

ROADM のリアルタイム故障予測のための GAN 強化機械学習

Real-Time Fault Prediction for ROADM Using GAN-Enhanced Machine Learning



平野 章 (AKIRA HIRANO, Ph. D.)

東京電機大学 工学部 情報通信工学科 教授

(Professor, Tokyo Denki University)

IEEE 電子情報通信学会 他

受賞: IEICE フェロー (2018年) 他

研究専門分野: 通信工学 ネットワーク

あらまし

光ネットワークの基幹装置である再構成可能光アド/ドロップマルチプレクサ (ROADM) は、柔軟な光信号の経路制御を実現する一方で、光学フィルタの中心周波数が経時的にずれる「光学フィルタシフト」などの障害が発生することで、伝送品質の劣化や通信障害の原因となる。本研究では、デジタルコヒーレント受信機の ADC (アナログ-デジタル変換器) 直後で取得した復調前の DP-16QAM コンスタレーションデータに機械学習を適用し、伝送装置以外の高価な監視装置を一切用いずに ROADM の光学フィルタシフトをリアルタイムで高精度に検出・予測する手法を提案する。実験プラットフォームとして、WhiteBox パケットトランスポンダ Cassini に Docker コンテナアプリケーションを実装し、上記デジタル信号のリアルタイム取得・保存を実現した。これまでの検討では、畳み込みニューラルネットワーク (CNN : DenseNet-121) を用いて 51 GHz のフィルタシフトをほぼ 100% の精度で検出できた。しかし、より現実的な小さな 26 GHz シフトでは特微量が不明瞭となり、検出精度が低下した。そこで、本研究では敵対生成ネットワーク (GAN : Generative Adversarial Network) のひとつである Deep Convolutional GAN (DC-GAN) を世界で初めて光学フィルタシフト検出に応用し、実測コンスタレーションデータに基づいて極めて高品質なクローンデータを生成した。このクローンデータを訓練データに

追加するデータ拡張により、必要な実測データ量を 68% 削減しつつ、26 GHz シフトでも Precision、Recall、F1 スコアが 90~100% に達する高精度検出を達成した。さらに、SD-FEC (ソフトデシジョン前方誤り訂正) 前のビット誤り率 (BER) が上昇する前に 26 GHz シフトを確実に検出できたため、伝送サービスに実障害が生じる前の時点で異常を捉え、障害発生を予測できることを実証した。本手法は、ネットワークのディスクアグリゲーションが進むオープンな光ネットワーク環境において、追加ハードウェアを最小限に抑えつつ自律的・プロアクティブな保守を実現し OPEX を削減する有力な技術である。

1. 研究の目的

ネットワークトラフィックの爆発的増加は、デジタル化の進展や SVOD (サブスクリプション型ビデオオンデマンド) サービスの普及、さらには Beyond 5G/6G 時代に向けたネットワークスライシングの展開によって加速している。これにより、光ネットワークは規模の拡大だけでなく、仮想化された多様なサービス要件への動的適応が求められ、全体の複雑さが飛躍的に増大している。このような環境では、従来の人手中心の運用・保守では対応が困難となり、障害予測に基づく自律型診断とプロアクティブな保守が不可欠となっている。一方、設備投資 (CAPEX) 削減を目的としたネットワーク機器のディスクアグリゲーション (オープン化) が急速に進展している。従来の集約型 (単一ベンダー) 機器に対し、WhiteBox と呼ばれる多ベンダー構成が可能なオープン機器が登場し、価格競争を促進している。しかし、複数ベンダーの機器が混在すると、障害発生時の責任所在が不明確となり、原因特定に多大な時間と労力を要する課題が生じる。本研究の目的は、このような背景の下で、光ネットワークの主要ノードである ROADM において発生しやすい光学フィルタシフトを、既存のデジタルコヒーレント受信機が持つ生データを活用し、追加の専用監視ハードウェアを用いずにリアルタイムで検出・予測する手法を確立することである。最終的な狙いは、伝送品質が実際に劣化する前に異常を検知し、障害を未然に防ぐ故障予測機能を実現することにより、運用コスト (OPEX)

