

4 光伝送路モニタリング技術

非線形シュレディンガー方程式の学習による マルチスパン光伝送路モニタリング技術

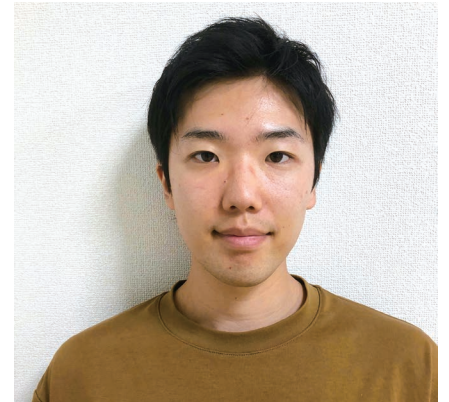
NTT 未来ねっと研究所（以下、未来研）のトランスポートイノベーション研究部では、非線形シュレディンガー方程式（以下、NLSE）のニューラルネットワーク（以下、NN）との類似性に着目し、マルチスパン光伝送路のモニタリング技術を開発した。専用測定器を用いずに、光損失・波長分散の光ファイバ長手方向分布測定を可能にした他、光フィルタの中心周波数ずれ検知の実証に成功した。

自動で光伝送路の状態を測定する スマートな光伝送システム

近年、光伝送システムは、通信キャリアのネットワークのみならずデータセンタ間接続等にも使われるようになった。このように光伝送システムの適用範囲が拡大するとともに、簡易な手法で光伝送システムを構築し、試験する技術が求められている。従来、光伝送システムを構築するには、光伝送路のパラメータを専用試験機でテストする必要があり、専門技術者の派遣も必要であった。具体的に試験するパラメータには、光ファイバの損失/波長分散、光アンプの入力パワー、ネットワークがROADM（Reconfigurable optical add-drop multiplexer）システムであれば

WSS（Wavelength selective switch）等の光フィルタの中心周波数ずれ等がある。これら多くのパラメータを把握し、光伝送装置を適切に設定しなければ、安定かつ大容量な光伝送システムの構築は望めなかった。これらの測定には、OTDR（Optical time domain reflectometry）や波長分散測定器、光スペクトルアナライザといった測定器のほか、伝送システムの設計に詳しい技術者も必要であり、光ネットワーク構築の期間やコストの増加の要因となっている。

しかし、イーサネット LAN ケーブルのように光ファイバを送受信機に接続するだけで、測定器なし・自動・遠隔で必要な測定を行い、最適な伝送設計を行えるようになれば、低コストで最大容量の光伝送システム



NTT 未来ねっと研究所
トランスポートイノベーション研究部
研究員 笹井 健生氏

を構築することが可能になる。また、ネットワーク運用時に光伝送路に異常が発生した場合に、自動で異常箇所を特定できれば、運用保守のコスト低減を実現できる（図1）。

この目的の達成には、異常箇所の特定のため、上記光伝送路パラメータの「長手方向分布」の取得が必要となる。例えば、光ファイバの場合、数十～数千 km の光ファイバの損失分布を取ることができれば異常損失点を検知することが可能となる。光フィルタの場合も、複数の光フィルタの中から異常なものだけを検知・修正するのが望ましい。

