

# WDM アクセスシステムにおける 光可変分岐制御方式の研究

## 学位論文内容の要旨

本研究は、WDM(Wavelength Division Multiplexing)アクセスシステムにおいて、ロスバジェット(許容光損失)を拡大させるための光可変分岐制御方式と、本制御方式を用いたシステムの経済化技術を提案し、将来の大容量光アクセスシステムを実現することを目的に行われたものである。

日々の生活になくてはならないインターネットサービスを支えるアクセス回線として、高速・広帯域で利用可能な FTTH(Fiber to The Home)の商用導入が進行中である。今後の更なる FTTH の普及拡大に際しては、光アクセスシステムの一層の経済化と高速化が重要な課題となる。光アクセスシステムの網構成では、光ファイバや局内伝送装置などの設備を、光スプリッタを用いて複数のユーザで共有する PON(Passive Optical Network)が内外共に広く利用されている。PON をベースとした将来の高度化に向けた研究には、TDM(Time Division Multiplexing)と WDM によるアプローチがあり、とりわけ超高速の光アクセスシステムの実現に向けては WDM アクセスシステムの研究が活発になされているが、PON に起因するロスバジェット低下に伴う伝送路距離の制限や加入者収容効率劣化の克服、さらには光パワーの有効利用(省電力化)の実現が求められている。

本研究では、このようなロスバジェットの問題を解決するために、局内装置 OLT(Optical Line Terminal)と宅内装置 ONU(Optical Network Unit)間の伝送路損失に応じて、信号光パワーの分岐比率を最適化する光可変分岐制御方式について検討を実施した。これは、OLT-ONU 間の伝送路損失の小さい(大きい)伝送路へ、OLT から光を弱く(強く)送信することで全体の光パワーを有効に利用し、ロスバジェットの問題を解決するものである。

光可変分岐制御方式は、WDM アクセスシステムに限らず、映像配信システムのような片方向のブロードキャスト型伝送システムや、GE-PON(Gigabit Ethernet-PON)のような TDM 型の双方向の光アクセスシステムにも汎用的に活用できる技術である。本研究では、キーデバイスとなる光パワーの分岐比率を制御する光可変分岐制御部をMZI(Mach-Zehnder Interferometer)回路に熱光学位相シフタを備えた光回路で構築し、温度変化量に応じて分岐比率を遠隔制御する方式を検討した。以下、代表的な 3 つのケースへの適用を想定し、具体的な制御方法の提案と分析、検証を行った。

### Case1: 片方向伝送システムにおける光可変分岐制御方式

最初に 1 波長を利用して下り方向のみ光信号を伝送するシステムを用いた PON を対象とした。提案制御方式は、光可変分岐制御部の各出力における最大伝送路損失と各出力における分岐損失の和が、全ての光可変分岐制御部の出力で一定となるよう制御する方法である。本提案方式により、理論上最大限最小受光レベル条件を緩和することができ、ダイナミックレンジも理論上最小化することができる。理論解析の結果、従来 OLT-ONU 間の伝送路損失の大小に関わらず各 ONU に不必要に分配されていた光パワーは最適に分配しなおされ、最小受光レベル条件は最大で 5.6dB 緩和が可能で、ダイナミックレンジ条件は最小で 3.2dB まで緩和が可能となる。また最大