ROADM のリアルタイム故障予測のための GAN 強化機械学習

Real-Time Fault Prediction for ROADM Using GAN-Enhanced Machine Learning

を大幅に削減するとともに、ネットワーク全体の信頼性と可用性を向上させることである。また、自律型診断プラットフォーム CAT との統合により、人手を最小限に抑えた次世代光ネットワーク自動運用技術に貢献することを目指している

2. 研究の背景

光通信性能監視（OPM：Optical Performance Monitoring）の分野ではこれまで、ROADM ノードにおける光学フィルタシフトが伝送品質（QoT）に与える影響が注目されてきた。海外を中心に、光スペクトルアナライザ（OSA）を用いてスペクトル形状の平坦領域やエッジの変化を捉え、理想スペクトルとの残差を機械学習の特徴量として入力することでフィルタシフトを検出する手法が提案されている[1]。これらの研究は一定の検出精度を示しているが、ROADM ノードごとに高価な OSA を追加導入する必要があり、システム全体のコスト増大と複雑化が大きな障壁となっている。また光周波数軸を走査するために一定の時間を必要とするため、レスポンスが遅いという課題もあり、リアルタイム性に欠ける。近年、デジタルコヒーレント伝送システムの普及に伴い、復調前のコンスタレーションデータ等のデジタル信号を直接活用するアプローチが国内外で活発化している。著者らはこれまで、同じ WhiteBox プラットフォームを用いてコンスタレーションデータを取得し、これを機械学習に用いることで光ファイバの曲げや光クロストーク（光伝送路の多重反射ノイズ）のリアルタイム検出に成功しており[2,3]、追加ハードウェアを不要とする本方式の利点を明らかにしてきた。ま、OSNR（光信号対雑音比）推定やその他の QoT 監視に関する機械学習応用研究も多数報告されている。しかし、光学フィルタシフトを対象とした故障予測、特に BER 劣化が生じる前の微小なシフトを検知する手法に関する報告は極めて少なく、国内外ともに空白領域となっている。さらに、現場での機械学習モデルの訓練に必要な大量の異常状態データを効率的に取得する難しさに起因するデータ不足を補うための効果的なデータ拡張手法を統合した研究もほとんど見られない。本研究は、これら課題に対し、光伝送装置からのリアルタイムデータ取得と GAN

による高品質データ拡張を組み合わせた新しいアプローチにより、光ネットワークの障害予測技術の実用化を大きく前進させるものである。

3. 研究の方法

本研究では、WhiteBox パケットトランスポンダ Cassini*1 に Docker コンテナアプリケーションを複数実装し、デジタルコヒーレント受信機*2 の ADC 直後のデジタル信号（TRDS：Tapped Raw Digital Signal）をリアルタイムに取得・保存する環境を構築した。取得した I/Q データを X/Y 偏波ごとに 64×64 の 2 次元ヒートマップに変換し、オフラインで CNN（DenseNet-121）を訓練した後、訓練済みモデルをコンテナにデプロイしてリアルタイム検出を実現した。実験構成は、25 GBd DP-16QAM 信号を生成し、光学フィルタの中心周波数を±26 GHz、±51 GHz に意図的にシフトさせた条件でデータを収集した(図 1 参照)。

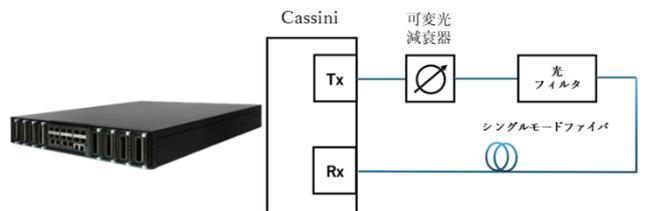


図 1 評価実験系

まず、データ拡張を行わない場合、51 GHz シフトでは各ラベル（left shift、right shift、normal）に対してほぼ 100% の F1 スコアを達成し、極めて高い検出精度を確認した（図 2 参照）。