このような背景から、我々は光伝送

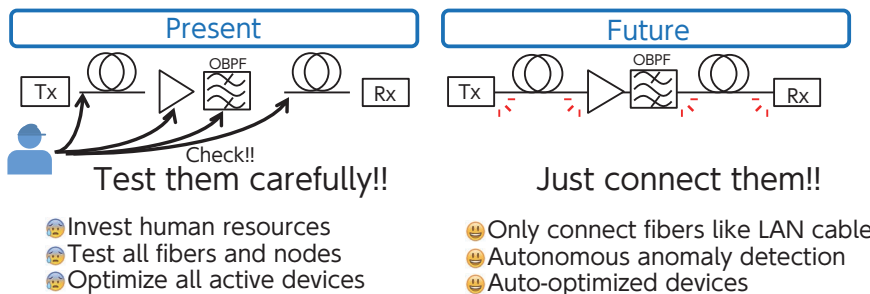


図1 光ファイバ伝送路構築/保守時の課題と理想

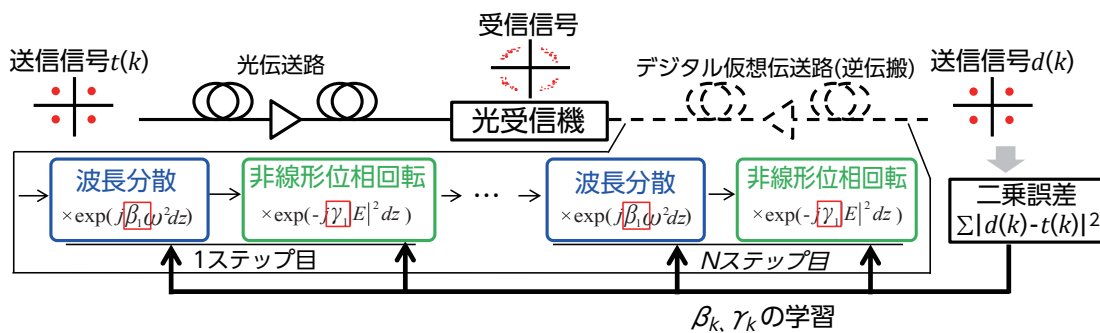


図2 スプリットステップフーリエ法 (SSFM) を用いたデジタル逆伝搬による送信信号復調

回転を繰り返し補償することによって送信信号に戻ることができる。

SSFM による補償時に、事前に n ステップ地点の光ファイバの実際の分散係数 $\beta(z_n)$ と非線形係数 γ

システムの実際のデータを運んでいる信号に受信側にてデジタル信号処理を施すのみで、従来不可能であったマルチスパン光伝送路中の光ファイバの損失 / 波長分散の長手方向分布、複数の光フィルタの周波数ずれ等を検知する技術を考案・実証した^{[1],[2]}。

光伝送路の長手方向の物理量を推定する方法は？

我々のゴールは、送信信号と受信信号のみから光ファイバの損失分布と波長分散分布を知ることである。(光フィルタの中心周波数ずれを測定する方法は後に述べる。) この目的のため、光ファイバ中の光信号の伝搬の様子を記述する非線形シュレディンガー方程式 (NLSE) を調べる。

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -i \frac{\beta(z)}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + i\gamma(z)|E|^2 E \quad (1)$$

ここで、

E : 光信号 (複素電界)

z : ファイバ上の位置

$\beta(z)$: 分散係数

t : 時間

$\gamma(z)$: 非線形定数

ここで式(1)の右辺第1項が分散部を、第2項が光パワー $|E|^2$ に比例する非線形位相回転部を表している。この方程式は、ファイバを微小距離 dz 進んだときに光信号 E がど

のように変化するかを表す式である。この方程式内に現れる分散係数 $\beta(z)$ と非線形定数 $\gamma(z)$ の z 方向分布を求めることができれば、光ファイバ中の波長分散と光パワー分布を求めることができる。これら $\beta(z)$ と $\gamma(z)$ を、送信信号と受信信号のみから求めたい。数学的には微分方程式の境界条件から、パラメータを推定する逆問題に相当する。

この NLSE は一般には数値解析的に解き、よく知られた手法として SSFM (Split step Fourier method) がある。SSFM では、電場 $E(z, t)$ が短い距離 dz だけ伝搬するとき、右辺第1項の分散を表現する項と第2項の非線形項があたかも独立に作用すると仮定して近似解を得る。

この SSFM にもとづいて送信信号から位置 z における $E(z, t)$ を近似的に求めることができるが、この演算を受信側から送信側に向かって逆に施すことで、受信信号から送信信号を復元することができる^[3]。図2にアルゴリズムのイメージ図を示す。送信機から送信された信号が、NLSE に従い波長分散と非線形位相回転を受けながら受信機に到達する。この受信信号を送信信号に戻す、つまり、デジタル上を仮想的に逆伝搬するように波長分散と非線形位相

