

学 位 論 文 題 名

光アクセスシステムにおける大容量・広域化技術の研究

学位論文内容の要旨

日本国内における FTTH(Fiber To The Home) サービスは,2007 年 9 月に 1000 万加入以上に達し,2008 年末には ADSL サービスを抜く勢いであり, 名実共にブロードバンドアクセサービスの主役になろうとしている.FTTH サービスの多くは, その経済性の高さから,PON(Passive Optical Network) に代表される P2MP(Point To Multi Point) 型の光アクセスシステムで提供されており, 日本では,IEEE 802.3ah に準拠した 1 Gbit/s の伝送速度の GE-PON(Gigabit Ethernet PON) システムが多く用いられている. ここで,PON とは, 局内装置 (OLT) と複数の宅内装置 (ONU) を, 光スプリッタを介して接続することにより, 光ファイバ伝送路および OLT を複数のユーザ間で共有する費用効率の高い光アクセスシステムある. さらに, 伝送速度 10Gbit/s を実現する 10G-EPON(10 Gbit/s Ethernet PON) の標準化が IEEE P802.3av で行われるなど, 次世代 PON システムの検討も行われている.

ところで,PON システムを用いて FTTH サービスを経済的に提供するためには, 一つの OLT で, できるだけ多くのユーザを効率的に収容できなくてはならない. たとえば,FTTH サービスの提供エリアは都市部に集中しているため, 都市部と遠隔地でのデジタルデバイドが問題となり, その解消が求められている. しかしながら,PON システムでは, 光スプリッタの分岐損失による伝送線路損失が大きくユーザの収容エリアが狭いことから,1 台の OLT で収容できるユーザ数を維持したまま, 人口密度が低くユーザが点在する遠隔地へ,PON システムを適用することが困難であった. それゆえ, サービス要求の比較的少ない地域 (遠隔地) では, 収容局に設置される OLT とユーザ宅内の ONU 間の距離を拡大することが重要である.

一方, サービス要求の比較的高い地域 (都市部) では, スプリッタの分岐数を増やすことが重要である. つまり, 伝送距離を拡大することにより, 一つの OLT で遠隔地のより多くの顧客にサービスを提供することができ, 分岐数を増加させることにより, 都市部のさらに多くのユーザにサービスを提供することができる.

そこで, 本研究では, 現在使われている OLT のユーザ収容数を低下させずに遠隔地のユーザを経済的に収容する PON 広域化技術についての研究を行う. また, 伝送速度 10Gbit/s を実現する次世代光アクセスシステムの標準化が行われていることから, 次世代光アクセスシステムの広域化についても検討を行う.

PON の広域化を実現する技術として,3R(Regeneration,Reshaping, Retiming) 機能を備えた光/電気, 電気/光変換 (OEO 変換) を伴う PON 中継器 (3R-PON 中継器), 及び光信号を光のまま増幅する光増幅器を用いた PON 中継器 (光増幅 PON 中継器) が有効である.

ところで,PON システムは, 下り光信号 (OLT から ONU への光信号) と上り光信号 (ONU から OLT への光信号) とを WDM(波長多重) で多重する一心双方向の光システムである. またユーザ間のデータ多重は, 下りは TDM(時分割多重), 上りは TDMA(時分割多重アクセス) で行われている. ここで,PON システムの最大の特徴として, 上り光信号が衝突しないように, 複数の ONU からの

上り光信号の送出タイミングを OLT が OLT-ONU 間の距離測定 (レンジング) を行い, サブ μs のガードタイムで TDMA 制御している点が上げられる. これにより OLT に到達する上り光信号は, 強度の異なるバースト光信号となる. 本研究では, これらの特徴に留意して PON 中継器を実現しなければならない.

