

超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発
(課題Ⅱ 基幹ネットワーク高速大容量化・低消費電力化技術)

Research and Development of Ultra-high-speed and Low-power-consumption
Optical Network Technologies

(High-speed, Large Capacity and Power Efficient Technologies for Optical Backbone Networks)

研究代表者

富澤 将人 日本電信電話株式会社 未来ねっと研究所
Masahito Tomizawa NTT Network Innovation Laboratories

研究分担者

宮本裕[†] 坂野寿和[†] 片岡智由[†] 米永一茂[†] 溝口匡人[†] 木坂由明[†] 吉田光輝[†] 村田浩一[†] 野坂秀之[†]
山田貴[†] 福知清^{††} 伊東俊治^{††} ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニュエル^{††} 前田和佳子^{††}
有川学^{††} 野口栄実^{††} 安部淳一^{††} 柴山充文^{††} 中村祐一^{††} 細川晃平^{††} 松井淳一郎^{††} 渋谷真^{††}
野村昌弘^{††} 岡本健志^{††} 水谷健二^{††} 堀田聡美^{††} 鈴木雄太^{††} 藤田定男^{††} 寺原隆文^{†††} 尾中寛^{†††}
塩田昌宏^{†††} 星田剛司^{†††} 秋山祐一^{†††} 中島久雄^{†††} 亀田勝^{†††} 尾花裕治^{†††} 小林茂幸^{†††}
森和行^{†††} 赤司保^{†††} 坂井良男^{†††} 小牧浩輔^{†††} 熱海健^{†††} 荒木洋文^{†††} 荻原裕史^{†††} 伊藤博康^{†††}
齊藤卓^{†††} 竹内理^{†††} 前田泰三^{†††}

Yutaka Miyamoto[†] Toshikazu Sakano[†] Tomoyoshi Kataoka[†] Kazushige Yonenaga[†]
Masato Mizoguchi[†] Yoshiaki Kisaka[†] Mitsuteru Yoshida[†] Koichi Murata[†] Hideyuki Nosaka[†]
Takashi Yamada[†] Kiyoshi Fukuchi^{††} Toshiharu Ito^{††} Emmanuel Le Taillandier de Gabory^{††}
Wakako Maeda^{††} Manabu Arikawa^{††} Hidemi Noguchi^{††} Junichi Abe^{††} Atsufumi Shibayama^{††}
Yuichi Nakamura^{††} Kouhei Hosokawa^{††} Junichiro Matsui^{††} Makoto Shibutani^{††}
Masahiro Nomura^{††} Takeshi Okamoto^{††} Kenji Mizutani^{††} Satomi Horita^{††} Yuta Suzuki^{††}
Sadao Fujita^{††} Takafumi Terahara^{†††} Hiroshi Onaka^{†††} Masahiro Shioda^{†††}
Takeshi Hoshida^{†††} Yuichi Akiyama^{†††} Hisao Nakashima^{†††} Masaru Kameda^{†††}
Yuuji Obana^{†††} Shigeyuki Kobayashi^{†††} Kazuyuki Mori^{†††} Tamotsu Akashi^{†††} Yoshio Sakai^{†††}
Kousuke Komaki^{†††} Ken Atsumi^{†††} Hirofumi Araki^{†††} Hiroshi Ogiwara^{†††} Hiroyasu Ito^{†††}
Taku Saito^{†††} Osamu Takeuchi^{†††} Taizo Maeda^{†††}

[†]日本電信電話株式会社 ^{††}日本電気株式会社 ^{†††}富士通株式会社
[†]NTT Corporation ^{††}NEC Corporation ^{†††}Fujitsu Limited

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

概要

本研究課題では、1 チャネルあたり 400Gbps 級の容量を有し、トラフィック量や伝送距離・伝送特性といった変動要因に適応的に対応することが可能な適応変復調伝送技術、適応線形補償技術、適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術およびこれらに対応する低消費電力信号処理回路技術に関する研究開発を実施した。本研究開発により、従来の 2 倍の伝送効率をもつ 400Gbps の伝送速度および従来の伝送速度(100Gbps)では従来の 2 倍の伝送距離を実現する技術を確認した。

1. まえがき

我が国のインターネット通信量は大幅な伸びを続けており、今後も大幅な増加が予想されている。同時に、これまでの通信機器を単純に高速化した場合、伝送する情報量の増加に比例して通信機器の消費電力も大幅に増加することになる。そのため、大量の情報を高速かつ低消費電力で伝送できる通信方式や通信機器が求められている。

このようなネットワークに対する大容量化の要求と低消費電力化の要求を同時に満たすためには、これまでの延長線上の技術としての高速化と省電力化に加えて、トラフィック量や伝送距離・伝送路特性といった変動要因に適応的に対応できる機能が必要となる。

一方、衰えることを知らない大容量化への要求に応えるべく、デジタルコヒーレント技術を用いた 100Gbps 級光伝送技術が開発・実用化され、現在はシステム導入フェーズに入っている。しかしながら、今後益々伸びるであろうトラフィック需要を将来にわたり安定的に満たしていくた