(z_n) が既知であれば、効率よく波長分散 / 非線形を補償でき、復調信号はより送信信号に近づく。逆にいえば、復調信号と送信信号の二乗誤差が最小となるように $\beta(z_n)$ と $\gamma(z_n)$ を最適化することができれば、最適化された $\beta(z_n)$ と $\gamma(z_n)$ は実際の光ファイバのパラメータを反映していると考えられる。このとき学習された $\beta(z_n)$ と $\gamma(z_n)$ から、それぞれ光ファイバの各点での分散と光パワーを求めることが可能となる。光パワー分布を微分することで損失も取得可能となる。

SSFM とニューラルネットワークの類似性

さて、信号を最もよく復調するように $\beta(z_n)$ と $\gamma(z_n)$ を最適化したい。面白いことに、SSFM は線形演算 (波長分散補償) と非線形演算 (非線形位相回転) を交互に繰り返す構造を取っており、この点で、SSFM は近年盛んに研究されている NN (Neural network) と酷似している (図3)。NN (本研究では単純な多層パーセプトロン) は、アフィン変換と呼ばれる線形演算にオフセットを乗せた演算 ($Wx+b$) と、活性化関数と呼ばれる非線形演算を交互に繰り返す構造を持っている。一般の

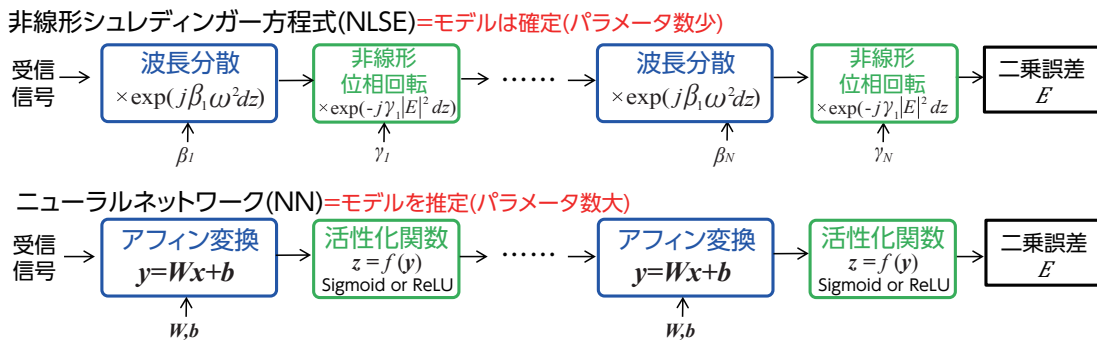


図3 NLSEとニューラルネットワークの類似点

NNでは線形演算における係数 W と b を学習する。

そこでNNが W と b を勾配法で学習するように、SSFM内の $\beta(z_n)$ と $\gamma(z_n)$ を学習する。幸い、SSFM内の分散演算と非線形位相回転演算は微分可能な関数からなる演算であり、同じく勾配法が利用可能である。

この手法の利点は、①伝搬モデルにもとづいた学習になっており、学習パラメータの物理的意味が明確である点、②NNにおけるノード数や初期値などの、人手によるチューニングが必要なハイパーパラメータを設定しやすい点、③機械学習分野で発展したさまざまな学習性能向上手法を適用できる点、など、モデルに基づいた推定とデータドリブンな学習を両立できることにある。NNのような完全なブラックボックスとして推定するのではなく、伝搬モデルに従うことでファイバ内の物理現象を推定しやすい。またNNでは、

その出力がいかにか教師信号に近いかに着目されがちだが、その学習パラメータに目を向けることでシステムの状態を知ることが可能となる。

マルチスパン損失分布推定結果

はじめに損失分布の推定結果を図4に示す。70km × 4スパンのSSMF (Standard single mode fiber) 伝送路で実験を行った。横軸が送信側からの距離を示し、縦軸に推定光パワー分布を示す。参照用にOTDRでの測定損失から計算される光パワー分布を黒点線で示した。また、損失点の検出可否を調査するため、各スパンの途中に減衰器を挿入してある。減衰器による減衰量が0dB (黒実線) の場合を見ると、伝送路を伝搬していくにつれ光ファイバ損失による光パワーの減衰が観測できている上、光増幅器の地点 (70,140,

