

平成 24 年度研究開発成果概要書
「光トランスペアレント伝送技術の研究開発（λリーチ）（153ア01）」
課題ア メトロ・アクセス広域・大容量化技術に関する研究
副題 適応変調と非線形補償による
周波数利用効率とトランスペアレント領域の拡大

（1）研究開発の目的

本研究では、課題ア、イ、ウの技術を連携し、メトロコア・アクセスネットワークにおける 10 ～ 100 Gbps 超のデータ伝送のトランスペアレント伝送領域を従来の 100 倍に拡大する光ネットワークの実現を目標とする。

課題アでは、具体的なトランスペアレント領域（ファイバあたりの伝送容量×リンク長）として、伝送容量とリンク長をそれぞれ 2 倍以上変化させ、4 Pbps×km 以上までのエリア拡大の実現を行うために、適応変復調伝送技術と非線形補償信号処理技術の 2 つの要素技術を 2015 年までに開発することを目的とする。適応変復調伝送技術では、光ネットワークの伝送路の状況に応じてビットレートや変復調方式を適応的に変化させることにより、周波数利用効率を 3 dB 以上拡大する。また、非線形補償信号処理技術では、光ファイバ伝送路の光非線形効果による伝送特性劣化を克服し 3 dB 以上の SN 比改善を実現する。

（2）研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度（5 年間）

（3）委託先

日本電信電話株式会社＜幹事＞、富士通株式会社、国立大学法人大阪大学

（4）研究開発予算（百万円単位切上げ）

平成 23 年度	200（契約金額）
平成 24 年度	188（ 〃 ）
平成 25 年度	177（ 〃 ）
平成 26 年度	167（ 〃 ）
平成 27 年度	157（ 〃 ）

（5）研究開発課題と担当

課題ア-1 適応変復調伝送技術	（日本電信電話株式会社）
課題ア-2 非線形補償信号処理技術	
課題ア-2-1 非線形補償信号処理方式構成技術	（富士通株式会社）
課題ア-2-2 非線形伝送解析技術	（国立大学法人大阪大学）

(6) これまで得られた研究開発成果

		(累計)60 件	(当該年度) 44 件
特許出願	国内出願	6	4
	外国出願	5	2
外部発表	研究論文	2	2
	その他研究発表	45	35
	プレスリリース	1	0
	展示会	1	1
	標準化提案	0	0

具体的な成果

(1) 適応変復調のための送受信機基本パラメータの設計手法を確立

高速デジタル・アナログ変換器を用いて高速ボーレートの多値信号が生成可能な送信系を構築して、16 値信号生成時の高速デジタル・アナログ変換器の分解能の影響を実験的に評価し、WDM の高密度化を目的とした帯域制限などの送信端信号処理を施す場合は 4bit を超える分解能が必要であることを確認した (Photonics West 2013 にて発表)。また、パイロットトーンを用いた位相雑音推定技術において、推定誤差の許容条件から基本パラメータを与える関係式を導出し、シミュレーションと実験により妥当性を評価した。さらに、QPSK や 16QAM を含む多様な変調信号の受信機に適用可能な広帯域周波数オフセット推定器の推定精度および回路規模を考慮した設計手法を確立した。

(2) 非線形補償信号処理方式の要素アルゴリズム仕様策定を完了

チャネル内の非線形効果を送信端で補償する摂動予等化 (PPD)、受信端で補償する摂動バックプロパゲーション (PBP)、チャネル間非線形効果に起因する偏波クロストークを受信端で低減する非線形偏波クロストークキャンセラ (NPCC) の 3 種類の技術について、数値シミュレーションによる性能評価に着手した結果、最大で 2 dB を超える改善量が得られることを確認した。また、伝送実験系を構築した上で PPD、PBP の予備実験評価を実施し、偏波モード分散や偏波依存性損失などの不確定要因がある場合にも確実に伝送性能の改善が得られることを実証した (ECOC2012 にて 2 件の発表)。さらに演算を簡略化する要素アルゴリズムの改良を検討した上で、性能改善効果と回路実現性の両面から検討を行い、要素アルゴリズム仕様を決定した。

