

光ファイバ通信用非線形イコライザ応用のための光リザーバ拡張技術

研究代表者

中村 守里也

明治大学 理工学部 専任准教授

1 はじめに

デジタルコヒーレント受信技術の実用化により、波形歪みをデジタル信号処理で補償することが一般的に行われるようになった。波形歪みは波長分散のような線形歪みと、自己位相変調や相互位相変調などの非線形歪みがある。線形歪みはFIRフィルタに代表される線形イコライザにより補償することができる。それに対して非線形歪みは、デジタルバックプロパゲーションやボルテラフィルタといった手法によって補償することができるが、計算量が膨大になるという欠点があった[1, 2]。これに対し、ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network (ANN)) による非線形イコライザを用いることで、非線形補償に必要な計算量を削減する方法が検討されている[3, 4]。また、リカレント型 ANN を応用した機械学習モデルであるリザーバコンピューティング (RC) に基づく非線形イコライザを用いる方法の検討も行われている[5, 6]。RC は、一定の時間内部にデータを蓄えることで時系列のデータを処理する能力を持つことや、出力層の重みのみを更新するため学習が高速であるといった特徴を持つ[7]。また、光デバイスによる RC の実装が検討されており、高速で低消費電力な非線形処理を実現することが期待されている[8, 9]。しかし、光デバイスによる RC の実装では、リザーバの大規模化や時定数の長大化が難しいという問題が生じている。これに対し、小規模のリザーバを複数接続することによって大規模な RC を実現する方法が検討されている[10]。また、入力層に遅延タップを用いることで RC の時定数を長大化する方法も検討されている[11-13]。しかし、遅延タップを長くすることにより RC の特性が徐々に悪化してしまうことも明らかになっている[14]。今回我々は、上記の問題を解決するため、遅延タップを介して小規模のリザーバを並列に接続する新しい RC の構成を提案し、その特性を数値シミュレーションと実験によって評価し良好な結果を得たので報告する。

2 RC による非線形イコライザ

図 1 に RC による非線形イコライザの構成を示す。RC は入力層、リザーバ層、出力層から構成される。ここでは、光ファイバ通信における光学非線形補償に用いることを前提としているため、光信号の IQ 成分を入力層と出力層のユニットを二つずつ用いている。また、RC の大きな特徴として、三層構造の中間層（隠れ層）に当たるリザーバ層のユニットが相互に結合し、リカレント型の ANN を構成していることが挙げられる。このリザーバにより、入力信号が一定時間 RC 内に残存するため、時間的な広がりを持つ入力信号に対して処理を行うことが可能となる。リザーバ層のユニットの出力 h は次のように表される。

$$h(n) = f(w^{in}x(n) + w^{res}h(n-1)) \quad (1)$$

ここで、 $f(u) = \tanh(u)$ はリザーバ層ユニットの活性化関数である。 w^{in} は入力層とリザーバ層の間の重みベクトル、 w^{res} はリザーバ層ユニット間の重みを表す重みベクトル、 x は入力層への入力、 n は時間インデックスである。このとき、 h が発振しないように w^{res} をエコーステートプロパティ (ESP) を満たすようにスケールリングする必要がある。ESP は、スペクトル半径 $\rho(w^{res})$ を用いて次のように表される。

$$\rho(w^{res}) = \max(|\lambda|) < 1 \quad (2)$$

ここで、 $\max(|\lambda|)$ は w^{res} の固有値の絶対値の最大値である。出力層の出力 y は次のように表される。

$$y(n) = w^{out}h(n) \quad (3)$$

ここで、 w^{out} はリザーバ層と出力層間の重みベクトルである。学習時に用いられる誤差関数 e は次のように表される。

$$e = \frac{1}{2} \{y(n-k) - t(n-k)\}^2 \quad (4)$$

ここで、 t は教師信号で、 k は受信信号と教師信号の時間シフトを表し、受信信号が RC で処理された後、 k の時間だけ遅延して出力されることを表現している。学習には LMS アルゴリズムを用い、誤差関数 e を最小化するように W^{out} のみを更新する。

