多値変調技術を開発
 - 変調歪の原因(消光劣化、変調非対称性)を究明
 - デジタル補正回路を考案
 - 336Gbps 偏波多重64QAM信号を生成、理論感度に近い性能と40km伝送を実証

→ 半導体変調器による64QAM伝送は世界初
H26/3報道発表「半導体64値変調」、日刊工業紙に掲載

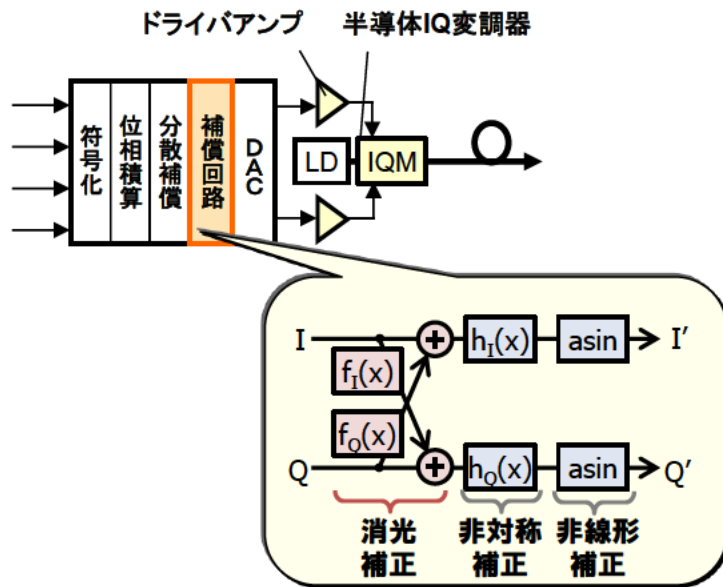


図1. 半導体光IQ変調器の補正回路

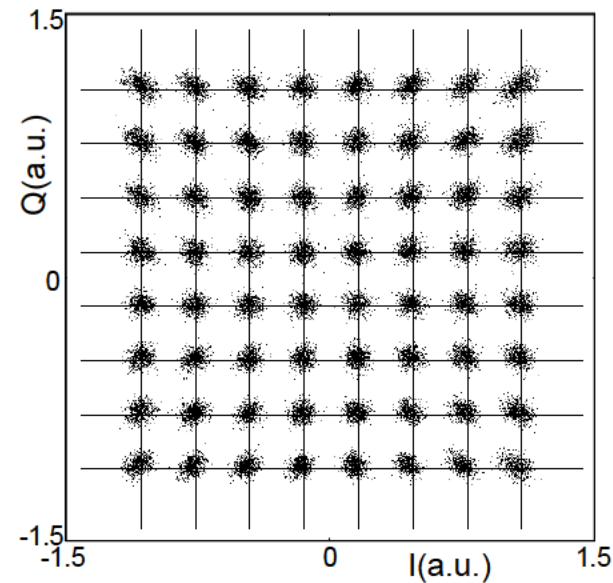


図4. 市販半導体変調器を用いた28GBaud 64QAM信号(8回平均)

3. 研究開発の成果 - 100G送受信器の試作

- FPGAを用いてリアルタイム1波長1偏波省電力100G多値送受信機を試作
 - 課題アの信号処理、課題イの半導体デバイス、課題ウの補償技術を接続
 - 変調方式: 単一偏波28GBaud 16QAM/16APSK(1波長あたり112Gbit/s)
 - 受信方式: 光遅延/強度検波+デジタル信号処理
- ほぼ全信号処理をFPGAに実装しリアルタイム100G送受信動作を確認
 - 光遅延検波を用いた100Gリアルタイム送受信器の試作は世界初

