

新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発

課題 I . 5Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術

Research and Development of innovative optical network technology that bears new social infrastructure . Part I . 5-terabit class ultra high speed, large-capacity, and low-power digital coherent optical transmission technology.

代表研究責任者 木坂 由明 日本電信電話株式会社 未来ねっと研究所
研究開発期間 平成 30 年度～令和 3 年度

【Abstract】

This paper describes the results of Research and Development of innovative optical network technology that bears new social infrastructure (Technological Theme I). In this project, next-generation digital coherent optical transmission technologies with 5-terabit class per channel capacity have successfully been developed.

Advanced modulation format employing high-order modulation, constellation shaping, multi-carrier technology, and ultra high speed signaling were developed to realize large data capacity. Fixed and adaptive equalizers were specially designed to achieve sufficient performance to handle the advanced modulation format signal. Advanced scheme for forward error correction code were developed to achieve high-performance and low-power consumption simultaneously.

All those technologies were tested in simulation models and implemented into circuit models, in order to verify function, performance, power consumption, and feasibility. Outlook for practical realization in industries are also described in the last part of the paper.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 木坂 由明 (日本電信電話株式会社 未来ねっと研究所)
- **研究分担者**
 - 野田 雅樹 (三菱電機株式会社 情報技術総合研究所)
 - 菅谷 靖 (富士通株式会社 フォトニクスシステム事業本部)
 - 津村 聡一 (日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所)
- **総合ビジネスプロデューサ** 高原 厚 (NTTエレクトロニクス)
- **ビジネスプロデューサ**
 - 西沢 秀樹 (日本電信電話株式会社 フロンティアコミュニケーション 研究部)
 - 清水 克宏 (三菱電機株式会社 社会システム事業本部)
 - 塩田 昌宏 (富士通株式会社 フォトニクスシステム事業本部)
 - 朝日 光司 (日本電気株式会社 第一ネットワークソリューション事業部)

○ **研究開発期間** 平成 30 年度～令和 3 年度

○ **研究開発予算** 総額 2,002 百万円

(内訳)

平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度 (令和 2 年度 3 次補正予算)
500 百万円	506 百万円	498 百万円	498 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

超高精細映像の流通や IoT・ビッグデータの利用や AI 等の普及によって通信トラヒックは急速に増大している。それに伴い、デジタルコヒーレント技術を利用した 400Gbps 級の光伝送技術が商用ベースで普及しつつあり、1Tbps 超級の光伝送技術の開発も進行している。このような状況下でトラヒック需要の成長は依然として指数関数的な拡大を見せており、光通信のさらなる大容量化は不可欠である。次世代の光伝送方式として、1T を大きく上回る運用単位を有する大容量が必要と考えられ、また低消費電力化も求められている。このような大容量化と低消費電力化を同時に実現するため、高度変復調方式やマルチキャリア連携などの光伝送技術の基盤技術の確立が必要である。

本研究開発は、高速大容量なチャンネル容量 5Tbps 級（運用単位）の光伝送システムにおいて高度な光伝送方式に要求されるデジタル信号処理技術を導入し、新たな光伝送方式に対応可能な高速多値光送受信技術と伝送劣化補償技術を確立し、5Tbps 級の大容量光伝送を実現する。また、5Tbps 級のデジタル信号処理回路において 100Gbps 級の信号処理回路に対し、同一通信速度で比較して動作電力を 1/6 以下にするため、各信号処理技術の最適化を行って、最新の電子回路技術を駆使した低消費電力デジタル信号処理回路技術の確立を目指す。

3 研究開発成果（アウトプット）

3. 1 5Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術

ア) 高速多値光送受信技術

a) 高度変復調方式基本技術

5Tbps を実現するために必要なボーレートおよびキャリア数等を決定し、伝送効率を最大にできる多次元符号化等の高度変調方式アルゴリズムおよび光送受信特性バラつき推定・補償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

5Tbps を実現するために定めたキャリア数、多値直交振幅変復調方式および符号化変復調方式等に対して、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) 伝送劣化補償技術

a) 信号等化基本技術

5Tbps を実現する符号化変調等のフレキシブルな変調方式・伝送速度に対して、光ファイバ伝送システムで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等化処理アルゴリズムの基本技術を確立する。

b) クロストーク抑圧基本技術

5Tbps を実現するボーレートやキャリア数等に対して、光ファイバ伝送システムで生じるキャリア間の線形／非線形干渉を抑圧・補償を可能とするクロストーク抑圧信号処理アルゴリズムの基本技術を確立する。

ウ) 伝送システム最適化設計技術

ア) イ) で検討した要素技術を選定・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、機能連携アルゴリズムの統合検証を行うことで、目標の伝送特性を実現する信号処理機能全体の最適化設計に向けた基本技術を確立する。

エ) 低電力回路最適化設計技術

a) 低電力回路統合検証技術

ア) イ) で検討した各要素技術の最適回路設計に向けた基本技術を確立し、各信号処理回路の統合検証を行うことで、100Gbps 級の信号処理回路に対し、同一通信処理速度で比較して 1/6 以下の電力で動作可能であることを確認し、低電力回路統合検証技術を確立する。

b) マルチチップ高周波実装技術

5Tbps 級の光伝送システムを実現するために必要な高度な光伝送方式に対応した高速アナログ電気インタフェースやデバイス間連携インタフェースの性能・実装検討を行い、光送受信器を含めた特性検証を行うことで、マルチチップ高周波実装技術を確立する。

ア) 高速多値光送受信技術

a) 高度変復調方式基本技術（日本電信電話）

5Tbps 級光伝送を実現する 800Gbps×6 波長および 1.2Tbps×4 波長を実現する高度変復調方式としてコンスタレーションシェーピング方式およびサブキャリア変調方式、送受信デバイス特性補償基本技術としてマルチステップ推定方式を開発し、実環境を模擬した外部環境モデルによる動作確認を完了し、高度変復調技術および送受信デバイス特性補償基本技術を確立した。

高度変復調方式基本技術として、平成 30 年度にコンスタレーションシェーピングおよびジオメトリックシェーピング方式の基本評価として従来変復調方式からの雑音耐力の改善効果を明確化し 5Tbps 級光伝送の 130GBaud 級 800Gbps×6 波長および 130GBaud 級 1.2Tbps×4 波長での実現の可能性を明らかにした。さらに令和元年度から令和 2 年度に、コンスタレーションシェーピングが現実的な信号処理演算量で雑音耐力の改善が可能であることを示しコンスタレーションシェーピング方式を選定し、光ファイバ伝送路を仮定したシミュレーションによりマルチキャリア変調方式の特性を評価し、波長分散耐力が向上することからマルチキャリア変調方式も選定した。さらに令和 3 年度には、図 3.1-1 に示すように実環境を想定した機能シミュレーションにおいて 400Gbps、800Gbps、1.2Tbps が所望の雑音耐力性能が得られることを確認した。

送受信デバイス特性補償基本技術として、平成 30 年度から令和 2 年度にかけて基本特性を評価しマルチステップ推定方式を選定した。さらに令和 3 年度に実環境を想定した外部環境モデルにおいてマルチステップ推定方式の推定精度および補償係数を送受信 DSP の信号処理部に反映した際の補償性能を評価した。送受信機の不完全性として I/Q 振幅比率を変化させ際の結果を図 3.1-2 に示す。送受信機の最適化後において Q 値ペナルティが 0.1dB 以下まで改善していることを確認した。以上より、高度変復

調技術および送受信デバイス特性補償基本技術を確立し到達目標を達成した。

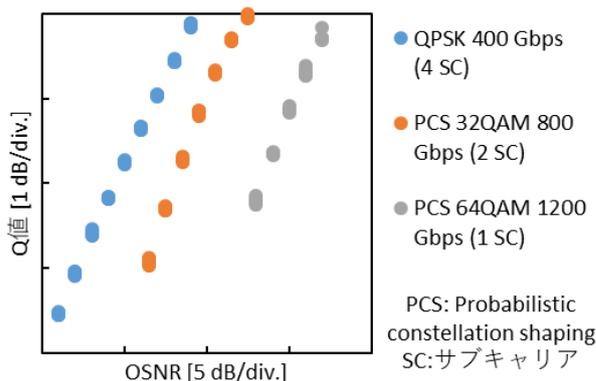


図 3.1-1 OSNR 耐力評価結果 (130 GBaud 級)
※サブキャリアあたりのボーレートの合計

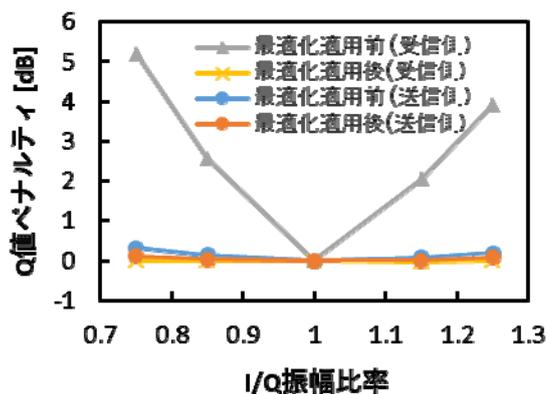


図 3.1-2 I/Q 振幅インバランス推定・補償結果
134-GBaud PCS64QAM (800 Gbps)

b) 誤り訂正基本技術 (三菱電機)

最大 5Tbps 級光伝送を実現するために必要なキャリア数 (800Gbps x 6 キャリア)、多値直交振幅変復調方式および符号化変復調方式等の高度な変調方式に対して、誤り訂正性能と消費電力のバランスに優れた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を開発し、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 30 年度に多値直交振幅変復調方式および符号化変復調方式等に親和性の高い誤り訂正アルゴリズム方式を抽出し訂正性能の評価を実施するとともに、高度な変調方式としてプロバビリスティックシェーピング (Probabilistic Constellation Shaping : PCS) に着目し、親和性の高い尤度生成アルゴリズムの検討を実施した。令和元年度はプロバビリスティックシェーピングの性能や情報長に柔軟に対応可能で、回路規模の低減・低電力化が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の選定を実施した。更に令和 2 年度は、回路規模・消費電力と誤り訂正性能のバランスを考慮して、5Tbps 級光伝送を実現するプロバビリスティックシェーピングを適用した多値直交変復調方式に対応するマルチレベル符号化 (Multi-Level Coding) ・マルチステージ復号構成の適用を検討し、基本機能の試作を実施した。最終年度となる令和 3 年度は前年度までに開発した基本機能試作に基づき、課題 ア-a) 高度変復調方式基本技術、イ-a) 信号等化基本技術、b) クロストーク抑圧基本技術、ウ) 伝送システム最適化設計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った。図 3.1-3 に性能検証結果を示す。400G PCS-MCL 16QAM、800G PCS-MCL 32QAM、800G PCS-MCL 64QAM について、所要 OSNR 期待値である 18dB、22.5dB、28dB を満足する特性が得られ、アルゴリズムの妥当性を確認した。以上により、到達目標を達成した。

