

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04532

研究課題名(和文) 深層学習を用いた光ファイバ伝送信号の抜本的な品質改善に関する研究

研究課題名(英文) A study on drastic improvement of optical fiber transmission performance using deep learning

研究代表者

植之原 裕行 (Uenohara, Hiroyuki)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：20334526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：深層学習の特徴抽出性能を利用して、光ファイバの光信号に対する非線形歪補償性能の既存のデジタル逆伝搬法と比較して抜本的な向上を目指した。まずANNを比較対象として検討を進め、非線形歪補償に有効な入力データのサンプリングレート、同時入力シンボル数、neuron数、epoch数の最適範囲を得た。次に2次元CNNによる非線形補償性能の検討を行い、伝送信号のI成分、Q成分を配列の縦軸・横軸に時間変化を表現可能なように対応させた。多数決法の導入が誤り率の改善に有効であり、I・Q成分の2並列方式において、線形補償のみ良好、1step/spanと2step/span DBPの中間的なBER特性となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバ通信システムの受信光信号の線形・非線形歪の補償性能を既存デジタル信号処理手法よりも抜本的に向上可能な、深層学習導入によるリアルタイム処理手法の実現を目指している。対象抽出能力の高い深層学習を導入し、既存のデジタル逆伝搬法の性能を改善する可能性を追究した。対象シンボル前後の情報による影響を事前学習させ、サンプリングレートと連続入力シンボル数を考慮に入れて、サンプリング後に信号再構築過程を導入し、人工ニューラルネットワーク、1次元あるいは2次元畳み込みニューラルネットワークにおいて、限定的ではあるが既存のデジタル逆伝搬法よりも補償性能の高い可能性を見出している。

研究成果の概要(英文)：We aimed at improving the nonlinear compensation performance drastically for optical fiber transmission by using high recognition feature of deep learning compared with that of the conventional digital backpropagation method. First, for the reference, ANN was used, and the effective conditions of the sampling rate and the simultaneous number of input symbols, the number of neurons, and the number of epochs were obtained. Next, two-dimensional CNN was investigated, and input data were assigned to In-phase and Quadrature-phase components with time transient information. Introduction of majority vote was found to improve the performance. We have found that the performance of two-dimensional CNN indicating on complex plane or using I-Q-components in parallel both are superior to that of linear compensation only, in the same level compared with DBP with 1step/span, but in the middle between DBP with 1step/span and 2steps/span. Layer construction should be investigated further.

研究分野：光信号処理

キーワード：光ファイバ通信 非線形歪補償 畳み込みニューラルネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

2000年代後半のデジタル・コヒーレント検波技術の提案、2010年度初頭の実ネットワーク導入以来、光ファイバ通信の送受信システムには多値変調・誤り訂正・デジタル信号処理回路による歪補償技術が中心的な存在となった。その流れは、今後の大容量・チャンネル高速化においても当面続く様相を呈する。一方で、多値変調導入により所望の受信品質確保のためには高い信号対雑音比が求められるようになり、ファイバ中の自己位相変調・波長多重信号からの相互位相変調・四光波混合の歪みによる性能劣化が顕在化している。その結果、信号対雑音比に対する理想的なシャノン限界の定める周波数利用効率が実現できていない。その課題解決のためにデジタル逆伝搬法、Volterra フィルタ法などの補償技術導入による性能改善が進められているものの、まだギャップが埋められない状況である。したがって、そのギャップを埋めるべく、従来の伝送歪み現象の逆特性の解析や、符号化による処理とは違った新たな手法の導入が期待されると考えた。

### 2. 研究の目的

今後の更なる光通信システムの伝送容量の絶え間ない向上を実現するため、既存の非線形歪みの逆特性演算を行うデジタル信号処理を超える、新たな処理として深層学習導入の効果を実証し、リアルタイム処理に適した手法の明確化を目的とする。そのコンセプトは5年ほど前から立ち上がり始めているが、計測器で取得した時間波形イメージに対して深層学習を導入するため、当時は変調方式の違いの識別への効果の可能性は示唆されているものの、復調への明確な検討例もなく、また現実的なリアルタイム処理ではなくオフライン処理でしか対応できない根本的な課題がある。本研究では、その課題を克服するため、現在の最先端の光信号受信処理であるデジタル・コヒーレント検波のサンプリング・量子化後の処理の初期段階に畳み込みニューラルネットワーク(CNN)の処理手順を組み込めると考え、その可能性の明確化とともに具体的なCNN処理構成を明らかにすることを狙いとする。