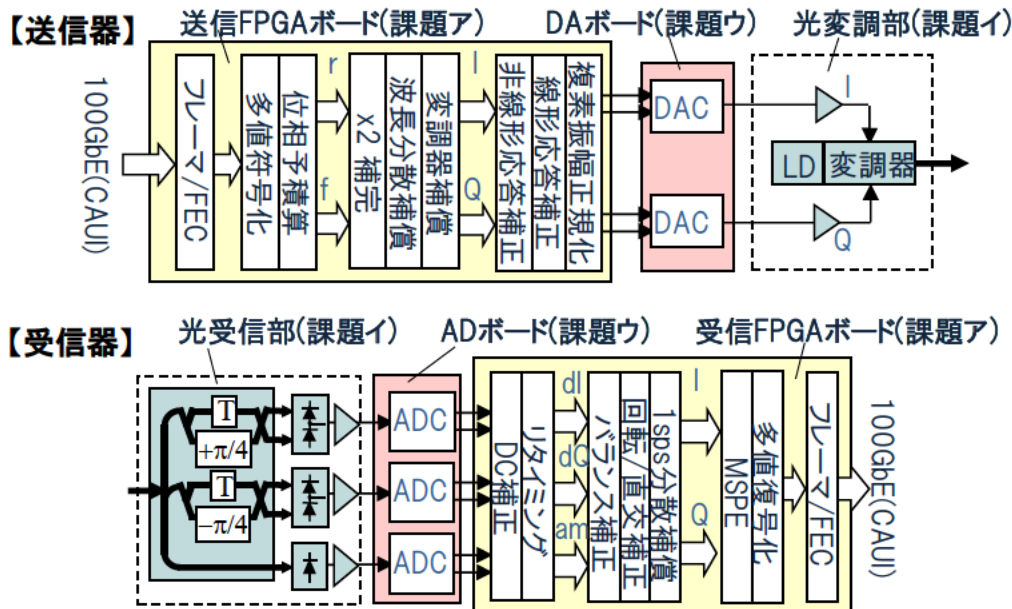


図1. 試作光多値送受信器の構成(1波長、112Gbps分)

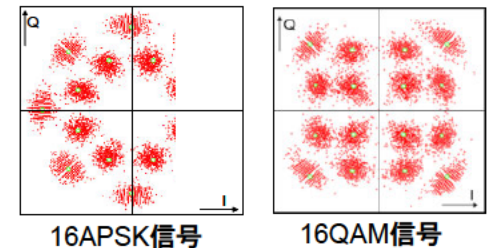
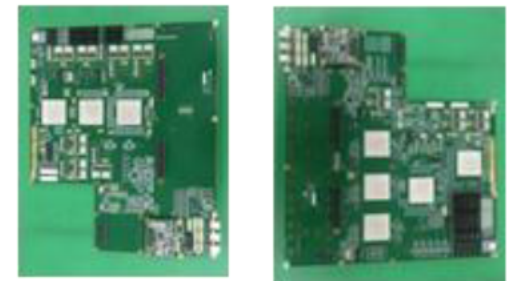


図2. 受信信号点配置の例



送信ボード (Virtex-7x3個) 受信ボード (同、x5個)

図3. 試作したFPGAボード

3. 研究開発の成果 - 400G伝送実験

- 100G信号を4波長多重し、400G多値インタフェースを実現
 - 光ファイバ40km伝送後、全波長で誤り率 $<10^{-3}$ を確認
 - ASIC化時の回路規模・消費電力は $\sim 3\text{MGate}, 16.5\text{W/ch}$ の見積もり
 - 当初目標(70W, サイズCFP $\times 2$)を達成
- 実用性検証のため、H27/3 札幌市に現場試験を実施
 - 448Gbit/s信号のビル間既設ファイバ18kmの伝送試験に成功
 - H27/3報道発表「データセンタ向け400G伝送」、日経等5紙に掲載