めには、ポスト 100Gbps を見据えた基盤技術の確立が求められる。

本研究課題では、1 チャネルあたり 400Gbps 級の容量を有し、トラフィック量や伝送距離・伝送特性といった変動要因に適応的に対応することが可能な適応伝送技術に関する様々な技術開発を実施した。これら技術の確立により、ネットワークの大容量化、効率化、低消費電力化を可能とし、国民生活の利便性向上、国際市場における我が国の競争力の確保を図るとともに、地球温暖化対策にも大きく貢献するものである。

2. 研究開発内容及び成果

2. 1 適応変復調伝送技術

【研究開発内容】

最大 16 値の多値信号に対応し、伝送効率を従来技術の 2 倍以上に高めることができる伝送路推定アルゴリズム、及び、変復調方式選択アルゴリズムを開発し、1 波長あた

り 400Gbps のスループットを持つ信号処理技術を確認する。

【研究開発成果】

ア) デジタルコヒーレントトレーニング信号処理技術

2 値位相変調(BPSK)/4 値位相変調(QPSK)/16 値直交振幅変調(16QAM)の適応変復調方式に適用可能なトレーニング信号処理アルゴリズムに関して、最大 400Gbps 級のスループットを持つ超高速信号に対応可能なトレーニング信号系列フォーマット、および標準シングルモードファイバ 60,000ps/nm の波長分散推定に適用可能な波長分散推定アルゴリズムを考案した。具体的には、400Gbps 級のスループット対応に向けた送信信号フィルタリングによるスペクトル狭窄化に対応したトレーニング信号系列フォーマットの確立、前記トレーニング信号系列に対応した波長分散推定アルゴリズムの確立を行った。また、考案手法の有効性を計算機シミュレーションにより確認した。さらに、回路記述言語モデルの設計を進め、その正常動作および推定性能が高位言語モデルと同等なることを確認し、最大 16QAM の多値信号に対して、波長分散 60,000ps/nm までの推定動作が可能な回路設計となっていることを確認した。前述の通り、回路記述言語レベルでの回路設計を完了し、推定動作の評価が可能な一次試作を実施した。さらに、試作回路を用いて期待通りの伝送路推定動作が可能であることを確認した。さらに、BPSK/QPSK/16QAM に加えて 8 値直交振幅変調(8QAM)の適応変復調方式に適用可能なトレーニング信号処理アルゴリズムに関して、推定値のズレが少なく PMD 耐力が高いトレーニング系列の設計を行った。また、波長分散 250,000ps/nm 超の新設海底ケーブルシステムにおいて強力な差別化要素となる大規模波長分散推定技術として、周波数領域等化フィルタと組み合わせた 2 回推定技術を確認した。さらに上記技術を用いて、光伝送テストベッドにおいて、QPSK、8QAM、16QAM について最大 10,000km、5,600km、2,600km の伝送を行い、期待通りの波長分散推定動作を示すことを図 1 の通り確認した。

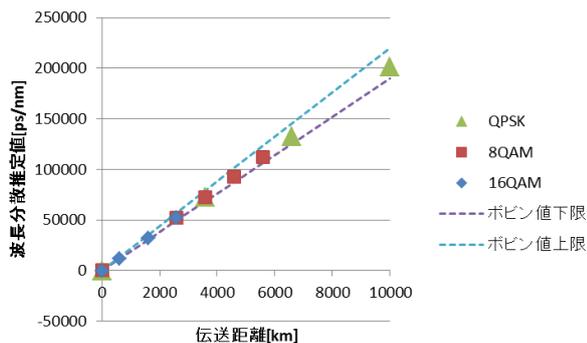


図 1 光伝送テストベッドにおける波長分散推定値の伝送距離依存性

イ) パイロットトン信号処理技術

2 値位相変調(BPSK)/4 値位相変調(QPSK)/16 値直交振幅変調(16QAM)の適応変復調方式に適用可能な、パイロット信号を用いて位相雑音を推定・補償するアルゴリズムに関して、周波数ドメインにてパイロットトンを挿入するアプローチと、時間ドメインにてパイロットシンボルを挿入するアプローチを並行して検討し、両方式の性能を計算機シミュレーションを用いて比較し、高い性能を有する後者のアプローチを選択した。その結果、最大 16QAM の多値信号において位相雑音耐性を 2 倍以上に向上できることを確認した。そして、時間ドメイン方式のパイロ

ット信号による位相雑音推定及び補償方式 (以下、パイロット位相雑音補償) を包含したパイロット信号処理アルゴリズムの回路設計を完了した。その際、位相雑音耐性を 2 倍以上に向上するために必要な演算ビット幅パラメータを設定して、設計した。さらに、前記のアルゴリズム評価が可能な試作を実施し、それを用いてパイロット信号処理アルゴリズム及び回路設計が期待通り動作することを確認した。BPSK/QPSK/16QAM および 8 値直交振幅変調(8QAM)の適応変復調方式に適用可能な、時間ドメイン方式のパイロット位相雑音補償を包含したパイロット信号処理アルゴリズムの回路設計に基づいた性能モデルに関して、性能検証を実施し、検証を完了した。また、他機能との連携動作を計算機シミュレーション及び実験により検証し、パイロット信号処理回路技術を確認した。前記技術を用いて、光伝送テストベッドにおいて伝送実験を実施し、期待通りの動作を示すことを図 2 の通り、確認した。

