

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

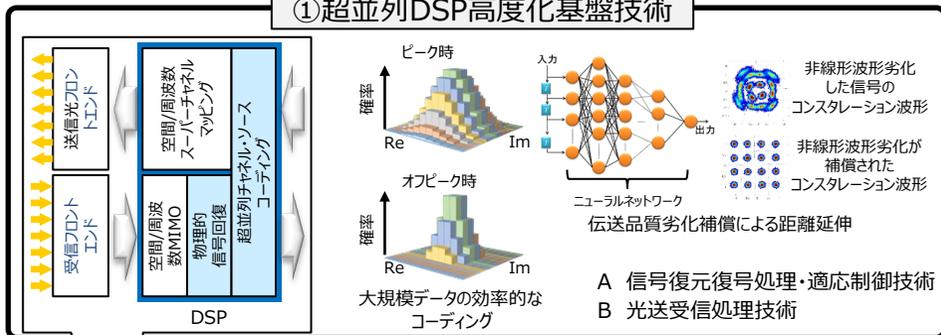
- ◆研究開発課題名 超並列型光ネットワーク基盤技術の研究開発
- ◆副題 大規模データを省電力・オープン・伸縮自在に収容する超並列処理光技術
- ◆実施機関 三菱電機(株)、(国研)産業技術総合研究所、(株)KDDI総合研究所、(国)香川大学、(学)慶應義塾
- ◆研究開発期間 平成30年度～令和3年度 (4年間)
- ◆研究開発予算 (契約額) 平成30年度から令和3年度までの総額280百万円 (令和3年度70百万円)

2. 研究開発の目標

2030年頃の空間多重システムに資する、光運用波長当たり現行比10倍の大容量性を実現する超並列DSP高度化基盤技術と、並列度現行比従来比1000倍、伸縮度現行比100倍の超並列性・伸縮自在性・オープン性を実現する超並列光ネットワーキング基盤技術をそれぞれ確立する。

3. 研究開発の成果

①超並列DSP高度化基盤技術



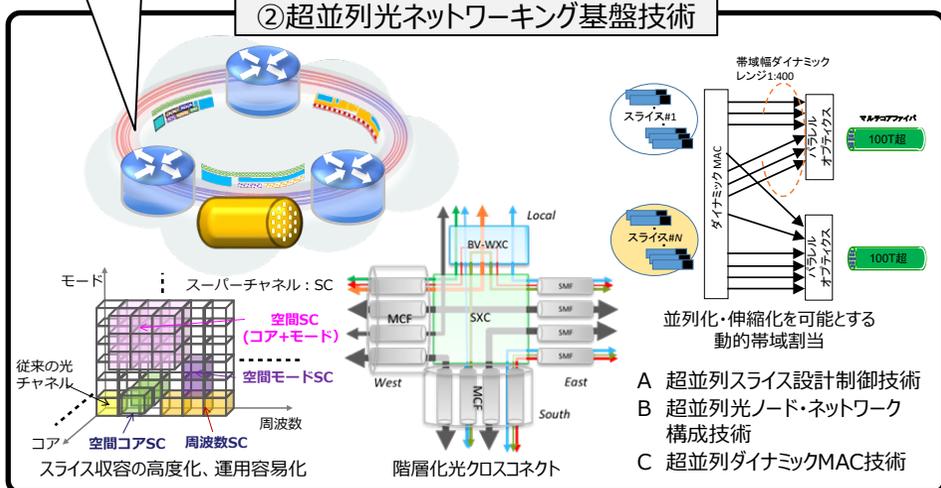
研究開発成果A 信号復元復号処理・適応制御技術

超並列光信号を収容するDSPの低電力化が課題。
・本研究開発では、圧縮シェイピング・マルチレベル符号化・適応復号により、方式のみで8.3～26倍の電力効率改善に成功。FPGAへの2Tbps超級回路の実装・評価、波長当たり400Gbps級伝送評価、項目①Bとの連携評価により、有効性を実証。

研究開発成果B 光送受信処理技術

WDM伝送時の相互位相変調(XPM)による非線形波形劣化が課題。
・本研究開発では、物理現象特化型ニューラルネットワークを用いて、SPMIに加えてXPM補償を実施して性能を向上する手法を新たに提案し、波長多重された(PS)64QAM信号について、非線形波形劣化補償を行わない場合と比較して60%以上の伝送距離延伸に成功。