で 3.6 倍まで ONU 収容効率の向上が実現できる。

#### Case2: WDM アクセスシステム・双方向光アクセスシステムにおける光可変分岐制御方式

ユーザやサービス毎に異なる波長を割り当てる一般的な WDM アクセスシステムおよび GE-PON のような上り下りで異なる波長を利用する双方向光アクセスシステムを適用する PON 構成を対象とした。上記複数波長を用いるシステムにおける提案制御方式は、光可変分岐制御部の分岐比率の波長依存性を考慮し、最小受光レベルの最大化、あるいはダイナミックレンジの最小化を目的として、制御パラメータである温度変化量の最適値を求める方法である。その中で、理論的に最適解を求めることができるが計算量が最多の全数探索法と、理論的に最適解ではないが計算量が最少の逐次探索法の 2 つの制御方式の比較を実施した。本提案方式により WDM アクセスシステムでは、利用する波長間隔が小さいため光可変分岐制御部の波長依存性はほとんど影響なく、また逐次探索法を用いても片方向伝送システムと同程度の特性が実現できる。双方向光アクセスシステムでは、利用する波長間隔が大きいため波長依存性の影響を受けるとともに、全数探索法と逐次探索法で得られる特性に差分が見られることから、光可変分岐制御技術を用いる際の目的や分岐数等のシステム条件に応じて、制御方式を使い分けることが重要となる。

#### Case3: 伝送速度と加入率を考慮した WDM アクセスシステムにおける光可変分岐制御方式

サービス多重型の WDM アクセスシステムにおいて、IEEE802.3av で検討されているデュアルレートサービス等を想定し、各波長サービスの伝送速度、加入率を考慮した光可変分岐制御方式の提案を実施した。提案制御方式は、各波長サービスの最小受光レベルの差分を伝送路損失の一部と見なし、最小受光レベル条件の厳しい伝送速度の速い波長サービスに対してより高強度の光信号を送信し、優先的に最小受光レベル条件の緩和を実現する。本提案方式により、2 波長の最小受光レベル差が 4dB の環境において、各波長サービスの伝送速度、加入率を考慮しない場合に比べ、最大 1.88dB、トータル 6.39dB の改善を見込むことができる。また、最大で 4.36 倍まで ONU 収容効率の向上が実現できる。

これら制御に加え、本研究では、光可変分岐制御技術を用いた WDM アクセスシステムの経済化を実現するためのアプローチとして、光可変分岐制御部の低消費電力化と、光分波器を複数の ONU で共有する WDM アクセスシステムの検討を実施した。

低消費電力化では、光可変分岐制御部を構成する MZI の結合効率を、実運用上必要となる制御範囲に基づき設計する方法を提案した。本設計方法により、平均で 6.3~11.5%の消費電力削減効果を見込むことができる。光分波器共有型の WDM アクセスシステムでは、分波器を共有するとともに施工面で取り扱いが容易な MMF (Multi Mode Fiber) を用いたシステム提案を実施した。また、回折の原理を用いた共有型分波器の構成を提案し、Littrow Mounting 型の  $4 \times (4 \times 4)$  の共有型分波器の試作を行い、共有型分波器の透過特性と、10Gbit/s、伝送距離 50m の MMF 環境における伝送特性実験を行い、システムの実現性を示した。

以上、光可変分岐制御方式により、光アクセスシステムの高速化を実現する TDM, WDM 技術に共通するロスバジェットの問題を解決でき、その結果、最小受光レベルやダイナミック条件の緩和、ONU 収容効率の向上が実現できることを示した。また光可変分岐制御部の低消費電力化、共有型分波器により、光アクセスシステムの経済化を図ることが可能となることを示した。

# 学位論文審査の要旨

主査	客員教授	坪川	信
副査	教授	小柴	正則
副査	教授	野島	俊雄
副査	教授	山本	強

学位論文題名

## WDM アクセスシステムにおける 光可変分岐制御方式の研究

本研究は、WDM-PON(Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network) 型アクセスシステムにおいて、光信号強度の分配制御を行うことで効率的なユーザ収容を行う光可変分岐制御方式を初めて提案し、本制御方式の特性評価方法および定量的評価をまとめたものである。本研究結果は、将来の大容量光アクセスネットワークの経済的な構築に寄与するものである。