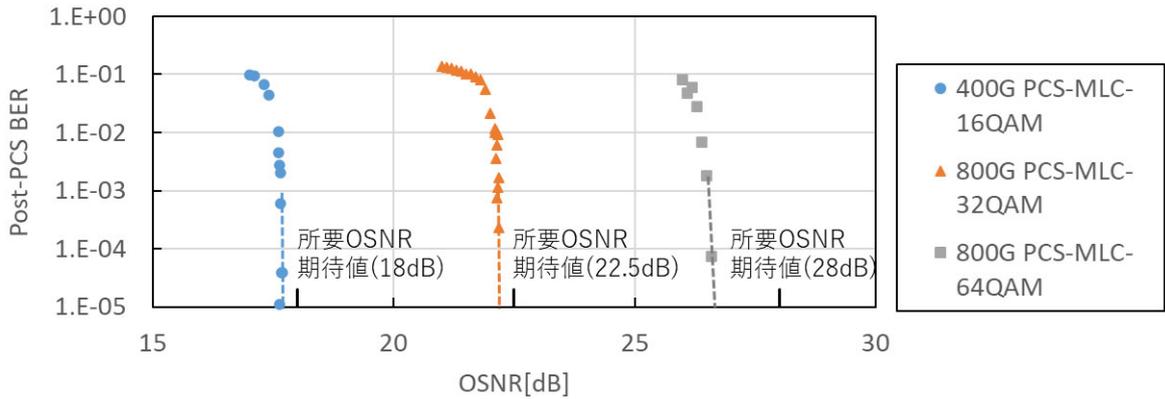


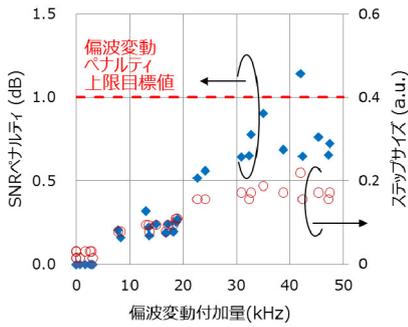
図 3.1-3 他機能との連携を考慮したマルチレベル符号化構成誤り訂正性能評価結果

イ) 伝送劣化補償技術

a) 信号等化基本技術（富士通）

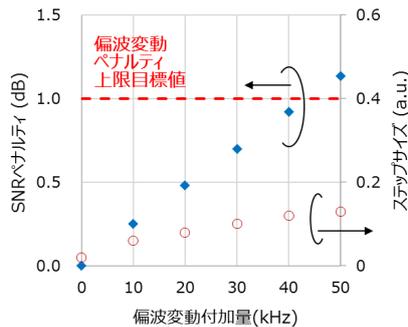
本研究開発では、5Tbps 級光伝送を実現する符号化変調等のフレキシブルな変調方式・伝送速度に対して、光ファイバ伝送システムで生じる波形歪みの補正を最も少ない演算規模で実現する信号等化技術の研究開発を実施した。まず、高速・高多値の伝送において課題となる波形歪み要因と、その歪みを補償するために必要となる等化处理機能の明確化を行い、低演算で信号等化が可能なフラクショナル適応等化处理方式と高精度な偏波変動追従を実現するステップサイズ最適化アルゴリズムを選定した。また、選定したアルゴリズムの性能と回路実現性を評価するため、回路実装も考慮した信号処理アルゴリズムパラメータを最適化した機能モデルの作成と評価を実施し、より実システムで想定される伝送条件を模擬するため、シミュレーション評価だけでなく、実験環境によるオフライン評価を実施し、目標とする偏波変動速度 10kHz 以上、30ps 程度の偏波モード分散に対応可能な性能が得られることを確認した。

具体的には、図 3.1-4 に示すように PCS-64QAM 60Gbaud の信号に対して、偏波変動追従性・偏波モード分散耐力のオフライン評価を実施した。目標性能への到達を判定する SNR ペナルティの上限目標値は、伝送設計で計上する劣化量として許容可能な 1.0dB とした。また、実験評価結果の妥当性確認のため、同一条件で機能モデルシミュレーションとの比較を行った（図 3.1-5 (a)）。オフライン評価結果は機能モデル評価結果と良く一致しており、60Gbaud の速度においても偏波変動速度 30kHz 以上、偏波モード分散耐力 50ps を確保し目標性能を満たしていることを確認した。また、目標とする 100Gbaud を超える伝送速度での性能を確認するため、PCS-64QAM 130Gbaud での機能モデルシミュレーションによる追加評価を行い、60Gbaud に対して偏波変動追従性能の向上を確認した（図 3.1-5 (b)）。これは、高ボーレート化により偏波変動追従に用いる制御用信号の速度が上昇したためである。以上のオフライン実験評価と機能モデルシミュレーション評価結果より、提案方式が目標性能を達成できることを確認し、信号等化基本技術を確立した。

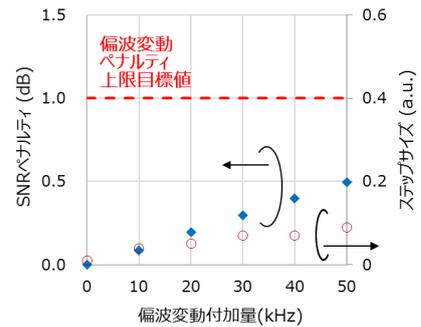


PCS-64QAM 60Gbaud
(偏波モード分散 50ps)

図 3.1-4 オフライン評価



(a) PCS-64QAM 60Gbaud
(偏波モード分散 50ps)



(b) PCS-64QAM 130Gbaud
(偏波モード分散 50ps)

図 3.1-5 機能モデルシミュレーション

b) クロストーク抑圧基本技術（日本電気）

5Tbps 級の高速大容量な光通信システムを実現するマルチキャリア光伝送の復調において、マルチキャリア間に生じるクロストークを抑圧する信号技術として、多次元符号化変調などの高度変調方式の適応的な変化やキャリア分割数の変化に対応可能な信号処理方式技術を開発し、他の課題と連携を考慮した信号処理アルゴリズムの機能動作検証を完了し、クロストーク抑圧基本技術を確立した。

具体的には、平成 30 年度および令和元年度に、複数の信号処理アルゴリズム候補について、光送受信性能、演算リソースの観点から比較検討を行い、令和 2 年度には周波数利用効率、回路規模、高度変調方式への対応容易性の観点から、ポーレート間隔程度のマルチキャリア多重で有用であるスーパーナイキスト MMSE (minimum mean square error) 方式を選定し、64QAM、PCS (probabilistic constellation shaping) 変調を使ったシミュレーションにより、周波数利用効率向上の効果を明らかにした。令和 3 年度には、より実環境に近い光伝送条件での特性評価のため、1000km 伝送後の特性検証を実施した。図 3.1-6 は光伝送シミュレーションによる評価結果であり、シンボルレート 100Gbaud、情報速度 4.0 bit/symbol とした 64QAM ベースの 4 デジタルサブキャリア偏波多重 PCS 信号を生成し、他の課題との連携を考慮した特性検証を実施した。5Tbps 級に相当する 7ch 伝送において、従来方式となるナイキスト方式に対してチャンネル間隔を狭めた際のクロストークによる Q 値劣化量が大きく改善すること (図 3.1-6 (a))、また、1000km 伝送後においても良好なコンスタレーションが得られていることを確認した (図 3.1-6 (b))。以上により、5Tbps 級を実現するクロストークを抑圧する信号処理アルゴリズムについて、光送受信性能、光伝送特性の観点から機能動作検証を完了し、到達目標を達成した。

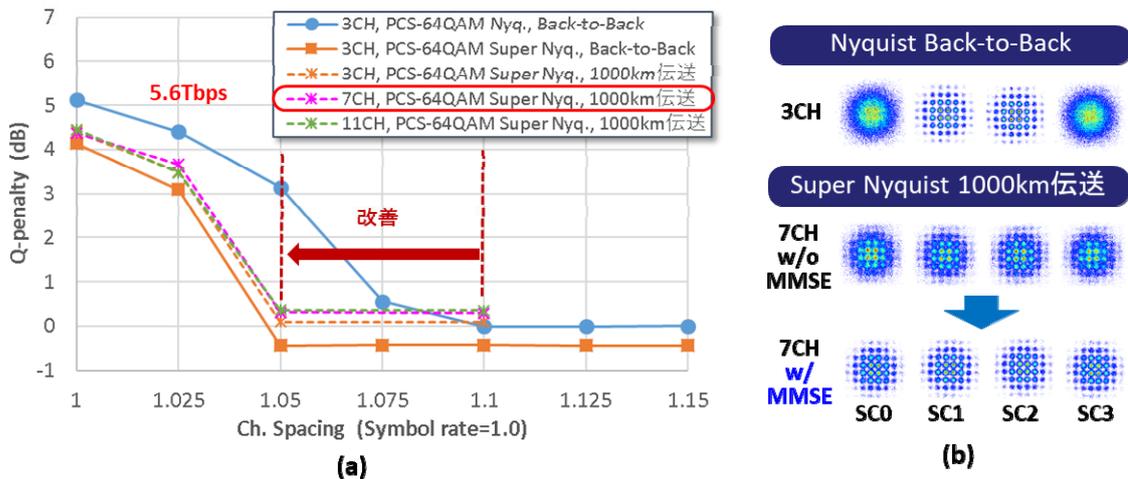


図 3.1-6 クロストーク抑圧基本技術による連携動作検証結果

ウ) 伝送システム最適化設計技術 (日本電信電話)

課題ア)、イ) で検討した要素技術を選定・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、信号品質に影響すると想定される光送受信デバイスのパラメータを組み込んだ統合機能モデルを用いて、光送受信デバイスの線形および非線形な歪み、光ファイバ伝送路の歪みを付加して、基本伝送特性の評価を完了した。全負荷条件での評価が可能な統合機能モデルを図 3.1-7 に示す。

