

# 巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発

The research and development project for the Tera-bit optical network technologies towards big data era

## 研究代表者

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

## 研究分担者

宮本裕<sup>†</sup> 平野章<sup>†</sup> 木坂由明<sup>†</sup> 濱岡福太郎<sup>†</sup> 岡本聖司<sup>†</sup> 小林正啓<sup>†</sup> 山崎悦史<sup>†</sup> 中村政則<sup>†</sup>  
松下明日香<sup>†</sup>  
岡村敦<sup>††</sup> 杉原隆嗣<sup>††</sup> 久保和夫<sup>††</sup> 亀谷聡一郎<sup>††</sup> 石井健二<sup>††</sup> 松田恵介<sup>††</sup> 吉田英夫<sup>††</sup>  
鈴木巨生<sup>††</sup> 中村隆彦<sup>††</sup> 三浦浩志<sup>††</sup> 野口由比多<sup>††</sup> 平野進<sup>††</sup>  
津村聡一<sup>†††</sup> 宮川伸也<sup>†††</sup> ル・タヤンディエ・ドウ・ガボリ エマニュエル<sup>†††</sup> 藤田定男<sup>†††</sup>  
野口栄実<sup>†††</sup> 安部淳一<sup>†††</sup> 柴山充文<sup>†††</sup> 竹下仁士<sup>†††</sup> 松井淳一郎<sup>†††</sup> 渋谷真<sup>†††</sup> 野村昌弘<sup>†††</sup>  
辻聡<sup>†††</sup> 堀田聡美<sup>†††</sup> 吉原知樹<sup>†††</sup> 佐藤正規<sup>†††</sup>  
寺原隆文<sup>††††</sup> 尾中寛<sup>††††</sup> 星田剛司<sup>††††</sup> 秋山祐一<sup>††††</sup> 中島久雄<sup>††††</sup> 荻原裕史<sup>††††</sup>  
小牧浩輔<sup>††††</sup> 遠藤岳人<sup>††††</sup> 斉藤卓<sup>††††</sup> 竹内理<sup>††††</sup> 前田泰三<sup>††††</sup> 尾花裕治<sup>††††</sup>  
小林茂幸<sup>††††</sup> 岡田直也<sup>††††</sup> 鈴木大<sup>††††</sup> 松下修造<sup>††††</sup>  
Yutaka Miyamoto<sup>†</sup> Akira Hirano<sup>†</sup> Yoshiaki Kisaka<sup>†</sup> Fukutaro Hamaoka<sup>†</sup> Seiji Okamoto<sup>†</sup>  
Shoukei Kobayashi<sup>†</sup> Etsushi Yamazaki<sup>†</sup> Masanori Nakamura<sup>†</sup> Asuka Matsushita<sup>†</sup>  
Atsushi Okamura<sup>††</sup> Takashi Sugihara<sup>††</sup> Kazuo Kubo<sup>††</sup> Souichiro Kametani<sup>††</sup> Kenji Ishii<sup>††</sup>  
Keisuke Matsuda<sup>††</sup> Hideo Yoshida<sup>††</sup> Naoki Suzuki<sup>††</sup> Takahiko Nakamura<sup>††</sup> Hiroshi Miura<sup>††</sup>  
Yuhita Noguchi<sup>††</sup> Susumu Hirano<sup>††</sup>  
Souichi Tsumura<sup>†††</sup> Shinya Miyagawa<sup>†††</sup> Emmanuel Le Taillandier de Gabory<sup>†††</sup> Sadao Fujita<sup>†††</sup>  
Hidemi Noguchi<sup>†††</sup> Junichi Abe<sup>†††</sup> Mitsufumi Shibayama<sup>†††</sup> Hitoshi Takeshita<sup>†††</sup> Junichiro Matsui<sup>†††</sup>  
Makoto Shibutani<sup>†††</sup> Masahiro Nomura<sup>†††</sup> Satoshi Tsuji<sup>†††</sup> Akemi Hotta<sup>†††</sup> Tomoki Yoshihara<sup>†††</sup>  
Masaki Sato<sup>†††</sup>  
Takafumi Terahara<sup>††††</sup> Hiroshi Onaka<sup>††††</sup> Takeshi Hoshida<sup>††††</sup> Yuichi Akiyama<sup>††††</sup> Hisao Nakashima<sup>††††</sup>  
Hiroshi Ogiwara<sup>††††</sup> Kousuke Komaki<sup>††††</sup> Taketo Endo<sup>††††</sup> Taku Saito<sup>††††</sup> Osamu Takeuchi<sup>††††</sup>  
Taizo Maeda<sup>††††</sup> Yuuji Obana<sup>††††</sup> Shigeyuki Kobayashi<sup>††††</sup> Naoya Okada<sup>††††</sup> Dai Suzuki<sup>††††</sup>  
Shuzo Matsushita<sup>††††</sup>  
<sup>†</sup>日本電信電話株式会社 <sup>††</sup>三菱電機株式会社 <sup>†††</sup>日本電気株式会社 <sup>††††</sup>富士通株式会社  
<sup>†</sup>NTT Corporation <sup>††</sup>Mitsubishi Electric Corporation <sup>†††</sup>NEC Corporation <sup>††††</sup>Fujitsu Limited

