

論文の内容の要旨

論文題目 コヒーレント光送受信器における光電場の
深層学習を用いた状態推定と制御

氏 名 谷村 崇仁

近年のクラウドサービスの多様化に伴い、都市間/内の光ファイバ通信ネットワークにおける通信トラヒックの多様化が進んでいる。多様化する通信トラヒックを収容するため、新しい伝送技術が次々と開発され配備されているが、この配備はしばしば従来技術と並行して行われるため、結果として複雑で多様な光ファイバ伝送環境が形作られている。またファイバ中の非線形効果により、新しく配置される伝送チャンネルは従来のチャンネルと相互に劣化を生じることから、問題はより複雑なものとなる。低廉なネットワーク保守運用費（Operational Expense: OPEX）を保ちつつ、このような複雑化したシステムを扱うため、光ファイバ物理層の運用管理高度化、特にモニタリングによるシステムの現在状態把握と、それに基づいた光通信機器の機能制御が必須となる。

現在の光ファイバ通信ネットワークでは、光物理層モニタとして、波長フィルタ等の光部品と、予めプログラムされた処理ルールに基づいた信号処理を合わせたものが用いられている。しかしながら、これら従来の光物理層モニタは、多様化する光伝送技術に応じ必要なモニタを逐次開発・配備する時間とコストが、処理ルールを明確に書き下すことが難しい複雑な相互作用に関するモニタの場合には特に高く、変化する光ファイバネットワーク環境に追従する際の足枷となっていた。

これらの課題に対処するため、光物理層モニタへの機械学習（Machine Learning）の導入が注目を集めている。機械学習は、データから処理方法を学習することで人手による明示的なプログラミングなしでタスクの実行を可能にする技術である。これにより、

開発コスト・期間を削減しながら、人間が設計し実装する固定的なプログラムでは難しい種類のタスクに取り組むことが可能となる。しかしながら、光物理層モニタに従来用いられてきた機械学習アルゴリズムは、その学習を、人間によって与えられたデータの表現 (Representation) に頼ってきた。データの表現は、特徴量 (Feature) とも呼ばれる。これは機械学習に与えるデータの表現形態であり、一般には、生データに人間が手を加え、学習に不要な情報を落とすなどして、データの本質をうまく表現する量のみを抽出している。この作業は機械学習を適用する技術領域 (本論文の場合は光通信工学) の知識を持った人間のエンジニアが行う必要があり、このことは例えば、光物理層モニタの目標モニタ種別、動作範囲、周辺環境 (自身や周辺チャネルの変調方式の多様化など) の変化が起こる度に、エンジニアが予め選択していた特徴量を再検討する必要があることを意味する。そのため、一度設計されたモニタが、変化する光ネットワーク環境に素早く追従するには限界があった。また、人間のエンジニアが手動で良い特徴量を設計できないほど複雑な量のモニタを構成することもまた難しかった。

そこで本研究では、これらの問題を解決し、光ネットワーク物理層における運用管理の高度化に資するため、人手による特徴量の選択・抽出なしで、ネットワークの運用管理にとって有用な情報を取り出すモニタリングのためのフレームワークを提案・実証し、これを用いて光ファイバ通信システムの制御が可能であると示すことを、目的とした。その遂行にあたって、はじめて光物理層モニタへの深層学習 (深層ニューラルネットワーク) の導入を行った。またモニタリングされた情報に基づく制御の対象として、多様化する通信トラヒックに対応するため容量だけでなく処理遅延も制御可能な光送受信器を合わせて用いた。これにより、以下の成果を挙げることができた。

- (1) 本研究では、光物理層モニタリングに関する先行研究を分析し、人手による特徴量抽出なしで測定生データから直接所望のモニタリング機能を学習することの重要性を示した。また、これを実現するため、帯域内光電場の古典的全物理量 (振幅・位相・偏光) を測定可能なデジタルコヒーレント技術を活用し、デジタルコヒーレント受信器で得られる巨大データを深層学習の訓練データとして用いた。深層学習を用いて特徴量抽出も含めたタスクを一括でデータから学習することで、人手による特徴量抽出なしで多様な種別のモニタリングを可能とする、モニタリング・フレームワークを提案した。
- (2) 提案した深層学習ベースのモニタリング・フレームワークを用いて、光物理層の状

態推定が可能なことを実験的に検証し成功した。具体的には、14 GHzおよび16 GHzのシンボルレートで変調された、DP (Dual-Polarization) -QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 、DP-16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 、DP-64QAM光信号をデジタルコヒーレント受信器で測定し、測定データを深層ニューラルネットワークに入力し情報処理を行なった。ここで深層ニューラルネットワークは、光信号対雑音比 (Optical Signal-to-Noise Ratio: OSNR) 、残留波長分散量、変調方式およびシンボルレートを推定するよう訓練された。深層ニューラルネットワークとして、全結合型深層ニューラルネットワーク (Fully-Connected Deep Neural Network) および畳み込み型ニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を用いた。訓練済みのCNNによる推定は、従来必要だった人手による特徴量抽出なしで、従来手法と同等か上回る推定精度を示した。この結果は、深層学習を用いたモニタリング・フレームワークが、モニタリング機能の設計開発に要するコストと期間を低減し、次世代光ファイバ通信システムの運用管理高度化に資することが可能であることを示唆している。

- (3) 深層学習を用いたモニタ方式を、光送受信器を介した光電場の制御と合わせて用いた場合、とりわけ伝送容量のみならず処理遅延も制御可能な光送受信器を介した場合の効果を実験的に評価した。まず、光送受信器における誤り訂正とサブチャネル間パワー割当を含むデジタル信号処理を制御することで、上位層サービスに合わせた伝送容量と処理遅延を提供可能なアプリケーション指向型の光送受信器を提案し、その動作を実験的に検証した。次に、与えられた伝送路状態に適合する光送受信器の動作モードを決定する手順を導出した。最後に、特定のユースケースを想定した実験において、畳み込み型ニューラルネットワークを用いた光物理層モニタによって伝送路の状態を推定し、これに適合した光送受信器の動作モードを選択することで、伝送に関する指標 (例えばQマージン) を改善できることを示した。その結果、深層学習を用いたモニタを用いて、次世代光ファイバ通信システムの運用管理高度化が可能である見通しを得た。

以上のように本研究では、将来光ファイバ通信システムにおける運用管理の高度化を実現する上で必要となる、光ファイバ物理層のモニタリング技術と光送受信器の制御技術を拡張し、その実現可能性を実証した。