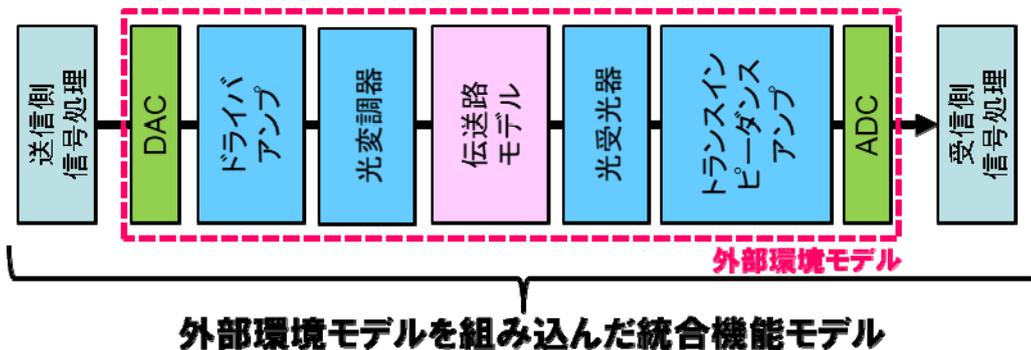


図 3.1-7 全負荷条件での評価が可能な統合機能モデル

さらに機能連携アルゴリズムの統合検証を行うことで、目標の伝送特性を実現する信号処理機能全体の最適化設計に向けた基本技術を確立した。具体的には、平成 30 年度は、ハイブリッド変調方式および多次元変調方式について機能レベルの統合モデルを構築した。同じ伝送容量を達成するための、33GBaud 64QAM、44GBd 16QAM+32QAM (ハイブリッド変調方式)、56GBd 6b4D-2A8PSK+16QAM (多次元ハイブリッド変調方式)、および 66GBd 8QAM の 4 つの変調フォーマットについて評価した。基本動作検証として、Back-to-back での OSNR 耐力評価、統合性能検証として運用 OSNR における残留分散耐力評価や PMD 耐力評価などを実施した。

令和元年度は、外部環境モデルの構築に向けて、ドライバアンプ、光変調器、コヒーレントレーザモジュールなどの 64GBd 級の実デバイス基本特性評価を実施し、信号品質に影響すると想定されるパラメータを抽出した。得られた結果を用いて単体デバイスモデルを構築し、簡易シミュレーション評価を実施した。

令和 2 年度は、課題アおよびイで構築するモデルを組み込むための統合機能モデルの修正を完了した。

また 64GBd 級の実デバイス基本特性評価から抽出した信号品質に影響すると想定されるパラメータとして、ドライバンプやトランスインピーダンスアンプの全高調波歪みを外部環境モデルに組み込み、修正した統合機能モデルと結合し、シミュレーションによる初期評価を完了した。

令和 3 年度は、信号品質に影響すると想定される実際の送受信光デバイスのパラメータとして、ドライバンプやトランスインピーダンスアンプの全高調波歪みを組み込んだ統合機能モデルを用いて、全負荷条件における伝送特性評価のため、非線形な歪み、線形な歪、光ファイバ伝送路の歪みを付加し、基本伝送特性の評価を完了した。さらに、目標の伝送特性の実現に向けて、機能連携アルゴリズムの観点から、信号処理機能全体のパラメータの最適化を完了した。具体的には、800Gbps 級の伝送モードにおいて、波長分散に対する伝送特性として、1000km 級の伝送が実現可能であること、偏波モード分散に対する伝送特性として、100ps 級の補償が実現可能であることを、確認した。以上により、到達目標を達成した。

エ) 低電力回路最適化設計技術

a) 低電力回路統合検証技術

1) 高度変復調回路基本技術（日本電信電話）

課題ア) で高度変復調方式として選定したコンスタレーションシェーピングに対して、高多値度対応とマルチキャリア変調を組み合わせた方式について回路規模と消費電力の観点で最適化を実施し、ハードウェア記述言語で構築した回路モデルの動作検証および機能モデルとの等価性確認を完了し、最適回路設計に向けた高度変復調回路基本技術を確立した。

ハイブリッド変調や多次元変調およびそれらを組み合わせた変調方式において、ハードウェア実装を志向してフレーム処理について検討した。具体的には、クライアントレートおよびその種別、誤り訂正符号の冗長度、そして上記高度な変調方式を使用したときのそれぞれの条件におけるマルチフレーム処理、フレームに挿入するスタッフビット数、そして動作周波数の設計を実施した。図 3.1-8 に DSP 動作モードごとのスタッフビットの挿入率および該当するシンボルあたりのビット数の関係を示した。シンボルあたりのビット数が多いほどスタッフビット挿入率が高い傾向があり、シンボルあたりのビット数が少ないほどスタッフビット挿入率が低下する傾向が見て取れる。Training Symbol (TS) 挿入間隔はすべての変調方式で固定とすることが望ましいため、シンボルあたりのビット数が多いほど、送信ビット系列における 1 フレームのビット長が増大する。そのため、マルチフレームとの同期がとりづらくなり、より多くのスタッフビットを挿入する必要がある傾向が出ているが、シンボルあたりビット数が最大の動作モードであっても 1%以下の十分に低いスタッフビット挿入率で実現できることを確認した。

さらにハードウェア記述言語を用いた回路モデルを構築し、基本検証を実施して、機能モデルとハードウェア言語における回路モデル間の等価性を確認した。

続いて、コンスタレーションシェーピングおよびジオメトリカルシェーピングについて回路構成を検討した。コンスタレーションシェーピングのほうが追加機能ブロックの回路規模は大きいですが、課題ア) における検討で特性改善量が大きいことが確認されたため、コンスタレーションシェーピングを選定した。

選定したコンスタレーションシェーピングとマルチキャリア変調を組み合わせた方式について検討した。(図 3.1-9) ハードウェア記述言語を用いた評価モデルを構築し、基本動作を評価した。

最後に、ハードウェア記述言語を用いた評価モデルの動作検証および機能モデルとの等価性評価を実施し、等価性が取れていることを確認した。また、回路規模と消費電力の評価を実施した結果、100Gbps 級の信号処理回路に対し同一通信速度で比較して 1/6 以下の電力で動作可能であることを確認した。

(図 3.1-16 参照)

以上の取り組みにより、低電力最適回路設計に向けた高度変復調回路基本技術を確立し、到達目標を達成した。

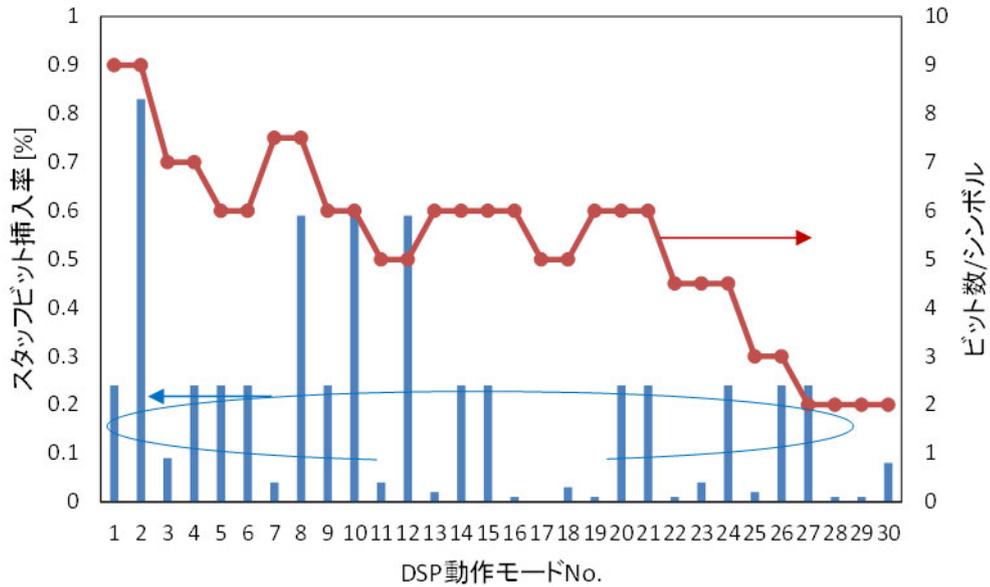


図 3.1-8 DSP 動作モードごとのスタップビットの挿入率および該当するシンボルあたりのビット数

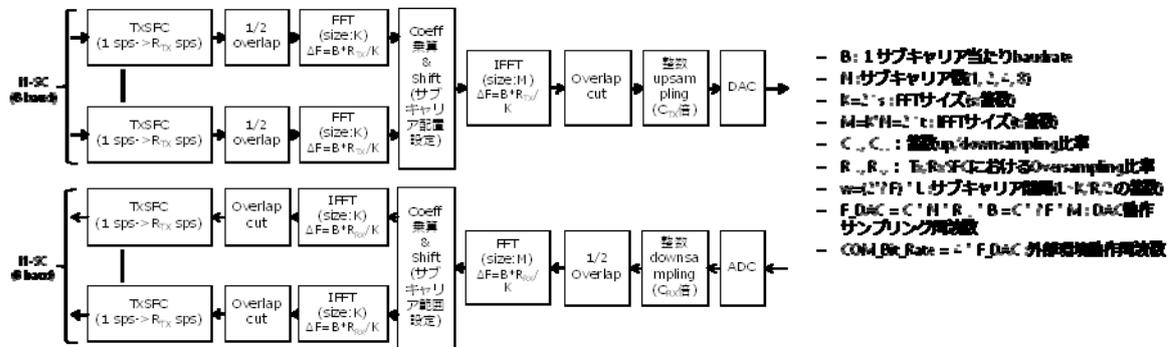


図 3.1-9 マルチキャリア変復調回路構成

2) 誤り訂正回路基本技術 (三菱電機)

高度な変復調方式等との親和性を考慮し、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、課題ア-b) で検討した基本機能試作に基づく基本回路を設計し、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。

最大 5Tbps 級光伝送を実現するために必要なキャリア数、多値直交振幅変復調方式および符号化変復調方式等の高度な変調方式に対して、誤り訂正性能と消費電力のバランスに優れた誤り訂正符号化回路・復号回路アーキテクチャとして、復号繰り返し数の収束がよい軟判定復号回路の符号化パラメータを設計した方式を採用し、回路の動作周波数 1/2 に低減した軟判定復号回路アーキテクチャならびに、軟判定誤り訂正符号による保護は最も誤り率が大きくなる LSB に限定することで、訂正性能が高く消費電力も大きくなる軟判定誤り訂正符号の処理量を大幅に削減することができるマルチレベル符号化・マルチ

ステージ復号回路アーキテクチャを採用した。これらの回路アーキテクチャを用いることにより、5Tbps 級のビットレート増加に伴う消費電力の増加を抑制可能となる。

更に、誤り訂正復号回路の演算量は、誤り訂正不可領域近傍のエラーレートで最も最大化する。一方で、光通信装置の運用領域においては、誤り訂正不可領域に比べ信号品質の高い受信信号が得られる確率が高く、このため符号単位で信号劣化状態を監視して、不要な演算を避けるよう復号回路の復号演算を動的に制御することにより、運用時の消費電力を低減可能となる。図 3.1-10 (a) に信号品質に応じた復号演算制御による電力削減回路アーキテクチャを、(b) に消費電力の削減効果を示す。誤り訂正限界の SNR ($\Delta \text{SNR}=0\text{dB}$) から 0.5dB のマージンが得られる領域で運用することで、それぞれ 41% (冗長度 25%)、37% (冗長度 45%) の電力削減効果が期待される。