②超並列光ネットワーキング基盤技術



研究開発成果A 超並列スライス設計制御技術

空間軸のスライス収容高度化とオープンインタフェースのSDM対応が課題。
・本研究開発では、光信号並列度現行比1000倍相当の実証、及びコア・モード、周波数軸を考慮した拡張オープンインタフェースによる及びスライス制御に成功。

研究開発成果B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

伸縮度現行比100倍の転送帯域を可能とする超並列光ノード構成法と超並列光ネットワーク設計法を明らかにすることが課題。
・本研究開発では、コア選択スイッチに基づく空間クロスコネクタの各種構成法、マルチレイヤ経路計算・コア/周波数スロット割り当てアルゴリズムを考案し、テストベッドを構築して、伸縮度現行比100倍の光チャネルの設定・切り替えが可能であることを実証した。

研究開発成果C 超並列ダイナミックMAC技術

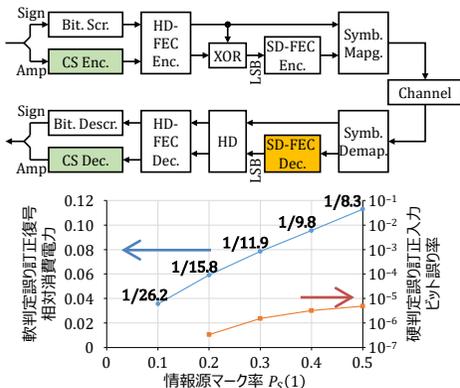
100多重級の光空間多重と10Tbps級のスーパーチャネルを使いこなすMACが課題。
・本研究開発では、レーン割り当数を可変にして容量可変及び部分故障対応を実現するダイナミックMACにおいて、400チャネルの実現性見込を確認、作成したエミュレータを用いて、JGN及び項目②A、②Bと連携した広域スケュー補償・部分故障自動復旧機構の技術検証に成功。

①A 信号復元復号処理・適応制御技術

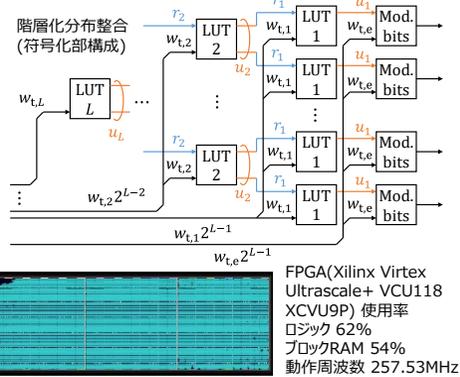
・最終目標：先進の情報理論を活用した信号の復元復号処理技術と、各機能を連携させることで適応的に性能・電力を最適化する技術を探求する。2030年頃の社会実装を想定した半導体プロセス・論理回路技術の進化(4.2倍見込み)を前提とし、現行1Tbpsの伝送容量を10倍の10Tbpsに増加させるとともに、25倍の電力効率化を可能とする基盤技術を確認する。方式・アルゴリズムのみで符号処理に係る消費電力効率6倍改善を達成する。

・実施内容：(1)開発：大容量・低電力化を実現する方式を複数開発。(2)実証：キー技術のFPGA高スループット実装を実施。波長当たり400Gbps級の各種伝送評価と、①Bとの連携評価を実施。(3)社会実装に向けて：研究開発成果を並走する総務省委託研究枠組みに提案。

