

学 位 論 文 題 名

時分割多重/多元接続型光アクセスシステムにおける
波長多重技術を用いた高速・大容量化、及び
高信頼化に関する研究

学位論文内容の要旨

インターネットの爆発的な普及により、近年、光ファイバを用いた 1 Gbit/s 級パッシブオプティカルネットワーク (PON) システムの導入が進められている。PON システムは、複数のユーザ装置を一つの通信事業者装置に収容し、また、光ファイバを共有することにより、システム費用を抑え、経済的に高速光インターネットサービスを提供する。従って、複数のユーザ装置は同一の波長を用いて、通信事業者装置からユーザ装置への下り通信には時分割多重 (TDM: Time division multiplexing)、逆方向の上り通信には時分割多元接続 (TDMA: Time division multiple access) 方式を用いて信号を送受信している。現在、更なる高速・大容量化や、より大規模な光アクセスネットワークの実現に向けた高信頼化が求められている。

しかし、PON システムにおいては大きな課題が 2 つ存在する。1 つ目は経済的に高速・大容量化を実現することである。特に PON システムの上り通信においては、各ユーザ装置 (ONU: Optical network unit) が異なる時間領域を使って上り信号を送信するため、通信事業者装置 (OLT: Optical line terminal) は、光パワーと時間的位相が信号毎に異なる光バースト信号を正常に受信する必要がある。その光バースト信号を送受信する光バースト送信器/受信器は、経済的に高速化を実現することが困難である。一方で、コア系ネットワークにおいては、伝送速度を増大するために、波長多重 (WDM: Wavelength division multiplexing) 技術の研究が進められてきた。波長多重技術は波長を追加することにより、1 波当たりの伝送速度を上げずに、光ファイバあたりの総容量を容易に増大させることが可能である。従って、PON システムの高速・大容量化に向けて、TDM 技術を用いた高速化と WDM 技術を用いた高速化の 2 つのアプローチが候補技術となる。

TDM 技術を用いた方式では、ONU のコストの大半を占める光部品である光バースト送信器の経済化と高速化が重要である。そのためには、各部品の経済化とともに、部品間の相互接続性を高める構成が必要である。すなわち、光バースト送信器の半導体レーザ (LD) とレーザ駆動回路 (LDD: LD driver) 間の相互接続性を向上し、製造コスト削減を図ることを目的とする。現状の ONU においては、LD には直接変調型 LD が用いられており、LDD と LD 間は直流 (DC) 結合型単相駆動の構成となっている。10G 級 PON システムの ONU においては、XFP と呼ばれる光トランシーバ内に光バースト送信器と下り信号用の連続信号用受信器が搭載され、電子基板上では、送信系と受信系の電子回路が近くに配置され、電氣的に大きな振幅をもつ送信系のノイズが受信系の電子回路にクロストークとして受信感度劣化を引き起こす要因となっていた。従って、本研究においては

そのクロストークの影響を抑えつつ、部品間の相互接続性を高めるために LD-LDD 間を容量 (AC) 結合差動駆動とする構成について検討した。しかし、光バースト信号を送信するためには、信号を送信しない時には、LD の発光を停止するために、LD のバイアス電流と LDD の出力電流を停止する必要がある。そのため、LD-LDD 間を AC 結合すると、バースト信号の ON 時に結合容量の過渡応答のために、光バースト信号の立ち上がり時間が遅くなり、伝送効率が低下する。本研究においては、高速な立ち上がり時間を実現するために、BLW-CMR(Baseline wander common mode rejection) 技術を提案する。本技術は、LD にバイアス電流を流した時に生じる LD 間の電圧降下量と、LDD の変調電流を流した時に生じる平均電位の変動量が同じになるように、光バースト信号が OFF 時の LDD の待機電位を調整し、光バースト信号 ON 時に、LD のアノード側とカソード側の両端に生じる過渡応答の大きさを同じにして、差動駆動の原理により相殺するところに新規性がある。本技術の適用した 10Gbit/s の光バースト送信器を製作し、50 ps 以下の高速な立ち上がり時間を達成した。