(3) 多値光信号に対する光ファイバの非線形性の影響を系統的に分析

チャネル間隔の狭い、多数の波長チャネルから成る多値光信号が光ファイバの非線形性の影響を受けて、時間的にも空間的にも局在した非常に振幅の大きな波が発生するローグウェーブ現象の発生機構についての解析を行った。また、非線形性の影響下においても、伝送途中で変化した

ない固有値に情報を載せる固有値通信方式について、デジタルコヒーレント方式を用いた復調法を提案した。さらに、ファイバ中の非線形効果を用いて光 QPSK 信号を生成する変調フォーマット変換器の入力光信号に対する分散耐性を実験的に調べた (Photonics Global Conference 2012 にて招待発表)。

(7) 研究開発イメージ図
別紙参照

平成24年度「光トランスペアレント伝送技術の研究開発(入リーチ) 課題ア メトロ・アクセス 広域・大容量化技術に関する研究」の研究開発目標・成果と今後の研究計画

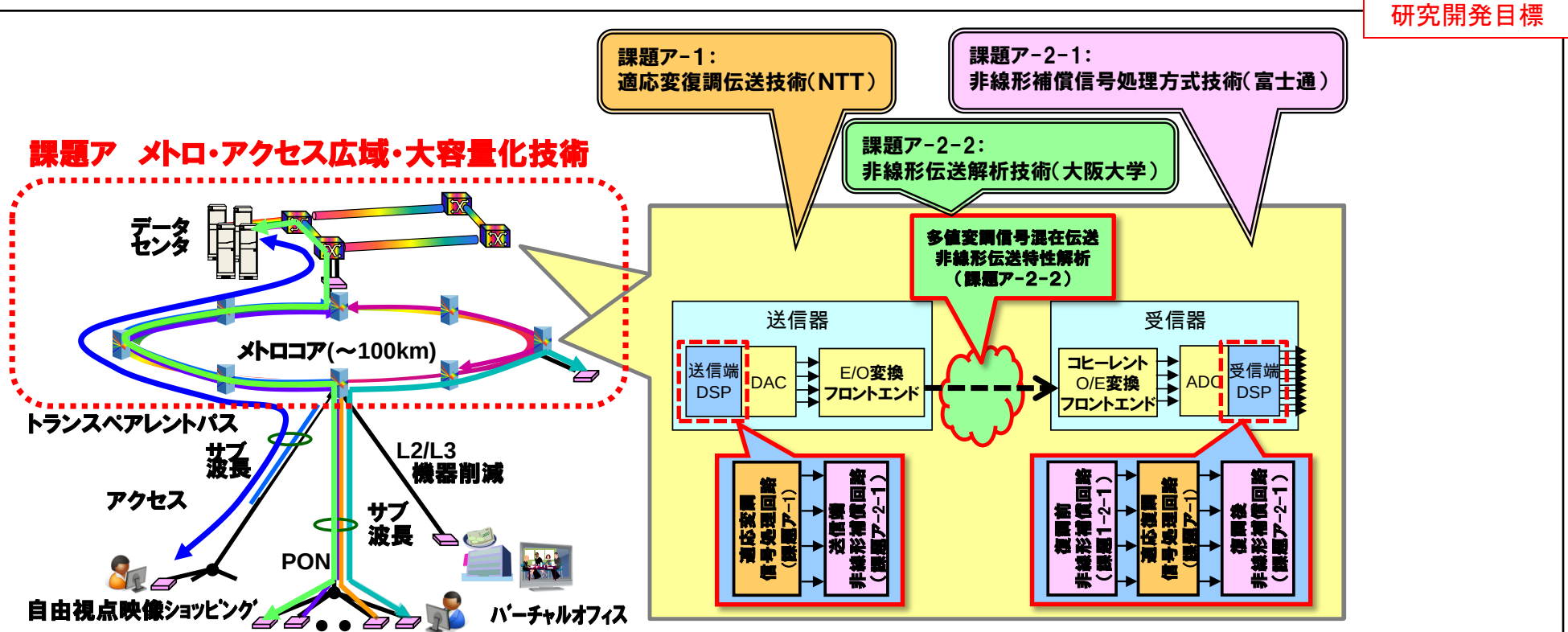
1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆実施機関 日本電信電話株式会社(幹事者)、富士通株式会社、国立大学法人大阪大学
- ◆研究開発期間 平成23年度から平成27年度(5年間)
- ◆研究開発予算 総額887百万円(平成23年度:200百万円、平成24年度:188百万円、平成25年度:177百万円、平成26年度:167百万円、平成27年度:157百万円)