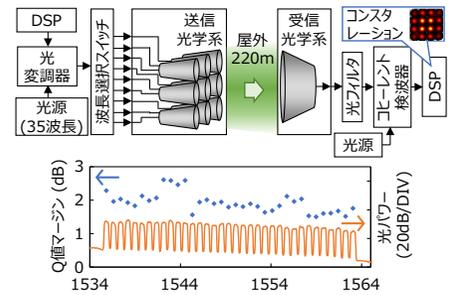
・結果：(1)圧縮シェイピング(CS)-マルチレベル符号化(MLC)256値直交振幅変調(QAM)にて、従来の均一分布・一括符号(BIC)128QAMに対して、符号処理に係る電力に支配的な軟判定誤り訂正(SD-FEC)復号の電力効率を方式のみで8~26倍改善(図①A-1)。(2)キー技術の階層化分布整合および周辺回路について、2Tbps超のスループットや 2^{22} 値以上のQAM信号のシェイピングを1石のFPGAで実現(図①A-2)。400Gbps/波長の確率整形16QAMの7ノード500km級伝送に成功。同技術を光空間通信にも横展開し、レーザー安全規格クラス1にて光空間通信容量の世界記録14Tbpsを達成(図①A-3)。項目①Bとの連携ではCS-MLC-64QAM信号により性能・電力評価を行い、単体評価に整合する結果を得た(図①A-4)。(3)テストチップ開発に組み込み済み。



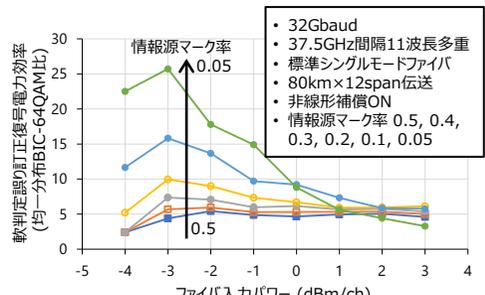
図①A-1：圧縮シェイピング-MLCM構成・電力



図①A-2：2Tbps超級回路FPGA実装



図①A-3：400Gbps PS-16QAM伝送検証



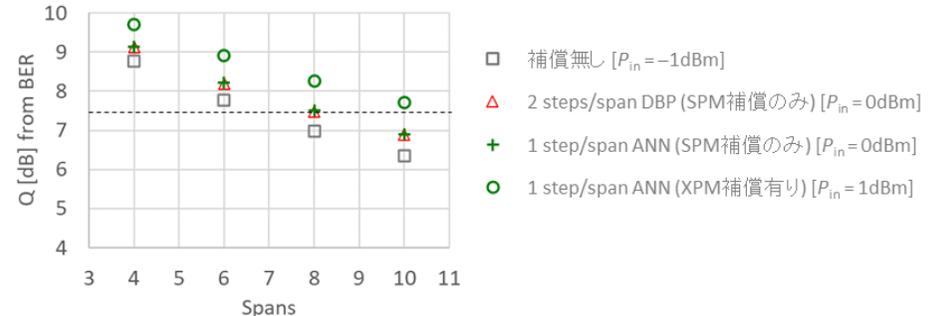
図①A-4：電力効率の連携評価

①B 光送受信処理技術

・最終目標：ニューラルネットワークを用いて、信号の非線形波形劣化を補償する送受信信号処理方法の開発を行う。波長多重された、周波数利用効率が10bit/s/Hz以上である高次QAM信号について、伝送後に発生する非線形波形劣化の補償を行い、非線形波形劣化補償を行わない場合と比較して60%以上伝送距離を延伸する。また、研究開発項目1内での連携評価を三菱電機と行い、DSP高度化基盤技術として検証する。

・実施内容：物理現象特化型ニューラルネットワーク(ANN)を用いて、SPMに加えてXPM補償を実施して性能を向上させる手法を新たに提案し、学習を実施するための数学的な枠組みを導出した。まずシミュレーションを用いて、9チャンネルのDP-64QAM信号に対する効果を検証し、伝送距離を60%延伸できることを確認した。次に周回伝送実験を実施し、11チャンネルのDP-PS-64QAM信号に対する効果を確認した。また、項目①内連携評価として、項目①Aで検討された分布を持つ変調信号を入力とし、シミュレーションによって信号伝送および非線形波形劣化補償を行い、電力効率向上の検討を行った。さらに、非線形波形劣化補償の性能を活かし、信号品質を向上して現実の伝送系で伝送距離を最大限延伸するために、光送信器で発生するアナログ光波形歪みを補償する周波数領域波形等化(FDE)の新たな方式を開発した。