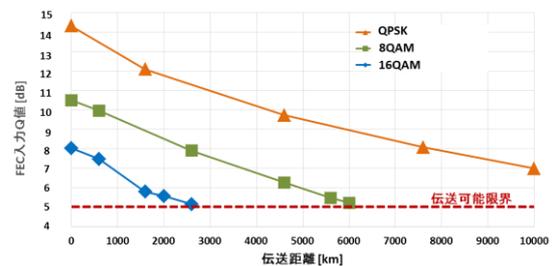


図 2 光伝送テストベッドにおける伝送距離依存性

ウ) 受信フロントエンド技術

2 値位相変調(BPSK)/4 値位相変調(QPSK)/16 値直交振幅変調(16QAM)の適応変復調方式に適用可能な、受信フロントエンド技術の確立のために、最大 16 値の多値信号に対応可能な要求性能と設計技術を検討し、回路試作と評価により検証した。まず、既存の受信フロントエンドの 100G DP-QPSK による評価により、電気信号部の特性パラメータである周波数平坦度とトータルハーモニックディストーション (THD) が Q 値に与える影響を検討した。また、シミュレーションによる要求性能の課題抽出を行った。光伝送シミュレーションを行い、電気信号処理部の特性パラメータである周波数平坦度と THD が Q 値に与える影響を DP-QPSK 及び DP-16QAM の両者について調べた。その結果を踏まえ、多値信号に対応可能な電気信号処理部への目標性能を、周波数平坦度<1dB、THD<3%と設定した。さらに、光受信フロントエンドを試作し、本光フロントエンドの単体評価により、最小制御で 100mVpp以下、最大制御で 600mVpp 以上の出力振幅が得られることを確認するとともに、当初目標 THD<3%について試作結果により検証した。また、課題(d)の試作回路との連携評価として、ADC TEG を用いて特性補償フィルタ前段までの THD を評価する先行検証を実施して課題抽出を行った。さらに、別の当初目標である周波数平坦度<1dBについて、上記試作で抽出した課題に基づき受信フロントエンドの改良試作を行い、受信フロントエンドの単体特性に影響を与えるフォトダイオード (PD) とトランスインピーダンスアンプ (TIA) 間のワイヤ長を変えた受信フロントエンドを実際に試作して評価することにより、ワイヤ長と周波数レスポンスのピーク量の関係を明らかにした。この結果、当初目標である周波数平坦度 (ピーク量) <1dB にできる実装条件を見出し、高周波実装の最適化を図った。また、16QAM 信号による Q 値評価を行い、ピーク量 1dB 以下とした受信フロントエンドが、最大 16 値の多値信号を含

む適応変調に適用可能であることを図3の通り検証した。

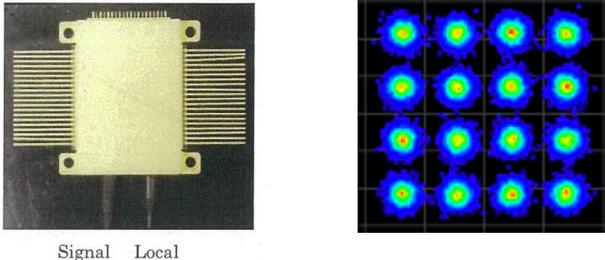


図3 32Gbaud 単一偏波 16QAM 受信時の
コンスタレーション実機評価

2. 2 線形適応等化技術

【研究開発内容】

最大1波長あたり400Gbps級の高速光信号において、本技術と適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術(2.3節)とにより、現状の技術(100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652ファイバ)で伝送した場合(伝送距離1,000km))と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて2倍(2,000km)程度の伝送距離を実現する。

【研究開発成果】

ア) 送受信スペクトル整形技術

伝送距離拡大に向けて、多数の通信機器を通過する際に生じる周波数特性などの線形な伝送特性変化による品質劣化を周波数軸上で補償(スペクトル整形)する技術、ならびに、サブキャリア多重により400Gbps級伝送実現する際に生じるクロストークを低減するスペクトル整形技術の開発を行った。さらに、伝送過程で生じる伝送劣化に応じてスペクトル整形を行うため、最適なフィルタ形状を選択可能なフィルタ係数決定手法を確立した。具体的には、400Gbps級伝送を実現するサブキャリア多重に必要な、ナイキストフィルタリングにより隣接チャネル干渉を抑える最適設定を見いだすため、回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルを試作し、実光信号を用いて動作を確認した。37.5GHz間隔の400Gbps級サブキャリア多重実光信号に対して、ナイキストフィルタをロールオフ率0.1としてかけることで、隣接チャネルの干渉の影響が大きいロールオフ率0.5の場合に比べて1.7dBのQ値改善効果が得られることを確認し400Gbps級スループットでの動作を実証した。また、ROADM(Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)機器通過に伴う帯域狭窄効果を補償するスペクトル整形機能を確認するため、QPSK信号の2,600km伝送において、送信端周波数応答調整有無での特性比較を行った。通過帯域幅30GHzの条件において、調整がない場合で生じた劣化を調整により0.6dBまで小さく抑えた(図4)。得られた結果に十分なマージンを含むため、3,000km級の伝送システムでの動作が十分に可能である。以上の結果より、従来と比較して同一の変調多値度とビットレートにおいて、2倍を大きく超える伝送距離での動作することを実光信号を用いて確認した。