一方、波長多重技術を用いた方式においては、ONU 毎に異なる波長を割り当てて多重し、その割当波長を ONU に占有させることにより、大容量化が可能となる。しかし、ONU 毎に異なる波長を出力させるためには、波長の数と同数の種類の ONU が必要となる。従って、大量生産の効果が見込めずコスト高になることと、ONU の管理/保守運用性の煩雑さから、運用コストの増大が予測される。そこで本研究においては、一品種の ONU で異なる波長を出力するカラーレス化技術について検討をした。ONU のカラーレス化の技術の中で、最も高速化が可能で、波長の管理が簡易な、波長供給型 WDM-PON を提案する。本方式では、ONU の上り信号用の複数の光源を OLT 側に集中配置し、OLT 側から上り信号用キャリアを ONU へ伝送し、ONU にて上り信号で変調して OLT に送り返すところに新規性がある。本技術を用いた ONU を製作し、10 Gbit/s の伝送速度で、32 波長の伝送実験を行い、ネットワーク規模を 50km に拡大可能であることを実証した。

2 つ目の課題としては、ネットワークの広域化に伴う高信頼化の必要性である。アクセスネットワークの更なる経済化や保守運用性の向上のために、これまで複数拠点に配置していた OLT を 1 か所に集約する必要がある。しかし、OLT を集約するためには、光ファイバ当たりに収容するユーザ数を増大し、伝送距離を延ばす必要があるため、光ファイバの故障が生じた場合には、多くのユーザの通信断を引き起こす。従って、多数のユーザを多重する区間においては、2 重化を図り、信頼性を向上する必要がある。本研究においては、TDM 方式と大容量化、長延化に優れた WDM 方式の両方式のメリットを適用することにより、PON システムを大容量、長延化する WDM/TDM-PON を提案し、波長切替方式を用いた高信頼化方式を提案する。本方式においては、光ファイバの故障が発生した時に、OLT 側で故障を検知し、OLT/ONU 側の送信波長を切り替えることにより、下り/上り信号の伝送ルートを変えて信号復旧を実現する。信号のルート切り替え点には、アレイ導波路回折格子 (AWG) を適用することにより、入力波長の切替えにより出力ポートを切り替えることを特徴としている。本方式を適用することにより、アクティブデバイスを用いずパッシブ部品のみでの構成において、高信頼化を実現することが可能となった。波長切替え実験を行い、高速な切替え時間、切替えによる伝送信号の低下がないことを実証した。

本研究において、光アクセスネットワークの経済的な高速・大容量化に向けた構成と高信頼化の構成を明らかにした。また、波長多重技術を活用し、新しい波長の運用法を提案することで、さらなる光アクセスネットワークの高機能化が実現できることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査	客員教授	吉 本 直 人
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

時分割多重/多元接続型光アクセスシステムにおける 波長多重技術を用いた高速・大容量化、及び 高信頼化に関する研究

近年、光ファイバを用いた 1 Gbit/s 級パッシブオプティカルネットワーク (PON) システムの導入が進められている。PON システムは、複数のユーザ装置を一つの通信事業者装置に収容し、また、光ファイバを共有することにより、システム費用を抑え、経済的に高速光インターネットサービスを提供する。従って、複数のユーザ装置は同一の波長を用いて、通信事業者装置からユーザ装置への下り通信には時分割多重 (TDM: Time division multiplexing)、逆方向の上り通信には時分割多元接続 (TDMA: Time division multiple access) 方式を用いて信号を送受信している。現在、更なる高速・大容量化や、より大規模な光アクセスネットワークの実現に向けた高信頼化が求められている。

PON システムにおいては大きな課題が 2 つ存在する。1 つ目の課題は経済的に高速・大容量化を実現することである。特に PON システムの上り通信においては、各ユーザ装置 (ONU: Optical network unit) が異なる時間領域を使って上り信号を送信するため、通信事業者装置 (OLT: Optical line terminal) は、光パワーと時間的位相が信号毎に異なる光バースト信号を正常に受信する必要がある。その光バースト信号を送受信する光バースト送信器/受信器は、経済的に高速化を実現することが困難である。一方で、コア系ネットワークにおいては、伝送速度を増大するために、波長多重 (WDM: Wavelength division multiplexing) 技術の研究が進められてきた。波長多重技術は波長を追加することにより、1 波当たりの伝送速度を上げずに、光ファイバあたりの総容量を容易に増大させることが可能である。従って、PON システムの高速・大容量化に向けて、TDM 技術を用いた高速化と WDM 技術を用いた高速化の 2 つのアプローチが候補技術となる。

