

採択番号 19302
研究開発課題名 スマートコミュニティを支える高信頼ネットワーク構成技術の研究開発
副題 超高信頼性を達成する次世代インテリジェント光ネットワークアーキテクチャ

(1) 研究開発の目的

1) 高信頼ノード装置アーキテクチャの開発

研究の背景・動機で述べたように、通信トラフィックの急増に伴う通信ノード大規模化は、ハードウェアコストの急速な増加と、コストダウンを意図するオープン化の要求とを生んだ。一方で、コンポーネント数の増加と、オープン化とで想定されるノード装置の信頼性の低下に 대응する必要が発生している。そこで本研究では、前回プロジェクトの成果である「フレキシブル波長群ノード」が、小規模な波長選択スイッチと光スイッチの集積として実現されており、コストダウンとオープン化の要求に極めてマッチしていることから、このフレキシブル波長群ノードのコンセプトを推し進め、内部構造に冗長性を導入して高信頼化することを目指す。これにより、比較的低廉な、小規模かつ信頼性にややかけるコンポーネントで構成されていても、求められる高度な信頼性をノード装置全体として達成する。

なお、小規模コンポーネントのみにより高いルーティング性能と冗長性を得るためには、ネットワーク最適化との連携が必要である。そこで装置としてのハードウェアに、ネットワーク最適化という「インテリジェンス」を加味することで、一層のハードウェア規模削減によるコストダウンと、更なる高信頼化を達成することも本研究の狙いの一つである。

2) ネットワーク高信頼化

高信頼化されたノード装置を持ってしても、掘削工事によるリンク切断や、大規模災害による複数のノード・リンク故障を担保することはできない。ネットワークレベルでの高信頼化を達成する上では、予備資源を確保し冗長性を得ることが必要であるが、予備資源の確保には多大なコストが必要である。そこで、以下の2つのネットワーク資源の適応的再配分により、資源量が許す範囲内での究極的な信頼性を達成する。

1. 正常運用時に、ネットワークの使用状況の将来予測を行い、資源再配分(光パスの追加・削除およびその経路制御)を行って、ネットワーク内の未使用資源(光ファイバ内での未使用の周波数領域等)を生み出す。この未使用資源を予備資源として利用し、信頼性を向上させる。また、高速な制御が必ずしも得意ではない光ネットワークの特性に鑑み、機械学習を用い通信トラフィックの変動予測を様々な時間スケールで実施し、これを元に遅延を加味した先行タイミングでの適正な資源再配分を行う。
2. 障害時には、影響を受ける光パスを可能な限りその予備へと切り替える。この予備光パスは事前に予約するものの、予約済みの予備光パスもまた障害の影響を受けている場合には、別の経路を通る新たな予備パスを割り当てる。以上は一般的な手段であるが、本研究では中途での信号再生による、光パスの伝送可能距離を超えた長距離での迂回、予備資源が不足した場合における通信容量の削減も導入することで光パスの断を極力避ける。

また、本研究では将来想定される超大容量トラフィックに鑑み、空間分割多重技術を用いたネットワークでの高信頼化についても、そのあるべき姿について検討を行う。

3) サービスレベルアグリーメントに基づくコネクション制御

限りあるネットワーク資源で実現できる冗長性には限界があることから、個々の光パス（コネクション）が要求するサービスレベル（許容故障時間等）を満足させつつ、ネットワーク側の収益を最大化するための予測及び制御手法を確立する。

光パスの平均故障時間の推定には多くの計算を要することから、計算結果を教師データとした機械学習（深層学習ニューラルネットワーク）を行うことで高速に近似値を推定し、また得られた近似推定値をネットワークの制御にフィードバックして、サービスレベルを満足する範囲内でネットワーク側の収益を最大化する。

(2) 研究開発期間

平成 30 年度から令和 3 年度（36 か月）

(3) 実施機関

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学 <代表研究者>
国立大学法人香川大学

(4) 研究開発予算（契約額）

総額 45 百万円（令和 3 年度 6 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：高信頼かつスケーラブルな光クロスコネクトノード

1-1 高信頼化フレキシブル波長群ノードアーキテクチャ

（国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学）

1-2 高信頼化フレキシブル波長群ネットワーク設計法及び拡張法

（国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学）

1-3 光クロスコネクトノードプロトタイプ開発及び検証

（国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学）

研究開発項目 2：複合型冗長化に基づく超高信頼光 NW

2-1 経済的で超高信頼な大規模光ネットワーク設計法（国立大学法人香川大学）

2-2 縮退資源再割当てによる故障救済率向上（国立大学法人香川大学）

2-3 空間分割多重光ネットワーク高信頼化への拡張（国立大学法人香川大学）

2-4 複数時間スケールにおけるトラフィック変動予測と動的ネットワーク制御への応用（国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学）