研究期間 平成 27 年度～平成 29 年度

## 概要

本研究開発では、ますます増える基幹ネットワークの伝送容量への要求に対応するため、高度な光伝送方式を用いた高速大容量光伝送技術並びに最新の電子回路技術を駆使し低消費電力化を進めたデジタル信号処理回路技術に関する研究開発を実施した。これにより 100Gbps 級光伝送技術に対し送受信機（実装サイズ）当たりの伝送容量を 10 倍にし、消費電力（同一通信処理速度で比較）を 1/4 にする 1Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術を確立した。

### 1. まえがき

超高精細映像やビッグデータ等の流通、移動通信トラヒックの急激な増加や、機器同士、端末同士など人間が介在しない通信トラヒックの増加の本格化が想定されることなどから、我が国の通信トラヒック量は増加を続け、今後も基幹ネットワークを支える光ネットワークに要求される伝送容量はますます大きくなることが予想される。現在、100Gbps 級の光伝送技術が普及しつつあり、これに続く 400Gbps 級光伝送技術の開発が進められているが、さらなる高速大容量化と低消費電力化を進めた光伝送技術が要求されている。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、トラヒック量や伝送距離・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。

本研究開発は、基幹ネットワークの長距離伝送に適したデジタルコヒーレント方式において、より高度な光伝送技術や低電力デジタル信号処理技術を導入し、1 波長あたり 1Tbps 級の容量を有し、トラヒック量や伝送距離・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を確立した。更に、これら技術を適用した送受信信号処理回路全体構成の最適化を行って、消費電力を従来比 1/4 に削減する技術を確立した。これらの技術の確立により、巨大データ流通を支える次世代光ネットワークの実現に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 1 テラビット級高速大容量光伝送技術

【研究開発内容】

100Gbps 級光伝送技術に対し、送受信機（実装サイズ）

当たりの伝送容量を 10 倍にするため、以下の到達目標を設定する。

ア) 適応変調符号化技術

上記 10 倍の伝送容量の実現に資する適応変調符号化技術として、以下の基本技術を確立する。

a) 適応変復調基本技術

伝送距離 (100~2,000km 程度)、伝送路の種別 (ITU-T 勧告 G.652~655) に応じて、伝送効率を最大に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の基本技術を確立する。

b) 誤り訂正基本技術

1Tbps を実現するために必要なキャリア数や適用する変調方式、信号品質等に対して、伝送効率を最大にできる誤り訂正処理アルゴリズムおよび尤度生成アルゴリズムの基本技術を確立する。

イ) 伝送システム内歪み補償技術

上記 10 倍の伝送容量の実現に資する伝送システム内歪み補償技術として、以下の基本技術を確立する。

a) 静的等化基本技術

最大 1Tbps となるキャリア成分の復調において、静的な線形歪みの補正を可能とするアルゴリズムの基本技術を確立する。

b) 動的等化基本技術

キャリア数と変復調方式の適応的な可変に対応した上で、最大数 kHz 程度の偏波変動速度と 100ps 程度の偏波モード分散により動的に生じる波形歪みの補正を最も少ない演算規模で実現するための信号処理アルゴリズムの基本技術を確立する。

【研究開発成果】

ア) 適応変調符号化技術

a) 適応変復調基本技術 (NTT)

1Tbps 級の大容量化を実現するために必要となる、伝送距離、伝送路の種別に応じて伝送効率を最大に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の基本技術において基本機能評価結果並びに外部の伝送特性補償機能との連携動作を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、1Tbps 級伝送における伝送路推定方式および信号点制御方式を確立した。

具体的には、伝送路推定方式に関しては、自己相関方式を最良方式として選択し、偏波状態、波長分散、偏波モード分散など様々な負荷条件において、同期感度、同期位置検出誤差、周波数オフセット誤差、波長分散推定精度などの基本性能を評価し、また、動作モード依存性も評価した。その結果、全ての負荷条件において動作モード全体に渡って正常な機能動作を確認した。信号点制御方式に関しては、制御精度、回路規模、消費電力の観点から選定した方式について、伝送路推定方式の評価と同様に実用システムを模擬した様々な負荷条件における性能評価を行った。変調器消光比、IQ 振幅ずれ、IQ スキューずれ等の様々な負荷条件下で、外部の伝送特性補償機能との連携動作を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了 (図 1) し、1Tbps 級伝送における信号点制御方式を確立し、到達目標を達成した。

