

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	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
副題	経済性と転送性能に優れた空間多重光ネットワーク基盤技術の研究開発
受託者	(大)香川大学、(株)KDDI総合研究所、日本電気(株)、サンテック(株)、古河電気工業(株)
研究開発期間	令和3年度～令和6年度(4年間)
研究開発予算(契約額)	令和3年度から令和4年度までの総額1,600百万円(令和4年度800百万円)

2. 研究開発の目標

1 Pb/s級光リンク容量が必要となる状況で、現行技術と比べて転送コスト50%以上の削減と転送距離50%以上の延伸化を実証する。階層化光ネットワーク・光ノード設計技術、保守性に優れたFIFOレス中継システム構築技術、MCFのコア毎に伝搬方向が異なる光信号の一括増幅技術、MCFのコア毎に切り替え可能な光空間スイッチ技術、装置内接続用MCF配線・接続技術を開発し、B5G無線通信を支える、経済性と転送性能に優れた空間多重光ネットワーク基盤技術を確立する。

3. 研究開発の成果

研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術

2022年度目標

CSS一次試作設計に基づくCSSコストモデルを用いて、CSSを用いた光ノードからなる光ネットワークの収容効率とネットワーク構築コストの一次評価を完了する。SXCのコア数やポート数の拡大方法等の検討と試作・評価等を通して、CSS高度化に向けた指針を得る。最終目標達成に向けたアプローチの妥当性検証のため、SXCプロトタイプとSDMネットワークテストベッドを設計・構築の上、有効性検証を完了する。

2022年度実施内容

CSSパッケージ試作で得られたCSSコストモデルと収容設計アルゴリズムに基づき、階層化光NWの構築コストのシミュレーションを実施した。SXCの高度化に向け、CSSの離調による可変光減衰機能動作の検証とクロストーク特性の明確化を行った。19コアCSS、19コアコア選択器、19コアFIFO、19コアスプリッタをMCFコードで配線して構成されるモジュラー型SXCと、FIFOレス4コア光中継システム、全方向7コア光増幅器から構成される簡易SDMネットワークテストベッドを構築し、実証実験を行った。

2022年度結果

提案する階層化SDM/WDM光ネットワークの予備系なしの場合の構築コストを、従来方式に比べて50%以上削減可能であるとの見通しを得た。CSSの出力光パワー制御についての見通しを得た(図3.1.1)。簡易SDM-NWテストベッドにおいて、コア単位の光チャネルの設定・切り替えの実証に初めて成功した(図3.1.2)。

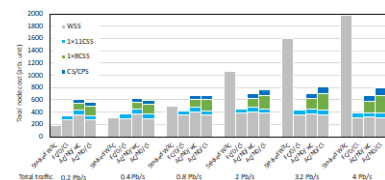


図3.1.1 コストシミュレーション結果

図3.1.2 SDMネットワークテストベッド

研究開発項目2 SDM光ネットワークシステム技術

2022年度目標

従来方式に比べて高い物理的転送性能を確保しつつ高度な監視・運用手段を提供でき、高信頼なSDM光ネットワークシステムの実証に向けて、SDM光中継伝送システムの基本設計を完了し、その実現可能性を提示する。FIFOレス中継伝送システムを構築することにより、中継器のモニタポートを含めてスパン損失を1.5 dB低減可能であることを示す。

2022年度実施内容

FIFOレスMCF光中継器を1次試作すると共に特性評価を実施し、概ね設計通りの特性が得られることを確認した。SDM光ネットワークシステムに関する標準化活動の一環として、NICT課題203と連携し、ITU-TにおけるSDM光ファイバ・ケーブルに関する技術レポート作成を推進した。

2022年度結果

FIFOレスMCF光中継器の1次試作の結果、中継器のモニタポートを含めてスパン損失を、FIFO有の場合と比較して1.5dB低減可能であることを検証した。SDM光ネットワークシステムに関する標準化活動の一環として、NICT課題203と連携し寄書提出により寄与してきたSDM光ファイバ・ケーブルに関する技術レポートが、ITU-T SG15プレナリー会合(9月開催)において制定が合意されると共に、発行された。

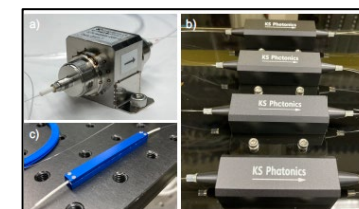


図3.2.1 FIFOレスMCF光中継器(左)及び構成デバイス(右)