これらアーキテクチャを適用することにより、本研究成果で目的とする従来の 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 1/6 以下の消費電力の実現に寄与した。以上により、到達目標を達成した。

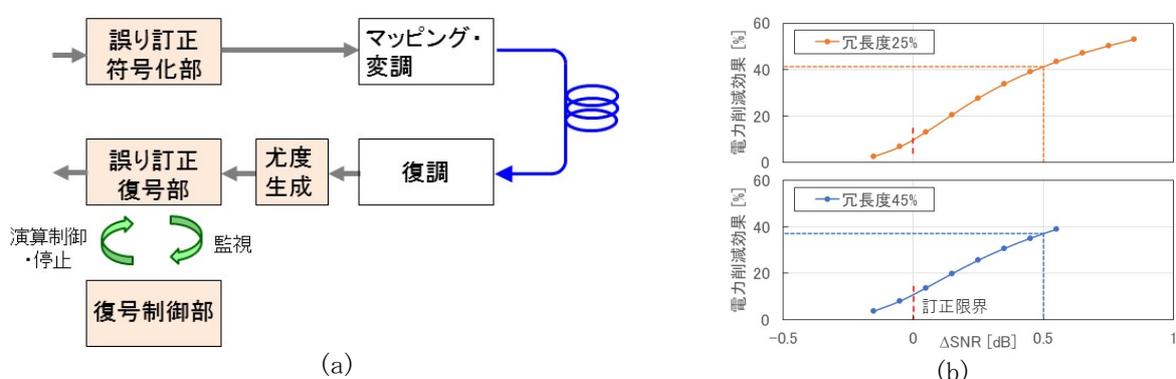


図 3.1-10 信号品質に応じた復号演算制御による電力削減回路アーキテクチャ (a) とその効果 (b)

3) 信号等化回路基本技術 (富士通)

信号等化回路の低消費電力化を行うためには、回路全体としての演算量を最小化する必要がある。本研究開発では、入力信号の状態を監視し、その状態に応じて複数の等化器間を連携制御する技術に着目し、連携制御を想定した等化器構成の最適化を図ることで、信号処理回路全体として所望の性能を得るための最小限の等化器構成を実現させる。また、この連携制御を効率的かつ遅滞なく実行するため、制御エンジン (FPGA)、内部 CPU、外部 CPU など複数の制御デバイスにより複数の制御層を構成した制御回路アーキテクチャを考案した。

この「多層型制御アーキテクチャ」に基づき、信号等化回路の論理構造設計を行い、ハードウェア技術言語により回路モデルを設計し (図 3.1-11)、動作検証を実施した。さらに課題イで作成した機能モデルとの性能等価性検証を行い、当該機能モデルと同等の処理性能であることを確認した。

当該回路の実装設計試行および実配置配線処理後の回路による消費電力評価結果を図 3.1-12 に示す。本グラフは、同一伝送速度、すなわち 100Gbps あたりの消費電力値を表しており、100Gbps 級従来回路の消費電力 (図中 A) を 100 とした相対値である。5Tbps 級信号処理回路では、高多値度や高ボーレート化に伴う演算器の高精度化や多種の補償機能による演算量増大のため、最新 CMOS 電子回路による効果だけでは 30%程度 (図中 B) にとどまるものの、本研究での提案技術と適用と回路設計の最適化により 14.8%まで削減 (図中 C) できることを確認した。以上により信号等化回路基本技術の検証技術を確立した。

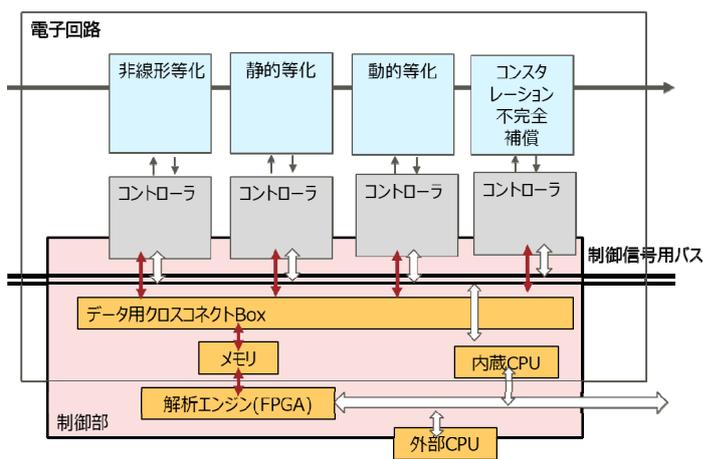


図 3.1-11 信号等化回路構成図

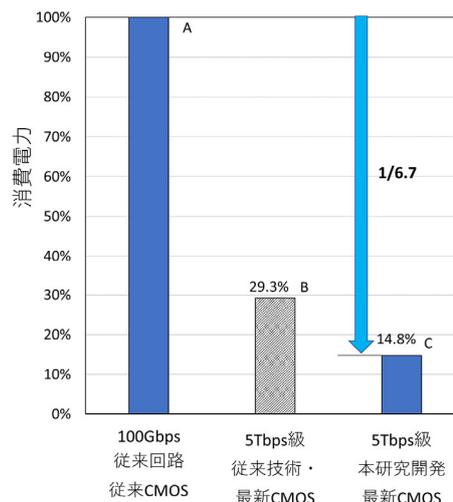


図 3.1-12 従来回路との消費電力比較
(100Gbps あたりの消費電力値)

4) クロストーク抑圧回路基本技術 (日本電気)

5Tbps 級の通信処理速度を実現するため、マルチキャリア間のクロストークによる波形歪みを、波形歪みの主な要因となる波長分散を含む他の波形歪みと合わせて抑制・補償を行う抑圧補償回路を低消費電力で実現する回路技術を開発し、クロストーク抑圧回路基本技術を確立した。

具体的には、クロストーク抑圧処理を、他の波形歪みと合わせて抑制抑圧・補償を行う周波数領域等化 (FDE : frequency domain equalizer) 方式による歪抑圧補償回路を採用し、回路構成候補の検討、クロストーク抑圧処理回路の全体回路構成の検討、回路記述の生成を効率化する設計効率化方式、および、その回路記述の検証を効率化する検証容易化設計方式の検討を実施した。開発した設計効率化方式による回路記述の自動生成環境を活用し、データビット幅やパイプライン数、パイプライン位置などの回路構成や回路パラメータの最適化、および、データ表現形式による消費電力の全体最適化を実施した。さらに、歪抑圧補償回路を構成する FFT/IFFT 回路が必要とする RAM マクロ数及び RAM 容量を削減する最適化方式を適用し、回路規模、及び消費電力の削減を図った。これら回路最適化による低消費電力化の効果を、FFT 回路、周波数領域フィルタ部、IFFT 回路から構成される 4096 ポイントの FDE 回路について評価した (図 3.1-13)。(a) 回路最適化の適用なし、(b) データ表現形式の最適化を適用、(c) データ表現形式及び RAM 構成の最適化を適用した結果、(c) の条件では 26.9%の大幅な電力削減が可能であることを確認した。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の部分試作を行った。この部分試作した回路記述を用いて、最適化を適用した歪抑圧補償回路が実用的な回路規模およ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、クロストーク抑圧回路基本技術を確立し、到達目標を達成した。

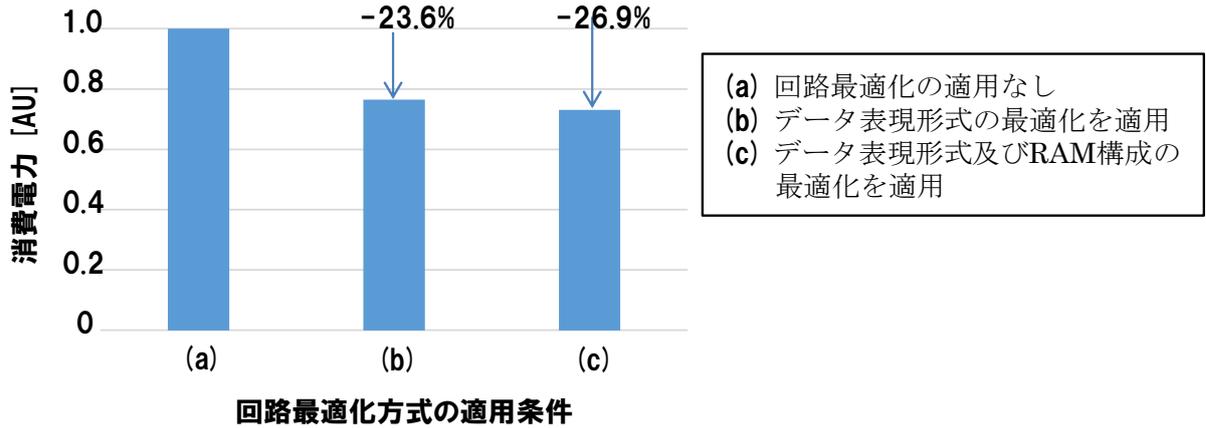


図 3.1-13 回路最適化による消費電力の削減効果

5) 低電力信号処理統合検証技術（日本電信電話）

課題エ-a) 1 から 4 で検討した高度変復調方式基本技術、誤り訂正基本技術、信号等化基本技術そしてクロストーク抑圧基本技術について、それらの回路モデルを組み合わせた統合回路モデルを開発し、当初目標であった $6 \times 800\text{Gbps}/\lambda$ による 5Tbps に加えて、1 波あたりの容量を拡大した $4 \times 1.2\text{Tbps}/\lambda$ の 5Tbps を実現する信号処理の回路動作および消費電力評価を実施し、 100Gbps 級の信号処理回路に対して、 100G あたりの消費電力を当初の目標である $1/6$ を上回る $1/6.9$ に削減し、低電力信号処理統合検証技術を確立した。

図 3.1-14 と 3.1-15 に $800\text{Gbps}/\lambda$ および $1.2\text{Tbps}/\lambda$ 動作時における統合機能モデルと統合回路モデルの OSNR 評価結果を示す。ここで統合機能モデルは、C++言語で性能評価用に作成された各機能のアルゴリズム評価モデルを統合した信号処理全体の評価モデルであり、統合回路モデルは、ハードウェア記述言語で作成された各機能の回路モデルを統合した信号処理全体の回路モデルである。統合回路モデルの妥当性を評価するために、同一負荷条件における統合機能モデルの Q 値特性と比較した。 $800\text{Gbps}/\lambda$ および $1.2\text{Tbps}/\lambda$ のどちらの条件でも Q 値誤差は全域で 0.1dB 以内であり、アルゴリズムを実装した回路が想定通りの動作を実現できていることを確認した。