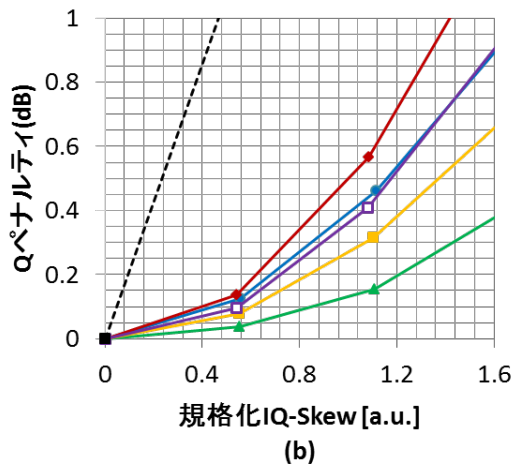
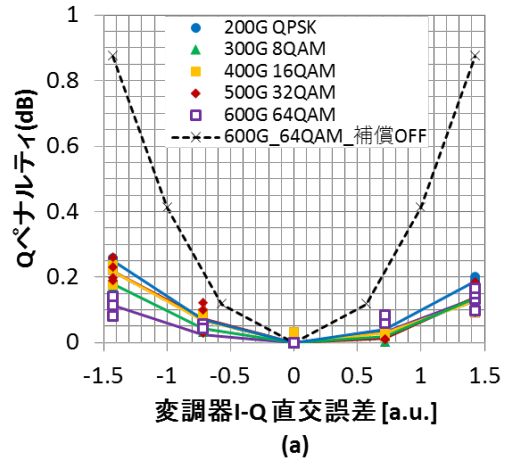


図 1 信号点制御による送信器歪み補償効果評価結果

b) 誤り訂正基本技術 (三菱電機)

最大 1Tbps 級を実現するために必要な様々なキャリア分割数や変調方式に対して、適応的に対応可能な符号化・復号処理アルゴリズムおよび尤度生成アルゴリズムを開発、他の機能との連携を考慮した検証によりアルゴリズムの妥当性を実証し、誤り訂正基本技術を確立した。平成 27 年度に誤り訂正フレーム構成方法および尤度生成方法の検討を行い、符号化・復号処理アルゴリズムおよび尤度生成アルゴリズムの方式仕様を策定、平成 28 年度にそれに基づきハードウェア実装も視野に入れて方式を選定し、基本機能試作を行い、機能動作を確認した。平成 29 年度には、基本機能試作に基づき、フレーム構成や演算ビット精度、歪補償後の信号波形など、課題 I-A)-(a) 適応変復調基本技術および課題 I-I) 伝送システム内歪み補償技術における各機能との連携を考慮した入力信号に対して、本課題の符号化・復号処理および尤度生成の性能検証を行うことでアルゴリズムの妥当性を実証した。DP-QPSK (100Gbps/サブキャリア) から DP-64QAM (600Gbps/サブキャリア) まで総計 19 個、いずれのキャリア分割数と変調方式の組み合わせにおいても、所望の誤り訂正後 BER の特性が得られた (図 2)。以上より従来の 100Gbps 級光伝送技術に対し、送受信機あたり 10 倍の伝送容量を実現することを目的として、最大 1Tbps 級光伝送を実現するために必要なキャリア数や適用する変調方式、信号品質等に対して、伝送効率を最大にできる誤り訂正基本技術を確立し、到達目標を達成した。

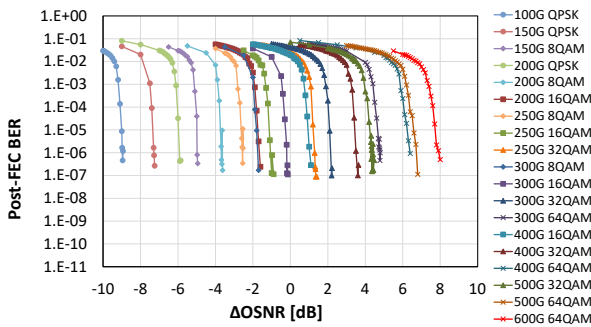
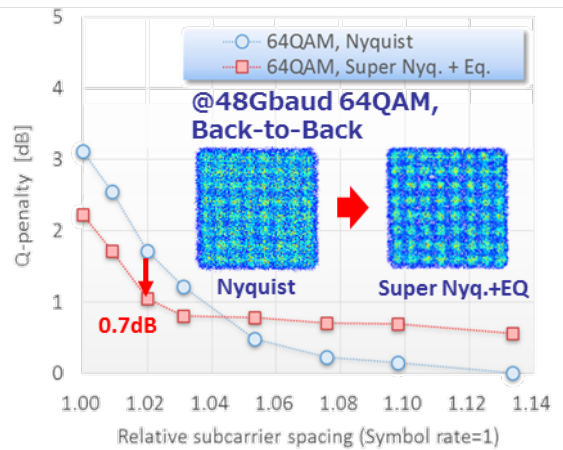