近年、ブロードバンドサービスの普及が進み、日本においては超高速アクセスを実現する FTTH(Fiber to The Home) が既に 1500 万回線を超え、アクセス方式の主役となっている。今後、更なる FTTH の普及拡大に向けては光アクセスシステムの一層の経済化と広帯域化が重要な課題となるが、その際、光スプリッタを内在する PON 方式の宿命、ロスバジェット低下に対する伝送路距離拡大や加入者収容効率劣化の克服、さらには光パワーの有効利用(省電力化)の実現が必要となってくる。本研究では、このようなロスバジェットの問題を解決するために、局内装置 OLT(Optical Line Terminal) と宅内装置 ONU(Optical Network Unit) 間の伝送路損失に応じて、信号光パワーを最適化する光可変分岐制御方式が検討されている。これは OLT-ONU 間の伝送路損失の小さい(大きい)伝送路へ、OLT から光を弱く(強く)送信することで全体の光パワーを有効に利用し、ロスバジェットの問題を解決する手法である。本研究では主に広帯域化を意図し、WDM アクセスシステムへの適用を検討しているが、本来、映像配信システムのような片方向のブロードキャスト型伝送システムや、GE-PON(Gigabit Ethernet-PON) のような TDM(Time Division Multiplexing) 型の双方向の光アクセスシステムにも汎用的に活用できる技術である。

本文では、3 つのネットワーク条件における提案方式の特性評価が行われ、その有効性が示されている。

まず、最も単純な 1 波長片方向伝送システムの場合は、最大伝送路損失と光可変分岐制御部の各出力における分岐損失の和が全ての光可変分岐制御部の出力で一定となるよう制御を行うことにより、最小受光レベル条件を緩和し、ダイナミックレンジも理論上最小化される。理論解析の結果、従来 OLT-ONU 間の伝送路損失の大小に関わらず各 ONU に不必要に分配されていた光パワーは最適に分配しなおされ、最小受光レベル条件は最大で 5.6dB 緩和が可能で、ダイナミックレンジ条件は

最小で 3.2dB まで緩和が可能となる。また最大で 3.6 倍まで ONU 収容効率の向上が実現できることが示された。

WDM 光アクセスシステムに対しては、光可変分岐制御部の分岐比率の波長依存性を考慮し、最小受光レベルの最大化、あるいはダイナミックレンジの最小化を目的として、制御パラメータの最適値を求める方法になる。片方向の場合は、光可変分岐制御部の波長依存性はほとんど影響なく、1 波長片方向伝送システムと同程度の特性が実現できるが、双方向光アクセスシステムでは、波長依存性の影響を受けるとともに、制御手法による最適値のバラツキが観測され、システム条件に応じて制御方式を使い分ける必要性が論じられている。

伝送速度と加入率を考慮した WDM アクセスシステムの場合は、各波長での最小受光レベルの差分を伝送路損失の一部と見なし、最小受光レベル条件の厳しい伝送速度の速い波長サービスに対してより高強度の光信号を送信し、優先的に最小受光レベル条件の緩和を実現する。その結果、2 波長の最小受光レベル差が 4dB の環境において、各波長サービスの伝送速度、加入率を考慮しない場合に比べ、最大 1.88dB、トータル 6.39dB の改善が期待できること、最大で 4.36 倍まで ONU 収容効率の向上が実現できることが示された。

上記検討に加え、アクセスシステムの経済化を実現するためのアプローチとして、光可変分岐制御部の低消費電力化と、光分波器を複数の ONU で共有する WDM アクセスシステムも検討されている。光可変分岐制御部を構成する MZI の結合効率を実運用上必要となる制御範囲に基づき設計する方法が提案され、平均で 6.3~11.5% の消費電力削減効果が得られている。また、分波器の共有化では、回折の原理を用いた共有型分波器の提案、Littrow Mounting 型の  $4 \times (4 \times 4)$  の分波器の試作が行われ、透過特性評価と 10Gbit/s の伝送実験によるシステム実証が行われている。

以上、要するに本論文は、光アクセスシステムの高速化に欠かせないロスパジェットの問題を解決するため、新たに光可変分岐制御方式を提案し、最小受光レベルやダイナミック条件の緩和、ONU 収容効率の向上が実現できることを明らかにした。また、デバイスの省電力化や共有型分波器構成など実用性に向けた検証も行っている。このことによって、本論文の成果は北海道大学博士(工学)の学位を授与する資格あるものと認める。