

称号及び氏名 博士（工学） 山口 秀

学位授与の日付 2022年3月31日

論文名 「Calculation Method for Wavelength Path Planning in Arrayed Waveguide Grating-STAR Network with Loopback Function」

論文審査委員 主査 山田 誠 教授  
副査 久保田 寛和 教授  
副査 林 海 教授  
副査 小山 長規 准教授

## 論文要旨

Arrayed Waveguide Grating-STAR (AWG-STAR)ネットワークは、波長分割多重(WDM)技術と Arrayed Waveguide Gratings Router (AWGR)を用いたフルメッシュネットワークである。本論文では、従来の AWG-STAR ネットワークで問題となっていた固定波長パスのトポロジーによるトラフィック集中や過疎化による非効率な通信容量消費を低減することを目的に、AWG-STAR ネットワークの改良を検討した。本研究では、データセンターネットワークを想定しているため、L3 スイッチと固定波長光源を用いることにより、低コストで大容量かつ柔軟性の高いネットワークを構築することができ、低コストでの柔軟なネットワーク設計・構築に貢献することが期待される。一方、AWG-STAR ネットワークでは、波長パスの数が多く、波長パスのトポロジーが非常に複雑になっている。波長パストポロジーが動的に変化するネットワークでは、波長パストポロジーの管理だけでなく、各波長パスの累積光損失が変化し、ネットワークの管理・保守・トラブルシューティングの作業負担が非常に大きくなる。そのため、ネットワーク管理者の作業負担を軽減するための波長パス管理システムが求められている。管理システムの機能の1つに、波長パスのトポロジー検出がある。固定波長パストポロジーの AWG-STAR ネットワークでは、行列表現を用いた波長パストポロジーの算出方法が提案されているが、可変波長パストポロジーの算出方法はまだ確立されていない。本研究では、提案されている波長パス再配置機能を持つ AWG-STAR ネットワークに適

した行列計算方法についても検討した。また、波長パストポロジだけでなく、波長パス経由のノードや、波長パスごとの累積光損失の計算方法についても検討した。しかし、機器の状態からネットワークトポロジを算出できても、必要なネットワークトポロジから必要な機器の状態を算出することは不可能である。また、ネットワーク管理の観点からは、ネットワーク管理者が管理しやすいインタフェースであることが求められる。そこで本論文では、AWG-STAR ネットワークを拡張し、通信容量の非効率な消費を低減することを目的とした新しいネットワークアーキテクチャを提案する。また、行列表現を用いた波長パストポロジの計算方法を考案し、提案する AWG ネットワークで伝送が可能かどうか、帯域設計や伝送設計の計算方法について検討した。以下、本論文の各章の内容を説明する。

第 1 章では、本研究の背景、目的及び内容について概略を示し、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、波長パスのトポロジを柔軟に変更できる新しい AWG-STAR ネットワークアーキテクチャを提案した。従来の固定波長パスのトポロジを柔軟に変更する機能を実現するために、AWGR でルーティングした波長信号を再度 AWGR に入力し、固定とは異なる宛先ノードに信号を送る方式を採用した。AWGR への波長信号の再入力には、各ノードと AWGR の間に光スイッチ (OSW) を導入し、OSW の切り替えにより、波長経路を再構成して AWGR への波長信号のループバックを可能とした。提案する AWG-STAR ネットワークが波長経路のトポロジを変更できることを実証するために、研究室で検証用ネットワークを構築した。検証用ネットワークにトラフィックを流し続けながら、OSW を切り替えて、ノード間の 1 波長分の経路を再配置した。ノード間のスループットを測定したところ、トラフィック容量が変化していることが確認され、特定波長パスを測定対象ノード間で追加することを確認した。さらに、波長パストポロジ変更機能の性能について、波長あたりのループバック数、同時に切り替える波長数、ノード間距離の 3 つの観点から実験を行い、提案する AWG-STAR ネットワークのスケラビリティを明らかにした。

第 3 章では、波長パスを利用したノード間の接続状態を簡単に表現するための新しい表現方法を考案した。これは波長パストポロジの動的変化機能の実証には成功したが、波長パストポロジの動的変化が続くと複雑化し、ノード間の通信容量、波長パスの光損失バジェット、波長パス経由のノードなどのネットワーク状態の把握が困難になることが明らかになったため、これを解決するためである。この方法は、AWGR の配線特性、OSW の内部接続状態、ノードの光トランシーバの出力波長を行列形式で表現し、行列計算によりノード間の接続関係や波長経路によるノード間の通信容量の変化を求めるものである。本手法を用いることで、従来は人手で管理する必要があった波長経路関連情報を、提案する AWG-STAR ネットワークで表現・算出することに成功した。