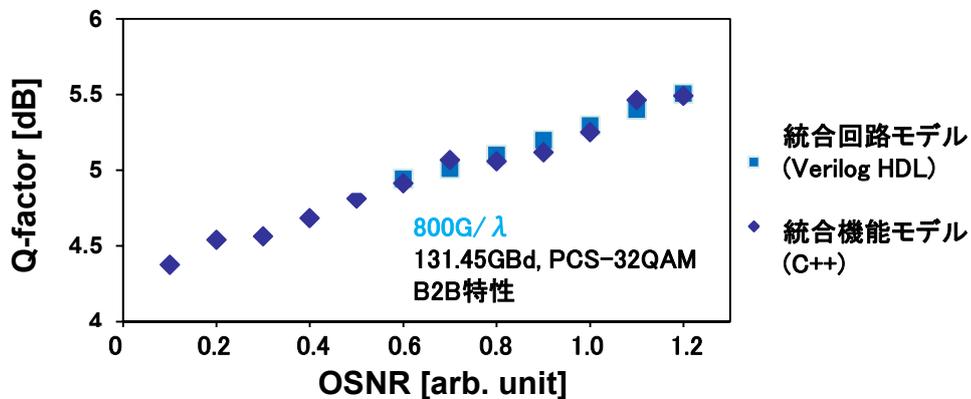


図 3.1-14 $800\text{Gbps}/\lambda$ の等価性評価

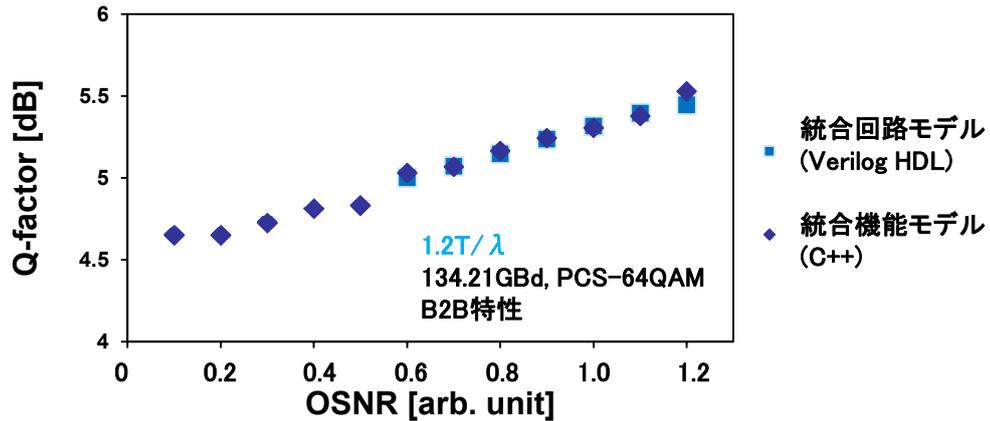


図 3.1-15 1.2Tbps/λ の等価性評価

図 3.1-16 に 100G 級 DSP と本研究開発における 5Tbps 級 DSP の 100G あたりの消費電力の比較を示す。5Tbps 級 DSP は 800Gbps/λ 動作時であり、最先端の 5nm プロセスのライブラリを使用して、ポストレイアウトまで実施後の電力値である。課題エ-a-1) から 4 で低消費電力化を検討した各機能ブロックを統合することによって 1λ あたりの容量を 8 倍にしなが、100G あたりの消費電力を、目標を上回る 1/6.9 とすることができた。

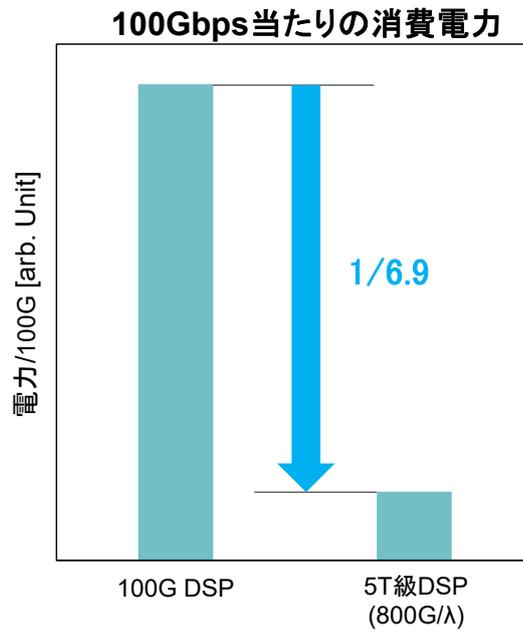


図 3.1-16 100G DSP および 5Tbps 級 DSP の 100G あたりの消費電力の関係性

b) マルチチップ高周波実装技術（日本電信電話）

複数 DSP のチップ間連携方式およびマルチキャリア変調方式について、チップ間連携の際に課題となるスキュー補償方式や、ライン側フレーミング方式の設計を行い、機能モデル・回路モデルを用いて動作検証を完了した。また、5Tbps 級信号に対応するための ADC・DAC 仕様の策定し、光送受信機各部のレベルダイヤ最適化を完了し、5Tbps 級光伝送に対応したマルチチップ高周波実装技術を確立した。

具体的には、複数レーザを束ねてマルチキャリア伝送を実施する方式について、複数 DSP で連携して

大容量のクライアント信号を大容量マルチキャリア信号に收容する検討を行った。その際に対応が必要なキャリア間のスキュー補償などの技術的課題について、機能モデルおよび回路モデルを用いて評価を行うことで技術を確立した。また、単一レーザを複数サブキャリアに分割する方式のマルチキャリア伝送方式に関して、ライン側フレーミング方式の設計と評価検証を行い、5Tbps 級マルチキャリア信号を効率的にフレーム收容する技術を確立した。設計したフレーミング方式については、機能モデルおよび回路モデルに実装し、シミュレーション等による検証を行った。

また、5Tbps 級信号に対応した高周波実装技術の研究開発を実施した。5Tbps 級信号で適用される高度変復調方式を想定し、アナログデジタル変換器（ADC）およびデジタルアナログ変換機（DAC）の満たすべき性能について検討し、設計指針を確立した。また、高度変復調方式とマルチキャリア伝送方式に対応した光送受信機最適化手法を検討した。DAC 出力と変調器および変調器ドライバアンプの各部レベルダイヤの最適化手法や、DSP 内部の誤り訂正復号部への入力レベルなどのレベルダイヤ最適化手法を確立することにより、5Tbps 級伝送に対応した高周波実装技術を確立した。以上により、到達目標を達成した。

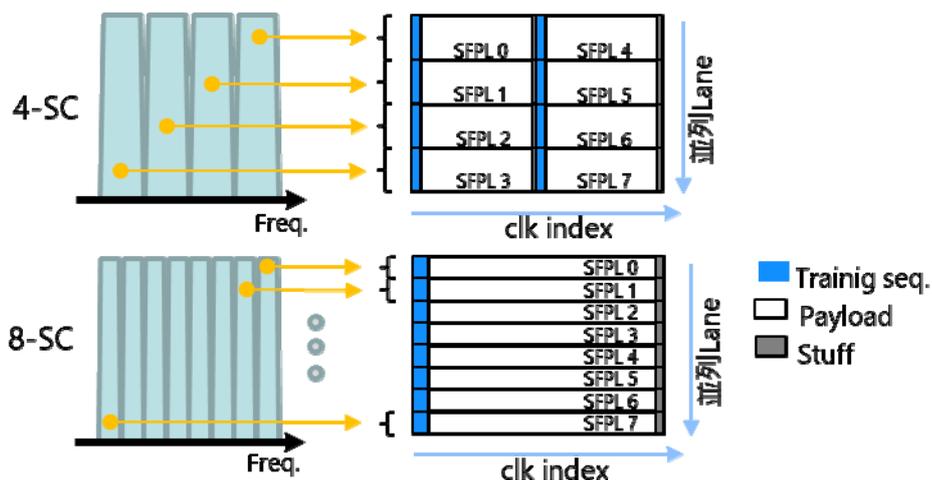


図 3.1-17 マルチキャリア信号に対応したライン側フレーミング方式の概要図

4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

4. 1 実用化、事業化

アウトカム目標の達成に向けた取り組みとして、ビジネスプロデューサの統括に基づき、事業化に向けて実効的な計画に取り組んだ。

- ・ 16nm テストチップをベースとした 600G DSP を令和元年度に製品化（日本電信電話）
- ・ 7nm テストチップをベースとした 400G 低電力 DSP を令和 2 年度に製品化（日本電信電話）
- ・ 本研究成果を利用して、5nm DSP（1.2Tbps/λ 対応）を令和 4 年度実用化予定（日本電信電話）
- ・ 7nm テストチップをベースとした 400G 低電力 DSP を搭載した光伝送装置の製品化開発を進めている。（三菱電機）
- ・ 成果に基づいて製品化されたデジタル信号処理 LSI を用いて、光伝送装置（DW7000）の 400G トランスポンダを製品化。（日本電気）

- ・本研究成果を適用したチップを用いて、光伝送装置の 1FINITY T500/T510 を 2019 年 5 月に製品化、1 FFINITY T600 を 2019 年 2 月に製品化、1FINITY T700 を 2020 年 8 月に製品化。(富士通)
- ・7nm テストチップをベースとした 400G 低電力 DSP チップを搭載するプラグブル光モジュールをサポートする製品を 2022 年度開発完了予定。(富士通)

4. 2 標準化活動

International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) SG15 Q11/15 並びに Q6/15 会合に継続的に参加しており、Q11 では、B100G-OTN における 200G/400G, 450km 用 FEC 選定に積極的な寄書を継続提案 (2019/2/25~3/1 スイス ジュネーブ、2019/7/1~12 スイス ジュネーブ、国際標準提案・獲得リスト[2, 3]) した結果、提案する FEC 方式が採択された (2020/1/27~2/7, スイス ジュネーブ、国際標準提案・獲得リスト[4, 5])。2020/9/7~18 に開催された会合にて G.709.3 に追記された。Q11 の決定を受けて Q6 でも 200G/400G 物理 IF の標準化を推進。G.698.2 に関して、200G/400G の 450km アプリケーションの 16QAM シンボルマッピングについて標準化機関間の共通性を重要視し、Open ROADM MSA ベースのものを適用することを提案 (2020/9/7~18 スイス ジュネーブ、国際標準提案・獲得リスト[6])。2021/4/12~23 に開催された会合でも前回提案で課題となった内容を追記し、再度提案した結果、提案方式が採択された (2021/4/12~23 スイス ジュネーブ、国際標準提案・獲得リスト[7])。