TDM 技術を用いた方式では、ONU のコストの大半を占める光部品である光バースト送信器の経済化と高速化が重要であり、光バースト送信器の半導体レーザ (LD) とレーザ駆動回路 (LDD: LD driver) 間の相互接続性を向上し、製造コスト削減を図ることが必要である。現状の ONU においては、LD には直接変調型 LD が用いられており、LDD と LD 間は直流 (DC) 結合型単相駆動の

構成となっている。10G 級 PON システムの ONU においては、光トランシーバ内に光バースト送信器と下り信号用の連続信号用受信器が搭載され、送信系と受信系の電子回路が近くに配置されるため、送信系のノイズが受信系の電子回路にクロストークとして受信感度劣化を引き起こす要因となっていた。本研究においてはそのクロストークの影響を抑えつつ、部品間の相互接続性を高めるために LD-LDD 間を容量 (AC) 結合差動駆動とする構成について検討している。本研究においては、高速な立ち上がり時間を実現するために、BLW-CMR(Baseline wander common mode rejection) 技術を提案している。本技術は、LD にバイアス電流を流した時に生じる LD 間の電圧降下量と、LDD の変調電流を流した時に生じる平均電位の変動量が同じになるように、光バースト信号が OFF 時の LDD の待機電位を調整し、光バースト信号 ON 時に、LD のアノード側とカソード側の両端に生じる過渡応答の大きさを同じにして、差動駆動の原理により相殺している。提案技術を適用した 10Gbit/s の光バースト送信器を製作し、50 ps 以下の高速な立ち上がり時間を達成している。

一方、波長多重技術を用いた方式においては、ONU 毎に異なる波長を割り当てて多重し、その割当波長を ONU に占有させることにより、大容量化が可能となる。しかし、ONU 毎に異なる波長を出力させるためには、波長の数と同数の種類の ONU が必要となる。従って、大量生産の効果が見込めずコスト高になることと、ONU の管理/保守運用性の煩雑さから、運用コストの増大が予測される。本研究においては、一品種の ONU で異なる波長を出力するカラーレス化技術について検討している。ONU のカラーレス化の技術の中で、最も高速化が可能で、波長の管理が簡易な、波長供給型 WDM-PON を提案する。本方式では、ONU の上り信号用の複数の光源を OLT 側に集中配置し、OLT 側から上り信号用キャリアを ONU へ伝送し、ONU にて上り信号で変調して OLT に送り返す方式を提案している。本技術を用いた ONU を製作し、10 Gbit/s の伝送速度で、32 波長の伝送実験を行い、ネットワーク規模を 50km に拡大可能であることを実証している。

2 つ目の課題としては、ネットワークの広域化に伴う高信頼化の必要性である。アクセスネットワークの更なる経済化や保守運用性の向上のために、これまで複数拠点に配置していた OLT を 1 か所に集約する必要がある。しかし、OLT を集約するためには、光ファイバ当たりに収容するユーザ数を増大し、伝送距離を延ばす必要があるため、光ファイバの故障が生じた場合には、多くのユーザの通信断を引き起こす。従って、多数のユーザを多重する区間においては、2 重化を図り、信頼性を向上する必要がある。本研究では、TDM 方式と大容量化、長延化に優れた WDM 方式の両方式のメリットを適用することにより、PON システムを大容量、長延化する WDM/TDM-PON を提案し、波長切替方式を用いた高信頼化方式を提案している。提案方式においては、光ファイバの故障が発生した時に、OLT 側で故障を検知し、OLT/ONU 側の送信波長を切り替えることにより、下り/上り信号の伝送ルートを変えて信号復旧を実現した。信号のルート切り替え点には、アレイ導波路回折格子 (AWG) を適用することにより、入力波長の切替えにより出力ポートを切り替えることを特徴としている。提案方式を適用することにより、パッシブ部品のみで構成でき、高信頼化を実現することが可能となった。波長切替実験を行い、高速な切替え時間、切替えによる伝送信号の低下がないことを実証した。

以上要するに、本論文は光アクセスネットワークの経済的な高速・大容量化に向けた構成と高信頼化の構成を明らかにするとともに、波長多重技術を活用した新しい波長の運用法を提案することで、さらなる光アクセスネットワークの高機能化が実現できることを示したものであり、情報ネッ

トワーク学の発展に大きく寄与するものである。よって著者は博士 (情報科学) の学位を授与されるに値するものと認める。