

令和 7 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 22402
 研究開発課題名 次世代コアと Beyond 5G/6G ネットワークのためのプログラム可能なネットワークの研究開発
 副 題 高信頼・大容量 End-to-end 接続を提供する次世代プログラマブル光＝無線統合ネットワーク

(1) 研究開発の目的

超大容量・低遅延・高信頼に加え、多様な要求に応じるための柔軟性を備え、知的・的確にコントロールされる、プログラマブルな光＝無線統合ネットワークの実現に向けた研究開発を実施する。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 7 年度（36 か月間）

(3) 受託者

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学＜代表研究者＞
 国立大学法人電気通信大学

(4) 研究開発予算（契約額）

令和 4 年度から令和 7 年度までの総額 45 百万円（令和 7 年度 7 百万円）
 ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 超大容量プログラマブル光コアネットワークの研究開発

- ・研究開発項目 1-1 コア＝エッジネットワークにおける統合光パス制御手法の開発と実証（東海国立大学機構）
- ・研究開発項目 1-2 可変密度多重および混合粒度ルーティングによる光ネットワーク大容量化（東海国立大学機構）
- ・研究開発項目 1-3 ペタビット級超多ポート光ノードアーキテクチャ（東海国立大学機構）

研究開発項目 2 光ファイバ給電で基地局を駆動するパッシブ光ネットワーク

- ・研究開発項目 2-2 新規光ファイバを用いた光ファイバ給電系（電気通信大学）
- ・研究開発項目 2-3 光ファイバ給電系の電力制御高速化（電気通信大学）
- ・研究開発項目 2-4 光ファイバ給電パッシブ光ネットワークの構築（電気通信大学）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	1	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	6	0
	その他研究発表	44	4
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	5	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目1：超大容量プログラマブル光コアネットワークの研究開発

・研究開発項目 1-1 コア=エッジネットワークにおける統合光パス制御手法の開発と実証

事前に予測した通信需要発生確率に応じて、強化学習の考えに基づき光パス配置を行う手法と、ノード間の最大フロー及びそのバリエーションを状態推定値として用い制御に反映させる間接的な方式を実現・検討し、多数のシミュレーションにより性能を評価した。前者に比べ後者が安定した制御性能を発揮し、かつ所望のスケールのネットワークに適用可能であることを確認した。同時に複数箇所での最大フローを評価し、ネットワーク容量の高精度な推定を可能にする方式を提案した。また、このフロー値をもとに、新たなネットワーク制御を提案している。なお、ネットワーク容量の正確な推定は数学的には極めて難しいものであるが、上界を数値的な解析を通じてタイトにしている。そして新たな制御法は、見積もられた上界からのギャップが大きくないこと、制御性能が良好であることを確認した。続いて、研究開発項目1-2で取り上げている階層化されたネットワークに於いて、伝送距離に応じて信号変調方式を変更する最新の伝送方式を導入し、信号劣化を考慮した光パスの経路制御により容量が向上することを示している。最後に階層化光ネットワークの制御手法を改善し、ファイバ粒度ルーティングを行うバイパスレイヤへのオフロード率向上を実現した。

・研究開発項目 1-2 可変密度多重および混合粒度ルーティングによる光ネットワーク大容量化

提案書にあったように光ファイバ内の帯域を区分し、多重密度を変更する方式について検討を進めた。異なる多重密度を混在させる方式として、光ファイバの使用率が極めて高い領域のみに高密度な波長多重を導入する構成を提案した。そのような領域を高速に評価する手法も開発している。一方、一般に異なる多重密度の混在は容易ではないことが明らかになってきたため、ネットワーク内を2つの階層に分離し、階層ごとに異なる粒度でのルーティングを行う方式を導入した。この方式は、迂回路として機能する階層と、通常の経路制御を行う階層を組み合わせ、それらをノード間の光ファイバで接続することで、波長選択スイッチを経由する伝送特性の劣化を抑制することに成功している。階層分割を行うアルゴリズムやネットワーク内で光パスの配置を決定するアルゴリズムを開発し、検証を行った。波長選択スイッチの平均通過数、および光スイッチ制御数を4割程度削減することを数値シミュレーションにより確認した。更に階層化光ネットワークのバイパスレイヤをマルチコア光ファイバで構成する、そこでコア単位のスイッチングを行う、あるいはネットワーク全体にマルチバンド伝送を導入してバイパスレイヤではバンド単位の切り替えを行う、等の次世代伝送技術の導入に関する検討を行った。これら伝送技術の部分的な利用を効率的に実現することから、その早期導入を可能にする方向性を見いだした。