・結果：シンボルレートが32Gbaudで、9チャンネルの偏波多重QAM信号を考え、理想的な伝送路における伝送シミュレーションによって伝送後の波形を得て、提案手法による非線形波形劣化補償の効果を検証した。DP-16QAM信号の受信波形を用いて、送信波形との誤差が最小となるように、1step/span構成のANNの学習を行った。次に、周波数利用効率が12bit/s/HzであるDP-64QAM信号を9チャンネル波長多重した信号の伝送後受信波形に対して、学習が完了したANNによる非線形波形劣化補償を実施した。図①B-1は、非線形波形劣化補償を実施しない場合、2step/spanの従来型DBPでSPMのみを補償した場合、1step/spanのANNでSPMのみを補償した場合、そして1step/spanのANNでSPMとXPMの両方を補償した場合(提案方式)のそれぞれについて、信号品質が最大となる最適入射パワーのもとで、各伝送スパン数に対するQ値の計算結果を示している。Q値のスレッシュを7.5dBに設定すると、非線形波形劣化補償を行わない場合の最大伝送距離は6スパンであるのに対して、提案手法である、1step/spanでXPM補償を実施するANNを用いた場合は、10スパンまでの伝送が可能になる。すなわち、伝送距離が60%以上延伸されたことを意味する。さらに、シンボルレートが32Gbaudで、11チャンネルの偏波多重QAM信号を送信信号とし、周回伝送実験によって得られた受信波形について、シミュレーション結果と同様に、オフラインで非線形波形劣化補償処理を行った。周波数利用効率が10bit/s/HzであるDP-PS-64QAM信号について、提案方式が有効に動作していることを確認した。また、項目①内連携評価を実施し、非線形波形劣化補償適用による電力効率向上を確認した。



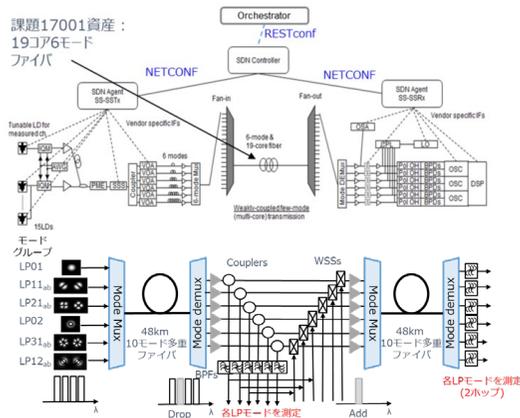
図①B-1：理想的な伝送路における、スパン数に対する信号品質のシミュレーション結果

②A 超並列スライス設計制御技術

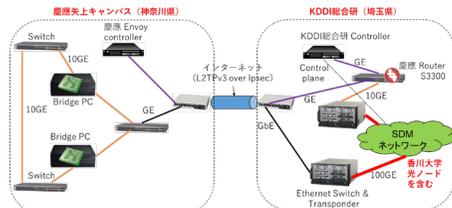
・最終目標：現行比1000倍相当の信号並列度を確保する。また、課題内連携により、並列度1000倍相当、伸縮度100倍相当の基盤検証を実施する。

・実施内容：テストベッドを構築し、現行比1000倍(モードグループ数6倍、波長数9倍、コア数19倍、現行シングルモード80波長)相当の信号並列度の基本検証、及びスライス間の主な品質劣化要因の監視結果を基にオープン制御インターフェースを用いたスライス制御を検証した。また、コア、モード、周波数を考慮したオープン制御インターフェースのデータモデル拡張を行い、制御性検証を実施した。課題内連携により、並列度1000倍相当、伸縮度100倍相当の超並列光ネットワーク基盤検証を実施した。

・結果：空間多重軸/周波数多重軸を駆使した光信号並列度現行比1000倍を可能とする超並列光ネットワーク設計技術と、オープンな制御インターフェースを活用したスライス制御技術を確認した。また、課題内連携により並列度1000倍相当、伸縮度100倍相当の基盤技術の検証を完了した。研究計画を100%達成し、特許出願2件完了、研究論文2件、国際会議7件、国内学会等8件発表を実施した。