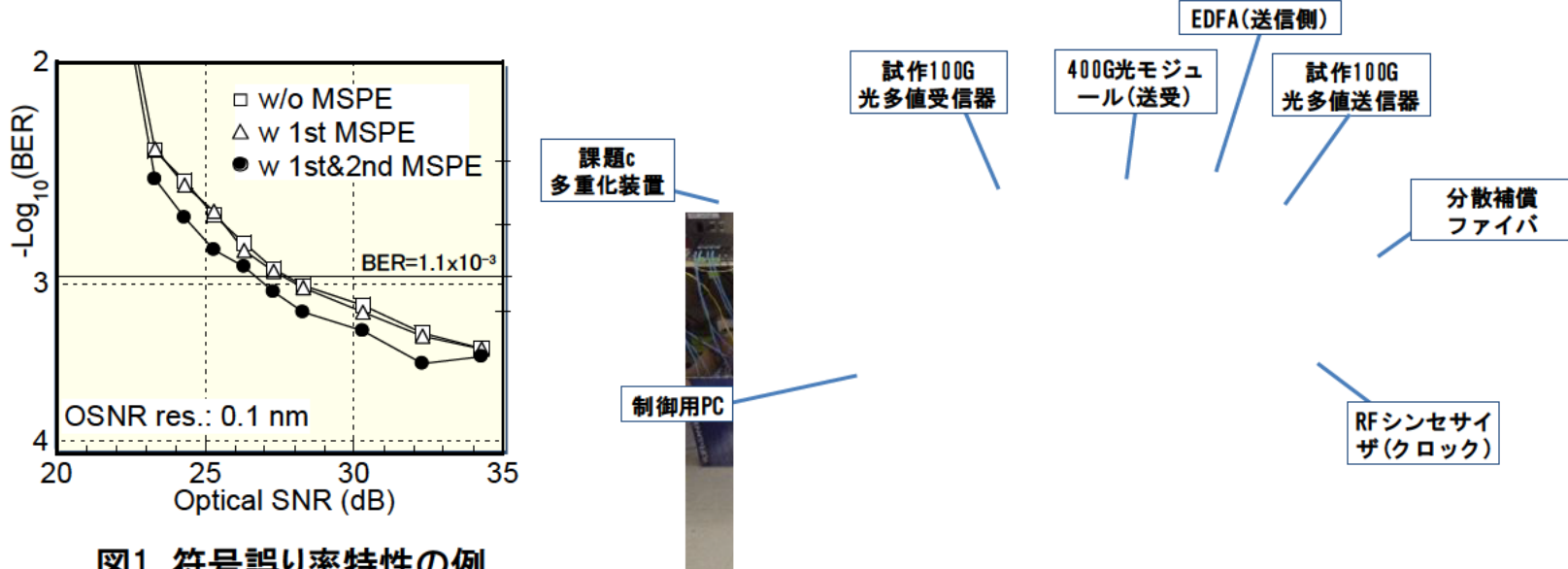


図1. 符号誤り率特性の例
(112Gbit/s16APSK信号)

図2. 現場試験の400G伝送系の構成(112Gbps $\times 4$ 波長)

3. 研究開発の成果 - <10km向け400G伝送方式

- 400G標準化の動向(短距離重視)に合わせ、<10km向け伝送方式を提案
 - 単一偏波100Gx4波長、短距離に向けに簡素な強度変調/強度受信方式を採用
 - 強度4値変調+信号帯域圧縮技術で、安価な28G級部品が利用可能
 - 目標よりさらに小型・省電力(部品数~1/2、消費電力1/2~1/3)
- 100G/波長伝送の原理実証実験に成功
 - 市販の100Gイーサ用半導体光源を用いて10/40km伝送を実証
 - IEEE802.3bsにて標準化提案活動を実施
 - 400GbEでは500mで100G/波長4値方式をベースライン採用
 - ただし~10kmは100G/波長は先送り(当面50G/波長)

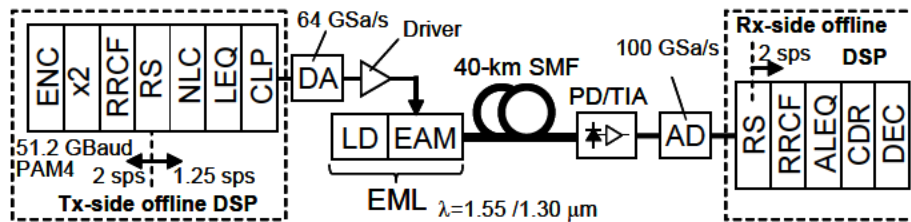


図1. 100G/λ実証実験の構成
(51.2GBaud ナイキストPAM4)

ENC: 符号化, OS: オーバーサンプリング, NLC: 変調器非線形等化回路, LEQ: 線形等化回路, CLP: クリッピング回路, LD: レーザ光源, EAM: 電界吸収型光変調器, EML: 変調器集積化光源, ALEQ: 適応等化回路, CDR: タイミング抽出回路, DEC: 多値復号