210,280km) では増幅による光パワーの急峻な増大の様子が見て取れる。また、減衰量を2dB (緑)、5dB (青) と増加させたケースにおいても、減衰地点での光パワーの落ち込みが観測できる。

以上から、マルチスパン光伝送路中で過剰な損失などの異常が発生した場合には、本技術で故障箇所を特定することが可能となる。

マルチスパン波長分散分布推定結果

続いて、波長分散分布推定の結果を図5に示す。図中、左より右にかけて、(a) (b) (c) (d) の順である。横軸は送信側からの距離で、縦軸は波長分散量の伝送路内最大値からの相対的な波長分散量を表す。(a) (b) (c) (d) はそれぞれ1,2,3,4スパン目にDSF/NZDSF (Dispersion shifted fiber/Non-zero DSF) を使用した場合を表している。参照用にすべてSSMFの場合を黒点線で示した。DSF (赤) を使用したスパンでは相対分散量の鋭い落ち込みが観測された。また、NZDSF (黄) を用いた (b) (d) では、DSF時に得られた分散量に比べ、NZDSFの波長分散量が高いことがわかる。このことから、SSMFとDSFの区別だけでなく、DSFとNZDSFという波長分散値が小さいファイバの中でも異なる分散量を持つファイバを見分けることが可能になることがわかる。