図2 OSNR に対する誤り訂正後 BER の連携動作検証結果

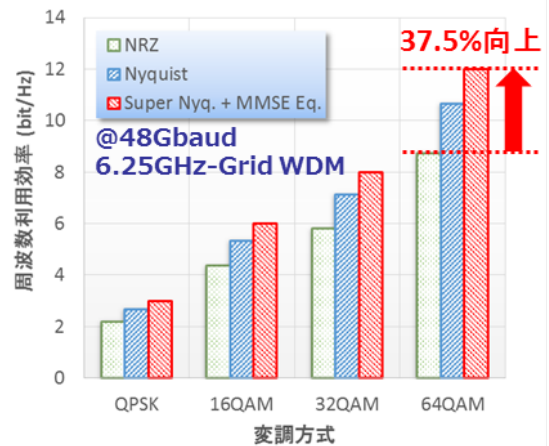
イ) 伝送システム内歪み補償技術

a) 静的等化基本技術 (NEC)

最大 1Tbps となるキャリア成分の復調において、静的な線形歪みの補正を可能とするアルゴリズムの基本技術の検討を行い、64QAM 等の高多値度の変調方式やキャリア分割数に変化する場合にも対応可能とした上で、従来技術 (100Gbps 級光伝送技術) に比べて、同一多値度の変調方式に対して、周波数利用効率を 30%以上向上するサブキャリア多重・分離技術について、他の機能と連携を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、静的等化基本技術を確立した。具体的には、シンボル間の符号間干渉を許容した上でナイキスト方式よりも更に信号帯幅幅を狭帯域化する狭帯域フィルタリングと MMSE (minimum mean square error) 規範に基づく高精度な線形等化の組み合わせにより、周波数利用効率を向上可能なスーパーナイキスト方式について提案を行い、64Gbaud の高速信号、および、64QAM 等の高多値度の変調方式において、商用周波数グリッドを考慮した際の機能モデル検証を実施した (図 3(a))。検討した全変調方式において、NRZ (Non Return to Zero) 波形を用いる従来方式に比べ、30%以上の周波数利用効率改善を確認した。さらに、提案方式の効果を検証するため、従来技術で実用化されている 32Gbaud の信号に対して、その 1.5 倍となる 48Gbaud の信号を用いて、光伝送オフライン実験評価系を構築し、回路実装レベルで記載した統合モデルを用いて信号生成および受信信号の復調を行い、オフライン処理による実機特性評価を実施した。6.25GHz グリッドの波長多重システムを想定し、実際のシステムで必要になるサブキャリア多重間隔の周波数シフトバラつき 1GHz を加味した評価を実施したところ、スーパーナイキスト方式では NRZ 方式に比べて最大 37.5%の改善効果が得られる事を実験的に確認した (図 3(b))。以上の結果により、周波数利用効率を 30%以上向上するサブキャリア多重・分離技術について、他の機能と連携を考慮した信号処理アルゴリズムの動作確認を完了し、静的等化基本技術を確立し、到達目標を達成した。



(a) 提案方式による Q 値改善量効果



(b) 各変調方式の周波数利用効率改善量

図3 静的基本等化技術によるオフライン実証結果

b) 動的等化基本技術 (富士通)

最大 1Tbps を実現し、最大 64QAM 等の高い多値度の変調方式まで、同一の信号処理回路で対応可能な方式を提案し、方式検討および性能評価を行うための機能モデルの作成を完了した。この機能モデルを用いて、偏波変動、偏波モード分散を付加した評価条件において、複数の変調方式で動作確認を行い、偏波変動速度 30kHz 以上、100ps 程度の偏波モード分散に対応できる性能が得られることを確認し、動的等化基本技術を確立した。具体的には、位相変調信号支援型の処理方式を提案・採用し、処理構成と制御パラメータの最適化を実施することで、64QAM の信号に対して 100ps 程度の偏波モード分散耐力 (図 4)、100ps の偏波モード分散が存在する条件下において 30kHz 程度の偏波変動追従性が得られることを確認した (図 5)。

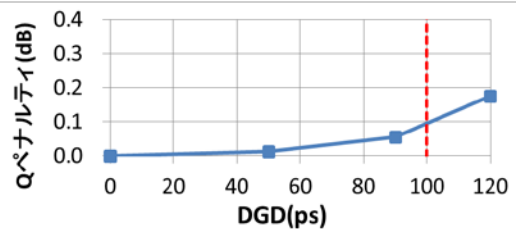


図4 400Gbps 64QAM 偏波モード分散耐力

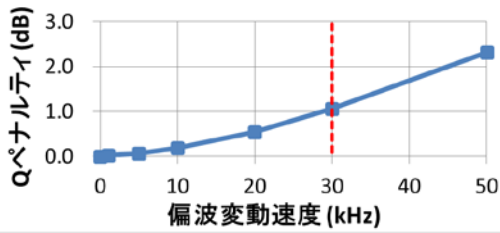


図5 400Gbps 64QAM 偏波変動耐力

## 2. 2 1テラビット級低消費電力光伝送技術

### 【研究開発内容】

1 波長あたり最大 1Tbps の通信処理速度を持つ信号処理回路を 100Gbps 級の信号処理回路に対し同一通信処理速度と比較して 1/4 以下の電力で実現するために必要な以下の到達目標を設定する。