1.3um EML 100G
CFP2-LR4 TOSA

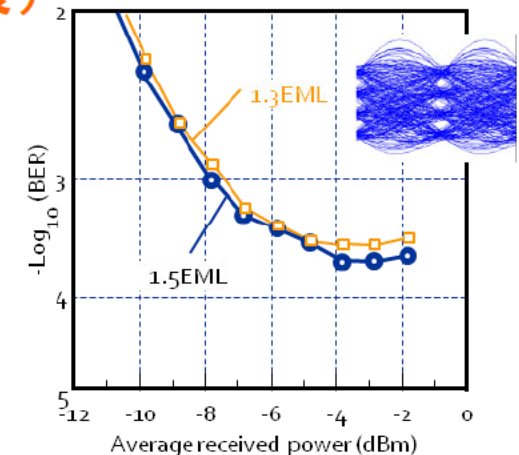


図2. 利用した半導体変調器集積光源と伝送特性
(実験)

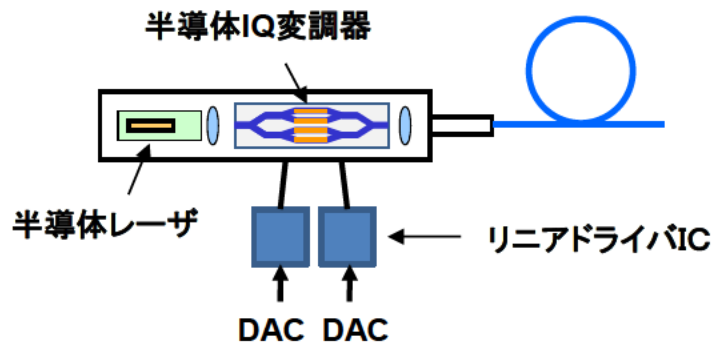
目次

- 背景
- 研究開発の内容
- 研究開発の成果
 - ア) 400Gbps多値伝送技術
 - イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術
 - ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術
- 成果展開と波及創出の取り組み
- まとめ

3. 研究開発の成果

- 【成果目標】** 1波長で100Gbps(16値、25Gbaud)の伝送が可能な
小型・低消費電力光インタフェース部の技術開発を行う。
(目標サイズ) 従来部品の1/2以下の占有面積