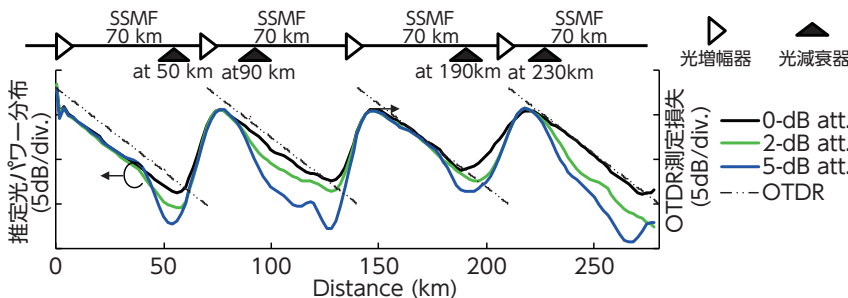


図4 マルチスパン損失分布推定の実験結果

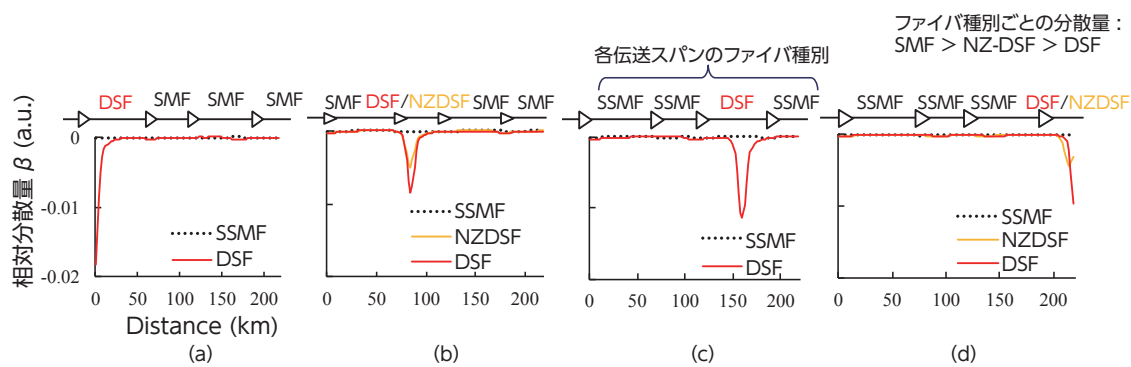


図5 マルチスパン分散分布推定の実験結果

かを特定可能なことが実証できた。異常個所を検出できると共に、推定結果を直接、光フィルタにフィードバックすることで、異常デバイスの補修も可能となり、システムの管

理が容易になると考える。

光フィルタの中心周波数ずれ検知結果

ROADM システムでは、光信号がノード光フィルタを通過する際に、中心周波数ずれが起きた場合、信号スペクトルをフィルタが削ってしまう PBN (Passband narrowing) が生じ、信号劣化が発生する。従来技術では、PBN が生じた場合でも、異常フィルタの位置特定ができないという課題があった (図6)。もしも異常光フィルタの特定や自動最適化が可能となれば、故障解析や伝送容量の最大化が可能となる。

基本原理は、損失分布 / 波長分散分布推定と同様で、NLSE モデルに光フィルタ模擬用の複素 FIR (Finite impulse response) フィルタ $h(k)$ をノード地点に追加する。その応答を推定する。 $\beta(z_n)$ と $\gamma(z_n)$ と同

様に、複素 FIR フィルタ係数 $h(k)$ を勾配法により学習する。

実験結果を、図6の下部に示す。図6上部のような3スパン2ノードの系において、1つめの光フィルタでは、中心周波数ずれなし (中心周波数シフト 0 GHz) とし、2つめの光フィルタでは、中心周波数を故意に +15GHz シフトさせている。実験結果において、2つめの光フィルタに対応する FIR フィルタ (赤) の周波数応答が、PBN によって削られた信号の肩の部分に補償するようにピークを示している。ゆえに、フィルタずれを検出できていることを示している。一方、1つめの光フィルタに対応する FIR フィルタ (青) では、そのようなピークは観測されなかった。

以上より、本手法で何番目の光フィルタの中心周波数ずれているの

将来に向けた展望

本研究では、OTDR 等の専用測定器を使わずに光ファイバ伝送路の長手方向の損失や波長分散の分布を受信側信号処理のみにて推定する手法を実証した。また、PBN による信号劣化を NLSE モデルに FIR フィルタを追加することで、異常光フィルタの特定が可能なることを実証した。

従来の専用測定器に比べ、精度は落ちるものの、マルチスパン伝送路でも測定可能、波長分散分布の取得が可能、光プローブを入力する必要がない、自動・遠隔測定が容易などの利点を持つため、将来のデータセンタ間ネットワークの構築を簡易化する技術として期待できると考える。

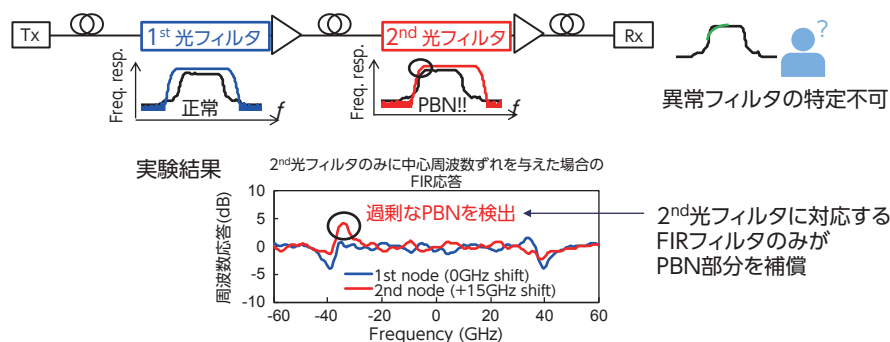


図6 光フィルタの中心周波数ずれ検知技術

[1] T. Sasai et al., "Simultaneous detection of anomaly points and fiber types in multi-span transmission links only by receiver-side digital signal processing," Optical Fiber Communication Conference (OFC), Th1F.1, 2020.
 [2] T. Sasai et al., "Digital backpropagation for optical path monitoring: loss profile and passband narrowing estimation" European Conference on Optical Communication (ECOC), Tu2D.1, 2020.
 [3] Ip, E. et al., "Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation. Journal of Lightwave Technology," 26(20), pp.3416 - 3425, 2008