まず OLT と ONT 間の伝送距離を拡大する光/電気, 電気/光変換を伴う 3R-PON 中継器として, ITU-T G.983 シリーズに準拠した B-PON の広域化を実現する B-PON レピータ (REP) の構成法について述べる. 特に, レンジング機能について, 従来の ONT を変更せずに REP を適用するために, レンジングウィンドウサイズを従来のまま往復伝送距離の 40 km 相当とし, レンジングウィンドウ開始位置を OLT と REP 間の伝送距離に応じて可変にするレンジング方式を提案する. その他, REP の機能として, 光バースト信号受信機能, 再生中継機能, 警報転送機能及び監視・制御機能の課題を示し, その解決策を述べた. 光バースト信号受信機能では, 各 ONT からのバースト信号が REP に到着する直前に自動識別レベル制御回路をリセットするために, REP が下り PLOAM セル中のグラントおよび分割スロット設定メッセージをモニタする方式を提案した. 再生中継機能について 3R (Reshaping, Retiming, Regenerating) が必要であることを示した. 警報転送機能について, REP が適用されても, 従来の機能を満足できる方式を提案する. 監視・制御機能について, REP を ONT の一つとして管理する方式を提案した. また, REP, OLT, ONT の考え得る接続構成を示し, 特にレンジング方式の観点から検討を加え, 実際の接続構成を与えた. 最後に, 開発した REP の装置構成を示した.

次に, 伝送ビットレートや伝送プロトコルによらずに PON システムの伝送距離の拡大や, 光スプリッタの許容分岐数の増大が可能な $1.3 \mu m$ 帯バースト対応光増幅器として, 利得クランプされたプラセオジウム添加ファイバ増幅器 (GC-PDFA) を用いることを提案する. また, バースト光増幅実現のため, GC-PDFA 利得の瞬時特性について検討を行い, 利得クランプによる PDFA の利得線形性の向上及び光サージの抑圧効果を確認した.

次に, GC-PDFA と, $1.49 \mu m$ 帯下り信号の増幅にトリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) を用いたバースト対応双方向光増幅器を提案し, その構成法について述べ, 提案した PON 中継器の上り方向及び, 下り方向の増幅特性を明らかにすると共に, これを PON システムに適用し, 特に下りリンクに比べて伝送損失の大きい PON の上りリンクについて許容損失量改善効果を確認した. また, S/N 設計モデルの構築による光中継 PON システムの上り伝送距離限界及び許容分岐数の見積もり, 及び市販の PON システムに本光増幅 PON 中継器を適用し, 64~256 分岐, 60 km の多分岐・長距離光増幅 PON 伝送実験を行うことにより, 本光増幅 PON 中継器の有効性を確認した.

最後に, 光増幅 PON 中継器の次世代光アクセスシステムへの適用可能性を確認するために, 2 台の光送信器と 1 台の光受信器から構成される 10Gbit/s のバースト送受信実験系を構築し, これに光増幅 PON 中継器を適用することで 15dB のロスバジェット改善効果を確認した. また, PON に必須なバースト光受信器を簡易に構成するため, 高速 Feed Forward 制御可変光アッテネータを用いることにより高速 ALC (Automatic Level Controlled) 光増幅器を実現した. これによりバースト光受信器の重要な構成要素である高速リミッタアンプを使わずに, 連続光信号用のリミッタアンプを用いたバースト光受信が可能であり, 本高速 ALC 光増幅器を用いることにより PON の高速化も容易に行えることを示した.

以上により, PON 中継器が PON の広域化の実現に有効であり, 特に光増幅 PON 中継器はビットレートや伝送プロトコルによらず PON の広域化が可能なため, より柔軟に PON の広域化が可能であることを明らかにした.