4. 3 知財確保

知財権獲得は、国際競争力を確保する源泉として不可欠あると考えており、本研究開発の成果を含むコア技術ならびに周辺技術について、特許出願を中心とした権利化に取り組み、光送受信デバイス特性補償技術 (出願特許リスト[2, 10-11, 31])、誤り訂正技術 (出願特許リスト[3-5, 30])、取得特許リスト[1-2])、信号等化技術 (出願特許リスト[24, 36])、クロストーク抑圧技術 (出願特許リスト[6, 9]) 等の特許出願、特許取得を行った。結果として国内出願、国際出願ともに当初目標を大幅に上回った。関連通信機器の国際競争力を向上させるため、重要技術の特許化によりライセンス化、デファクト化を図るべく取得した特許は原則として適正な条件で公開し、技術の普及に貢献する。また、開発・実装・検証により確立した技術に関しては、秘匿化・ライセンス化・オープン化からもっとも適切な形態を選択して活用し、周辺技術を含めたエコシステムを構築することにより通信産業分野における国際競争力の向上を目指している。

4. 4 アドバイザリ委員会

適宜学識経験者、有識者による指導、意見を受けながら研究開発を推進するため、アドバイザリ委員会を設置し、初年度は 1 回、2 年目以降は各年度 2 回開催した。

- ・2019 年度 第 1 回 (2019 年 2 月 27 日 ステーションコンファレンス東京)
- ・2019 年度 第 1 回 (2019 年 9 月 19 日 ステーションコンファレンス東京)
- ・2020 年度 第 2 回 (2020 年 2 月 10 日 ステーションコンファレンス東京)
- ・2020 年度 第 1 回 (2020 年 9 月 7 日 オンライン)
- ・2021 年度 第 2 回 (2021 年 2 月 25 日 オンライン)
- ・2021 年度 第 1 回 (2021 年 9 月 9 日 オンライン)
- ・2022 年度 第 2 回 (2022 年 2 月 8 日 オンライン)

【アドバイザリ委員】

- ・神谷 武志 名誉教授 東京大学 「超高速光デバイス技術」
- ・浅見 徹 代表取締役社長 国際電気通信基礎技術研究所 「通信ネットワークとその応用技術」
- ・北山 研一 名誉任教授 大坂大学 「フォトリックネットワーク技術・伝送劣化補償技術」
- ・中沢 正隆 特任教授 東北大学 「超高速光通信技術・変復調技術」
- ・松澤 昭代表取締役社長 テックイデア 「超高速アナログ・デジタル変換回路技術」

4. 5 成果発表会・展示

以下の国際会議やシンポジウム開催等を通して、受託各社の得られた成果とその意義について積極的に発表してきた。

- ・Optics Express、IEICE Transactions on Communications、電子情報通信学会論文誌、IEICE ComEX
- ・ECOC (2018 ローマ、2019 ダブリン、2020 ブリュッセル)
- ・信学会総合大会 (2019 東京、2020 広島、2021 オンライン)
- ・OECC (2019 福岡、2020 台北)
- ・信学会ソサイエティ大会 (2019 大阪)
- ・OCS シンポジウム (2019 三島)
- ・OFC (2020 サンディエゴ、2021 サンフランシスコ、2022 サンディエゴ)

4. 6 報道発表

得られた成果については、国内・海外にむけ各社からタイムリーにマスメディアを通して情報発信をし、日本の国際競争力のアピールを行った。

- ・「NTT エレクトロニクス社、高性能な 64 GBaud コヒーレント DSP を販売開始 1 波長あたり世界最速 600Gbps 光ファイバ伝送を実現する ExaSPEED TERA をラインナップ」2019 年 2 月 27 日 (NTT エレクトロニクス)
- ・「世界最高速度の 600Gbps 光伝送システム 1FINITY T600 を製品化」2019 年 2 月 27 日 (Fujitsu Network Communications Inc)
- ・「超大容量 1 テラビット/秒光信号の長距離伝送に成功 ～商用環境において世界最長 1,122km の伝送を実現～」2019 年 2 月 27 日 (日本電信電話、NTT コミュニケーションズ)
- ・「400Gbps DWDM オープンシステム用 CFP2-DCO コヒーレントトランシーバの販売を開始 2022 年 3 月 1 日 (富士通オプティカルコンポーネンツ)

5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

アウトカム指標	目標年度	数値目標等	調査方法	終了条件
特許取得の活用状況			契約書に基づく報告書	特許権の消失
情報発信	令和 6 年	10 件	契約書に基づく報告書	数値目標 10 件を達成した時点
製品化事例	令和 7 年	6 件以上	ヒアリング調査等	適用事例 6 件以上を達成した時点、あるいは 10 年経過時点

国内外ネットワークへの適用事例	令和 8 年	6 件以上	ヒアリング調査等	適用事例 6 件以上を達成した時点、あるいは 10 年経過時点
-----------------	--------	-------	----------	---------------------------------

【日本電信電話株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

国際標準化については、OIF、Open ROADM 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。5Tbps 級の光伝送を実現するデジタル信号処理 LSI の製品化に向けては、これまで製品化してきたデジタル信号処理 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・運用する事業会社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。

○アウトカム以外に期待される波及効果

最大 256QAM などの高多値度と確率的コンスタレーションシェーピングを組み合わせた高度適応変復調技術の確立により、伝送容量と伝送距離のトレードオフを自在に選ぶことができるようになった。また、ガウシアン型のより理想的なコンスタレーションを生成できるようになり、よりシャノン限界に近い伝送容量を達成できるようになった。これにより、適用される光伝送路に対して最適な周波数利用効率を柔軟に選択できるようになり、光伝送ネットワークの経済化が促進される。また、情報理論に立脚した研究開発手法が定着したことで、光通信技術のみならず周辺領域でのさらなるブレイクスルーをもたらす可能性がある。

【三菱電機株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

これまでに進めた顧客マーケティング活動および OIF、ITU-T 等の標準化動向調査を元に応用化に向けた研究開発、商用化開発を行う。7nm テストチップをベースとした DSP 搭載の光伝送装置を主軸に、関連事業部との連携を図りつつ研究開発を進め、主要ベンダおよび顧客との情報交換を積極的に実施し、令和 5 年度までの事業化を視野に、当社の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、社会展開を図る。

○アウトカム以外に期待される波及効果

当社では光伝送技術、誤り訂正技術やデジタル信号処理技術を専門性として持つ研究者が研究員として従事し、本研究開発を推進してきた。計画立案の段階より光通信システム、装置に関わる事業部と連携して、成果の実用化を前提とした研究開発を進めてきたが、今後も社内関連事業部門における製品化開発に研究員も広く参画することで、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。

【日本電気株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

5Tbps 級の光伝送装置や光モジュールを令和 6 年までに製品化することを目指し、実用化に向けた技術開発を令和 4 年度から進める。これら装置やモジュールに対して、本研究開発の成果を適用することによる伝送容量増大あるいは更なる伝送能力向上を検討すると共に、これらの実導入に積極的に取り組み開発技術の社会展開を図る。

○アウトカム以外に期待される波及効果

本研究開発を通して得られたクロストーク抑圧基本技術およびクロストーク抑圧回路基本技術は、多次元変調方式などの高度な変調方式や 100Gbaud 級の高速変調に対しても周波数利用効率の向上および消費電力低減に効果があることが確認された。従ってこれらの技術は、5Tbps 級およびそれを上回る超大容量伝送を実現する際の基本技術として波及すると考えられ、長距離大容量の基幹系光伝送システムのみならず、今後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にも展開されることが期待される。

【富士通株式会社】

○社会展開に向けた取組方針や計画

今後は 5Tbps 級の伝送速度を実現する光伝送装置の製品化に向けた取り組みを進める。具体的には、令和 4 年度より商用化開発の検討および実用化に向けた研究開発を開始し、これと並行して国内外の市場要求の調査、競合情報の収集、標準化動向の調査を行う。これらの活動を基盤として光伝送装置の事業化の検討を行い、令和 6 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

信号等化基本技術（課題イ-a）における高多値度かつ高ボーレートに対応可能な信号等化処理方式に関しては、短距離伝送分野の大容量化への貢献が期待され、具体的にはアクセス系や、データセンター間通信（DCI：Data Center Interconnect）などへの適用が考えられる。また、より高効率な伝送を必要とされる無線分野における伝送容量向上への寄与も期待される。

信号等化回路基本技術（課題エ-a-3）における回路の低消費電力化に関しては、回路構成の全体最適化による低消費電力化技術などを無線通信分野へ応用することが可能であり、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。

6 査読付き誌上発表論文リスト

- [1] 前田英樹、齋藤航平、笹井健生、濱岡福太郎、河原光貴、関剛志、川崎岳、可児淳一、“Real-time 400Gbps/carrier WDM transmission over 2,000 km of field-installed G.654.E fiber” *Optics Express* Vol.28, No.2, pp.1640-1646, 20 January 2020 (2019/1/20)
- [2] 濱岡福太郎、笹井健生、齋藤航平、小林孝行、松下明日香、中村政則、谷口寛樹、桑原昭一郎、河原光貴、関剛志、小木曾義弘、前田英樹、木坂由明、富沢将人、“Dual-Carrier 1-Tb/s Transmission Over Field-Deployed G.654.E Fiber Link Using Real-Time Transponder” *IEICE Transactions on Communications* (Volume E103-B No.11) pp1183-1189 DOI:10.1587/transcom.2019OBI0003 (2020/11/1)
- [3] 亀谷聡一朗、石井健二、久保和夫、吉田英夫、杉原隆嗣、“電力スケーリング誤り訂正による光通信網の低消費電力化” *電子情報通信学会論文誌*、Vol. J101-B, No. 12, pp. 1036-1044 (2018/12/1)
- [4] 石井健二、吉田英夫、小西良明、杉原隆嗣、“超並列誤り訂正方式による電力スケーリングを用いた光通信網の低消費電力化” *電子情報通信学会論文誌*、Vol. J103-B, No. 4 pp. 162-171 (2020/4/1)
- [5] M. Binkai, S. Chikamori, T. Yoshida, K. Matsuda, K. Ishii, Y. Konishi, S. Hirano, and N. Suzuki, “Demonstration of Shallow Probabilistic Shaping for Low-Power Transmissions at 400 Gb/s and Beyond,” *IEICE ComEX*, vol. 10, no. 3, pp. 117-123 (2020/12/9)