### 3. 研究の方法

リアルタイム復調フローとしては、入力光信号を2サンプル/シンボルでAD変換後、ある程度のシンボル周期の時間波形を認識できるようにするための線形歪み補償・クロック再生・位相補償を前段で施す。その後、CNN処理を導入する。画像イメージとして扱うため、1シンボルの時間・振幅を適切な分解能に再処理するためのリサンプル・量子化を行い、そのデータをもとにCNN処理を行うことが可能と考えられる。その処理を行うことで、誤り率により既存手法との差異を定量評価する。

CNNの種類としては、時間軸方向に強度情報を並べる1次元処理(同相(I)成分と直交位相(Q)成分を合わせて2次元処理と見なせる)、時間軸と強度方向の2次元処理を行う手法があり、簡便さと識別能力がトレードオフ関係である。複数の可能性を比較検討し、リアルタイム処理を適切な回路規模・消費電力の範囲内で対応できる手法の明確化を検討した。リサンプル処理の時間領域でのイメージとしては、2サンプル/シンボルの受信信号は時間的にまばらな取得データであるが、周波数成分としては元の信号を隙間無く複製したものを並べたことになっている。したがって、もとの信号の周波数

成分だけを帯域制限フィルタで抽出すれば、もとの時間波形にほぼ復元できるので、例えば8サンプル/シンボルにリサンプル・3ビット量子化すれば8水準の振幅情報を得る。時間軸方向に1次元でカーネルを構成すれば1次元 CNN、時間軸と振幅方向にカーネルを構成すれば、2次元 CNN の処理ができる。このデータを CNN に入力する。

以上の全体手順の中で、明らかにしなければいけない項目を以下に記す。 入力光信号の2サンプル/シンボルからリサンプル処理までの信号処理の適切さの検証 CNN の効果を定量評価するための人工ニューラルネットワークなど他の深層学習の検討、CNN における I/Q 時間情報かコンスタレーションかの選択、畳み込み層でのカーネルの画像解像度、畳み込み層数、プーリング層、全結合層までの全体構成の明確化 学習データの内容の明確化(変調形式の各シンボルに対して前後に加えるシンボル系列の種類、過学習を回避し任意性の高い推定を可能とするデータ系列、光ファイバ伝送時の光信号パワー・伝送距離を与えて線形・非線形歪みを加えた後の受信段階の信号を用いることの効果)

以下に、年次ごとの計画を述べる。初年度(2020年度)は CNN と比較検討として ANN を選択し、CNN としては最も単純な1次元 CNN を選択、階層数・ブロック数を固定して、復調後の信号品質を Q 値で定量評価し、既存のデジタル逆伝搬法(DBP)の Q 値との差分、計算量の比較検討を行った。さらに過学習を回避可能な学習データを検討した。2年目(2021年度)は、効果的な CNN の手法のさらなる絞り込み(1次元、2次元、階層数・カーネル画像解像度の条件)を行い、測定データを用いた効果の検証のための事前準備を進めた。3年目(2022年度)は、2年目までに絞り込んだ CNN 手法・条件に対して入力シンボル数などの条件の検討を進めた。

#### 4. 研究成果

最初に、CNN の条件を詳細に詰める前の段階として、以下の2項目に関して検討を実施することとした。

##### (1) 入力信号のサンプリングレートに対する復調性能の確認

入力信号のシンボルレートに対するサンプリングレートに対して、2サンプル/シンボル以上の条件に品質最適条件があるかどうかを確認することを目的とした。

##### (2) 学習データの適切な選択方法

機械学習には事前の学習データによるノード数やノード間結合係数の最適条件の設定を行うが、テストデータと異なるものを使うため、同じデータを使った際に復調性能が確認できてもテストデータでは性能が得られないことが報告されている。そのため適切な学習データの考え方を確認してからでないと、CNN 条件最適化による性能の評価が正確にできないと考えた。