図 2 は、光ファイバ伝送後の波形歪みの影響を示している。光信号が光ファイバを伝搬すると、波長分散等により波形が時間方向に広がり、時間的に隣接する前後両側の信号から影響を受けることになる。これは、シンボル間干渉 (ISI) と呼ばれ、伝送後の信号に歪みを生じさせる。このような ISI が生じた信号を補償するためには前後のシンボル情報が必要になる。図 3 に示すような FIR フィルタを用いて波形歪みを補償する場合、遅延タップは前後の影響を受けるシンボルを保持する長さが必要であり、時間シフト k は遅延タップ長の半分に設定される場合が多い。これと同様の考えにより、RC で非線形イコライザを構成する場合においても、リザーバに保持されるデータの長さ (RC の時定数) と時間シフト k の値に注意する必要があると考えられる。

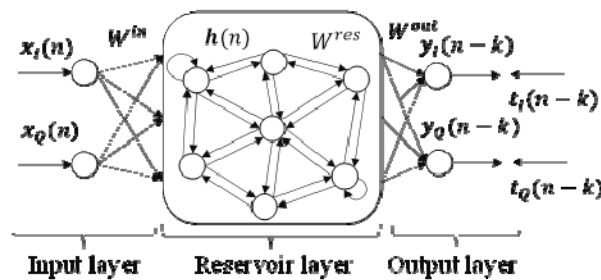


図 1. RC による非線形イコライザの構成

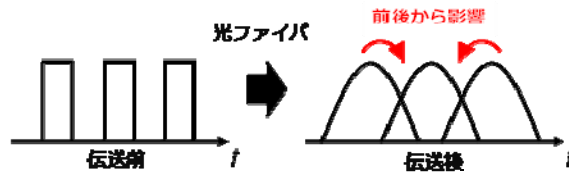


図 2. 光ファイバ伝送における波形歪み

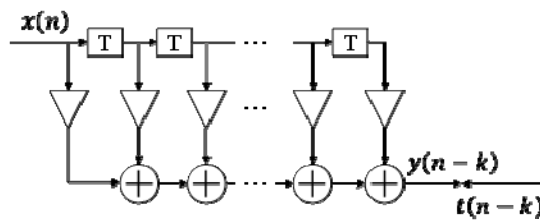


図 3. FIR フィルタと教師信号の時間シフト

3 遅延タップを介した RC の大規模化

RC の時定数を大きくしてリザーバ内に保持できるデータ量を増加させるためには、式(2)におけるスペクトル半径を大きくする必要がある。しかし、スペクトル半径の大きさには制限があり、また大きくし過ぎるとリザーバの動作が不安定になり発振する危険もある[6, 7]。これに対し、入力層に遅延タップを用いることで RC のデータ保持量を増大させる方法が検討されている[11-13]。図 4 に、その構成を示す。この構成では一つのリザーバだけを使用しているため、ここでは SIR (Single Reservoir) 構成と呼ぶ。SIR は、自身のリ