学位論文審査の要旨

主 査	客員教授	坪 川	信
副 査	教 授	山 本	強
副 査	教 授	小 柴	正 則
副 査	教 授	野 島	俊 雄

学 位 論 文 題 名

光アクセスシステムにおける大容量・広域化技術の研究

本研究は、現在 FTTH システムでは収容が難しい 20km 超の遠距離のユーザや 32 分岐を超える分岐数が期待されるマンションユーザなどを経済的に収容するための PON(受動光ネットワーク) 広域化技術についての検討を行うとともに、現在標準化が進行中の伝送速度 10Gbit/s の次世代光アクセスシステムへの適用に対する大容量化の検討が行われたものである。

PON システムは、下り光信号 (局内装置 OLT から宅内装置 ONT への光信号) と上り光信号 (ONT から OLT への光信号) とを WDM(波長多重) で多重する一心双方向の光システムであり、ユーザ間のデータ多重は、下りは TDM(時分割多重)、上りは TDMA(時分割多重アクセス) で行われる。OLT と各 ONT との距離は通常異なるため、OLT に到達する上り光信号は強度とタイミングが不均一なバースト光信号となる。このため各光信号が衝突しないように TDMA 制御を行いつつ、強度の均一化を図ることが重要であり、本研究はそれを実現する PON 中継器技術について述べている。

まず、伝送距離を拡大する O/E、E/O を伴う 3R-PON 中継器として ITU-T G.983 シリーズ準拠の B-PON の広域化を実現する B-PON レピータ (REP) の構成法が提案されている。特に、OLT と各 ONT 間の距離測定 (レンジング) 機能について、既設の ONU を変更せずに REP を挿入できるようウィンドウサイズを従来の往復伝送距離の 40 km 相当とし、OLT と REP 間の伝送距離に応じて調整可能なレンジング方式が提案されている。その他、REP の機能として、新たに光バースト信号受信機能では REP が下り信号中のグラントおよび分割スロット設定メッセージをモニタする方式、警報転送機能では REP が適用されても、従来の機能を満足できる方式、監視・制御機能では REP を ONT の一つとして管理する方式が述べられている。また、主にレンジング方式の観点から REP、OLT、ONT の実用的な接続構成を示されるとともに、実際に開発された REP の装置構成が紹介されている。

次に光増幅器を用いた中継器の提案がなされる。光増幅器の場合、伝送ビットレートや伝送プロトコルへの依存がない特徴を有しており、本研究では上り信号用の 1.3 μm 帯バースト対応光増幅器として、利得クランプされたプラセオジウム添加ファイバ増幅器 (GC-PDFA) を用いた構成が提案されている。利得の瞬時特性の検討から利得クランプによる PDFA の利得線形性の向上及び光サージの抑圧効果を確認されている。続いて下り信号用には 1.49 μm 帯の増幅にトリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) を適用し、全体システムとしてのバースト対応双方向光増幅器が提案されている、ここでは PON 中継器の上り方向及び、下り方向の増幅特性が明らかにされると共に PON システム

への適用性,特に下りリンクに比べて伝送損失の大きい PON の上りリンクに対する許容損失量改善効果が確認されている。また,S/N 設計モデルの構築による光中継 PON システムの上り伝送距離限界及び許容分岐数の分析を行い,64~256 分岐,60 km の多分岐・長距離光増幅 PON 伝送実験までを実現することで本提案の有効性が認められる。

最後に,次世代光アクセスシステムへの光増幅 PON 中継器の適用が検討されている。ここでは 10Gbit/s のバースト送受信実験系を用いた伝送実験が行われ 15dB のロスバジェット改善効果が確認され,さらに実用性の観点から光受信器を簡易に構成できる高速 Feed Forward 制御可変光アッテナータを用いた高速 ALC(Automatic Level Controlled) 光増幅器が提案,実証されている。

以上要するに,本論文は,PON 中継器がアクセスネットワークの広域化,多分岐化の実現に有効であり,特に光増幅 PON 中継器はビットレートや伝送プロトコルによらず PON のロスバジェットを拡大できるため,より柔軟に PON の適用領域の拡大が可能となることを明らかにした。このことによって,本論文の成果は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与する資格あるものと認める。