



Title	オール光ネットワークに基づく広域光アクセスの伝送距離拡大に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	五十嵐, 稜
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16009号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92218
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryo_Igarashi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 五十嵐 稜

学位論文題名

オール光ネットワークに基づく広域光アクセスの伝送距離拡大に関する研究
(A study on reach expansion for wide-area optical access based on all-optical network)

社会のデジタル化に伴い基盤となるネットワークの高度化が求められている。キャリアネットワークでは局舎とユーザ宅を光ファイバで接続し高速光アクセスを実現する fiber to the home (FTTH) サービスが提供されている。FTTH では複数ユーザが伝送路や装置を共有する経済的な point to multi point (P2MP) 型の passive optical network (PON) システムが採用されている。近年、PON システムは経済化を目的としてモバイルサービスのバックボーンへの適用が検討されている。

アプリケーションの進歩とともにネットワークの大容量/低遅延化に対する要求が高まっている。例えばデータセンタのケースでは、分散配置した複数拠点を大容量/低遅延に接続し、広域の仮想ネットワークを構築することで、地政学的リスクや電力集中のリスクを低減できる。ドローンや重機の遠隔制御のケースでは、作業者と遠隔のマシンを大容量/低遅延なネットワークで接続することで、没入感、ひいては操作性、安全性を高めることができる。このように将来キャリアネットワークでは大容量/低遅延ネットワークの構築が求められている。

現在コアネットワークでは、ルータや転送装置間の大容量化を目的として ROADM ベースの光ネットワークが導入されている。ROADM ベースの光ネットワークはノードに光スイッチを用いて光のまま信号を転送するネットワークであり、従来の電気スイッチベースのノードで必要な L2/L3 のスイッチング処理やプロトコル変換が不要となるため、処理遅延や高負荷時の容量制限を削減し、大容量のみならず低遅延化が可能になる。一方、今後増々高まる要求条件の高まりに対応するためには、コアネットワークにおけるノード間のみならず、アクセスネットワークも含めたすべての区間をオール光化し、End-to-End(E2E) で大容量/低遅延な光直結経路を提供することが有効であり、それを実現するアクセス/メトロ融合オール光ネットワークが検討されている。アクセス/メトロ融合光アクセスネットワークにおいて、大容量/超低遅延が求められるケースでは光直結経路を提供するが、1 ユーザ当たりの伝送レートが低く経済性の求められる FTTH やモバイルのようなケースでは、引き続き P2MP 型の PON システムを用いることが考えられる。

アクセスメトロ融合オール光ネットワークの実現にあたって本稿では2つの課題に注目する。1つ目は最適経路設計に関する課題である。アクセス/メトロ融合オール光ネットワークでは装置更改や新規装置の導入などで経路の動的な構築が求められるが、伝送特性を決定づけるパラメータの多さからリアルタイムな最適設計が難しい。マージンを持たせることで符号誤りのない経路を設計/構築することもできるが、伝送距離やロスバジェットが制限を受けてしまう。2つ目は P2MP システムにおける駆け付け保守稼働が大きいという課題である。比較的ユーザ密度の低いルーラルエリアでは、運用保守者の常駐する大規模な局舎から数 10km 以上離れた場所にユーザが点在しているケースがある。ただし P2MP 型システムでは、分岐損失が大きく伝送距離は 10-20 km 程度に制限される。現在は途中に無人の局舎を設け信号を中継しているが、昼夜問わず発生する装置故障に対する駆け付け保守稼働が問題となっている。これを解決するためには、伝送距離拡大によって中継局舎を削減することが有効である。

以上を鑑み、本論文では、アクセス/メトロ融合ネットワークの経済的なサービス提供エリアの拡大、および運用保守稼働の削減を目的として伝送距離拡大を検討する。まず FTTH やモバイルサービスを長延化することをスコープとし、伝送路にアクティブ装置を配置しない無中継光増幅構成に

よる伝送距離拡大を検討する。提案構成による伝送距離拡大効果をシミュレーションと実機によって検証する。続いてオール光ネットワークに基づく E2E の光直結パス提供を想定し、その伝送距離最大化にむけて伝送路パラメータを最適化するための伝送品質推定技術を検討する。提案手法の推定精度および計算量の削減効果について検証する。

第 1 章では、本研究の背景として現在のキャリアネットワークの構成と提供されている光アクセスサービスの概要について述べる。その後、将来の大容量/低遅延ネットワークの実現にむけて検討されているアクセスメトロ融合オール光ネットワークの概要について述べる。最後に本研究の目的であるアクセスメトロ融合オール光ネットワークの伝送距離拡大について説明する。

第 2 章では、FTTH を例にして装置故障時の駆け付け保守稼働削減に向けて光増幅技術に基づく伝送距離拡大を検討する。駆け付け保守稼働の削減に向けては、伝送路中に故障リスクのあるアクティブ素子を配置しない無中継構成の実現が重要であるが、その場合特に上り信号増幅の低雑音化が課題である。そこで上り信号増幅に低雑音な分布ラマン増幅技術を用いた手法を提案する。10GE-PON システムにて実機検証を行い、伝送距離を 37 km だけ延伸できることを示す。

第 3 章では、鉄道や高速道路に対する低遅延かつシームレスなモバイルアクセスを経済的に提供することを例にして、バス型トポロジの光アクセスを検討する。伝送距離拡大に向けて、2 章で活用した分布ラマン増幅の導入に加えて、ドロップポイントに分岐比率の異なる不等分岐光スプリッタを活用する構成を提案する。解析的アプローチから提案システムにおける各パラメータの最適化手法を検討し、数値シミュレーションおよび実機検証にて、達成可能な最大ロスバジェットや最大伝送距離、最大収容端末数を明らかにする。

第 4 章では、オール光ネットワークのリアルタイムな伝送路設計に向けた高速伝送品質推定技術に関する検討を行う。伝送品質を高精度に推定することで伝送路設計時のロスバジェットのマージンを低く抑え、リソースを最大限活用した長距離伝送が可能となる。具体的には、SPM による波形劣化を確定的な波形歪みとして非線形ボルテラフィルタにて模擬し、そこに確率的な波形歪みとして SPM/FWM による雑音を付与することで受信信号を再現し、符号誤り率を推定する。高精度な SSFM ベースの伝送シミュレータとの比較を通して提案手法の推定精度を検証する。

第 5 章では、4 章で提案した伝送品質推定技術を発展させることで、計算量削減、およびマルチスパンネットワークへの拡張を検討する。4 章の手法では VNLFF を用いた電界波形の計算が計算量削減に向けたボトルネックとなっていた。計算量を抜本的に削減するため、電界波形の代わりに、そこから抽出した次元の低い特徴量をニューラルネットワークにて解析する手法を提案する。伝送シミュレータとの比較より、提案手法による符号誤り率の推定精度を評価する。また、従来手法に対する計算量削減量について合わせて述べる。

以上のように、本研究では P2MP で構成される FTTH、モバイルネットワークにおける駆け付け保守稼働の削減にむけて、分布ラマン増幅に基づく無中継光増幅手法を提案し、その場合の最大伝送距離や収容ユーザ数を検証する。また、アクセス/メトロ融合光ネットワークの動的な経路設計/構築において、伝送距離を最大化する最適な伝送路パラメータを導出するための伝送品質推定手法を提案し、その推定精度、計算量についての評価を行う。