



Title	広域光アクセスシステムにおけるデジタルコヒーレント伝送技術に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	金井, 拓也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15548号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/89817">https://hdl.handle.net/2115/89817</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Takuya_Kanai_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 金井 拓也

### 学位論文題名

広域光アクセスシステムにおけるデジタルコヒーレント伝送技術に関する研究  
(A study on optical digital coherent technology for future optical access network systems)

日本国内における Fiber To The Home (FTTH) によるブロードバンドサービスは、国民生活、および経済活動を支える重要な通信インフラとして必要不可欠なものとなっている。2022年6月末時点における利用者数は、3500万人を越えている。これら FTTH サービスは、通信事業者の収容局に設置される伝送装置、伝送路である光ファイバ、および光パワーを分岐するスプリッタなどの設備を、複数の加入者で共有することにより高い経済性を実現した、PON(Passive Optical Network) という光アクセスシステムによって提供されている。

現在普及している光アクセスネットワークで提供される通信サービスは、レジデンシャルやビジネス、専用線など多岐にわたっている。さらに今後は、Beyond 5G などのモバイルサービスや、仮想現実 (VR: Virtual Reality) サービス、8K のような超高精細映像サービスなど、光アクセスネットワークで提供される通信サービスは益々多様化していくと考えられる。しかし、現有の光アクセスネットワークでは、サービス毎にネットワークに必要な通信速度や提供エリア (距離) などのサービス要件が異なるので、それぞれ個別にネットワークを構築する必要があり、OPEX(operation expenditure) や CAPEX(capital expenditure) といった設備投資や保守運用にかかるコストが大きく増加してしまう。将来の光アクセスネットワークでは、そのようなコストを削減し、多種多様なネットワークサービスを高効率に収容するために、個々のサービス要件に柔軟に対応可能で様々なネットワークサービスを同一基盤上で提供可能な新たなネットワークシステムが求められる。光アクセスネットワークの経済性を高めるには、PON システムにおけるサービス提供エリア (伝送距離)、および収容ユーザ数 (分岐数) を拡大することが有効である。それにより、アクセス局舎に配置されていた局内装置 (OLT) をよりコアネットワークに近いメトロ局舎に集約することが可能となり、通信局舎の統廃合による OPEX/CAPEX の大きな削減効果が期待できる。

本研究では、多種多様な通信サービスを同一基盤上で高効率に提供可能な新たなネットワークとして、メトロ・アクセス統合型ネットワークシステムを新たに提案する。提案システムを実現するための要素技術として、ロスバジェットの抜本的な改善や柔軟性の向上を可能とするデジタルコヒーレント伝送技術の光アクセスネットワークへの応用について検討し、加入者装置に搭載する経済的な光コヒーレント送信器について提案と実証を行い、その有効性を示し、提案したメトロ・アクセス統合型ネットワークシステムも構築する。また、さらに将来を見据えた広域光アクセスシステムについて検討し、新たに必要とされるネットワークシステムの管理制御技術について述べる。

第1章では、本研究の背景として、我が国におけるブロードバンド通信サービスの状況と併せて、光ブロードバンドサービスの普及を大きく加速させた PON システムの概要や標準化動向について述べる。さらには、将来の光アクセスネットワークの進展および目指すべき方向性について述べ、本研究の目的であるメトロ・アクセス統合型ネットワークシステムの研究動向について説明する。第2章では、本研究の目標であるメトロ・アクセス統合型ネットワークシステムを実現するため

に最も重要な要素技術である光デジタルコヒーレント伝送技術を光アクセスシステムへの応用する際の課題について述べる。デジタルコヒーレント伝送技術を適用した経済的な PON として、上り方向通信にデジタルコヒーレント伝送技術、下り方向通信にシンプルな IM-DD 方式を採用した TDM-PON について検討し、その中で重要となる加入者装置に搭載する光送信器の経済化について述べる。次に、将来の光アクセスネットワークで展開される多種多様な通信サービスを同一基盤上で収容することを可能とするメトロ・アクセス統合型ネットワークシステムにおける要求性能や高い柔軟性を実現するための検討課題について説明する。また、マルチサービス収容で必要となる通信サービスの多様なプロトコルや変調方式に対して適用可能な加入者装置の遠隔管理制御技術について述べる。

第 3 章では、新たに開発した上りバースト信号に対応した DSP を用いてデジタルコヒーレント伝送技術を適用した PON システムを実機で構築し、システムレベルでのリアルタイムでの 10 Gbit/s 双方向 40 km 伝送実験を行い、従来システムの 64 倍に相当する収容数が実現可能な 50 dB 以上のパワーバジェットを実験により示す。

第 4 章では、加入者装置への搭載できるレベルの経済的な光送信器の実現を目指し、直接変調レーザ (DML) を用いたシンプルなバーストモード光送信器を提案し、Continuous Phase Frequency Shift Keying (CPFSK) という変調方式を用いたバースト対応光送信器を提案および実証する。また、その際に課題となるキャリア周波数オフセット (CFO) についても、受信側のデジタル信号処理にて、シンプルなアルゴリズムにより CFO 補償を実現する手法を新たに提案し、実機により実証する。これにより、加入者装置の光送受信器において、従来の PON システムと同等レベルの経済性を担保しつつ、デジタルコヒーレント伝送技術を応用することで、広域光アクセスシステムに必要とされる 50 dB 以上のロスバジェットが実現可能となる。

第 5 章では、様々なネットワークサービスを収容する広域光アクセスネットワークとして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) を提案し、実機による検証結果について述べる。具体的には、E $\lambda$  AN における災害時のファイバ断を想定した故障発生時の冗長システムへの切替動作の検証を行い、最適な経路や冗長システムを自動で選定する切替動作を世界で初めて実証する。切替動作により、伝送距離が 20 km から 40 km に延伸するため、QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) や 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation) といった変調方式を柔軟に変更することで、通信品質を落とさず 10 秒以内に復旧することが可能であることを示す。

第 6 章では、光-電気-光変換処理を極小化したさらに将来の新たなネットワークにおいて、電気処理を介すことなくユーザ装置の監視・制御を可能とする遠隔監視制御方式およびシステム構成について提案し、end-to-end で光直結されたユーザ装置間で、主信号に影響を与えることなく経路中で制御信号の監視・挿入が可能であることを実機により実証する。

以上のように、本研究では伝送速度や伝送遅延などの要求条件、伝送方式が異なる多種多様なネットワークサービスを単一のネットワークシステムで収容可能な新たなネットワークシステムとして、デジタルコヒーレント技術を応用した広域光アクセスシステムについて提案し、実機実証を通じてその有効性を示す。デジタルコヒーレント技術を用いることで、光アクセスシステムの抜本的な長延化・多分岐化だけでなく、高い柔軟性も同時に実現することが可能となる。