図②A-1：オープン制御インターフェースを用いた超並列スライス制御検証用テストベッド概要



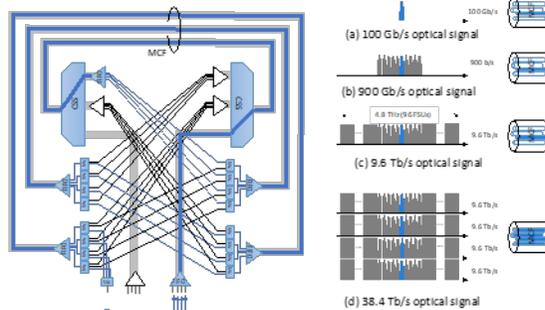
図②A-2：課題内連携テストベッドの概要

②B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術

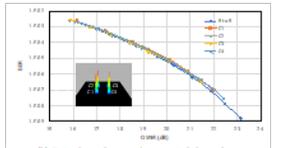
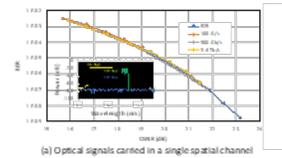
・最終目標：空間軸/周波数軸を駆使した伸縮度現行比100倍の転送帯域を可能とする超並列光ノード・ネットワーク構成技術を確認する。

・実施内容：コア選択スイッチ (CSS) に基づく空間クロスコネクタ (SXC) の各種構成法を検討、評価した。CSSを用いたWDM/SDM階層型光ネットワークテストベッドを構築、評価した。WDM/SDMマルチレイヤ経路計算・コア/周波数スロット割り当てアルゴリズムを考案・実装した。FMF用階層型光ノード実証テストベッドを構築、評価した。また、ASE雑音と非線形雑音を考慮した解析を実施した。

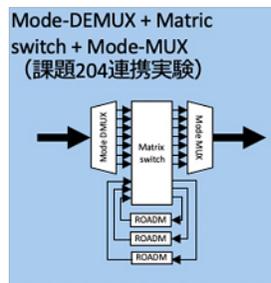
・結果：CSSに基づくSXCがファイバスイッチに基づく従来構成と比較してハードウェアを削減可能であることを実証した。伸縮度現行比100倍 (100 Gb/sから40 Tb/s) 光チャネルの設定・切り替えが可能であることを実証し、数値目標を達成した。SDM/WDM階層型光NWは高空間レーン利用効率と低コストの両立の可能性があると実証した。弱結合と強結合が混在するFMFを収容可能な階層型光ノードアーキテクチャの実現可能性を実証した (項目2-1と2-2の連携実験)。伝送距離維持 (周波数グルーミング) と延伸 (空間バイパス) のための設計指針 (SXC損失 < 7~10 dB) を得た。



図②B-1：伸縮自在な光チャネル設立実証実験系



図②B-2：伸縮実験結果



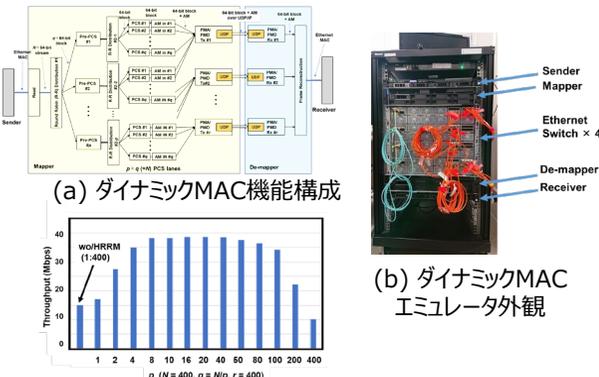
図②B-3：連携実験に用いた光ノードアーキテクチャ

②C 超並列ダイナミックMAC技術

・最終目標：100多重級の光空間多重と10Tbps級のスーパーチャネルを前提とした大規模光ネットワーク実現をサポートするために、ダイナミックに帯域幅を変更可能なMAC技術のエミュレータによる原理確認により基盤技術を確認する。

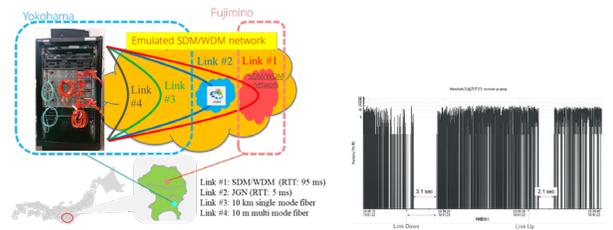
・実施内容：400レーンを実現するダイナミックMACアーキテクチャを考案。ダイナミックMACに対する(1)帯域幅伸縮実現手法、(2)スキュー補償実現手法、(3)部分故障対応手法を検討。考案アーキテクチャに基づく、エミュレータをソフトウェア実装し、実験室内及びJGNを利用した広域環境での帯域幅伸縮・スキュー補償・レーン故障対応の基本機能の動作確認を実施。項目②A、②Bと連携した総合検証による広域での動作検証を実施。