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] 中島久雄、星田剛司、“Polarization change monitor based on jointly applied constant modulus algorithm and carrier phase recovery in coherent receiver”、*OECC2019 (Optoelectronics and Communications Conference)* (福岡) 2019/7/7
- [2] 濱岡福太郎、笹井健生、齋藤航平、小林孝行、松下明日香、中村政則、谷口寛樹、桑原昭一郎、河原光貴、関剛志、尾崎常祐、小木曾義弘、前田英樹、木坂由明、富沢将人、“Dual-Carrier 1-Tb/s Transmission Over Field-Deployed Large-Core Pure-Silica-Core Fiber Link Using Real-Time Transponder”、*OECC2019* (福岡) 2019/7/10
- [3] T. Yoshida and N. Suzuki, “Flexible and Low-Power Probabilistic Shaping for Fiber-Optic Communications,” *SPPCom2019 (OSA Signal Processing in Photonic Communications)*, paper SpT3E.2, 2019/7/29
- [4] T. Yoshida, M. Mazur, J. Schröder, M. Karlsson, and E. Agrell, “Performance Monitoring for Live Systems with Soft FEC,” *ECOC2019 (European Conference on Optical Communication)*, 2019/9/23
- [5] 吉田剛、備海正嗣、越川翔太、近森峻、松田恵介、鈴木巨生、Magnus Karlsson、Erik Agrell, “FPGA Implementation of Distribution Matching and Dematching”、*ECOC2019 (ダブリン)* 2019/9/23
- [6] 佐藤正規、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、“Mitigation of Linear Crosstalk with Fixed Frequency-Domain Equalizer assisted MIMO for High-Order Modulation”、*ECOC2019 (ダブリン)* 2019/9/24
- [7] 吉田剛、Magnus Karlsson、Erik Agrell, “Multilevel Coding with Flexible Probabilistic Shaping for Rate-Adaptive and Low-Power Optical Communications”、*OFC2020 (The Optical Networking and Communication Conference and Exhibition)* (サンディエゴ) 2020/3/9

- [8] 佐藤正規、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、石井直人、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、“Mitigation of Inter-Subcarrier Linear Crosstalk with Groupwise Fixed FDE assisted MIMO”、OFC2020 (サンディエゴ) 2020/3/11
- [9] 齋藤航平、笹井健生、濱岡福太郎、河原光貴、関剛志、前田英樹、“High spectrum efficiency real-time 500-Gb/s/carrier transmission over field-installed G.654.E fiber link using forward and backward distributed Raman amplifier”、OFC2021 (サンディエゴ) 2020/3/12
- [10] 佐藤正規、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、ル・タヤンディエ エマニュエル、“Invited)Mitigation of Inter-Subcarrier Linear Crosstalk with MIMO equalizer”、OECC2020 (台北) 2020/9/24
- [11] T. Yoshida, M. Binkai, S. Chikamori, K. Matsuda, S. Koshikawa, N. Suzuki, K. Igarashi, M. Mazur, J. Schröder, M. Karlsson, and E. Agrell, “Required and Received SNRs in Coded Modulation,” ECOC 2020 (2020/12/7)
- [12] T. Yoshida, K. Igarashi, M. Karlsson, and E. Agrell, “Sparse-Dense MLC for Peak Power Constrained Channels,” ECOC 2020, 2020/12/7
- [13] 黄国秀、中島久雄、秋山祐一、星田剛司、“Up to 115GBaud Faster Than Nyquist PDM-64QAM Based on Tomlinson-Harashima Precoding with Single DAC”、ECOC 2020 paper Tu1D-8、2020/12/8
- [14] 吉田 剛、五十嵐浩司、小西良明、Magnus Karlsson、Erik Agrell、“FPGA Implementation of Hierarchical Subcarrier Rate and Distribution Matching for up to 1.032 Tb/s or 262144-QAM” OFC 2021 (サンフランシスコ) 2021/6/8
- [15] 佐藤正規、有川学、野口栄実、松井淳一郎、安部淳一、ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル、“Mitigation of Transmitter impairment with 4x2 WL MIMO Equalizer Embedding Preliminary CPR”、OFC 2022 (サンディエゴ) 2022/3/7
- [16] 齋藤航平、中村政則、笹井健生、柿崎武、濱岡福太郎、小林孝行、山崎悦史、木坂 由明、“Impact of Local Oscillator Phase Noise on Long-Haul Transmission of 120-Gbaud Digital Sub-Carrier Signals”、OFC2022 (サンディエゴ) 2021/3/9
- [17] 中島久雄、岡田直也、前田泰三、星田剛司、“Accurate Analysis and Low-complexity Compensation of Transceiver Nonlinear Distortion for Higher Order Modulation”、Photonics West 2022 on demand、2022/2/21

8 その他の誌上発表リスト

9 口頭発表リスト

- [1] 富澤将人、“Future role of CMOS coherent DSP toward 2030 – Performance, Power, Integration, and cost perspectives”、ECOC2018 (ローマ) 2018/9/23
- [2] 富澤将人、“White-Boxes with Coherent optics, interoperability, and network diagnosis trends”、ECOC2018 (ローマ) 2018/9/26
- [3] 富澤将人、“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”、ICT イノベーションフォーラム 2018 (東京) 2018/10/10
- [4] 石井健二、吉田英夫、小西良明、杉原隆嗣、“マッシュアップパラレル FEC 方式による電力スケールアップ技術” 2019年電子情報通信学会総合大会 (東京) 2019/3/19

- [5] 富澤将人、“コヒーレント光通信システム用デジタル信号処理技術”、OPIE'19 (Optics & Photonics International Exhibition) (横浜) 2019/4/24
- [6] 富澤将人、“デジタルコヒーレント光通信の基礎と最新動向”、FOE 2019 (光通信技術展) (東京) 2019/7/18
- [7] 吉田剛、松田恵介、近森 峻、備海正嗣、越川翔太、鈴木 巨生、“2 元誤り訂正を用いる多値光通信システム運用時の通信品質モニタ” 2019 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (豊中) 2019/9/10
- [8] 吉田剛、近森峻、備海正嗣、越川翔太、松田恵介、鈴木巨生、“階層化分布整合に基づく圧縮 Probabilistic Shaping の FPGA 実装検討” 2019 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (豊中) 2019/9/10
- [9] 石井健二、吉田英夫、小西良明、久保和夫、杉原隆嗣 “パリティ検査行列の拡張とマスキングによる冗長度可変 LDPC 符号の提案,” 2019 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (豊中) 2019/9/11
- [10] 細井響子、石井健二、吉田英夫、小西良明 “4 次元符号化 APSK 信号のリアルタイム軟判定尤度生成処理” 電子情報通信学会 OCS シンポジウム (三島) 2019/12/17
- [11] 小牧浩輔、“次世代光伝送システム開発に向けて”、OCS シンポジウム (三島) 2019/12/17
- [12] 岡田直也、石堂勝利、小牧浩輔、中島久雄、野村義孝、小泉伸和、井元裕也、“光送信機内のデバイス非線形性歪補償に関する検討”、OCS シンポジウム (三島) 2019/12/17
- [13] 石井健二、吉田英夫、小西良明、杉原隆嗣、“光通信向け誤り訂正符号のフレキシブルスケーリング技術”、レーザー学会年次大会 (仙台) 2020/1/22
- [14] 岡本聖司、“1Tbit/s/ch 超を実現するコヒーレント DSP 研究開発の最新動向”、2020 年電子情報通信学会 総合大会 (広島) 2020/3/18
- [15] 小西良明、吉田英夫、中村隆彦、石井健二、藤森崇文、“通信向け高速・低電力誤り訂正符号化技術”、電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会 (オンライン) 2020/8/24
- [16] 小牧浩輔、“ポスト 5G を支えるテラビット光伝送システム”、JWEF (日本女性技術者フォーラム) 2020 産業技術勉強会第 1 回「ポスト 5G」(オンライン) 2020/10/21
- [17] 星田剛司、“フォトニックネットワーク技術の新しい潮流”、2020 年度光産業技術シンポジウム (東京) 2020/12/9
- [18] 石井健二、吉田英夫、吉田剛、平野進、藤森崇文、小西良明、“光通信用誤り訂正符号化技術”、2021 年電子情報通信学会総合大会 (オンライン) 2021/3/10
- [19] 吉田 剛、五十嵐浩司、備海正嗣、近森 俊、松田恵介、越川翔太、鈴木巨生、“マルチレベル符号化圧縮 PS による光通信システムの低電力化”、2021 年電子情報通信学会総合大会(オンライン)2021/3/11
- [20] 佐藤正規、野口栄実、安部淳一、松井淳一郎、ル タヤンディエ エマニュエル、“大容量コヒーレント光伝送を支えるクロストーク抑圧技術”、2021 年電子情報通信学会総合大会、(オンライン) 2021/3/9
- [21] 木坂由明、“総務省プロジェクトによるデジタルコヒーレント DSP 研究開発”、2021 年電子情報通信学会 総合大会 (オンライン) 2021/3/10
- [22] 岡本聖司、“デジタルコヒーレント光伝送における多値変調技術”、2021 年電子情報通信学会 総合大会 (オンライン) 2021/3/10
- [23] 齊藤 卓、“高多値度デジタルコヒーレント伝送に向けた歪み補償技術”、電子情報通信学会 2021 年総合大会 (オンライン) 2021/3/10
- [24] 堀越建吾、“コヒーレント通信用 DSP の開発”、DA シンポジウム 2021 (オンライン) 2021/9/3
- [25] 山崎 悦史、“Recent R&D efforts in digital coherent optical transmission technology”、2021 ICETC

(International Conference on Emerging Technologies for Communication) (オンライン) 2021/12/7

- [26] 永沼友浩、前田泰三、中島久雄、”フラクショナル適応等化制御の偏波変動耐力及びその改善手法”、2022年電子情報通信学会 総合大会 (オンライン) 2022/3/15
- [27] 吉田剛、備海正嗣、松田恵介、越川翔太、小西良明、鈴木巨生、“超並列型光ネットワークに向けたDSP 高度化基盤技術”、2022年電子情報通信学会 総合大会 (オンライン) 2022/3/15