・研究開発項目 1-3 ペタビット級超多ポート光ノードアーキテクチャ

複数の周波数帯域を用いるマルチバンド伝送がこの数年注目を集め、従来のシングルモードファイバの伝送特性を向上させるものとして検討が進められているが、周波数帯域ごとに大規模波長選択スイッチなどのデバイスを用意し、帯域分離用フィルタと併用して複数周波数帯域に分散する信号を処理する必要があった。しかし、大規模かつ様々な周波数帯域に対応した波長選択スイッチは高価である。そこで、今回、これまで我々が提案してきた光パスのグループ化と経路制御を分離するという方針に基づき、新たなノード構成を提案した。提案構成では周波数帯域ごとに用意した小規模な波長選択スイッチを用いて周波数帯域ごとに信号をグループ化し、グループごとに一度集約の上、周波数依存性のない一般の光スイッチで経路制御する。プロトタイプを構成し伝送実験を行って、ノードのスループット 300Tbps が達成できること

を明らかにした。続いてフル実装時の入出力数がそれぞれ 128 に達する超大容量プロトタイプノードの一部を実現し、伝送実験を行った。伝送容量を優先した高次の変調フォーマットを使用した際にはノードの総スループットは 4.71Pbps に達し、また伝送距離を優先した場合にも周波数帯域毎に 2000km の伝送が可能であることを明らかにした。小規模構成に適した従来型ノードと大規模構成に適する提案型ノードを混在させる新たな光ネットワーク構成を提案した。提案型ノードは光パスグループ数の多寡によりルーティング能力とコストのトレードオフをフレキシブルに設定できるため、ノード構成及び提案型構成を取るノードのグループ数を全て個別に最適化することとし、計算コストの小さな遺伝的アルゴリズムを導入することで最適化に成功している。提案型ノードのみで構成されるネットワークと異なり、あらゆる通信量において今回提案した混在型ノードのネットワークが最良となることを数値シミュレーションにて示している。

研究開発項目2：光ファイバ給電で基地局を駆動するパッシブ光ネットワーク

・研究開発項目 2-1 光ファイバ給電パッシブ光ネットワーク構成法研究開発項目

光ファイバ回線を通信だけでなく、基地局を駆動するための電力線として活用する、新たな光ファイバ給電光パッシブネットワークの構成法を提案した。信号と電力を同時伝送可能な光リンク構成は集約局からスプリッタまでとスプリッタから基地局までの 2 つの構成とした。前者は、当初新規マルチコアファイバの導入を検討していたが、製造の難しさと耐入力パワーの制限から個別のマルチモードファイバを用いる構成にした。これにより、データ伝送については、従来のパッシブ光ネットワークと同様にスプリッタを介して、それぞれの基地局に下り信号が伝送される構成を維持しつつ、パワー伝送については、データ伝送とは別にそれぞれの基地局に個別の光パス（コアもしくは光ファイバ）を配備する構成とし、それぞれの基地局のトラヒックに対応した電力制御を行える構成とした。また、動的な電力制御の検討として、導入を予定している複数の光電変換素子の電力制御の応答特性を測定し、その有効性を明らかにした。

・研究開発項目 2-2 新規光ファイバを用いた光ファイバ給電系

光ファイバ給電系において、光エネルギーをより高効率かつ長距離伝送するためには、低損失な光ファイバの研究開発が重要である。そこで、本研究開発で導入を検討していた大ブクラッド光ファイバに対し、新たに純シリカ内部クラッドで構成されたダブルクラッド光ファイバを用いることで伝送損失を格段に低減する新規光ファイバ技術を提案した（特許申請済）。これにより、内部クラッドの伝送損失を大幅に低減しただけでなく、既存光ファイバの波長損失依存性に近い損失特性を得ることに成功し、光ファイバ給電ネットワークにおける給電効率を大幅に向上する。この純シリカ内部クラッドで構成された新規ダブルクラッド光ファイバを用いた際の信号光と給電光の光合分波回路の構成に関する検討を行った。これまでのダブルクラッド光ファイバでは、2 重コアの内側に信号光、外側に給電光という構成から、複雑な合分波回路を必要とした。これに対し、新しいダブルクラッド光ファイバの低 NA（開口数）を活用した空間系波長フィルタ型の光合分波回路を構成し、従来の光分波回路よりも簡易かつ低損失な性能が得られることを実証した。もう一案の光合分波回路として、光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電変換素子の透過特性を利用した光合分波回路を構成し、特性評価を行った。実験により、光電変換素子を透過する信号光が高い信号品質を有し、同時に伝送した給電光は光電変換素子で電気エネルギーに変換されることを明らかにした。また、動的な光ファイバ電力制御の評価については、ネットワーク構成に即した応答特性の評価を実施するために、実際に使用可能な給電光源を用意し、詳細な応答特性の評価が可能な評価系を構築した。この