・結果：(1)多段ラウンドロビン方式を考案し、ダイナミックMACエミュレータ(図②C-1)でのスループット向上から有効性を確認。及び400レーンの実現性をエミュレータで確認。(2) 5msスキュー補償の実現性をJGN及び項目②A、②Bとの連携実験により実証(図②C-2)。(3)レーン故障に対応した自動復旧機構の基本動作をエミュレータで確認(図②C-3)。



(c)ダイナミックMACエミュレータでの400レーンスループット測定

図②C-1：ダイナミックMACエミュレータの実装と評価



図②C-2：項目2間連携実験系

図②C-3：自動復旧機構動作確認実験結果

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース報道	展示会	受賞・表彰
10 (6)	18 (11)	11 (2)	80 (20)	0 (0)	3 (2)	16 (5)	5 (2)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- (1) スタートアップミーティングを開催(2019年1月25日@NICT): 評価委員・専門委員、総務省担当課、NICT関係者、受託者間で研究開発の前提条件、進め方、到達目標等の認識共有
- (2) 中間評価ヒアリングを開催(2020年11月13日(オンライン)): 評価委員・専門委員、総務省担当課、NICT関係者により第1期研究開発(2018~2020年度)の達成度を評価。第2期(2021年度)継続が決定。
- (3) 終了評価ヒアリングを開催(2022年3月23日(オンライン)): 評価委員・専門委員、総務省担当課、NICT関係者により全期間(2018~2021年度)の達成度を評価。社会実装に向けた展望を議論。
- (4) 連絡調整会議を開催(2020年1月23日@NICT): NICT関係者、受託者間で研究開発状況、到達目標、今後の進め方、成果発信の方法等の認識共有
- (5) 受託者間調整会議を開催(2019年2月15日@三菱電機、4月15日@三菱電機、8月8日(電話会議)、2020年1月10日@三菱電機、6月24日(以降オンライン)、9月14日、2021年2月16日、7月12日、11月30日): 受託者間およびNICTオブザーバにより、研究開発の進捗状況を共有
- (6) 主要成果の特許出願、国内外の論文・学会における発表を実施
 28件の国内外特許出願を行い、2件の特許登録が完了(特許第6884293号、第6980162号)
 OSA論文Journal of Optical Communications and Networking (2019年3月、2020年1月、2021年2月)
 IEEE/OSA論文Journal of Lightwave Technology (2020年3月、8月、9月、2021年9月、12月)
 IEEE論文Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (2020年7月)
 IEEE小論文Photonics Technology Letters (2021年9月)、電子情報通信学会和文論文誌B (2020年9月)
 電子情報通信学会英文小論文誌Communications Express (2021年2月、3月)
 国際会議OFC2019: 2019年3月3日~3月7日、米国サンディエゴ(ワークショップ)
 国際シンポジウムEXAT2019: 2019年5月29日~31日、いせとびあ(伊勢市)
 国際シンポジウムISUPT/SSPhF2019: 2019年6月17日~19日、米国・ナバパレー
 国際会議OECC/PSC2019: 2019年7月7日~11日、福岡コンベンションセンター(福岡市)
 国際会議AP2019: 2019年7月29日~8月1日、米国・サンフランシスコ
 TTCセミナー: 2019年9月2日、芝公園電気ビル(東京都)
 国際会議ECOC2019: 2019年9月22日~26日、アイルランド・ダブリン
 電子情報通信学会PN/EXAT研究会: 2019年11月14日~15日、慶應大学(横浜市)
 国際会議ZS2020: 2020年2月26日~28日、スイス・チューリッヒ
 国際会議OFC2020: 2020年3月8日~12日、米国・サンディエゴ/オンライン開催
 国際会議PSC2020: 2020年7月13日~16日、オンライン開催
 国際会議iPOP2020: 2020年9月10日~11日、オンライン開催
 国際会議OECC2020: 2020年10月4日~8日、オンライン開催