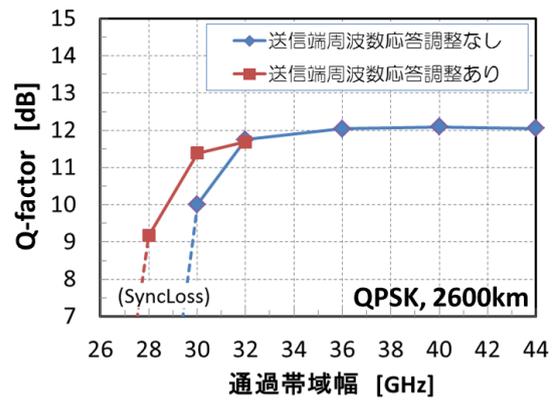
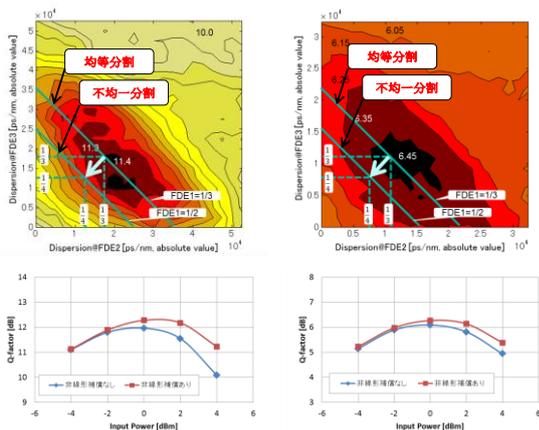


図4 通過帯域幅とQ値の関係(QPSK)

イ) 分割型波長分散補償技術

伝送距離拡大を実現するためには、非常に大きな複数の波長分散補償ブロックが非線形補償ブロック(適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術(2.3節)で開発)を挟んで複雑に連携して信号処理を行う必要がある。本課題では、超長距離の波長分散補償を実現するとともに、回路規模の増大を抑えながら非線形補償の効果を最大限に引き出す、最適な分散補償ブロックの分割手法を開発した。波長分散補償量の最適な分割分配機能確認のため、分割型波長分散補償技術を適用した回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルを試作し、実光信号を用いた検証を行った。分割型波長分散補償機能は、非線形補償機能を挟んで連携する3つの周波数領域等化(FDE)から成る。回路効率を考慮して、一つのFDE回路に大きな分散補償量の補償とそれ以外の線形補償機能をわりあて、残る2つのFDE回路で小さな分散を補償する構成とした。システム検証では、伝送路を純シリコニアファイバとし、2種の構成(①128Gbps PM-QPSK, 2,600 km、②256Gbps PM-16QAM, 1,600km)における、分散補償比率とFEC入力Q値を測定した。詳細解析により非線形補償フィルタを最適化することで、採用した不均一分割FDEにより均等分割と同等レベルのQ値改善が得られることを確認した。さらに、①の構成で400Gbps級伝送を実現する4サブキャリア多重を行うためナイキストフィルタをかけて伝送評価し、図5に示すように非線形補償によりFEC入力Q値が0.3dB改善することを確認した。FEC入力Q値が十分大きいことから、3,000km級の伝送と非線形補償による同程度のQ値改善効果を得られる。②の構成でも2サブキャリア400Gbps伝送で0.2dBのQ値改善が見られた。以上の結果より、不均一分割FDEを用いた分割型波長分散補償技術について、回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルにより実光信号を用いて実験的に確認し、最適な波長分散補償ブロックの分割手法を確立した。



①QPSK 2,600km ②16QAM 1,600 km

図5 不均一分散分割補償の最適化(上段)と最適波長分散補償分割を適用した伝送特性(下段)

ウ) 線形等化フィルタ統合技術

本課題では、線形等化フィルタ集約化による制御性の向上と回路規模削減の実現に向けて、アナログフロントエンドデバイス特性補償等の波長分散補償以外の機能を集約した一つのFDEで統合して波形歪み補償する技術について開発を行った。さらに、課題ア) 送受信スペクトル整形技術とイ) 分割型波長分散補償技術を統合した統合機能モデルを試作し、実光信号を用いたシステム検証実験を実施し、開発した線形適応等化技術全体での特性検証を行った。まず、フロントエンド補償とのフィルタ統合動作確認のため、受信信号のIQ成分に伝搬遅延差を設けて歪みを付与した信号(IQインバランス3°相当)を補償し、良好なコンスタレーションが得られることを確認した。次に、システム検証として、3種類のWDMシステム構成(①112波 100Gbps PM-QPSK、②112波 150Gbps PM-8QAM、③112波 200Gbps PM-16QAM)での受信コヒーレント検波信号を機能モデルで復調した際のQ値を測定した。超長距離での波長分散補償性能確認のため、低損失・低非線形の伝送路を用いたところ、図6に示す通り、100Gbps PM-QPSKシステムにおいて、伝送距離10,000kmでも誤り訂正後エラーフリーとなるQ値が得られた。また、すべての構成において補償回路によるQ値の改善を確認し、長距離対応波長分散補償と非線形補償の両立を確認した。さらに、ナイキストフィルタを用いた複数サブキャリア400Gbps伝送検証を行い、②の構成で5,600km、③の構成で2,000kmまで伝送できることを確認した。以上の活動により、線形等化フィルタ統合したシステム評価において、10,000km超長距離伝送での波長分散補償と400Gbps級スループット動作を確認完了した。