#### ア) 信号処理回路最適設計技術

上記 1/4 以下の消費電力の実現に資する信号処理回路最適設計技術として、以下の回路基本技術を確立する。

##### a) 適応変復調回路基本技術

適応変復調機能として、高速伝送路品質推定機能、推定品質に従って適切な変復調方式を選択する機能、適切なデータマッピングを行う機能等の最適回路設計に向けた基本技術を確立する。

##### b) 誤り訂正回路基本技術

誤り訂正機能として、伝送距離や伝送路種別による伝送特性に応じた信号の変化に対して、最適な処理を行う誤り訂正符号化機能および軟判定誤り訂正復号機能等の最適回路設計に向けた基本技術を確立する。

##### c) 静的等化回路基本技術

線形等化機能として、キャリアが受けた静的な線形歪みを所定の通信処理速度で補正する機能等の最適回路設計に向けた基本技術を確立する。

##### d) 動的等化回路基本技術

動的等化機能として、偏波変動追従機能、偏波モード分散補償機能、搬送波位相再生機能を有する回路の最適設計に向けた基本技術を確立する。

#### イ) 低消費電力信号処理統合検証技術

ア-a) ~d) で開発した各要素技術を統合するとともに光送受信器や光伝送路等のモデル化を行い、全機能アルゴリズムの統合検証を行うことで、100Gbps 級の信号処理回路に対し同一通信処理速度と比較して 1/4 以下の電力で動作可能であることを実証する。

### 【研究開発成果】

#### ア) 信号処理回路最適設計技術

##### a) 適応変復調回路基本技術 (NTT)

1Tbps 級の適応変復調伝送を実現する伝送路推定方式および信号点制御方式の検討において、ハードウェア記述言語および性能評価モデルによる評価結果について等価性を評価し、消費電力・回路規模、そして推定・検出精度について最適化を実施し、適応変復調回路基本技術を確立した。

具体的には、伝送路推定方式に関して、伝送路推定機能の性能評価モデルとハードウェア記述言語モデルの等価性を評価した。実用システムの運用時に非常に近い信号波形が入力される評価系において、クライアント容量 100Gbps~600Gbps、変調方式として QPSK、8QAM、16QAM、32QAM、64QAM までの 5 変調方式を組合せた

動作モードに対して評価を行い、全動作モード、及び全負荷条件において、特性差分がクライテリアに適合する結果を得られた。また、信号点制御方式に関して、ハードウェア記述言語モデルを作成し、性能評価モデルとの等価性を確認した。ハードウェア化の演算ビット精度制限による信号品質劣化、及び係数制御誤差が性能クライテリアを満たすことを確認した (図 6)。最後に、伝送路推定方式および信号点制御方式に関して、最先端 CMOS テクノロジライブラリを用いてハードウェア記述言語をハードウェアに合成して、CMOS 回路実装性を評価し、そのタイミング収束性、回路規模、消費電力を評価し、実回路へ実装可能であること、及び回路規模・消費電力が目標を満たしていることを確認した。これらを通じて、適応変復調回路基本技術の信号処理回路最適設計技術を確立し、到達目標を達成した。

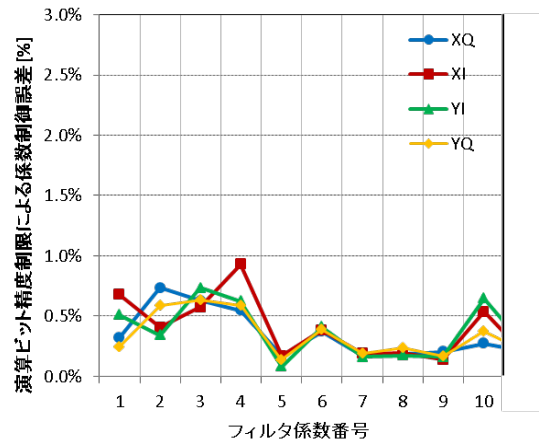


図6 ハードウェア演算ビット精度制限によるフィルタ係数制御誤差評価結果

##### b) 誤り訂正回路基本技術 (三菱電機)

伝送距離や伝送路種別による伝送特性に応じた信号の変化に対して、最適な処理を行う誤り訂正符号化機能および軟判定誤り訂正復号機能について、設計した基本回路に基づき、最先端 CMOS 技術を適用した場合の回路規模と消費電力を合成ツールおよびシミュレーションにより算定した。さらに符号化利得と消費電力とを最適化する電力スケールングの効果を確認し、誤り訂正回路基本技術を確立した。