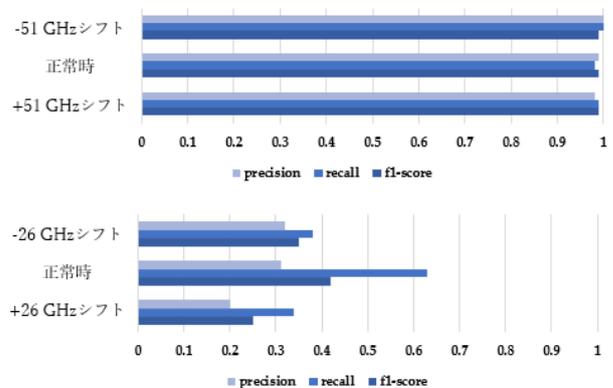


図 2 GAN 生成なしの結果

ROADM のリアルタイム故障予測のための GAN 強化機械学習

Real-Time Fault Prediction for ROADM Using GAN-Enhanced Machine Learning

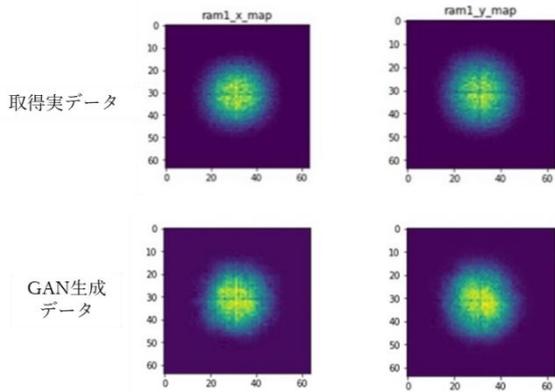


図3 GAN 生成したクローンデータ例

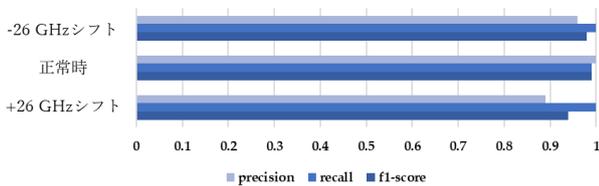
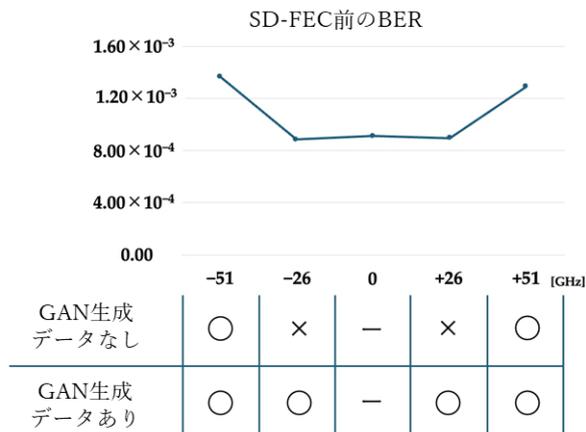


図4 GAN 生成データを加えた評価結果

表1 誤り率との統合実験結果



一方、26 GHz シフトではスペクトル変化が微小であるため特徴量が不明瞭となり、検出精度が大幅に低下した。この課題に対し、Deep Convolutional GAN (DC-GAN) *3 を初めて光学フィルタシフト検出に適用し、実測コンスタレーションデータに基づいてクローンデータを生成した[4,5]。生成データは視覚的・統計的に実データとほぼ区別がつかない高品質なものであり(図3参照)、これを訓練データに追加することで

データ拡張を行った。その結果、必要な実測データ量を68%削減しつつ、26 GHz シフトにおいても Precision、Recall、F1 スコアが90~100%に達する高精度検出を実現した(図4参照)。さらに、SD-FEC 前のビット誤り率(BER)のリアルタイム監視と組み合わせた評価では、BERに異常が現れる前の±26 GHz シフトを確実に検出できた(表1参照)。これにより、伝送サービスに実障害が生じる前の段階で異常を捉え、近未来の障害発生を予測できることを実証した。本研究の最大の意義は、既存のデジタルコヒーレント受信機が持つ生データを最大限活用し、追加ハードウェアをほぼ不要とする低コストな手法で高精度なリアルタイム故障予測を実現した点にある。特にディスアグリゲーション環境では、ベンダー間の責任問題を回避しつつ、自律型診断プラットフォーム CAT*4 と組み合わせることで、迅速かつ正確な保守運用が可能になると考える。また、GANによるデータ拡張は、現場でのデータ取得時間を大幅に短縮できるため、実運用ネットワークへの導入障壁を大幅に低減できる。