以上のように、線形適応等化技術について、送受信スペクトル整形技術、分割型波長分散補償技術、線形等化フィルタ統合技術の3つの課題に取り組み、回路レベルで機能検証可能な統合機能モデルを用いて他課題との連携動作を考慮した検証を実施した。その結果、従来技術による伝送と比較して、同一の変調多値度とビットレートにおいて2倍を大きく超える3,000km級伝送での動作確認、ならびに最大400Gbps級のスループットでの動作確認を完了し、本課題の最終目標を100%達成した。

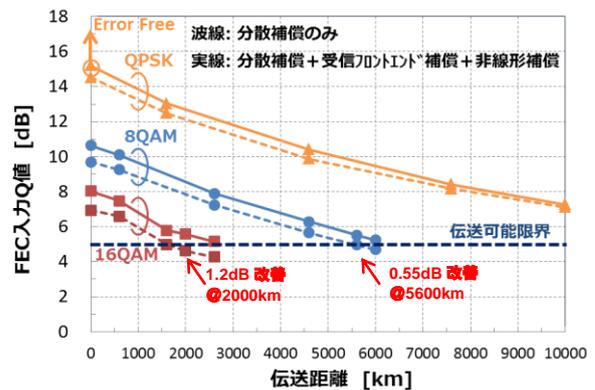


図6 112波 WDM ナイキスト QPSK/8QAM/16QAM 伝送特性

2.3 適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術

【研究開発内容】

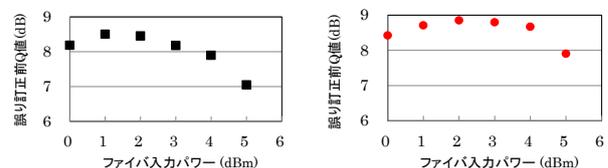
最大1波長あたり400Gbps級の高速光信号において、本技術と線形適応等化技術(2.2節)とにより、現状の技術(100Gbps 偏波多重QPSK信号をシングルモードファイバ(G.652ファイバ)で伝送した場合(伝送距離1,000km))と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて2倍(2,000km)程度の伝送距離を実現する。

【研究開発成果】

ア) 伝送波形歪みに対応する適応非線形補償技術

試作するCMOS電子回路を用いて、現状の技術(100Gbps 偏波多重QPSK信号をシングルモードファイバ(G.652ファイバ)で伝送した場合(伝送距離1,000km))と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて2倍(2,000km)以上の伝送実験を通じて実証した。また、400Gbpsの超高速信号伝送についても動作確認及び性能評価を実施し、適応非線形信号補償技術を確立した。

具体的には、本研究開発課題の成果として設計した非線形歪み補償回路機能と誤り訂正回路機能を搭載した試作CMOS回路を用いた場合、100Gbps 偏波多重QPSK信号に対し、従来の距離の3倍の伝送距離である3,000kmでの特性評価を行い、誤り訂正後にエラーフリーでの伝送が可能であることを、実ファイバ伝送実験を通じて実証した。また、400Gbps級の超高速信号に対応する偏波多重16値直交振幅変調(16QAM)信号に対しても、非線形歪み補償回路機能と誤り訂正回路機能の連携動作を確認し、エラーフリー伝送動作を確認した。以上の結果により、伝送波形歪みに対応する適応非線形補償技術を確立した。



①非線形歪み補償機能：OFF (左)
②非線形歪み補償機能：ON (右)

図7 100Gbps 偏波多重QPSK信号における非線形歪み補償機能の効果(3,000km伝送後)

イ) 適応誤り訂正・適応非線形補償の最適化技術

適応誤り訂正・適応非線形補償の各種動作パラメータを協調制御するためのインバンド制御信号重畳・検出を行う電子回路と、適応変復調に対応したサンプリング位同期・適応等化・搬送波周波数誤差補正・搬送波位相再生を行う電子回路を、評価系を用いて所期の特性を得られることを確認し、技術確立した。

具体的には、上記電子回路を適用した光送受信評価系を用い、周波数偏移変調方式によるインバンド制御信号の重畳・検出を行う電子回路技術を実現できることを実証した。また、適応変復調に対応したサンプリング位同期・適応等化・搬送波周波数誤差補正・搬送波位相再生を行う電子回路についてハードウェアエミュレーションを行い、所期の特性を得られることを確認した。以上により、インバンド制御信号重畳・検出を行う電子回路と、適応変復調に対応したサンプリング位同期・適応等化・搬送波周波数誤差補正・搬送波位相再生を行う電子回路技術を確立した。