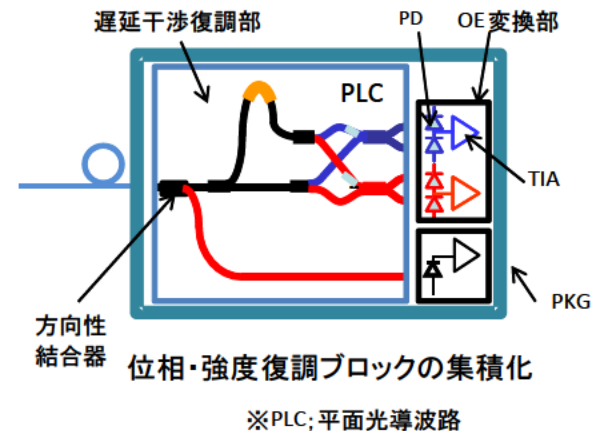
イ) -1 光送信インタフェース集積化技術



【技術のポイント】

- ・小型半導体IQ変調器
→ 従来LN変調器より大幅な小型化が可能
- ・多値変調が可能なリニア・ドライバIC
- ・レーザ光源を含めた一体集積化技術の検討

イ) -2 光受信インタフェース集積化技術



【技術のポイント】

- ・PLCを用いた位相復調部と強度復調部の集積化
- ・多値変調信号の直接検波が可能な受信フロントエンドの研究開発

3. 研究開発の成果

イ)ー1 光送信インターフェース集積化技術

- 半導体IQ変調器チップ内蔵モジュールを試作し、28Gbaud、16QAM動作達成
- 変調器モジュールの容積は約4.2ccで、従来LN変調器モジュールのおよそ1/3に小型化
- 変調器駆動用の線形ドライバIC、およびパッケージを試作し、28Gbaudの多値変調動作を確認
1チャンネル当たりの消費電力は1W弱と省電力化(従来LN駆動用ドライバの~1/2)
- ドライバ・パッケージの実装面積は4チャンネルで14 x 8 mm²(従来LN駆動用ドライバの~1/4)
- 送信IFの評価ボードを試作し、28Gbaud、16QAM動作を確認 (図1、2)
→ 実装面積 1/2 以下の100Gbps/λ光送信IFを実証
- さらに、半導体変調器、ドライバIC、光源、すべてを一体集積化したパッケージを設計し、送信IFの実装面積を1/3にできる見通しを得た (図3)

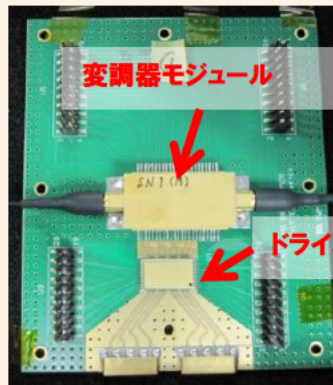


図1 光送信IF評価ボード

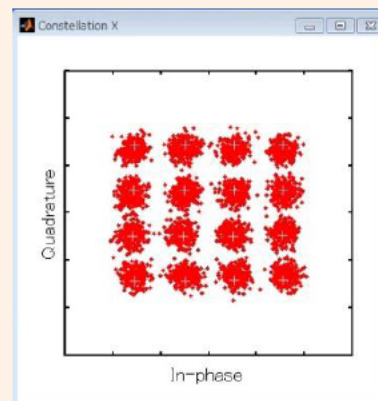


図2 変調波形(28Gbaud, 16QAM)

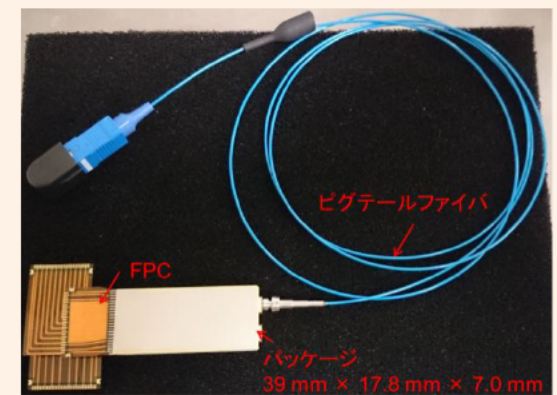


図3 一体集積型送信IF

3. 研究開発の成果

イ)ー2 光受信インターフェース集積化技術

- ・石英ガラス・プレーナ光波回路(PLC)技術を用い、位相復調部と強度復調部を備えた一体型の受信フロントエンドの試作し、28Gbaud、16QAMなどの多値変調光の受信を確認
- ・一体型に集積化したことにより、個別部品を用いた構成と比べて、実装面積を43%に小型化
→ 実装面積 1/2 以下の100Gbps/λ光受信IFを実証 (図1, 2, 3)

