

## 内容の要旨

報告番号	甲 第 4350 号	氏 名	佐藤 丈博
主論文題目： Energy-efficient Reliable Optical Metro/Access Integrated Network Using Virtualization Technology (仮想化技術を用いた省エネルギー・高信頼な光メトロ/アクセス統合型ネットワーク)			
<p>有線/無線通信におけるブロードバンドサービス加入者数の増加、映像配信等のアプリケーションの普及により、ネットワークトラヒックは増加を続けている。これに伴い、ネットワーク機器の総消費電力量は年率 12% の速度で増加しており、そのうち 60~80% をアクセスネットワークが占めると推計されている。アクセスネットワークでは、複数の加入者で設備を共有することにより安価にブロードバンドアクセスを実現する <b>Passive Optical Network (PON)</b> が一般家庭向けに普及している。仮想専用線やモバイルフロントホールといった事業系サービスを既存の光アクセスネットワーク上で提供する研究も行われており、費用対効果を考慮した高信頼性の確保が必須となる。</p> <p>上記の背景より、次世代光アクセスネットワークでは、大容量化・低コスト化に加えて省電力性・高信頼性・マルチサービス収容が必要である。これらの要求を同時に達成するため、光アクセスネットワークの規模を現在のメトロネットワークの領域まで拡張する、光メトロ/アクセス統合型ネットワークの検討が行われている。本ネットワークでは局側装置あたりの収容加入者数を増加させることにより、トラヒックの集約効率を高めるとともに電気スイッチ等の装置数を削減し、省電力化の達成を目指す。また、予備系装置を多数の加入者で共有することにより、低コストでの耐障害性の向上が期待される。我々が提案する <b>Elastic Lambda Aggregation Network (ELAN)</b> では、各サービスの収容に必要な機能を提供するプログラマブルな局側装置や加入者側装置、および経路や割当帯域を柔軟に変更可能な光ネットワークにより、マルチサービス収容の実現を検討している。</p> <p>本論文では、ELAN においてネットワーク仮想化技術を活用し、さらなる省電力性および高信頼性を達成する手法を提案する。各サービスの収容に必要な機能をトラヒックの変動に応じて少数の局側装置に集約し選択的スリープを行うことにより、局舎における消費電力の削減を実現する。また、大規模障害の発生時に 1 台の局側装置が収容する加入者群を時間的に切り替えることにより、加入者に対して最低限の接続性を確保する。</p> <p>本論文は以下のように構成される。第 1 章では現在の光ネットワークにおける課題を整理し、本論文の目的を明確化する。第 2 章では関連する光ネットワーク技術、省電力化および高信頼化の手法を示す。第 3 章では省電力化について提案を行う。局側装置の選択的スリープを実現するために、各サービスの提供に必要な機能を局側装置間でマイグレーションする手法を提案する。また、稼働する局側装置数が最小となる機能配置方法を求める問題を整数線形計画法によりモデル化する。計算機シミュレーションにより、スリープ可能な局側装置の数が平均 16.7%、最大 35.8% 向上することを示す。第 4 章では高信頼化について提案を行う。プロテクションおよび収容加入者群の時間的切り替えが可能な物理ネットワークの構成手法として、マッハツェンダ型 2×2 光スイッチを用いた光スイッチネットワークを提案する。さらに、1 台の局側装置から通常時を超える数の加入者側装置を収容する通信方式を提案する。本通信方式では、通信間隔の増大による影響を軽減するため、トラヒックシェーピング等の機能を提供するプロキシを生成する。プロトタイプシステムを用いた実測により、プロキシによる UDP パケット損失率および TCP スループットの改善効果を示す。最後に、第 5 章において論文全体の結論を述べる。</p>			