ウ) フロントエンド評価・特性補正技術

最大 400Gbps 級の光信号伝送を実現すべく既存フロントエンドデバイスの特性評価、特性補正回路の性能検証を行い、特性補正を行う信号処理回路技術を確立した。

具体的には、偏波多重 16QAM 光信号で光送信器が出力する光信号品質の評価を行い、特性補正の適用により符号配置のばらつきが改善することを確認した。また、特性補正効果を定量的に確認するため光通信における基本的な性能指標である光信号対雑音比 (OSNR) の特性評価を行い、OSNR=32dB となる条件において 0.6dB の改善効果を確認した。これにより特性補正を行う電子回路技術を確立した。

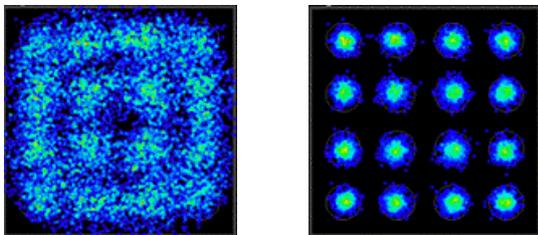


図 8 送信フロントエンドデバイスの特性補正効果 (16QAM)
(左: 特性補正前, 右: 特性補正後)

2. 4 低消費電力信号処理回路技術

【研究開発内容】

ア) 適応変復調伝送回路技術

最大 400Gbps 級のスループットを実現可能な適応変復調伝送技術に関して、低消費電力信号処理統合検証に適用可能な変復調方式選択および伝送路品質推定を行う適応変復調伝送回路を実現する技術を確立する。

イ) 線形適応等化回路技術

最大 1 波長あたり 400Gbps 級の高速光信号において、線形適応等化技術と適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術とにより、現状の技術 (100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合 (伝送距離 1,000km)) と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて 2 倍 (2,000km) 程度に伝送距離を拡大する回路を実現する技術を確立する。

ウ) 適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術

最大 1 波長あたり 400Gbps 級の高速光信号において、

線形適応等化技術と適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術とにより、現状の技術 (100Gbps 偏波多重 QPSK 信号をシングルモードファイバ(G.652 ファイバ)で伝送した場合 (伝送距離 1,000km)) と比較して、同一の変調多値度とビットレートについて 2 倍 (2,000km) 程度に伝送距離を拡大するために必要な回路を実現する技術を確立する。

エ) 低消費電力信号処理統合検証技術

デジタルコヒーレント送受信部、光ノード、光伝送路のモデルを相互接続した統合検証技術を用いて最大 400Gbps 級の送受信信号処理回路のハードウェア実装の設計・試作を行い、動作・消費電力検証、および外部機能との適応的連携により、基幹ネットワークの消費電力を 1 波長あたり 100Gbps の伝送方式と比較して 1/2 以下 (「単位伝送速度×単位伝送距離」を単位として消費電力を比較した場合。) に削減可能であることを実証する。

【研究開発成果】

ア) 適応変復調伝送回路技術

「2. 1 適応変復調伝送技術」で考案した波長分散推定方式およびパイロット信号による位相雑音推定・補償方式について、信号処理アルゴリズムを実現する為の回路構成を検討し、レジスタ設定によりパラメータを変更できる回路構成を 25MGate 以下の回路規模で実現できることを確認し、適応変復調伝送方式に関する回路実現技術を確立した。さらに検討を進め、回路全体としての性能評価を通して、当該ブロック回路の必要条件を明確化し、低消費電力化を図り、当初見積もり 25MGate を下回る回路規模にて実現する低消費電力回路設計を完了した。さらに、低消費電力化適用後の回路設計にて、必要性能を満たすことを確認し、設計技術を確立した。さらに、性能検証ならびに機能モデルとの一致性検証を通して、低消費電力化を適用した消費電力削減モデルにおいて、要求性能が実現できることを、シミュレーションおよび実験により確認した。上記に加え、適応変復調を実現する QPSK、16QAM、8QAM 方式のそれぞれについて、波長分散推定回路及びパイロット位相雑音補償回路が正常に動作することを確認することで、要求性能実現と消費電力抑圧を両立する適応変復調伝送回路技術を確立した。前記技術を用いた消費電力削減モデルでの光伝送テストベッドにおける伝送実験の評価結果(QPSK)を、図 9 に示す。