(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	0	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	5	1
	その他研究発表	43	5
	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	7	1

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 1：高信頼かつスケーラブルな光クロスコネクトノード

研究開発項目 1-2 高信頼化フレキシブル波長群ネットワーク設計法及び拡張法

令和 3 年度では、高信頼化ネットワークの設計アルゴリズムの開発を行い、これを用いてのパス冗長化を導入した場合における性能評価を行った。

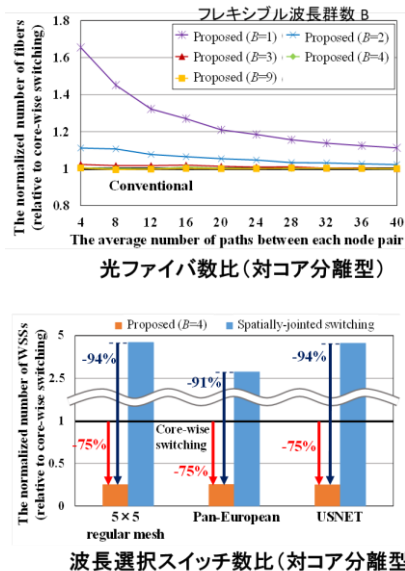


図 1-2 パス冗長化を導入した場合における 5x5 正方格子ネットワーク・4 コア MCF における提案ネットワークアーキテクチャの性能評価 (上：コア分離型に対する光ファイバ数比、下：コア分離型に対する波長選択スイッチ数比)

図 1-2 に、最終的な設計アルゴリズムによる 5x5 正方格子ネットワークにおける設計結果を示す。パス冗長化をしない前述の実験結果ではコア数が増えるに従い性能が改善したことから、最悪値を担保すべくコア数が少ない場合（コア数 4）の評価を行った。図の上側は、コア分離型ノードを用いた場合のマルチコアファイバ数を 1 として正規化したときの、提案ノードにより構成されたネットワークで必要となる光ファイバ数を示している。フレキシブル波長群数 B を 1,2,3,4,9 としており、B=3 程度でコア分離型とほぼ同等のルーティング能力を発揮することが判る。最大トラフィック時の、波長選択スイッチ数の比較を図 2-8 の下側に示す。この例では B=4 としている。従来型ノードについては、コア分離型に対し空間ジョイントスイッチング型はカスケード接続が避けられず、結果として大幅な波長選択スイッチ数の増加に繋がっている。一方、提案型ノードは波長選択スイッチを複数コアで共有するほか、カスケード接続も行わないため波長選択スイッチ数が極小化されている。

研究開発項目 1-3 光クロスコネクトノードプロトタイプ開発及び検証

研究開発項目 1-1 の成果を踏まえ、21 個のコアを有するマルチコアファイバを 4 本接続した 4x4 ノードプロトタイプにおける詳細な伝送実験を実施した (図 1-4 参照)。

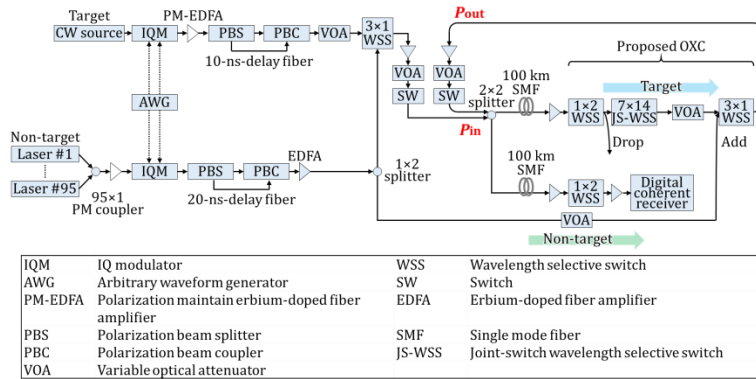


図 1-4 伝送実験

図 1-4 に、今回用いた実験装置の構成を示す。1x20 波長選択スイッチを、7 コア空間ジョイントスイッチングの 1x2 波長選択スイッチとして用いており、これを 3 つ並べることによって 21 コアに対応させている。図 1-5 に各々伝送可能距離を最大・容量を最大とする、QPSK/16QAM での伝送実験の結果を示す。中間的な値となるため、8QAM は省略している。提案ノードでは、ノード内の DC スイッチでの損失と、光増幅器の増幅率とのトレードオフにより性能が決定される。比較的ノードの次数が小さく (3x3-5x5) 損失の小さなケースにおいては、QPSK で 2000km を超える伝送を実現している。一方、16QAM を用いた場合、伝送可能距離は最大でも 700km に留まった。