評価系で詳細な信号・電力伝送特性の評価を実施した。新たな光合分波回路も組み込み、最大給電光パワー20 Wにおいて、実証実験を実施した。電力伝送については、内部クラッドを純シリカで構成することで、給電光波長である976 nm帯において、ファイバの伝送損失を10 dB程度低減することに成功し、これに伴う高い給電効率を達成することに成功した。信号伝送においても、RoFを想定したキャリア周波数5.2 GHzの無線信号を変調信号として用い、上り・下り伝送において、ペナルティがほとんど発生しない高い伝送特性を達成し、新規ファイバの有効性を明らかにした。

・研究開発項目 2-3 光ファイバ給電系の電力制御高速化

本研究開発で想定している光ファイバ給電パッシブネットワークでは、給電電力の効率的な利用のため、RRHのトラヒックに応じて、EC側から必要最低限の電力を供給するシステムを導入する。このため、RRHのトラヒック変動に応じて、ダイナミックに給電電力の制御が可能な電力システムを構築する必要がある。そこで、実際の光ファイバ給電パッシブネットワークを想定したシステム構成において、実際の電力制御の応答速度の評価を行った。応答速度を決定するパラメータとしては、給電光源の周波数帯域、ファイバの伝送路長、光電変換素子の周波数帯域がある。これらの応答速度を詳細に評価した結果、1 msオーダーでの電力制御が行えることを明らかにした。これは、RRHに供給する電力制御の応答速度としては十分なものであり、トラヒックに応じた電力制御によるネットワーク全体の消費電力の削減に有効性があることを明らかにした。

・研究開発項目 2-4 光ファイバ給電パッシブ光ネットワークの構築

光ファイバ回線で基地局を駆動するための電力線として活用する、新たな光ファイバ給電光パッシブネットワークの構築の検討を行った。EC-スプリッタ間を構成する光ファイバとして、異コア径マルチコアファイバやSMFとMMFのバンドル構成の検討を行い、後者で検討すすめていくことを決定した。また、US側のジョージワシントン大学とは光ファイバ給電パッシブ光ネットワークにおけるコスト・消費電力に関するネットワーク評価を実施するため、実際の構成に即した使用デバイスのコストや消費電力の詳細な調査を実施し、これを基に、ネットワーク評価のパラメータを明らかにした。研究開発項目 2-2 で構築した新規ファイバを用いた光ファイバ給電系を組み込んだ光ファイバ給電パッシブ光ネットワークを実際に構築した。また、US側のジョージワシントン大学とは光ファイバ給電パッシブ光ネットワークにおけるコスト・消費電力に関するネットワークの評価を継続的に共同で実施し、実際の構成に即した使用デバイスのコストや消費電力の詳細な調査を基に、ネットワーク評価のパラメータを明らかにしている。

・研究開発項目 2-5 ネットワーク実証実験および検証

研究開発項目 2-4 で構成したネットワークを基に、ネットワーク実証実験を進める。米国ジョージワシントン大学と連携して、開発した新たな光ファイバ・新たな分岐構造のコスト解析を実施し、ネットワーク最適化を行い性能評価を完了した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

展開・普及にあたっては以下の3点を想定している。

- プロジェクト実施期間および終了後も、有力国際会議（ECOC/OFC/OECC 等）や論文誌での発表により、効果的に成果の周知を計る。招待講演が設定された場合には、本プロジェクトの成果を積極的に広告する。
- 本プロジェクトのみに限らない日米研究者間の国際協力関係を構築し、当コミュニティの中での研究分担者および日本の研究のプレゼンスを高める。
- 国内においては、学会により公開された日本のバックボーンネットワークポロジを用い、現実的な検討結果を適宜発表するなどして、国内のキャリア・ベンダへの可能な限りのフィードバックを試みる。

(9) 外国の実施機関

ジョージワシントン大学・ノースカロライナ州立大学（いずれも米国）