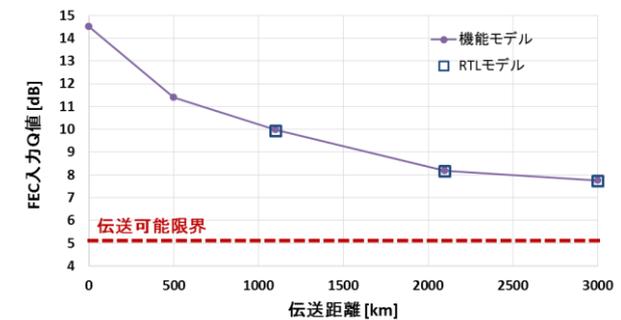


図 9 消費電力削減モデルにおける QPSK 伝送特性評価

イ) 線形適応等化回路技術

400Gbps 級の高速光信号伝送に向けた線形等化回路方式について、伝送距離の拡大と消費電力の低減とを両立することが可能な信号処理回路技術を確立した。

具体的には、オーバーラップ FDE 方式を用いた線形適応等化回路において、伝送距離に応じて消費電力を最適化可能とする回路方式を検討し、その回路実装仕様を策定した。オーバーラップ FDE 方式では、オーバーラップ量が

インパルス応答長程度必要となる特性を利用し、補償に必要なインパルス応答長に対して FFT フレームサイズを最適な値に適応的に変更できる構成とした(図 10 の左図)。その結果、伝送距離に応じて、最大 1/2 に消費電力を削減できることを確認した(図 10 の右図)。策定した回路仕様にに基づき、高位言語 C により機能レベル回路記述を作成・評価・検証を実施した。さらに、RTL (Register Transfer Level: レジスタ転送レベル) 言語を用いた論理モデルの作成・シミュレーションにより動作確認、さらにはレイアウト工程まで実施したゲートレベル回路記述の部分設計を行い、伝送長距離化を実現する線形等化回路が実用的な回路規模、及び消費電力で実現可能であることを明らかにした。

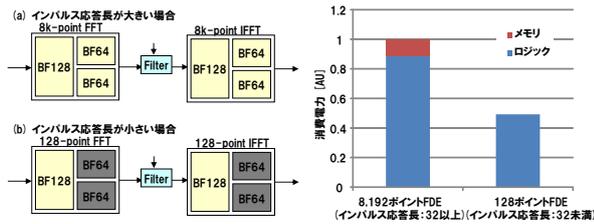


図 10 線形等化回路の構成(左)と消費電力低減の効果(右)

ウ) 適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術

受信端波形歪み補償・非線形偏波クロストーク除去・FEC 復号を含む機能を実現する信号処理電子回路機能の設計を完了し、実用的な回路規模と消費電力で所定の機能・性能が得られることを確認することで、適応誤り訂正・適応非線形信号補償回路技術を確立した。

具体的には、ハードウェア記述言語(RTL)で記述された回路モデルやフロントエンド回路を統合した環境の構築、およびエミュレータを用いた評価技術の確立によって、集積化された信号処理電子回路の性能が期待通りとなっていることを確認した。

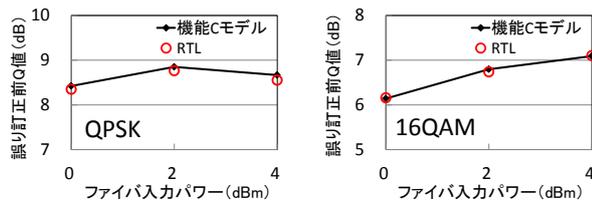


図 11 RTL エミュレーションに基づく性能検証結果

エ) 低消費電力信号処理統合検証技術

平成 25 年度に確立した設計・評価手法を用いて統合設計・統合試作を行い、動作・消費電力評価により基幹ネットワークの消費電力を単位伝送速度 100Gbps の伝送方式と比較して 1/2 以下(「単位伝送速度×単位伝送距離」を単位として消費電力を比較した場合)に削減できることを確認し、低消費電力信号処理統合検証技術を確立した。

具体的には、開発した統合機能モデル、及び回路記述言語(RTL)レベルの統合検証プラットフォームを用いた詳細動作検証・性能検証の結果に基づき、設計・評価手法を最適化すると共に、フィードバックにより消費電力削減を検討及び実施し、改良した機能モデルおよび RTL レベルの機能ブロックの再設計・統合を行った。さらに RTL 統合検証を実施し、回路構成法及び回路アーキテクチャの評価を行った。その結果、従来の 100G-DSP に比べ、1 波

長あたり最大 4 倍の伝送速度を達成しながら、電力の増加は約 1.4 倍まで抑えることが可能となった。また、伝送距離は、400G 対応 DSP は、100G モード(QPSK 変調方式)で 10,000km まで可能であることを確認した。以上の結果から、3,000km 伝送時のネットワーク消費電力は、従来の 100G-DSP の場合と比較して、1/2 以下の消費電力に削減できることを確認した。

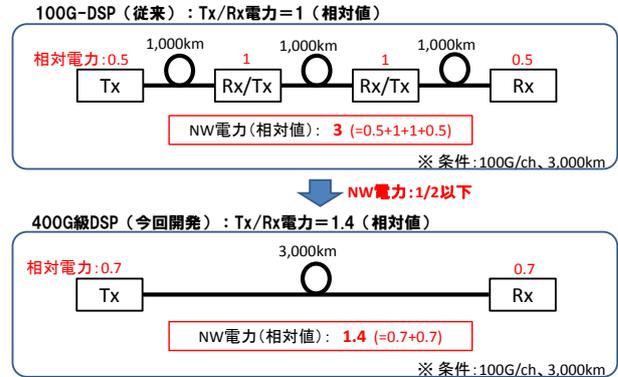


図 12 ネットワーク消費電力の削減

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発を通して得られた適応変復調伝送技術、線形等化技術、適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術は、チャンネル当たり 400Gbps 級の高速信号伝送では必須の技術になることが期待される。波及効果としては、ネットワークの切り替え迅速な復旧を必要とする災害対応などにおいても本研究開発成果の活用が期待されるため、様々なアプリケーションへの成果展開に引き続き取り組んでいく。