2. 研究開発の目標

- 光ネットワークや伝送路の状況に応じてビットレートや変調方式を適応的に変化させ、周波数利用効率を高めることによって光ファイバあたり伝送容量を拡大することができる適応変復調技術を開発するとともに、光ネットワークの広域化・大容量化を制限する主たる要因の1つである光ファイバの非線形性による伝送特性劣化を克服するための非線形補償信号処理回路技術を開発し、10~100G超ビット/秒のデータ伝送におけるトランスペアレント領域(ファイバあたりの伝送容量×リンク長)において、伝送容量とリンク長をそれぞれ2倍以上拡大し、4Pビット/秒×km以上を実現することができる伝送基盤技術を確立する。

3. 研究開発の成果



研究開発成果:課題ア-1 適応変復調伝送技術

課題ア-1 適応変復調伝送技術

(日本電信電話株式会社)

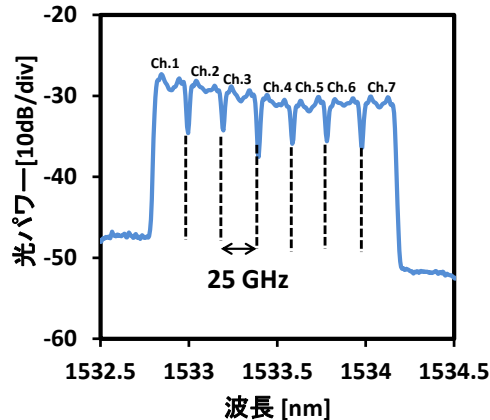
H24年度成果概要

- ①偏波多重QPSK、16-QAMを含む高速ボーレートの信号が生成可能な送信系を構築し、WDMの高密度化を目的とした帯域制限などの送信信号処理の適用時のOSNR耐力や信号処理適用時のペナルティなどの基本特性を評価した。
- ②適応変調方式に適用可能なパイロットトーンによる位相雑音耐力向上技術を提案し、その基本特性を適式化した。その妥当性をシミュレーション及び、一部条件において実験的に検証した。
- ③QPSK、16-QAMを含む多様な多値信号に対応し、適応変復調伝送方式に適用可能な広帯域周波数オフセット推定器の推定精度および回路規模を考慮した設計手法を評価した。実験によるその設計手法の実現性を確認した。

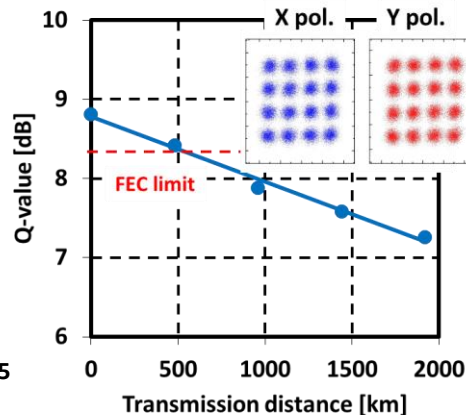
- ①分解能4bitの高速DAC回路を用いて、24Gbaudの高速ボーレートで多値変復調が検証可能な伝送実験系を構築し、一例として、16QAM信号を想定し、送信端信号処理(ナイキストフィルタ)の適用可能性について評価を行った。