最大 1Tbps 級を実現するためのキャリア分割数や多値度に対して最適な処理を行うための符号化回路・復号回路アーキテクチャとして、マルチコア誤り訂正演算制御方式を適用し伝送速度、キャリア分割数や多値度に応じて、誤り訂正符号の演算処理を複数の誤り訂正演算コアへ振り分けるとともに、演算回数を適応的に調整して処理することにより、誤り訂正機能として最適な処理を実現した (図 7)。本研究成果による誤り訂正基本回路の 100Gbps 当たりの消費電力は、従来に比べて 75.6%低減されており、従来の 100Gbps 級光伝送技術における誤り訂正回路に対し同一通信処理速度と比較して 1/4 以下の消費電力を実現した。また符号化利得と消費電力とを最適化する電力スケールングの効果を確認するため、入力 SNR に対する軟判定 FEC デコーダの動作率を算出し、デコーダの繰り返し回数制御により消費電力の抑制が実現可能であることを示した。

これらにより伝送距離や伝送路種別による伝送特性に応じた信号の変化に対して、最適な処理を行う誤り訂正符号化機能および軟判定誤り訂正復号機能の最適回路設計に

に向けた基本技術を確認し、到達目標を達成した。

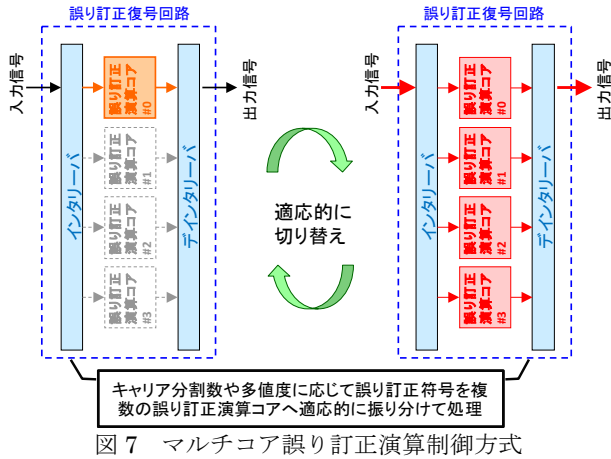


図7 マルチコア誤り訂正演算制御方式

c) 静的等化回路基本技術 (NEC)

1Tbps 級の通信処理速度を実現するための歪み補償処理に向けた静的等化回路について、適応的パラメータ制御 FDE (frequency domain equalization) 方式による線形適応等化回路に対して、演算精度、回路規模、消費電力の観点から回路最適化を実施した。具体的には、設計効率化方式による回路記述の自動生成環境を適用して生成した複数の回路バリエーションの回路記述から、適応的パラメータ制御 FDE 回路の回路記述を生成した。つぎに、検証容易化設計方式による期待値モデルの自動生成環境を適用して生成した複数の回路バリエーションの回路記述に対応する期待値モデルから、適応的パラメータ制御 FDE 回路の期待値モデルを生成した。これら回路記述と期待値モデルを用いて、回路規模や消費電力の観点で評価し、回路最適化を実施した。この際、回路最適化の方式として、データビット幅やパイプライン数、パイプライン位置の最適化などに加えて、データ符号化形式や線形歪補償フィルタ回路による IQ レーン個別補償機能及び周波数オフセット補償機能の動作制御の最適化による低電力化を図った。動作シミュレーションから得た回路のトグル率をベースに評価した結果、これらの最適化により、最大 27.2% の電力削減が可能であることを確認した (図 8)。さらに、回路記述の妥当性を確実なものとするため、レイアウト工程まで考慮したゲートレベル回路記述を部分試作した。この部分試作により、最先端の微細 CMOS プロセスの適用により、適応的パラメータ制御 FDE 回路が実用的な回路面積、及び消費電力で実現可能であることを確認した。以上の回路最適化の実施、及び評価により、静的等化回路基本技術を確認し、到達目標を達成した。

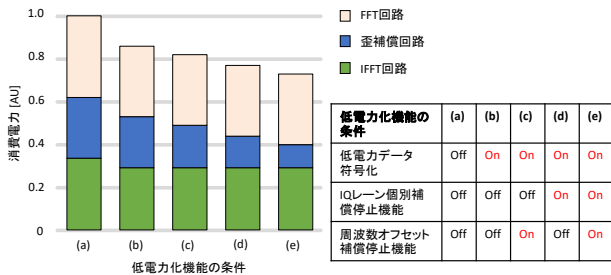


図8 適応的パラメータ制御による低電力化機能の評価結果

d) 動的等化回路基本技術 (富士通)