国際標準化については、OIF(Optical Internetworking Forum)および ITU-T(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)に本研究開発成果に関連する寄書提案を行ってきた。今後は提案内容が最終的な標準に反映されることを目指して引き続き活動を継続するとともに、本研究開発成果の国際展開に向けて引き続き寄書提案等にも取り組んでいく。また、本研究開発成果が実現する機能・性能をシステム仕様のデファクト化とすることを通して広めることに引き続き取り組む。

また実用化については、既開発の 100Gbps 級の光ファイバ通信システム、インターフェースモジュールおよびデジタル信号処理 LSI に対して本研究開発の成果を適用することにより、400Gbps 級の伝送容量の実現あるいは更なる伝送能力の向上の検討を進め、開発技術の社会展開を図る。

現在、400Gbps 級の光ファイバ通信システムの商用化は目前に迫っていると見られているが、伝送距離の制限等によりその適用領域が限定される恐れがある。本研究開発で得られた成果は、高速信号の高密度多重と伝送距離延伸に効果があることが確認されたことから、400Gbps 級、さらにはそれを上回る将来の超大容量光伝送システムにも基本技術として波及して効果を及ぼすものと期待され、今後も引き続き技術の発展的な高度化に取り組む。

4. むすび

平成 24 年度から 26 年度までの 3 年間の委託研究期間において、1 チャンネルあたり 400Gbps 級の容量を有し、

トラフィック量や伝送距離・伝送特性といった変動要因に適応的に対応することが可能な適応変復調伝送技術、適応線形補償技術、適応誤り訂正・適応非線形信号補償技術およびこれらに対応する低消費電力信号処理回路技術に関する研究開発を実施した。本研究開発により、従来の2倍の伝送効率をもつ400Gbpsの伝送速度および2倍の伝送距離（従来と同一の100Gbpsと比較）を実現する技術を確立した。

これら技術の確立により、ネットワークの大容量化、効率化、低消費電力化を可能とし、国民生活の利便性向上、国際市場における我が国の競争力の確保を図るとともに、地球温暖化対策にも大きく貢献するものである。

【査読付発表論文リスト】

- [1]Yutaka Miyamoto, Masahito Tomizawa, “High-Capacity Scalable Optical Communication for Future Optical Transport Network”, ISSCC (San Francisco) (平成25年2月10日)
- [2]Shoichiro Oda, Takahito Tanimura, Takeshi Hoshida, Yuichi Akiyama, Hisao Nakashima, Kyosuke Sone, Zhenning Tao, Jens C. Rasmussen, “Three Benefits Brought by Perturbation Back-Propagation Algorithm in 224 Gb/s DP-16QAM Transmission”, IEICE Trans. Commun., Vol. E97-B, No. 7, pp.1342-1349 (平成26年7月1日)
- [3]Kiyoshi Fukuchi, Atsufumi Shibayama, Kohei Hosokawa, Wakako Maeda, Hidemi Noguchi, Jun-ichi Abe, “Practical techniques for nonlinear compensation and mitigation”, OFC2015 (Los Angeles) (平成27年3月24日)

【取得特許リスト】

- [1]山崎悦史、石原浩一、木坂由明、富沢将人、光送受信システム、送信器、受信器および光送受信方法、日本、平成25年3月22日、平成25年12月20日、特許第5438856号
- [2]吉田光輝、山崎悦史、岡本聖司、堀越健吾、石原浩一、小林孝行、木坂由明、富澤将人、藤原直樹、片岡智由、米永一茂、光受信装置および光受信方法、日本、平成25年3月28日、平成27年1月16日、特許第5681743号
- [3]野坂秀之、村田浩一、“コヒーレント光通信用増幅器”、日本、平成26年3月27日、平成27年3月27日、特許第5719461号

【国際標準提案・獲得リスト】

- [1]Optical Internetworking Forum, oif2013.351.01, Input on Driver Amplifier Linearity Guideline for Coherent CFP2, 平成24年10月21日
- [2]Optical Internetworking Forum, oif2014.007.00, Drive Level and Linearity for CFP2-ACO Transceiver IA, 平成25年1月21日
- [3]Optical Internetworking Forum, oif2014.008.00, Digital interface for micro-ICR, 平成26年1月17日

【報道掲載リスト】

- [1]“光通信速度3倍へ技術開発”、日本経済新聞、平成24年12月12日
- [2]“NTT・NEC・富士通、光伝送を大容量化―従来比4倍、毎秒400ギガビットにめど”、日刊工業新聞、平成26年9月5日
- [3]“光信号で送信速度4倍”、日経産業新聞、平成27年3月24日