3. 研究開発の成果（つづき）

研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術

2022年度目標

前年度にて設計した基本的構成に基づいた光増幅器を、コア毎に信号伝搬方向固定、コア数4または7にて試作、光増幅動作の実証を完了する。また、光増幅度や雑音指数といった基本的性能の定量評価を通して、最終目標達成のために必要な光増幅器設計パラメータの見通しを立てる。

2022年度実施内容

基本的構成に基づき、光増幅器をコア毎に信号伝搬方向を固定としコア数7で試作した。また光増幅度や雑音指数といった光増幅器の基本的性能を評価し、最終目標を達成するために必要な設計パラメータを検討した。

2022年度結果

試作した全方向光増幅器の光増幅動作を確認。励起方式として双方向励起とすることで、信号伝送方向に依存しない光利得・雑音指数を実現できる見込みを得た。方向固定の場合は、最終目標として定めた光増幅度や雑音指数を実現できることを確認した。一方、方向可変の場合は改善が必要であることが分かり、光増幅器の設計パラメータを検討しその見通しを立てた。

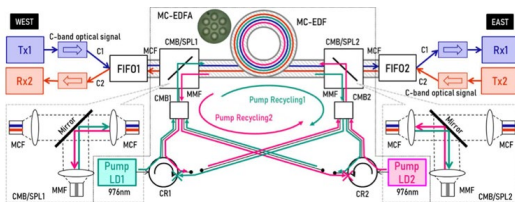


図3.3.1 全方向光増幅器の構成



図3.3.2 試作した全方向光増幅器の外観

研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術

2022年度目標

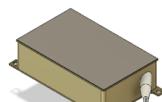
前年度の成果であるCSS二次試作機の評価結果から技術課題を抽出し、10コア以上MCF対応1入力8出力空間光スイッチの高性能化に向けた課題を明らかにし、対策をとることで二次試作機の設計を完了させる。また、該スイッチの性能を最大化するために必要な監視・制御用大規模光パワーモニタを試作し、連携動作検証によりその実現可能性を検証する。

2022年度実施内容

19コアMCF対応1入力8出力空間光スイッチ（CSS）の二次試作の光学設計、機械設計を実施した。19コアMCFのコアセレクトスイッチ(CS)の光学設計、一次試作を実施した。SDMネットワークを想定しCSSとCSを組み合わせたROADMノードを試作した。Fan-in Fan-outを必要としないMCF光パワーモニターの光学設計を行い原理検証を実施した。CSS内蔵に適した可変光パワー減衰器を提案し、動作検証を実施した。

2022年度結果

19コアMCF対応のCSを試作、評価し全長35mm、直径9mmのサイズにおいて、光損失1dB以下の低損失性を実証した。CSSとCSを2U19インチケースに搭載し、USB経由で遠隔操作可能SDM用ROADMを実現した。MCF光パワーモニターの原理検証を行い、挿入損失1dB以下の可能性を得た。CSS内蔵を可能とする可変光減衰器を評価し、クロストークの劣化なく過剰損失0.2dB、減衰量19.5dB以上の性能を実験的に実証した。



53 x 99 x 25 mm
図3.4.1 CSS二次試作設計

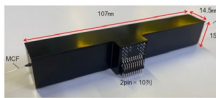


図3.4.3 MCF光パワーモニター

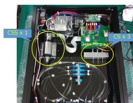


図3.4.2 19inch SDM ROADMノード

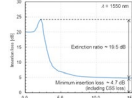


図3.4.4 CSS内蔵光減衰特性

研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術

2022年度目標

装置内配線に適切な19コアファイバの構造を確定させ、この接続部材を完成させる。SCコネクタで構成していた配線材のLCコネクタ化を完了させる。装置内の損失補償に用いる増幅器に集積型部品を適用し小型化を実現する。

2022年度実施内容

光ファイバへの要求条件を確定するために、ノード内の配線形態、環境条件の調査を行った。コネクタの構造上の開発ポイントと光ファイバの開発要素を整理して、両者のバランスを取りながら設計解の探索を進めた。構造最適化されたMCFに合わせてMCFの入出力部に用いるファンイン／アウト（FIFO）の構造設計を進め、問題点の洗い出しを行った。設計によって見積もられた配線材料の特性と親和性の高いインタフェースを持つ光増幅器の構造設計を行うとともに、光増幅器へのノード内特有の要求特性を調査した。