最大 1Tbps を実現し、最大 64QAM 等の高い多値度に適応的に対応するために、複数の変調方式を実現可能な論理構造設計を行い、RTL を作成した。次に、機能モデルと

RTL の等価性検証および消費電力見積もりを実施し、動的等化回路の基本技術を確認した。

具体的には、適用を想定する 16nm プロセス CMOS の伝播遅延特性及び電力特性から、最適なクロック動作速度と基本的な回路構成を決定し、複数の変調方式に対応した共通回路化を検討して論理構造の設計を行った。この設計結果を用いて System C による高位言語コーディングを行い、高位合成ツールを使用して RTL を作成した。次に、機能モデルと RTL の等価性検証を実施した。偏波変動追従、偏波モード分散補償、搬送波位相再生の諸性能について、伝送容量 100Gbps から 600Gbps、変調方式 QPSK から 64QAM までの組み合わせで機能モデルと RTL の等価性検証を実施し、雑音波形の統計揺らぎの範囲内ではほぼ完全に一致することを確認した。図 9 に、機能モデルと RTL の等価性検証結果の一例を示し、縦軸は機能モデルを基準にした時の RTL 差分値を示す。さらに消費電力見積もりを実施し、適用する CMOS テクノロジーへの配置配線処理後の回路を元に消費電力値を算出した。100Gbps 当たりの消費電力は、600Gbps 64QAM 伝送において従来比 13% と大幅な削減を達成した。

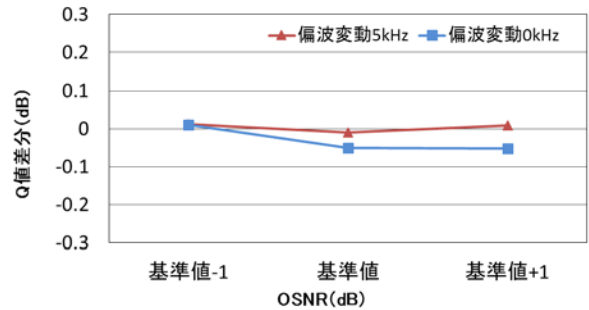


図9 機能モデルと RTL の等価性検証結果 (600Gbps 64QAM)

イ) 低消費電力信号処理統合検証技術 (NTT)

機能ブロック毎に作成した RTL レベルの回路モデルを統合し、統合検証プラットフォーム (検証エミュレーション環境) を開発した。この統合検証プラットフォームを用いた統合検証により、光増幅器による雑音に対する耐力 (OSNR 耐力) 特性並びに FEC 耐力特性について 200G QPSK、300G 8QAM、400G 16QAM、500G 32QAM、600G 64QAM 信号モードに対して性能評価モデル統合検証プラットフォームとの等価性を評価し、両者がほぼ同等の特性となることを確認し、本回路設計手法の妥当性が確認できた。基本回路動作および消費電力評価を行い、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 1/4 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 (図 10)、低消費電力信号処理統合検証技術を確認した。

さらに、一部機能を実装したプリプロトタイプを開発した。高ボーレート動作の確認として、600G 64QAM 信号の信号疎通を確認し、実装した機能が正常動作していることを確認した。さらに 32Gbaud-100G QPSK 信号、65Gbaud-200G QPSK 信号、32Gbaud-200G 16QAM 信号並びに 65Gbaud-400G 16QAM 信号に対して信号疎通を確認し、ボーレート、変調方式に依らず動作することを確認した (図 11)。以上のことから、到達目標を達成するとともに実機での機能動作検証を実施し、技術検証レベルを向上させた。