第 4 章では、提案する AWG-STAR ネットワークの波長パストポロジ変更に対する能力を向上させるため、光損失とパケットロス率の性能を評価した。光損失の評価では、波長信号のループバックが波長パスに与える影響を評価するため、検証用ネットワークを構築し、送信側光トランシーバからネットワークを介して受信側光トランシーバまでの複数の中間点における光強度を測定した。その結果、波長信号のループバックによる光損失が蓄積され、ループバック可能な回数に限界があることが判明した。そこで、提案する AWG-STAR ネットワークに光増幅器ユニットを導入し、この制限を緩和することにした。光増幅器ユニットの導入により、波長信号のループ可能回数を増やし、波長パスのトポロジ変更機能の柔軟性を向上させることに成功した。波長信号のループバックによる光損失の蓄積と光増幅器による光損失補償の観点から、ノードまでの AWGR の距離、ループバック数、光増幅器の利得の関係性を分析し、提案 AWG-STAR ネットワークの規模、ループバック数、光増幅器の利得設定などのスケラビリティを分析した。提案する AWG-STAR ネットワークのスケラビリティと光増幅器ユニットの設定利得の関係性を明らかにした。さらに、パケットロス率を評

価するために、提案する AWG-STAR ネットワークに遠隔操作機能を実装した。検証ネットワーク上で OSW 切り替えのリモート制御を行い、OSW 切り替え時のパケットロス率を測定し、動的な波長パスのトポロジー変化がトラフィックに与える影響を評価しました。その結果、OSW 切替時のパケットロス率は 1%程度であり、要求される通信品質によっては、切替時に IP 層でのパケット迂回制御が必要であることが明らかにした。

第 5 章では、中継ノードと光損失の情報を含む新たな行列表現法を開発し、波長経路が確立できるかどうかの計算方法を確立しました。これは第 4 章の性能評価の結果、波長パスのトポロジー変更機能には物理的な限界があり、OSW を切り替える前に波長パスの中継ノードと光損失情報に基づいて切り替えるかどうかを判断する必要があることが判明し、第 2 章で提案したマトリックス表現法は、波長パスのトポロジーを容易に表現できるものの、波長パスの中継ノードや累積光損失などの物理情報を含んでいないため、ノード間で波長パスが確立できるかどうかを計算することができないため、確立できない波長パスを見落とす可能性があり、表現力が不十分である可能性があった。提案したマトリックス表現法は、従来の波長パストポロジーの表現に加え、中継ノード、光損失、ノード間距離、伝送遅延を計算することができ、トポロジー情報管理の観点からも有用であった。

第 6 章では、第 5 章で提案した手法をベースに、新たに波長経路と OSW 内部状態の算出方法を提案し、ネットワーク管理者向けのアプリケーションを開発した。これまでの章では、ネットワークの状態を計算する方法のみを検討していたが、ネットワーク管理に必要な、波長パスを多重化したノード間の情報から必要な OSW 内部の状態を計算する方法や、ユーザインタフェースは検討した。

第 7 章では、本論文の総括を行い、調査から得られた成果を結論として示した。OSW を用いた高機能な AWG-STAR ネットワークを開発・実証し、波長パスのトポロジー管理に有用な計算手法を明らかにした。

## 審査結果の要旨

本論文は、波長分割多重(WDM)技術と、波長ごとに経路を振り分ける波長ルータのひとつである Arrayed Waveguide Gratings Router (AWGR)を用いたフルメッシュのネットワーク(NW)である AWG-STAR NW に関して研究を行ったものであり、以下の成果を得ている。

- 1) 波長パストポロジーを柔軟に変更できる AWG-STAR NW を提案した。従来の固定的な波長パストポロジーを柔軟に変更できる機能を実現する手段として、AWGR によりルーティングされた波長信号を再度 AWGR に入力することで、固定された宛先とは異なる宛先ノードへ信号送信できる手法を利用した。波長信号の AWGR への再入力の実現のため、光スイッチ(OSW)を各ノードと AWGR の間に導入した。OSW 切替により、光の経路を変更して AWGR へ波長信号のループバックを実現した。
- 2) 波長パストポロジーの動的変化が継続すると波長パストポロジーは複雑化し、ノード間通信容量などの情報把握が困難になるという問題が明らかになった。この問題の解決のため、波長パスによるノード間の接続状態を簡易に表現できる新規表現法を考案した。この手法により、提案 AWG-STAR NW において、従来手作業で管理していた波長パス関連の情報を簡便に表現・計算することに成功した。
- 3) 提案 AWG-STAR NW の波長パストポロジー変更機能を高度化するため、研究室内に検証 NW を構築し、光損失とパケットロス率の性能評価を行った。波長パストポロジー変更機能には光損失の累積による物理的制約があること、パストポロジー変更時に瞬断が発生することが判明した。
- 4) 波長パストポロジーの表現機能に加え、中継ノードや光損失、ノード間距離や伝送遅延などの計算も実現するため、行列表現方法を拡張・一般化し、中継ノードや光損失情報を含む計算が可能

な行列表現手法を考案し、波長パス設置可否判定できる計算方式を確立した。

5) NW 管理上必要となる波長パスが多重化されているノード間の情報から必要な OSW 内部状態を算出する方式を提案し、NW 管理者向けにグラフィカルユーザーインターフェースを有するアプリケーションを開発した。

以上の成果は、多様化する NW 要件に対応するための大容量・低遅延を実現する光フルメッシュ NW を構築可能な AWG-STAR NW の有する波長パストポロジーが固定化されていることに起因するトラフィック変動に対応できない課題に対し設備・運用上低コストで柔軟な光ネットワークを実現するものであり、電気情報工学分野に大きく貢献する。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。