ナイキストフィルタによる帯域制限を適用した、ビットレート192Gb/sの偏波多重16QAM信号を25GHz間隔で7チャンネル多重した高密度WDM長距離伝送特性評価実験を実施し、80kmスパンで480km伝送できることを確認した。

4bit DACによる送信信号処理を適用した
16QAM信号の高密度WDM光スペクトル



WDM長距離伝送特性



- ②送信端信号処理により挿入したパイロットトーンを用いた場合の位相雑音耐力向上技術において、パイロットトーンと主信号のパワー比、PLLの帯域などのパラメータを考慮した評価式を提案し、許容する推定誤差の分散(α^{-1})を与えることで基本パラメータを導出可能にした。

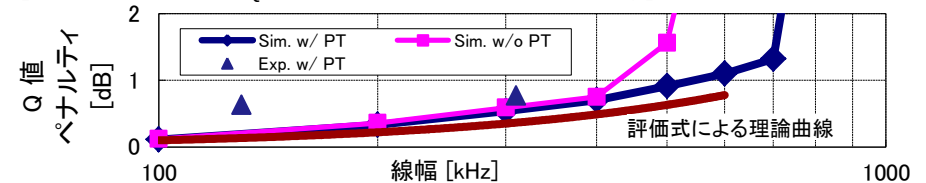
その一例として偏波多重16QAM信号に適用した際のシミュレーションおよび実験を実施し、提案式の妥当性を評価した。

【評価式】

$$\alpha^{-1} = 2B_L T_s \left[\left(\frac{k^2}{2\pi f_{FWHM} T_s} \right)^{-1} + (2\gamma)^{-1} \right]$$

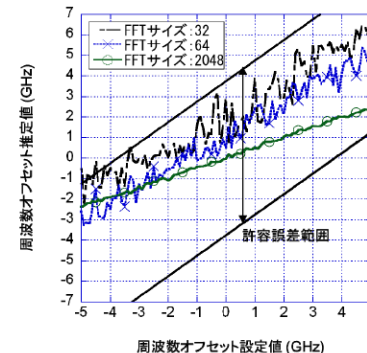
橙線: 多値数と許容誤り率により決まるパラメータ
 緑線: 変調速度の逆数
 青線: PLLのパラメータ
 紫線: Wiener過程でモデル化した位相雑音の半値全幅
 桃線: パイロットトーンのSNR

【21.4Gbaud偏波多重16QAM信号のシミュレーションおよび実験結果】

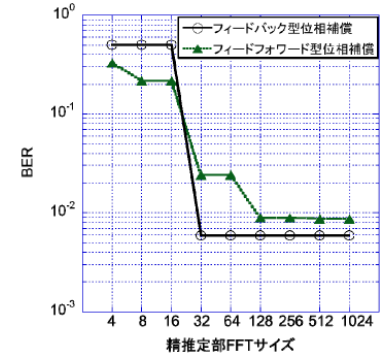


- ③OIF準拠の ± 5 GHzの周波数オフセットを推定可能範囲と設定し、粗推定部(周波数スペクトルの形状を利用)および精推定部(ピリオドグラムを利用)について、推定精度とFFTサイズの関係性を評価した。

10Gbaudの多値QAM信号に対して実験検証を実施し、2種類の位相補償器の適用を想定した場合において、提案手法の実現性を確認した。



粗推定部の回路規模依存性



精推定部のFFTサイズ依存性

研究開発成果：課題ア-2 非線形補償信号処理技術

課題ア-2-1 非線形補償信号処理方式構成技術

(富士通株式会社)