## 論文審査の要旨

報告番号	甲 第 4350 号	氏 名	佐藤 丈博
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授 工学博士	山中 直明
	副査	慶應義塾大学教授 工学博士	笹瀬 巖
		慶應義塾大学教授 工学博士	天野 英晴
		慶應義塾大学教授 博士（工学）	津田 裕之
		University of Virginia Ph.D. in Electrical Engineering	Malathi Veeraraghavan
		University of Texas at Dallas Ph.D. in Electrical Engineering	Andrea Fumagalli

学士（工学）、修士（工学）佐藤丈博君の学位請求論文は、「Energy-efficient Reliable Optical Metro/Access Integrated Network Using Virtualization Technology（仮想化技術を用いた省エネルギー・高信頼な光メトロ/アクセス統合型ネットワーク）」と題し、全5章から構成される。

ブロードバンドインターネットユーザ数の増加、および広帯域を必要とするアプリケーションの普及により、ネットワークトラフィック量は増加の一途をたどっている。これに伴いネットワーク機器の消費電力量も急速に増加し続けており、その60～80%を占めるアクセスネットワーク領域の低消費電力化が急務である。一方、現在の光アクセスネットワークでは低コスト化のために専用線やモバイルバックホールといった複数のサービスを収容する研究が行われている。このような事業系サービスの収容にあたり、高信頼性の確保が必要となる。

本論文では上記の要求を実現するため、メトロエリアネットワークとアクセスネットワークの統合、およびネットワーク仮想化技術に焦点を当てている。プログラマブルな局側装置および再構成可能な光ネットワークの導入により複数サービスを収容するエラスティック光アグリゲーションネットワーク（E $\lambda$ AN）をベースに、仮想化技術を活用し省電力化および高信頼化を達成する研究を行っている。本論文は以下のように構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景および課題を明らかにし、論文の概要を説明している。

第2章では現在実用化されている光アクセスネットワークの基盤技術、光メトロ/アクセス統合型ネットワークの既存研究、省電力化および高信頼化の関連技術を提示し、これらに対する本研究の位置づけを明確化している。

第3章および第4章は具体的な研究内容について述べている。第3章ではE $\lambda$ ANにおけるトラフィック変動に応じた局側装置の選択的スリープ手法を提案している。トラフィック集約後もサービスの提供を継続するために、局側装置間で各サービスの提供に必要な機能をマイグレーションする手法を提示している。稼働する局側装置の数が最小となるような機能配置を求める問題を線形整数計画法によりモデル化し、計算機シミュレーションにより省電力効果を評価することによって、提案手法の有効性を示している。さらに、実デバイスのパラメータを用いてマイグレーションに伴う通信瞬断時間について検討を行い、提案方式の妥当性を確認している。

第4章では、E $\lambda$ ANにおいて高信頼化を達成するため、散發的障害と大規模障害のそれぞれのケースに対応する手法を提案している。前半では、散發的障害への対策として、プロテクションにより高可用性を実現する光ネットワークトポロジを提案している。2 $\times$ 2光スイッチを用いることにより、少数のデバイスで各加入者にノードディスジョイントな2経路を提供可能であることを示している。後半では、局舎機能停止などの大規模障害が発生した際に、多数の加入者に対して最低限の接続性を確保する通信方式を提案している。1台の局側装置が通常時の上限を超える数の加入者装置を収容するために、ネットワーク機能仮想化（NFV）技術の利用によりプロキシを生成し、トラフィック平滑化などの機能を提供することで、狭帯域ながら安定した通信を実現する。プロトタイプシステムを用いた実装実験によりスループットの測定を行い、本提案方式の有効性を示している。

第5章は結論であり、本研究により得られた結果を総括している。

以上要するに、本論文は低消費電力かつ高い耐障害性を備えた光アクセスネットワーク技術の確立のために、局側装置機能のマイグレーション技術およびその配置計算手法、高可用性ネットワークトポロジ設計手法、大規模障害発生時の通信方式について提示している。これらの研究内容は、将来の社会インフラストラクチャとしての光ネットワークの継続的発展を実現する上で、工学上寄与する所が大きいと評価される。

よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。