

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2014～2015
課題番号：26820141
研究課題名(和文) フォトニックネットワークにおける伝送限界の追究

研究課題名(英文) Large-capacity and long-haul photonic networks

研究代表者

森 洋二郎 (MORI, Yojiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10722100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光ファイバネットワークの伝送距離および容量の限界を追究し、大容量且つ長距離な次世代ネットワーク構築の基礎とするものである。光ファイバ通信の距離および容量は光ファイバの持つ非線形な伝送特性によって制限されている。このため、非線形な信号歪みを補償する必要がある。機械学習は信号判別器として有効であるが、レーザ位相の不安定性に起因するサイクルスリップ現象がその導入を妨げていた。機械学習による信号判別法にサイクルスリップ訂正技術を導入した新たな信号判別法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって確認した。

研究成果の概要(英文)：In optical fiber communication systems, the transmissible capacity and distance are strictly limited by transmission impairments such as fiber nonlinearity in links. To maximize network performance, signal distortion caused by such impairments must be eliminated. Machine learning can discriminate symbols in accordance with their distortion. As a result, the demodulation performance can be improved. However, cycle slips induced by laser phase noise disrupt the learning process and hence constructed decision boundaries are distorted. To resolve this problem, we propose a novel configuration in which cycle-slip detection and correction are introduced into the machine learning process. With such a scheme, we can reduce the number of bit errors in a stable manner. The proposed scheme substantially elongate the transmissible distance without reducing capacity.

研究分野：通信工学，ネットワーク，デジタル信号処理

キーワード：光ファイバ通信 光ネットワーク 機械学習

1. 研究開始当初の背景

世界的に増加し続ける光ファイバ通信需要に対応するために、大容量かつ長距離なフォトニックネットワークの構築は急務である。これまで、固定周波数間隔に配置された異なる複数の波長チャネルを多重して伝送する波長分割多重方式を用いることで、光ファイバ伝送システムの容量は増加の一途を辿ってきた。しかし、光ファイバで使用可能な周波数帯域は光増幅器が増幅可能な帯域に限定される。このため、さらに伝送容量を増加するためにはこの限られた周波数帯域を有効に利用しなければならない。周波数利用効率を向上させるためには、主に以下の二つの手段が知られている。一つは4相位相偏移変調 (Quadrature phase-shift keying: QPSK) や 16 相直交振幅変調 (16-ary quadrature amplitude modulation: 16QAM) などの多値変調方式を用いることである。この方式では一つの信号シンボルに複数のビットを割り当てることで、使用帯域を増やすことなく送信するビット情報を増やすことができる。もう一つは異なる波長チャネルの干渉を避けるためにチャネル間に挿入されているガードバンドと呼ばれる不使用帯域を小さくすることである。これら二つの手法を用いた送受信器が商用システムへ適用され、従来システムと比較して 10 倍程度の周波数利用効率を達成している。さらに周波数利用効率を向上させるためには、より高次の多値変調方式を用いるか、ガードバンド幅を 0 に近づけなければならない。しかし、伝送可能な容量および距離は光ファイバの非線形効果によって厳しく制限されている。より高次の変調方式を用いるほど、あるいはより小さなガードバンドを用いるほど非線形効果の影響を受けやすく、伝送可能な距離が短縮されるという特性を持つ。すなわち、伝送距離と伝送容量の間には光ファイバが持つ非線形な伝送特性によってトレードオフの関係を課せられているといえる。このため、大容量かつ長距離なネットワークを構築するためには光ファイバの非線形効果に起因する信号歪みに対処することが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では伝送システムに内在する信号劣化要因に対処することで、フォトニックネットワークにおける最大伝送容量および最長伝送距離の限界を追究する。これらに上界を定める主要因は光ファイバの非線形な伝送特性である。光電界が光ファイバを伝搬することで、光電界の強度に応じた屈折率変化が生じ、結果として非線形な位相変動が起こるのである。これまでファイバ非線形効果によって生じた信号劣化を補償するために、デジタル逆伝搬法が広く研究されてきた。しかし、本手法では線形処理と非線形処理を繰り返すため、莫大な計算資源を必要とする

という問題がある。計算コストを低減する研究も多く報告されているが、その効果は計算コストとのトレードオフの関係にあるといえる。このため、その有用性を保持したまま実用システムに導入することは困難である。また、ファイバ伝送路の物理的特性に関する詳細な情報が事前に必要であるため、将来期待される動的制御を含むフォトニックネットワークへの適用には不向きであるという問題も挙げられる。

本研究では、上記の問題を解決する新たな光ファイバ非線形効果への対抗技術を提案し、大容量および長距離という二つの要素を両立したネットワークを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

伝送容量の増大及び伝送距離の延伸を同時に達成するためには、光ファイバの非線形性に由来する信号劣化に対処することが必要不可欠である。本研究では機械学習を用いた新たな複素信号判定方式を提案し、その効果を計算機シミュレーションによって示した。