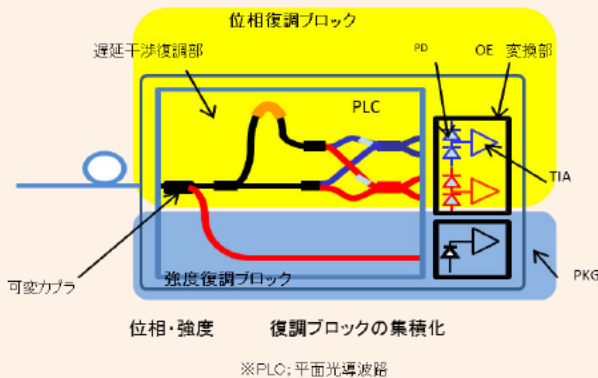


図1 受信FEの内部構成

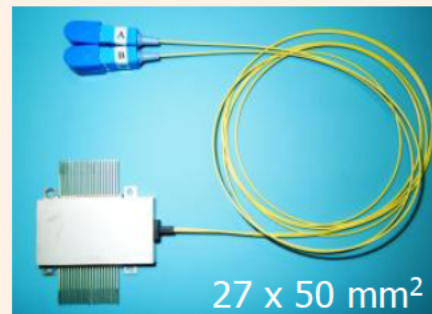


図2 受信FEの外観

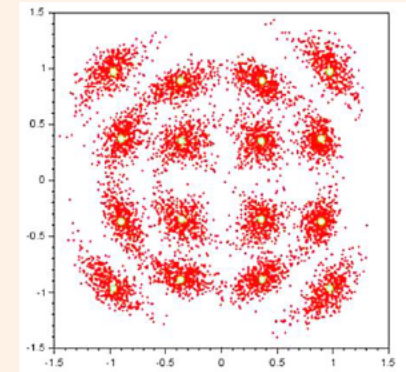


図3 復調波形(28Gbaud, 16QAM)

【課題イ)成果まとめ】

- ・光半導体変調器、リニアドライバ、直接検波用受信モジュールのプロトタイプの100Gbps/λ動作実証
- ・小型化目標1/2以下を達成
- ・課題ア)ウ)に光IFを提供し、400Gbps伝送の現場動作試験に貢献

3.研究開発の成果 - 特許・発表など

- 特許出願 計14件
 - 国内 10件
 - 国外 4件

- 研究発表 計47件
 - 国際学会 11件
 - 国内学会 21件
 - 英論文 1件
 - 標準化寄書 12件
 - その他 2件

- 報道発表
 - リリース 2件
 - 報道掲載 5紙

目次

- 背景
- 研究開発の内容
- 研究開発の成果
 - ア) 400Gbps多値伝送技術
 - イ) 400Gbps光インタフェース集積化技術
 - ウ) 高速低消費電力ADC/DAC技術
- 成果展開と波及創出の取り組み
- まとめ

4.成果展開と波及創出の取り組み - 標準化

- 本研究の課題:「小型・省電力400G光多値インタフェースの開発」
- 同時期に次世代大容量光IFの標準化が開始
 - IEEE: 400Gイーサ(はじめて光多値伝送が採用)
 - OIF: 中距離省電力100G伝送
- ・市場ニーズ/開発技術の妥当性の証左
- ・当研究でも多くの寄書を提出し、標準化に貢献