10 出願特許リスト

- [1] 石井健二、“低電力誤り訂正復号回路および光受信器”、PCT、2018/4/9
- [2] 岡本聖司、木坂由明、中村政則、光受信装置及び波形歪み補償方法、日本、2019/1/9
- [3] 吉田英夫、小西良明、石井健二、杉原隆嗣、“誤り訂正復号装置および誤り訂正復号方法”、PCT、2019/2/22
- [4] 吉田英夫、石井健二、小西良明、杉原隆嗣、“符号化装置、復号装置、及び誤り訂正装置”、PCT、2019/3/8
- [5] 小西良明、石井健二、吉田英夫、杉原隆嗣、吉田剛、“光伝送装置および尤度生成回路”、PCT、2019/3/11
- [6] 野口栄実、安部淳一、佐藤正規、“波長多重光伝送システム、波長多重光伝送方法及びプログラム”、日本、2019/3/26
- [7] 柴山充文、“デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ装置の動作方法及びプログラム”、日本、2019/3/26
- [8] 石井健二、吉田英夫、“復号装置”、PCT、2019/6/13
- [9] 佐藤正規、野口栄実、安部淳一、“波長多重光伝送システム、波長多重光伝送方法及びプログラム”、日本、2019/10/10
- [10] 岡本聖司、木坂由明、中村政則、光受信装置及び波形歪み補償方法、PCT、2020/1/6
- [11] 堀越建吾、中村政則、岡本聖司、山崎悦史、松下明日香、笹井健生、光受信装置及び光受信方法、PCT、2020/1/6
- [12] コンピュータ可読媒体”、PCT、2020/2/4
- [13] 柴山 充文、“デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ装置の動作方法及びプログラムを格納した非一時的なコンピュータ可読媒体”、PCT、2020/2/10
- [14] 柴山 充文、“デジタルフィルタ装置”、日本、2020/3/26
- [15] 野村義孝、中島久雄、“伝送装置及び歪み補償方法”、特願 2020-049178、2020/3/19
- [16] 佐藤正規、野口栄実、安部淳一、“光信号処理回路、光受信装置及び光信号処理方法”、PCT、2020/10/5
- [17] 黄国秀、中島久雄、“伝送装置及び伝送方法”、特願 2020-196968、2020/11/27
- [18] 柴山充文、“デジタルフィルタ装置”、PCT、2021/3/26
- [19] 柴山充文、“高速フーリエ変換装置及びデジタルフィルタ装置”、日本、2021/3/29
- [20] 佐藤正規、“光伝送装置、システム、方法、及び非一時的なコンピュータ可読媒体”、PCT、2021/5/28
- [21] 黄国秀、中島久雄、“伝送装置及び伝送方法”、US 17/369733、2021/7/7
- [22] 柴山充文、“デジタルフィルタ装置、デジタルフィルタ装置の動作方法及びプログラム”、日本、2021/8/27
- [23] 野口栄実、安部淳一、佐藤正規、“波長多重光伝送システム、波長多重光伝送方法及び非一時的なコンピュータ可読媒体”、日本、2021/8/27
- [24] 横倉伊智郎、杉山純一、清水真、鈴木俊博、野間剛志、中島久雄、“偏波変動監視システムおよび偏

波変動監視方法”、特願 2021-150512、2021/9/15

- [25] 柴 充文、“DIGITAL FILTER DEVICE, OPERATION METHOD FOR DIGITAL FILTER DEVICE, AND NON-TRANSITORY COMPUTER-READABLE MEDIUM STORING PROGRAM”、米国、2021/9/16
- [26] 野口栄実、安部淳一、佐藤正規、“WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM, WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING OPTICAL TRANSMISSION METHOD, AND NON-TRANSITORY COMPUTER-READABLE MEDIUM”、米国、2021/9/17
- [27] 佐藤正規、有川学、“光伝送装置、システム、方法、及び非一時的なコンピュータ可読媒体”、PCT、2021/10/18
- [28] 佐藤正規、有川学、“光伝送装置、システム、方法、及び非一時的なコンピュータ可読媒体”、PCT、2021/10/29
- [29] 堀越建吾、山崎悦史、岡本聖司、周波数オフセット推定装置、受信装置、周波数オフセット推定方法及びプログラム、PCT、2021/3/4
- [30] 吉田英夫、吉田剛、小西良明、石井健二、“誤り訂正符号化装置、誤り訂正復号装置、制御回路、記憶媒体、誤り訂正符号化方法および誤り訂正復号方法”、PCT、2020/4/2
- [31] 中村政則、笹井健生、山崎悦史、木坂由明、光伝送システム、送信装置、受信装置及びデバイス特性推定方法、PCT、2021/6/23
- [32] 蓑口恭、山崎悦史、木坂由明、堀越建吾、岡本聖司、中村政則、利得調整方法、光受信装置及びコンピュータプログラム、PCT、2021/12/24
- [33] 蓑口恭、中村政則、岡本聖司、木坂由明、推定方法、光受信装置及びコンピュータプログラム、PCT、2022/1/4
- [34] 柴山充文、“高速フーリエ変換装置、デジタルフィルタ装置、高速フーリエ変換方法、及びプログラム”、日本、2022/3/10
- [35] 野口栄実、安部淳一、佐藤正規、“光信号処理回路、光受信装置及び光信号処理方法”、日本、2022/3/23
- [36] 中島久雄、岡田直也、“非線形補償および光送受信器”、特願 2022-056189、2022/3/30

1 1 取得特許リスト

- [1] 吉田英夫、小西良明、石井健二、“誤り訂正復号装置および誤り訂正復号方法”、日本、2019/2/22、2019/8/9、特許第 6567238 号
- [2] 小西良明、石井健二、吉田英夫、杉原隆嗣、吉田剛、“光伝送装置および尤度生成回路”、日本、2019/3/11、2019/12/20、特許第 06633262 号

1 2 国際標準提案・獲得リスト

- [1] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15 本会合、C1132R1、300G FlexO-LR、2018/10/8
- [2] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15 本会合、C1166、Burst error tolerance for 200G/400G FlexO FEC、2019/7/1、2019/7/13
- [3] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15

- 本会合、C1345、Proposal to specify OFEC for FlexO-LR 450 km application、2019/7/1、2019/7/13
- [4] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、C1749、Analysis on FEC burst tolerance、2020/1/27
- [5] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、C1759、Proposal to specify OFEC for FlexO-LR 450 km application、2020/1/27
- [6] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、C2057、DP-16QAM Symbol mapping for 200G and 400G applications in G.698.2 in G.698.2、
2020/9/8
- [7] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、C2505、DP-16QAM Symbol mapping for 200G and 400G applications in G.698.2、2021/4/13

1 3 参加国際標準会議リスト

- [1] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、スイスジュネーブ、2018/10/8～19
- [2] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
Q6 中間会合、イギリスロンドン、2019/1/28～31
- [3] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
Q11 中間会合、スイスジュネーブ、2019/2/25～3/1
- [4] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、スイスジュネーブ、2019/7/1～12
- [5] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
Q6 中間会合、スイスジュネーブ、2019/10/28～30
- [6] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
Q11 中間会合、オランダアムステルダム、2019/10/28～11/1
- [7] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
本会合、スイスジュネーブ、2020/1/27～2/7
- [8] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
Q6 中間会合、virtual meeting、2020/6/29、7/1、6、8、27
- [9] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15
Q11 中間会合、virtual meeting、2020/6/3、7/15
- [10] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・
SG15 本会合、virtual meeting、2020/9/7～18
- [11] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・
SG15 Q11 中間会合、virtual meeting、2020/10/26～30、2021/1/28～2/5
- [12] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・
SG15 本会合、virtual meeting、2021/4/12～23
- [13] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・
SG15 Q11 中間会合、virtual meeting、2021/6/1～11、7/26～30
- [14] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・

SG15 Q6 中間会合、virtual meeting、2021/6/15、16

[15] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15 本会合、virtual meeting、2021/12/6～17

[16] International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)・SG15 Q11 中間会合、virtual meeting、2022/2/14～18

1 4 受賞リスト

[1] 前田英樹、島崎大作、中村正則、財団法人通信協会 第 67 回前島密賞、“超高速 400G オプティカルネットワークシステムの開発と実用化”、2022/2/28

1 5 報道発表リスト

(1) 報道発表実績

[1] “NTT エレクトロニクス社、高性能な 64 GBaud コヒーレント DSP を販売開始 1 波長あたり世界最速 600Gbps 光ファイバ伝送を実現する ExaSPEED TERA をラインナップ”、2019/2/27

[2] “世界最高速度の 600Gbps 光伝送システム 1FINITY T600 を製品化”、2019/2/27

[3] “超大容量 1 テラビット/秒光信号の長距離伝送に成功 ～商用環境において世界最長 1,122km の伝送を実現～”、2019/6/19

[4] “400Gbps DWDM オープンシステム用 CFP2-DCO コヒーレントトランシーバの販売を開始”、富士通オプティカルコンポーネンツ株式会社、2022/3/1

(2) 報道掲載実績

[1] “Fujitsu Launches Industry’s First 600G Hyperscale Optical Transport Solution, Empowering Tomorrow’s High-Speed Networks”、Business Wire、2019/2/27

[2] “Fujitsu 1FINITY T600 blade offers 600-Gbps optical transport”、LIGHTWAVE、2019/2/27

[3] “NTT と NTT コム、商用環境において超大容量 1 テラビット/秒光信号の長距離伝送に成功”、日本経済新聞、2019/6/19

[4] “NTT、商用光ファイバー環境初の 1,000km 超の 1Tbps 伝送に成功”、impress、2019/6/19

[5] “超大容量 1Tbps 光信号の長距離伝送に成功”、OPTCOM、2019/6/19

[6] “NTT ら、商用環境で 1Tb/s 信号の 1122km 伝送に成功”、OPTRONICS ONLINE、2019/6/19

[7] “NTT が 1 テラ光長距離伝送に成功、商用環境で世界最長 1122km”、ビジネスネットワーク.JP、2019/6/20

[8] “NTT、伝送速度 10 倍の実験成功”、日本経済新聞、2019/6/22

[9] “NTT など、情報伝送速度 10 倍に”、日経産業、2019/6/26

[10] “NTT、超大容量 1 テラビット/秒光信号の長距離伝送に成功”、LaserFocusWorld.JAPAN、2019/6/28

研究開発による成果数

	平成30年度	令和元年度	令和2年度
査読付き誌上発表論文数	0件 (0件)	1件 (1件)	3件 (3件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0件 (0件)	9件 (7件)	4件 (4件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
口頭発表数	2件 (1件)	13件 (3件)	8件 (0件)
特許出願数	6件 (3件)	8件 (6件)	6件 (4件)
特許取得数	0件 (0件)	2件 (0件)	0件 (0件)
国際標準提案数	1件 (1件)	4件 (4件)	1件 (1件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	2件 (2件)	0件 (0件)
受賞数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
報道発表数	2件 (2件)	1件 (0件)	0件 (0件)
報道掲載数	2件 (0件)	8件 (0件)	0件 (0件)

	令和3年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件 (1件)	5件 (5件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	4件 (4件)	17件 (15件)
その他の誌上発表数	1件 (0件)	1件 (0件)
口頭発表数	4件 (1件)	27件 (5件)
特許出願数	16件 (10件)	36件 (23件)
特許取得数	0件 (0件)	2件 (0件)
国際標準提案数	1件 (1件)	7件 (7件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	2件 (2件)
受賞数	1件 (0件)	1件 (0件)
報道発表数	1件 (0件)	4件 (2件)
報道掲載数	0件 (0件)	10件 (0件)

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読(peer-review(論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの))のある出版物に掲載された論文等(Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のあ

る小論文、研究速報、レター等を含む)を計上する。

注3 : 「査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集 (電子媒体含む) に掲載された論文等 (ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。) を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等 (電子情報通信学会技術研究報告など) は、「口頭発表数」に分類する。

注4 : 「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等 (査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む) を計上する。

注5 : PCT 国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何カ国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6 : 同一の論文等は複数項目に計上しないこと。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しないこと。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。