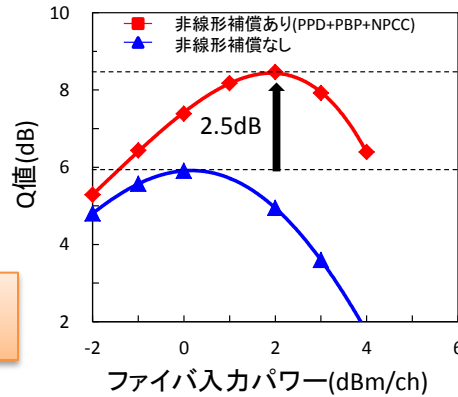
- ・ 非線形補償方式の数値シミュレーションモデルを構築、性能評価に着手した結果、最大で2dBを超える改善量が得られることを確認した。また、性能改善効果と回路実現性の両面から検討を行い、要素アルゴリズム仕様を決定した。
- ・ 非線形補償処理方式の伝送実験による予備的な特性評価も実施し、実機による要素アルゴリズムの基本性能の確認を行った。

非線形補償処理による性能改善効果
(数値シミュレーション)

非線形補償方式の性能改善効果を比較

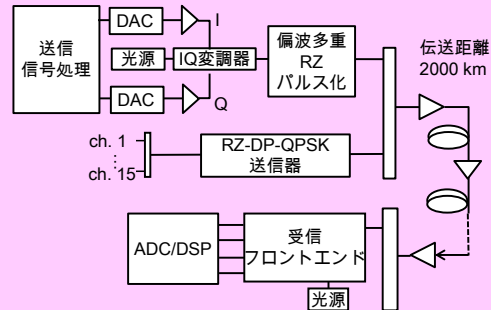
- ・ 送信端非線形予等化(PPD)
- ・ 摂動バックプロパゲーション(PBP)
- ・ チャネル間非線形対策(NPCC)

SMF 2000km 伝送時の
改善効果

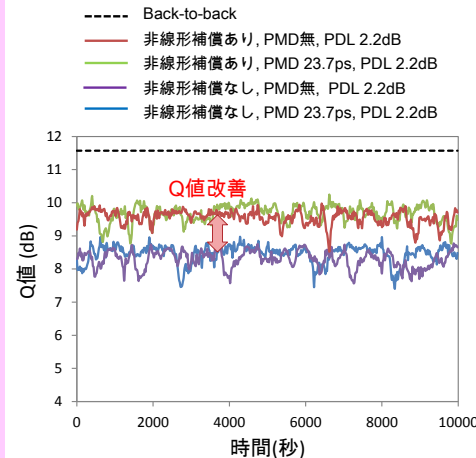


伝送実験による予備性能評価

偏波モード分散や偏波依存損失などの不確定要因がある場合にも伝送性能改善が得られることを確認



2000km 伝送実験系

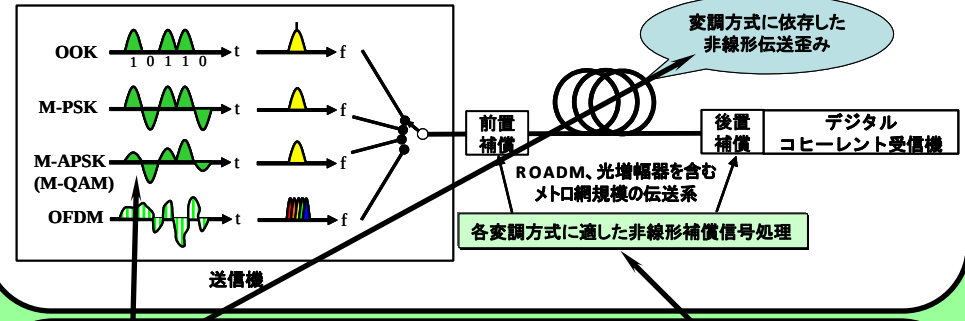


偏波変動環境下での改善効果

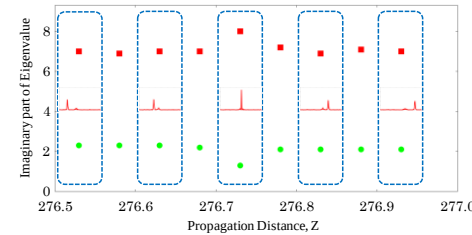
課題ア-2-2 非線形伝送解析技術

(国立大学法人大阪大学)