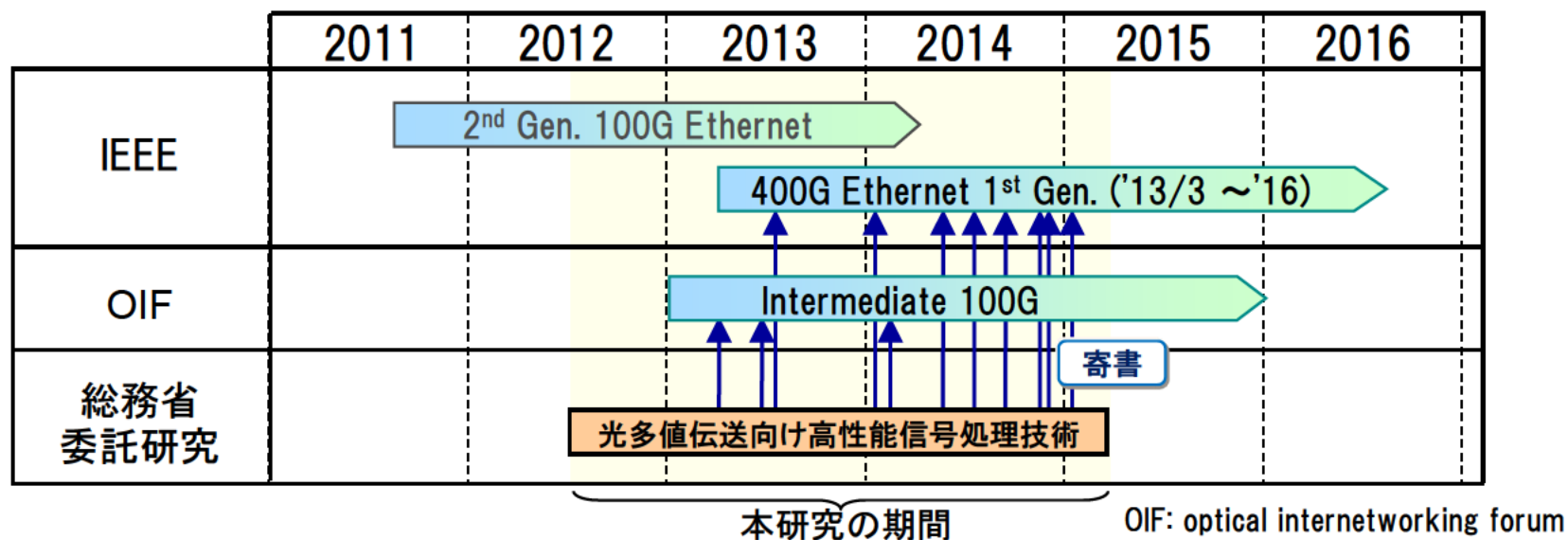


図. 標準化の動向と本研究の実施期間

4.成果展開と波及創出の取り組み - 今後の展開

■ 400G伝送技術

- 今後も実用化に向けた研究開発を継続
- 標準化/製品展開を通じて、開発技術の社会展開に勤める

■ 標準化活動

- 光インタフェースの実用化では「標準化採用」が重要なマイルストーン
 - ・ 委託期間後も活動を継続中(500mでは1波長100G4値方式が採択)
 - ・ 2km以上のカテゴリでは、早期製品化のため100G/波長方式の採択が先送りとなったため、今後も普及活動を継続する予定

■ 製品展開

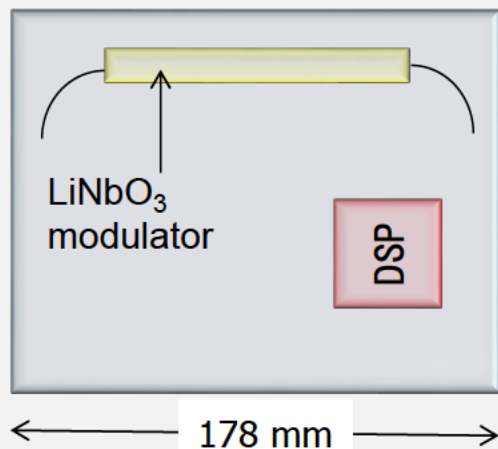
- 自社機器への搭載、標準化での連携先を通じて製品展開を推進

4.成果展開と波及創出の取り組み - 今後の展開

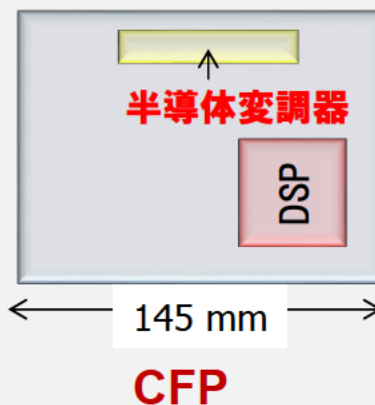
■ 光IF技術の今後の展開

- 400GbEの標準化動向を踏まえ、今後も実用化に向けた研究開発を継続
- 上記研究開発活動を通して、光通信事業への寄与を推進
- 最も早く実用化が予想される100Gデジタルコヒーレント用小型TRxへの応用展開

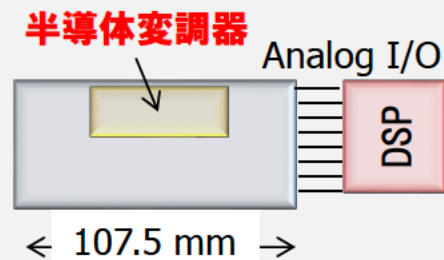
■ デジタル・コヒーレントTRxの小型化



5" x 7" OIF MSA Gen1



Digital I/O



CFP2-ACO

5.まとめ

- **本課題では、光多値伝送向け高性能信号処理技術の開発を行った。**
 - 直接検波を用いた短距離向け単一偏波単一波長の16値100G光多値リアルタイム送受信器のFPGA試作
 - 400G光インタフェースの試作と実証
 - 上記に向けた小型・省電力半導体デバイスの開発