本提案手法では、期待される信号および伝送後の信号のセットを用いて、これらを相互比較して学習する。これにより、ファイバ非線形効果に適應した信号判定基準を生成し、それに基づき複素信号のラベル判定を行う。このような機械学習手法を用いた複素信号のラベル判定は、学習用信号が光ファイバを伝送することによって得られた実際に歪んだ複素振幅を用いてラベル境界を構築する。このため、信号が現実を受けた非線形な歪みを反映させながら複素振幅ラベルを判定することができる。学習用信号の受信によって識別精度の高い実用的な複素振幅ラベル判定境界を構築するためには、学習データを誤りなく収集することが不可欠である。しかしながら、現実の送受信システムでは、送信側および受信側におけるレーザ光源の位相不安定性が原因で、サイクルスリップと呼ばれる、確率的に本来の受信複素振幅の位相にオフセットが加わった状態で複素振幅値を検出してしまう現象が発生する。サイクルスリップの本質的な原因は、レーザの出力光電界位相の時間的不安定性にある。このレーザ光源自体が持つ位相不安定性と、伝送路による信号劣化、変調方式、位相推定回路の特性が相まってサイクルスリップが生じる。この現象の発生する時間間隔は、1 シンボルに相当する数十ピコ秒から 秒と、一切予測することはできない。サイクルスリップが一旦発生すると、以降の受信複素振幅にも同様にオフセットが加わった形で複素振幅値が検出されてしまう。その結果、誤った学習データを含んだ学習データセットに基づいて複素振幅ラベル判定境界が構築されてしまう。これを避けるためには、サイクルスリップ検出器および訂正器を、機械学習による学習過程に

取り入れなければならない。

本研究ではサイクルスリップ検出器・訂正器を含む、機械学習に基づくシンボル判定器を提案し、その有効性を計算機シミュレーションによって確認した。機械学習には様々なアルゴリズムが存在するが、現在最も判別能力の高いとされるサポートベクターマシンを用いた。ただし、本研究結果が示す手法はサポートベクターマシンに限定されるものではなく、多くの機械学習アルゴリズムに広く適用できるものである。本提案手法は、回転対称にあるシンボルを同一のグループとし、同一グループに属する過去に受信した信号の平均と現在受信した信号の差動位相を監視することで、サイクルスリップおよびその大きさを認識する。このため、学習中にサイクルスリップが生じたとしても、サイクルスリップを適切に検出し、また信号に生じた位相誤差を補正することで、正しい学習データを収集することが可能となる。

4. 研究成果

図1に16QAM信号を例として構築されたシンボル判定境界を示す。提案手法では、受信信号の分布に従って、16の領域を生成するように信号判定境界が構築されていることがわかる。一方、従来手法では、学習データが含むサイクルスリップに全く対処できておらず、受信信号の分布とは異なる信号判定境界が構築されている。このような歪んだ信号判定基準を用いれば、伝送特性が劣化は避けられない。

図2に、レーザ線幅に対するビット誤り率の安定性を示す。ここで、異なるビット列で100回の計算を行い、100回の計算の中での最小、平均、最大のビット誤り率を示している。提案手法を用いた場合ではビット誤り率は安定しているのに対し、従来手法ではビット誤り率が不安定であることがわかる。このように、位相が不安定な光ファイバ通信システムに機械学習を導入するためには、サイクルスリップ現象への対策が必要不可欠であることがわかる。

図3にビット誤り率と伝送可能スパン数(距離)の関係の一例を示す。ここで、Squareは機械学習を用いない場合の特性を示している。また、M-ary, One-against-all, One-against-oneは機械学習の手法を示している。いずれの場合も、機械学習による信号判定を用いることで、伝送可能距離を延伸していることが確認できる。

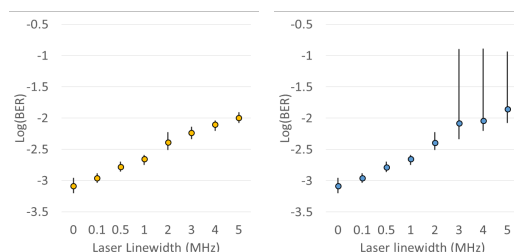
このように、提案構成を用いることで、機械学習によるシンボル判定を、光ファイバ通信のように位相が不安定なシステムにも、安定に導入可能であることを示した。提案手法は歪みに適応した信号判定境界を構築することでビット誤り率を低減する。結果として、伝送容量を減らすことなく長距離化を達成するという当初の目的が達成されるのである。また、本手法は受信信号の歪みから最適

な信号判定基準を算出するため、伝送路の種々の物理的特性に関する情報を一切必要としていない。このため、光パスが時間的に変化する動的ネットワークにも容易に導入可能である。さらに、光ファイバの非線形効果だけでなく、様々な信号歪みに同時に対応可能である。このような機械学習による信号判定技術は、将来の大容量かつ長距離なフォトニックネットワークの構築の主要技術となることが大いに期待される。



(a)提案手法 (b)従来手法 (c)受信信号

図1 サイクルスリップが発生した場合に構築されたシンボル境界及び受信信号の一例。



(a)提案手法 (b)従来手法

図2 レーザ線幅に対するビット誤り率の安定性。100回の計算を行い、ビット誤り率の最小、平均、最大値を示している。

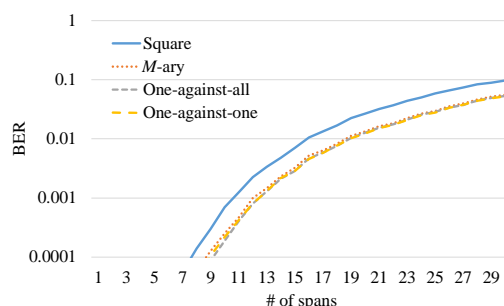


図3 ビット誤り率および伝送スパン数の関係。1スパンは80kmの伝送距離に相当する。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計1件)

Hiroshi Kawase, Yojiro Mori, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato, "Cycle-Slip-Tolerant Decision-Boundary Creation with Machine Learning," IEEE International Conference on Photonics, March 14-16, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：光受信装置及び光受信装置における光
シンボルラベル識別法

発明者：森洋二郎，佐藤健一，長谷川浩，川
瀬弘嗣

権利者：同上

種類：特許

番号：2016-048519

出願年月日：2016 年 03 月 11 日

国内外の別： 国内

6．研究組織

(1)研究代表者

森 洋二郎 (MORI, Yojiro)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10722100