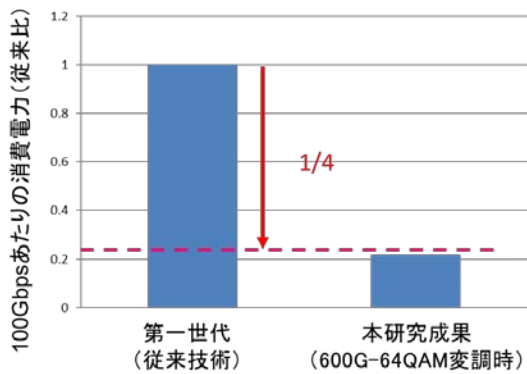


図 10 統合回路の動作データを用いた消費電力評価結果

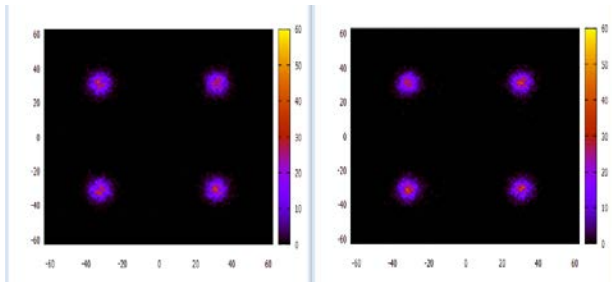


図 11 200G QPSK コンスタレーション

### 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

社会展開に向けた取組方針や計画に関しては、国際標準化については、OIF および ITU-T に本研究開発成果に関連する寄書提案を行ってきたが、今後も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取り組んでいく。1T 級デジタル信号処理 LSI の商用化に向けては、100Gbps 級デジタル信号処理 LSI の顧客との関係を活用して引き続きグローバル展開を図っていく。今後はシステムベンダと協力して技術の完成度を高めて、実際にネットワークを構築・運用する事業者に対して本研究開発成果技術の利点と実現性を継続的にアピールし、数年内に実ネットワークへの導入を目指す。また、三菱電機は海底ケーブルシステムや陸上波長多重光伝送システムに本開発成果を搭載して行くことにより社会展開を図り、日本電気は 1Tbps 級の光伝送装置や光モジュールを平成 32 年までに製品化することを目指し、富士通は光伝送装置を、平成 32 年度を目処に市場投入を行うことで、本研究開発成果の社会展開を図る。

アウトカム以外に期待される波及効果に関しては、最大 64QAM 等の高度な適応変復調技術の採用により、従来は限定的な変調方式と伝送容量であったものが、様々な変調方式をより高いレベルでフレキシブルに変えることが可能となる。これにより、トラヒック需要や要求伝送距離に応じて、周波数利用効率と伝送距離のフレキシブルな最適化をより高い自由度で実現するエラスティック光トランスポートネットワークの実現が可能となると考えている。ITU-T でもフレキシブルグリッドとして一部の概念が標準化されており、今後の光ネットワーク研究の大きな流れの一つとなっていくと考えられる。

今後、本研究の開発技術及び波及技術を含む製品化が期待されるほか、大幅な大容量化が求められるメトロ/アクセス系やデータセンター間通信等への展開も期待される。低消費電力化に関しては、光通信分野だけではなく通信分野

全体の低消費電力化へ貢献する技術として期待される。

### 4. むすび

平成 27 年度から 29 年度までの 3 年間の委託研究期間において、1 波長あたり 1Tbps 級の容量を有し、トラヒック量や伝送距離・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、誤り訂正基本技術、静的等化基本技術、動的等化基本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、100Gbps 級光伝送技術に対し送受信機(実装サイズ)当たりの伝送容量を 10 倍にし、消費電力(同一通信処理速度で比較)を 1/4 にする高速大容量・低消費電力光伝送技術を確立した。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。

#### 【誌上发表リスト】

- [1]秋濃俊昭、小島啓介、David Millar、Kieran Parsons (Mitsubishi Electric Research Laboratories)、吉田剛、杉原隆嗣(三菱電機株式会社)、“Pareto Optimization of Adaptive Modulation and Coding Set in Nonlinear Fiber-Optic Systems”、Journal of Lightwave Technology, Vol.35, NO.4, pp.1041-1099, (平成 28 年 9 月 8 日)
- [2]小山智史、谷村崇仁、Jens. C. Rasmussen (富士通研究所) 星田剛司、中島久雄、秋山祐一(富士通株式会社)、“Linewidth-Tolerant Carrier Phase Estimation for N-PSK Based on Pilot-Assisted N/2th-power Method”、ECOC2016 (デュッセルドルフ) (平成 28 年 9 月 22 日)
- [3]佐藤正規、野口栄実、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、松井淳一郎、安部淳一、“Transmission of 200G PM-16QAM Subcarriers with Reduction of Penalty from Linear Crosstalk Using Super-Nyquist Filtering and Low Complexity MMSE”、Asia Communications and Photonics Conference 2017 (ACP2017) (広州) (平成 27 年 11 月 23 日)

#### 【申請特許リスト】

- [1]中村政則、吉田光輝、米永一茂、平野章、光伝送システム、日本、平成 28 年 3 月 24 日、平成 29 年 1 月 20 日、特許 6077696

#### 【国際標準提案リスト】

- [1]ITU-T SG15 Q11・Interim meeting, WD11-11, OSNR requirement based on the black-link in G.698.2、平成 27 年 10 月 16 日
- [2]ITU-T SG15 Q11/15, C.40, Request to consent Draft new Recommendation G.709.otu4lr、平成 29 年 6 月 19 日
- [3]ITU-T SG15 Q6・Interim meeting, WD06-16, OSNR requirement based on the black-link in G.698.2、平成 29 年 10 月 16 日

#### 【報道掲載リスト】

- [1]“コヒーレント DSP で革新”、電経新聞、平成 28 年 3 月 28 日
- [2]“NEC、都市の通信を支えるメトロネットワークの構築に適した小型の packets 光統合トランスポート装置を発売”、日経新聞、平成 29 年 2 月 24 日
- [3]“NTT コムなど、データセンター間を接続するネットワークへ超大容量 400 ギガビット伝送装置を導入”、日本経済新聞、平成 29 年 4 月 7 日