- 国際会議ECOC2020: 2020年12月6日~10日、オンライン開催
- 国際会議ONFIRE Symposium: 2021年2月24日、オンライン開催
- PIF/PN研共催 2020年度チュートリアル講演会: 2021年2月24日、オンライン開催
- 国際会議OFC2021: 2021年6月6日~11日、オンライン開催
- 国際会議OECC2021: 2021年7月3日~7日、オンライン開催
- 国際会議Advanced Photonics Congress: 2021年7月26日~30日、オンライン開催
- 国際会議ECOC2021: 2021年9月13日~16日、仏国・ポルドー/オンライン開催
- 国際会議PSC2021: 2021年9月27日~29日、オンライン開催
- 国際会議iPOP2021: 2021年9月30日~10月1日、オンライン開催
- その他、光ネットワーク産業・技術研究会、電子情報通信学会全国大会、研究会にて多数講演
- (7) プレスリリース
 香川大学、“空間チャネルネットワークの実証実験に成功”、2019年10月8日
 香川大学、“超広帯域で低損失なコア選択スイッチの実証に成功”、2021年6月9日
 慶應大学、“Beyond 5G時代に向けた、新しい光ネットワーク運用コンセプト実験に成功”、2021年12月6日
- (8) 展示会にて成果を発信
 国際会議iPOP2019: 2019年5月30日~31日、NEC玉川事業場(川崎市)
 2019年度PIF定期総会講演会・展示会: 2019年6月7日、ホテルルポール麹町(東京都)
 国際会議OECC/PSC2019展示会: 2019年7月8日~10日、福岡コンベンションセンター(福岡市)
 KEIO TECHNOMALL2019: 2019年12月13日、東京国際フォーラム(東京都)
 第33回光通信システムシンポジウム展示会: 2019年12月17日~18日、東レ総合研修センター(三島市)
 国際会議iPOP2020: 2020年9月10日~11日、オンライン開催
 第34回光通信システムシンポジウム展示会: 2020年12月15日~16日、オンライン開催
 KEIO TECHNOMALL2020: 2020年12月18日、オンライン開催
 国際会議iPOP2021: 2021年9月30日、オンライン開催
 国際会議High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis: 2021年11月15日~18日、米国・セントルイス
 KEIO TECHNOMALL2021: 2021年12月10日、オンライン開催
 第35回光通信システムシンポジウム展示会: 2021年12月14日~15日、オンライン開催
- (9) 国際会議・論文誌にて受賞
 国際会議OECC/PSC2019 Best Paper Award受賞、国際会議ECOC2019 Highly Scored Paper受賞(2件)、
 電子情報通信学会通信ソサイエティ チュートリアル論文賞(2021年)、PN研究賞(2022年)

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- ①A 信号復元復号・適応制御技術: 総務省委託研究と連携し、早期社会実装を推進。加えて、NICT令和3年度Beyond 5G研究開発促進事業の「Beyond 5G通信インフラを高効率に構成するメトロアクセス光技術の研究開発(課題番号014)」にて高効率化に向けた研究開発を行い、本研究における大容量化との相乗効果を狙う。
- ①B 光送受信処理技術: 特許出願を完了しており、今後は学会や論文誌などを通じて、事業化を担う企業へのアピールを行い、企業への技術移転を通じて事業化・普及に向けた活動を行う。
- ②A 超並列スライス設計制御技術: NICT令和3年度 Beyond 5G研究開発促進事業の「Beyond 5G大容量無線通信を支える空間多重光ネットワーク・ノード技術の研究開発(課題番号002)」において空間多重光ネットワークのリンク技術に関して発展的に研究開発を継続。
- ②B 超並列光ノード・ネットワーク構成技術: 本委託研究で得られた成果の一部は、NICT B5G委託研究(課題002)に引き継ぎ、CSSベースのSXCを実用化に供し、B5Gモバイルサービスに貢献するために必要な基盤技術の研究開発を推進する。
- ②C 超並列ダイナミックMAC技術: 継続的な成果報告により“超並列”をホットピックとして学術界に貢献する。また、超低遅延ネットワークや時空間同期への適用といったネットワーク基盤構築のための研究開発へ発展させていく。