

# リザーブ計算を用いた IM-DD 光ファイバ 通信の波長分散及び非線形劣化補償 Compensation of Wavelength Dispersion and Nonlinear Degradation in IM-DD Fiber Optical Communications using Reservoir Computing

1255056 畑 聡之 (光制御・ネットワーク研究室)  
(指導教員 小林 弘和 准教授)

## 1. 研究背景・目的

近年、スマートフォンなどの通信機器の急速な普及により、データセンタ間の IP トラフィックが増加しているため、光通信システムの大容量化が求められている。大容量化するために波長多重や多値化が用いられるが、それにより波長分散や非線形劣化が増大してしまう。この信号劣化をニューラルネットワークを用いて補償する手法が近年注目されている。本研究ではニューラルネットワークの一種であり、高計算機能、低計算コストの両立が期待されるリザーブ計算を用いた信号劣化補償を目的として強度変調・直接検波(Intensity Modulation - Direct Detection (IM-DD))伝送システムにおけるシミュレーションを行った。

## 2. リザーブ計算

リザーブ計算はリカレントニューラルネットワーク(RNN)の一種であり、リカレント層内のノード間で前時刻のノード状態が引き継がれるため、時系列入力にも対応できる。また一般的な RNN と異なり、リカレント層のパラメータの固定したリザーブを非線形変換器として用いて、出力層の線形学習機のみでパターン解析を行う。そのため、計算コストを削減しつつ、非線形な事象にも対応することができる。リザーブ計算の模式図を図 1 に示す[1]。

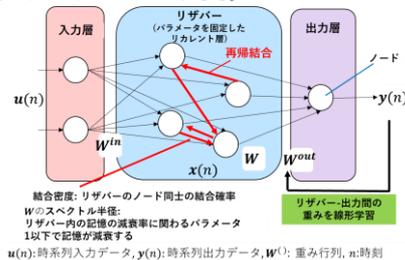


図 1 リザーブ計算の模式図

## 3. シミュレーション内容

IM-DD 伝送システムにおける 2 値の強度変調(PAM2)及び、4 値の強度変調(PAM4)の送信信号の生成、伝送路における信号劣化、リザーブ計算を用いた劣化の補償、ビット誤り率(BER)の評価を行った。IM-DD 伝送により加わる波長分散及び、非線形劣化はスプリットステップフーリエ法を用いて計算した[2]。シミュレーションの全体像を図 2 に示す。

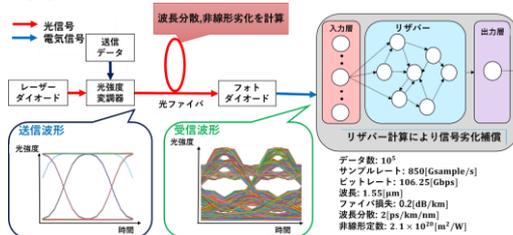


図 2 シミュレーションの全体像

リザーブ計算では非線形変換器であるリザーブで非線形変換し出力層で線形学習を行うため、補償精度を高めるためにはリザーブのハイパーパラメータは調整するを行った。送信波形は 1 ビットあたり 8 点で表現しているため、受信データを 8 点ごとに入力層(入力層数: 8)に入れ、1 ビットごとの送信データを教師データとして出力層(出力層数: 1)の重みを学習させた。その後学習済みモデルを用いて、評価用データである別の受信データを補償した。

## 4. シミュレーション結果

### 4.1 波長分散補償

IM-DD 伝送システムで波長分散のみを考慮した場合、PAM2 及び PAM4 での受信信号のリザーブ計算による信号劣化補償を行った。ここでは PAM2 のシミュレーション結果を示す。補償前と補償後の BER を図 3 に示す。リザーブのパラメータはノード数 800、スペクトル半径を 1.2、結合密度を 0.75 とした。前方誤り訂正(FEC)で訂正可能な BER $10^{-3}$ 以下で伝送できる距離が PAM2 では 7km10km から 16km、PAM4 では 2km から 7km10km から 16km まで伸ばすことができた。

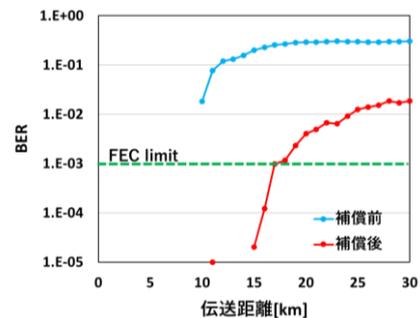


図 3 PAM2 における波長分散補償結果

### 4.2 非線形劣化補償

伝送距離を 9.3km とし、4.1 のシミュレーションに非線形光学効果と熱分散を加えた場合のリザーブ計算による信号劣化補償を行った。補償前と補償後の BER を図 3 に示す。低入力光電力時には熱雑音の影響により、高入力光電力時には非線形光学効果の影響で BER が悪化し、非線形劣化に対しても補償効果があることが確認できた。

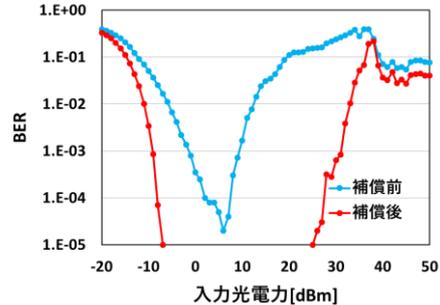


図 4 PAM2 及び PAM4 における波長分散補償結果

## 5. まとめ

IM-DD 伝送システムにおける PAM2 及び PAM4 で発生する波長分散及び非線形劣化をリザーブ計算を用いて補償することができた。それにより、伝送距離及び入力光電力の増大への効果があることが確認できた。

## 参考文献

[1] 田中 剛平, 中根 了昌, 廣瀬 明, ‘リザーブコンピューティング 時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア’, 森北出版, 2021, pp70-79.  
[2] Oleg V. Sinkin, Member, IEEE, Ronald Holzlohner, Student Member, IEEE, John Zweck, and Curtis R. Menyuk, Fellow, IEEE, Fellow, OSA, ‘Optimization of the Split-Step Fourier Method in Modeling Optical-Fiber Communications Systems’, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 21, 2003, pp61-62