4. 将来展望

本手法は、コンテナベースで柔軟に実装できるため、データセンター間接続ネットワークから Tier1 キャリアの長距離バックボーンネットワークまで、WhiteBox が導入されるあらゆる光ネットワークに短中期(3~5年以内)で適用可能である。ネットワークのディスアグリゲーションがさらに進展するにつれ、自律的監視・診断の需要は一層高まると予想され、本技術の実用化が強く期待される。今後の主な課題として、(1) 低 OSNR 環境や異なる変調フォーマット(例:64QAM)、FEC 構成でのロバスト性検証、(2) 複数 ROADM ノードが連なる実際のネットワークでの障害ノード特定手法の開発(例:候補ノードで逆方向に微小デチューンを行い検出結果の変動を観察)、(3) フィルタシフトの時間的進行速度を学習し、BER 劣化発生までの残存時間を定量的に予測するモデルの構築、(4) DC-GAN のさらなる最適化によるデータ拡張効率の向上、が挙げられる。これらを順次解決することで、より実践的で汎用性の高い故障予測システムが完成する見込みである。最終的には、提案手法を CAT 診断プラットフォ

ROADM のリアルタイム故障予測のための GAN 強化機械学習

Real-Time Fault Prediction for ROADM Using GAN-Enhanced Machine Learning

ームに完全に統合し、光ネットワーク全体の自律的運用・保守を実現する。これにより、運用コストの大幅削減、障害復旧時間の短縮、サービス信頼性の向上を達成し、急速に進化するデジタル社会を支えるシームレスで高信頼な通信インフラの構築に大きく貢献できると確信している。

おわりに

本研究では、WhiteBox トランスポンダを活用したリアルタイム生データ取得と GAN によるデータ拡張を組み合わせることで、ROADM の光学フィルタシフトを BER 劣化前に高精度で検出・予測する手法を確立した。これにより、追加ハードウェアをほとんど必要とせず、必要な実測データ量を大幅に削減しつつ故障予測を実現できた。今後、多様なネットワーク環境での検証と CAT プラットフォームへの統合を進め、光ネットワークの自律的運用と OPEX 削減に貢献する実用的なシステムの完成を目指す。

用語解説

- *1 WhiteBox パケットトランスポンダ Cassini : Telecom Infra Project (TIP) で開発されたオープン化された光トランスポンダ。多ベンダーのモジュールを組み合わせ可能で、コンテナアプリケーションをホストする汎用プラットフォームとして機能する。
- *2 デジタルコヒーレント受信機 : 光信号の位相と振幅情報をローカル発振光と混合して電気信号に変換し、デジタル信号処理 (DSP) で復調する受信機。高感度・長距離伝送に不可欠である。
- *3 Deep Convolutional GAN (DC-GAN) : 畳み込みニューラルネットワークを生成器・識別器に導入した敵対生成ネットワーク。高次元データ (コンスタレーションヒートマップなど) の高品質な生成に優れ、訓練安定性が高い。
- *4 CAT 診断プラットフォーム : Collecting (データ収集)、Analyzing (分析)、Testing (追加テスト) の診断サイクルを自動的に繰り返し実行する自律型ネットワーク診断プラットフォーム。オープンソースの StackStorm など実装可能。

参考文献

- [1] Shariati, B.; Ruiz, M.; Comellas, J.; Velasco, L. Learning from the Optical Spectrum: Failure Detection and Identification. *J. Light. Technol.* 2019, 37, 433–440.
- [2] Nishikawa, Y.; Nishijima, S.; Hirano, A. Real-Time Detection of Fiber Bending and/or Optical Filter Shift by Machine-Learning of Tapped Raw Digital Coherent Optical Signals. *IEICE Trans. Commun.* 2023, E106, 1065–1073.
- [3] Onodera, M.; Hirano, A. Real-Time Detection of Optical Cross-Talk for Autonomous Network Diagnosis. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Big Island, HI, USA, 19–22 February
- [4] Goodfellow, I. et al., “Generative Adversarial Nets”, *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2014.
- [5] Radford, A. et al., “Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks”, arXiv:1511.06434, 2015.

この研究は、令和3年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和4～6年度に実施されたものです。