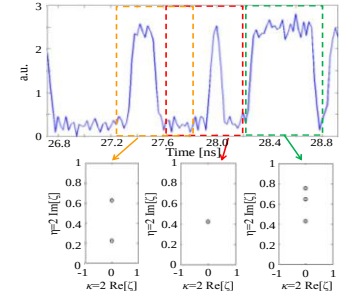
研究開発イメージ



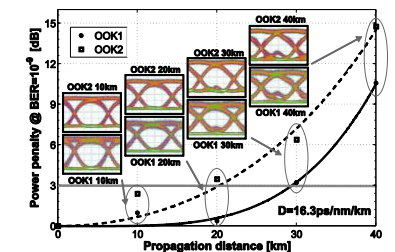
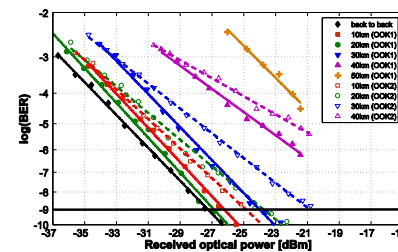
時間的/空間的に局在した波動(ロー
グウェーブ現象)の発生機構の解明



デジタルコヒーレント方式を用いた
固有値の復調法を開発



ファイバ中の非線形効果を用いてQPSK信号を生成する
変調フォーマット変換器の入力光信号に対する分散耐性を調査



4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等) ※成果数は累計件数と()内の当該年度件数です。

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	展示会	標準化提案
光トランスパレント 伝送技術の研究開 発(λ リーチ)課題ア	6 (4)	5 (2)	2 (2)	45 (35)	1 (0)	1 (1)	0 (0)

5. 研究成果発表会等の開催について

(1)学会発表・表彰

- ・光通信研究会(2012年1月)にて「光トランスパレント伝送技術の研究開発(λ リーチ)」の研究計画概要を発表(H23)
- ・ECOC2012にて、パイロットトーンを用いたSC-FDM 400Gbit/s/ch変復調技術とそれを用いた100Tbit/s級伝送技術を発表(H24)
- ・ECOC2012にて、送信端非線形補償による偏波多重QPSK変調信号の距離延伸と偏波変動環境下での性能評価実験結果を発表(H24)
- ・Photonics West2013にて、高速DACを用いた16QAM信号によるナイキストWDM伝送実験結果を発表(H24)
- ・Photonics West2013にて、送信端・受信端の各非線形補償アルゴリズムの処理簡略化方式について発表(H24)
- ・OFC2013にて、送信端・受信端非線形補償を組み合わせた場合の改善効果について発表(H24)
- ・Photonics Global Conference 2012にて、招待講演を行い、QPSK光信号の生成時の分散耐性について発表(H24)
- ・Photonics in Switching 2012にて、複数波長チャネルのBPSK信号の同時生成法について発表(H24)

(2)展示会

- ・第26回 光通信システム(OCS)シンポジウム(2012年12月、静岡県三島市)でパネル展示(H24)

(3)報道発表

- ・超高速光ファイバー伝送システム向け補償回路の消費電力を約1/3に削減する革新的な歪み対策技術を開発(H23)

6. 今後の研究開発計画

平成23～24年度の研究開発成果を受けて、平成25年度は、2倍の周波数利用効率改善能力を実現可能な適応変復調伝送回路、および3dBに迫る特性改善を可能とする非線形補償信号処理回路の機能設計を完了する。また、複数波長チャネルのシミュレーションプログラムを開発し、光ファイバ非線形性の影響を系統的に明らかにする。