以上について、人工ニューラルネットワーク(ANN)を使って検討を進めた。その結果を以下に示す。

##### (3) まず、28Gbaud RZ-16QAM 信号に対して ANN の補償性能に関する検討を行った結果、neuron=80 160、epoch=300 500 が非線形歪補償に最適であり、使用する活性化関数としては ReLU を用いることが良いと分かった。また、ANN の入力データのサンプリングレートは4が最適で、同時入力シンボル数は1が最適であることが分かった。

##### (4) 異なる種類の学習データで学習した ANN を比較した結果、無作為に画像を選んで構成された画像符号よりも画像相関を考慮し0.5付近の画像同士を選んで構成された画像符

号の方が良い汎化性能となった。しかしながら、ランダム符号に対して明確な優位性は見られなかった。

- (5) EVM を評価基準とし、DBP 法による非線形補償性能に対する ANN の補償性能の改善効果を定量的に検証した。入力データのサンプリングレートは 4、同時入力シンボル数は 1 が最適との結果に基づき ANN での非線形補償結果を線形補償のみ、DBP と比較を行った。同じ平均光パワーの 28Gbaud RZ-16QAM 信号に対して、伝送距離 1,000~10,000km の受信信号に対する補償性能を、ANN および DBP について比較検討した結果、すべての距離で目標 EVM 値 (14.9%) を下回った上で ANN が優れている結果を得られた。しかしながら、一部最終結論に至るには詳細検討がさらに必要であることもわかった。

ANN の性能が一通り得られたことから、引き続いて 2 次元畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による非線形補償性能の検討を行った。2 次元のパラメータとして何を適用するか、について異なる組み合わせについての比較検討を行い、以下の結果を得た。

- (6) 2 次元 CNN の畳み込み層の入力データ形式として伝送信号の I 成分、Q 成分をそれぞれ配列の縦軸・横軸に対応させることが、コンスタレーション上での時間変化を表現可能とした。また多数決法の導入が誤り率の改善に有効であることもわかり、非線形補償性能が高い入力光パワー条件において線形補償のみの場合と比較して高い補償性能を確認した。
- (7) CNN のアーキテクチャとして非線形補償器に最適な層数などを検討した。入力シンボル数を増やすことも有効な手段の一つと捉え、また 2 次元 CNN として、受信シンボルの I 成分・Q 成分を 2 次元複素平面内に表示する方式、I 成分・Q 成分それぞれの時間的な経緯を並列で持つことで 2 次元的な情報を持つ方式を比較した。検討を進めるプラットフォームとしては、MATLAB から python に変更し、伝送結果の妥当性を確認した。また、主に伝送距離を変えて DBP との比較検討を行い、線形補償のみに対する優位性にとどまらず、CNN の非線形補償性能の優位性を検討した。2 次元 CNN の層構造として、畳み込み層に ReLU 関数を用いた 2 回あるいは 3 回繰り返した後にプーリング層との組み合わせを 6 回行う構成を用いた。その出力を全結合層・ソフトマックス層を通して分類を完了させた。検討としては、入力シンボルの連続数を 3~13 で変え、また伝送距離を SMF6000km~10,000km (1000km 間隔) で可変とした。変調フォーマット NRZ-QPSK、入力光パワー 5dBm、ボーレート 28Gbaud、中心波長 1550nm 固定とした。一般的な優位性の評価軸として、線形補償のみによる場合、DBP (1step/span、2step/span) を比較対象とした。2 次元複素平面表示、I・Q 成分の 2 並列方式とも、線形補償のみより BER 特性は良好だが、前者は 1step/span DBP と同程度、後者は 1step/span と 2step/span DBP の中間的な BER 特性となった。以上から、CNN の構成として、I・Q 成分の 2 並列方式が良く、2step/span DBP を凌駕するには層構成など更なる検討が必要である結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>上野信明, 植之原裕行                                     |
| 2. 発表標題<br>ニューラルネットワーク導入による長距離伝送光受信信号の復調性能検討(学習データによる汎化性能) |
| 3. 学会等名<br>2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会                           |
| 4. 発表年<br>2020年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|