なお、全ての光信号の変調方式を 16QAM に設定した際のノードのスループットは 2.15Pbps (400Gbps, 64 波/ファイバ, 84 コア/ノード) に達する。

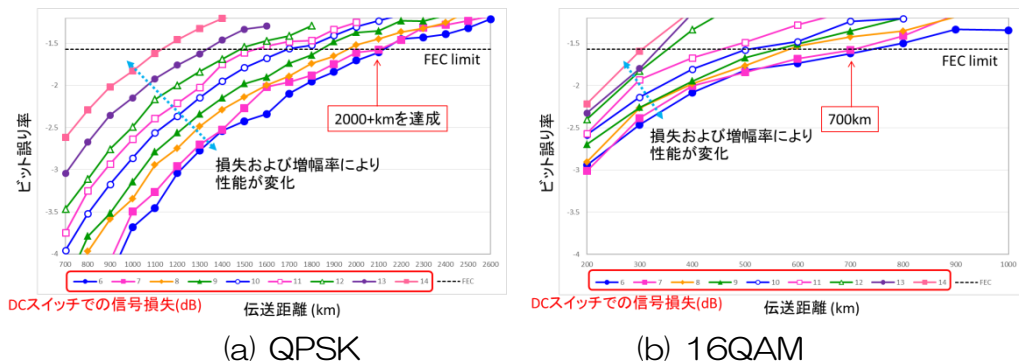


図 1-5 測定結果

研究開発項目 2：複合型冗長化に基づく超高信頼光ネットワーク

研究開発項目 2-3 空間分割多重光 NW 高信頼化への拡張

空間チャネルネットワーク (SCN) における資源共有プロテクション-縮退運用 (SP-FB) 方式の広波長帯域信号に対する適用可能性を明らかにすることを目標に、S バンドならびに L バンドへの拡張の可能性について検討し、実験により検証した。具体的には、SB-FB を実装する空間クロスコネク (SXC) を構成する波長選択スイッチの挿入損失波長依存性を 1480nm から 1630nm の広い範囲にわたり測定し、この波長域全体にわたる低挿入損失性を確認するとともに、1480 nm (S バンド) と 1600nm (L バンド) の 100 Gb/s 光信号を SXC でスイッチングし、ビット誤り率特性を評価した。

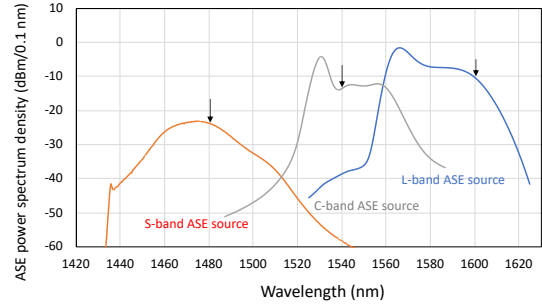
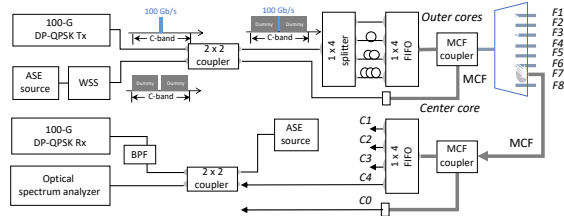
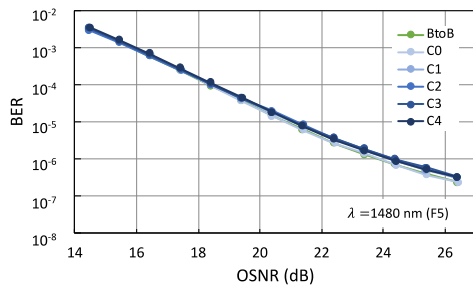