2022年度結果

ノード内で配線可能なクラッド径240um、190umのMCFの試作により設計検証を完了した。

240umクラッドMCFのコネクタ付けおよび入出力デバイス、19コア増幅器の基礎評価を完了させるとともに共同研究者に提供し、連携に供与した。

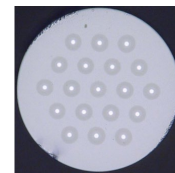


図3.5.1 19コアMCF

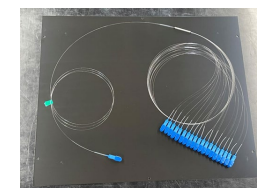


図3.5.2 19コアFIFO



図3.5.3 19MC-EDFA

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
15 (10)	0 (0)	3 (2)	56 (45)	1 (0)	4 (1)	3 (2)	4 (3)

※成果数は累計件数、() 内は当該年度の件数です。

- ・ **特許出願**：10件の国内特許出願により、知的財産権の確保を行った。
- ・ **研究論文・国際会議**：研究論文2編（Journal of Lightwave Technology）を発表するとともに、国際会議講演19件（OECC 2022 3件、ECOC 2022 9件、Photonics West 2023 1件、OFC 2023 6件）を行い、研究成果を国内外にアピールした。
- ・ **プレスリリース・報道**：報道発表「非対称データ通信を効率的に収容可能な空間分割多重光ネットワーク技術を実証」を行い、読売新聞オンライン、日本経済新聞オンラインなど5つのメディアに掲載された。
- ・ **受賞等**：ECOC 2022にてHighly Scored 1件（KDDI総研）、OFC 2023にてTop Scored 2件（香川大学、NEC、サンテック、古河電工）・（KDDI総研）として顕彰された。
- ・ **展示会**：国際会議OECC/PSC 2022併設の展示会に現地出展し、CSSプロトタイプとFIFOレスMCF光中継器プロトタイプの静態展示を行い、当委託研究の成果をアピールした。電子情報通信学会OCS研究専門委員会主催のOCSシンポジウム2022併設の展示会にオンライン出展した。
- ・ **ウェブサイト**：PHUJINプロジェクトのウェブサイト（<https://phujin-project.jp>）を開設、成果を国内外に発信した。



図4 OECC/PSC 2022における展示

5. 今後の研究開発計画（2024年3月末まで）

研究開発項目1 SDM光ネットワーク・ノード設計技術：コア間パワー偏差、波長間パワー偏差などに対する光学的補償機構を有するSXC構成等や、それを前提としたNW収容設計アルゴリズム等を検討する。また、さらなるCSSの多コア化や多ポート化、高信頼化とそれを前提としたSXC構成法等を検討する。

研究開発項目2 SDM光ネットワークシステム技術：2022年度までに決定した連携仕様に従い、連携基礎評価を通じて、連携インタフェース仕様を最終化する。また、従来のFIFOデバイスを有するMCF及びマルチコア中継器により構成されるMCF中継システムの場合と比べて、転送距離50%以上の延伸化を満たすSDM光ネットワークシステムを実証する。

研究開発項目3 SDM全方向光増幅技術：光増幅性能の最終目標光増幅利得12dB、雑音指数7dB以下を達成するため、2022年度に見通しをたてた光増幅器設計パラメータを反映することによって光増幅性能を改良した、MCF入出力に対応してコア毎に伝搬方向の異なる信号を一括増幅することができる光増幅器の試作を行う。改良においては、光増幅利得および雑音指数が最善となるよう、必要に応じて2022年度に行った検討のアップデートも行う。

研究開発項目4 SDM空間光スイッチ技術：前年度までの試作評価で課題となったCSSの挿入損失低減、クロストーク性能改善を両立する光学設計、工法を検討する。同時に社会実装を意識した高信頼性パッケージング化にも取り組む。また、SDMノードの有用性を実証するための評価系に用いるCSSの試作を行う。

研究開発項目5 SDM高密度配線・接続技術：装置内配線に適切な19コアファイバの構造を確定させ、この接続部材を完成させる。SCコネクタで構成していた配線材のLCコネクタ化を完了させる。装置内の損失補償に用いる増幅器に集積型部品を適用し小型化を実現する。