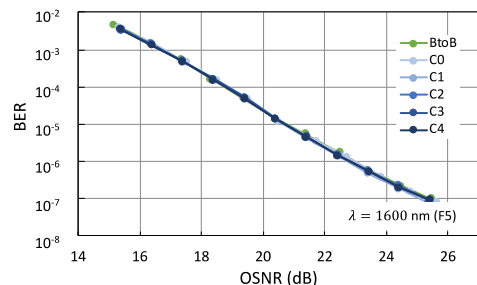
図 2-1 SXC スwitchングにおける BER 測定系

図 2-2 ASE 光源のスペクトル

図 2-1 は S バンドならびに L バンドの 100 Gb/s 光信号に対する SXC スwitchングにおける BER 測定系である。図 2-2 は評価に用いた S-, C-, L-バンドの ASE 光源のスペクトルである。図 2-3 には、波長 1480 nm (S バンド) ならびに波長 1600 nm (L バンド) の 100 Gb/s 光信号を、5 コアファイバのコア 0 からコア 5 に入力し、SXC でスswitchングした後、受信機における光信号対雑音比 (OSNR) を変化させて測定した BER をバックツーバック特性とともに示している。図 2-3(a) ならびに (b) からわかるように、すべてのコアを通った光信号の OSNR 対 BER 特性は、バックツーバック特性と一致しており、S バンドならびに L バンドにおいても SXC は良好なスswitchング特性を提供可能であることがわかる。SP-FB 方式は SXC におけるコア単位のスswitchング機能に基づいており、SCN は C バンドのみならず、S バンドから L バンドにわたる非常に広い範囲の光信号において、SP-FB による高信頼で経済的な故障救済機能を提供可能であることを確認した。



(a) BER vs. OSNR performance of 100 Gb/s DP-QPSK optical signal at 1480 nm for each core in F5



(b) BER vs. OSNR performance of 100 Gb/s DP-QPSK optical signal at 1600 nm for each core in F5

図 2-3 OSNR 対 BER 特性

研究開発項目 2-4 複数時間スケールにおけるトラフィック変動予測と動的ネットワーク制御への応用

令和 3 年度においては、完全なフレキシブルグリッドおよび距離適応変調方式の導入時における提案手法の性能について検討と性能評価を実施している。準正則グリッドを用いた場合において、固定グリッド上の周波数に比べ周波数スロット数が多いこと、周波数スロット間の関連性を考慮する必要があることから、固定グリッドの場合の数倍の処理時間が必要である。しかし、汎用ライブラリを用いた現状の実装においても、パス収容あたりの経路・波長決定時間は 0.3 秒程度に留まっており、現実的な手法となっている。また、完全なフレキシブルグリッドおよび距離適応変調方式を導入した場合においても計算時間は秒単位に留まっている。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

(1) 計画

今回の研究課題実施によって得られた知見を今後の研究活動にフィードバックし、より優れた成果を挙げることを目指す。得られた知見には、次世代ノードアーキテクチャ、構成デバイス、アルゴリズムに関して解決すべき新たな課題が含まれており、これら新たな課題の解決に取り組み、有力国際会議・国際論文誌に成果を発表し周知していくことが必要である。また、光ネットワーク一般に有効な、普遍性のある知見については、今回主に取り扱ったコア・バックボーンネットワーク以外への応用も検討する。

(2) 展望（5年後程度を想定）

項目1で提案した空間ジョイントスイッチング型フレキシブル波長群ノードについては、100Gbps-400Gbps程度の現状の光パスのルーティングを従来型ノードと遜色ないレベルで実施できる。一方、項目2のノードは超大容量の光パスを多数扱うことが可能であり、より将来の通信トラフィックに適合する。よって、各ノードの導入可能時期としては項目1のそれが相対的に早いものとなるであろう。また、項目1および2の研究で得られた知見は、形を変えて更に新しいノードの開発や、他のネットワーク領域への応用として直接研究活動に貢献すると見込まれる。研究実施者としては、これら継続的な研究開発の結果、より優れた光ネットワークの実現とネットワークを基盤とした新たなサービスの創出、これまでに無い快適さを提供する利便性の実現に貢献することを望んでいる。また、今回の研究課題実施で、将来の研究を担う大学生・大学院生は多くの経験と知識を手に入れることになった。研究期間後半は残念ながら国際会議はオンライン実施となったものの、世界で切磋琢磨する経験を得たことは間違いなく、彼らは今後数年で若手研究者として活躍していくことが期待される。

(9) 外国の実施機関

ジョージワシントン大学（米国）