ザーバだけではデータ保持力が不足する際に、入力層の遅延タップを長くすることで容易に RC の時定数を大きくすることが可能である。また、遅延タップを光デバイスで実現する方法も検討されている[15]。しかし、リザーバを光デバイスで実装しようとした場合、大規模化が難しいという問題がある。これに対し、小型のリザーバを複数接続することで大型のリザーバを実現する方法が検討されている[10]。図 5 は、SIR のリザーバを並列化して大型化した構成である。ここでは、これを PMR (Parallel Multi-Reservoirs) 構成と呼ぶ。この構成では、一つのリザーバの規模が制限されている場合でも、それを複数並列接続することにより大きなリザーバを実現することができる。しかし、SIR や PMR の構成では、遅延タップ数を増やしていくと、RC の特性が悪化してしまうことが指摘されている[14]。これは、必要以上に遅延タップが長いと、リザーバ内で不要な時間の入力信号が混ざり合い、出力で所望の信号を抜き出すことが困難になると理解することができる。そこで我々は、これらの問題を解決する方法として、図 6 に示す SMR (Split-input Multi-Reservoirs) 構成を提案する[16]。この構成では、遅延タップを介した入力信号が時間方向に分離されて、別々に小型のリザーバへ入力されるため、異なる時間の信号が過度にリザーバ層内で混ざり合うことを制限することができる。また、不要な時間のタップの信号は、学習時に出力層において切り離されるため、出力への影響を抑えることが可能となる。

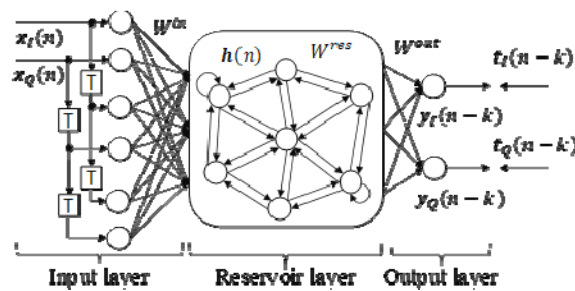


図 4. SIR(Single Reservoir)構成

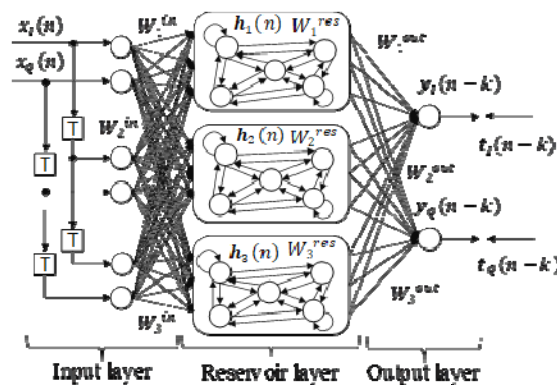


図 5. PMR(Parallel Multi-Reservoirs)構成

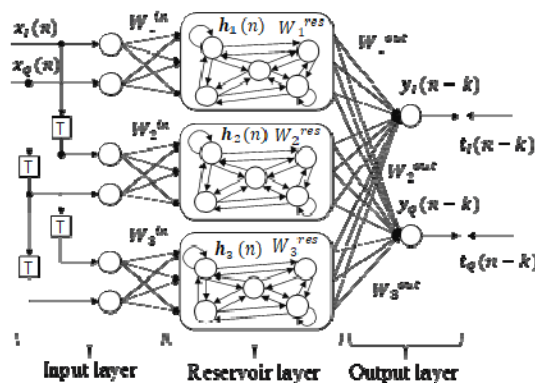


図 6. SMR(Split-input Multi-Reservoirs)構成

4 インパルス応答と遅延特性の評価

RC が保持できるデータの時間的な長さは、そのインパルス応答を測定することで評価することが可能である。ただし、シミュレーションの場合には、計算機の精度が続く限り無限に応答が続いてしまう。ここでは一つの目安として、図 7 に示すように、インパルス応答が 1 つ目の応答の振幅から $1/100$ 以下になるまでの時間を“応答インパルス数”と定義し、以降の議論に用いることとする。図 8 に、スペクトル半径に対する応答インパルス数の変化を各構成について示す。このとき、SIR のリザーバ層ユニット数は 300 であり、遅延タップ数が 9 の場合の PMR と SMR は 33 ユニット×9 並列となっている。RC の結合重みをランダムに変化させて 10 回試行し、平均値をプロットしている。エラーバーは標準偏差を示している。スペクトル半径が大きくなるほど多くの信号を RC に保持できるようになる一方で、インパルス応答長のぶれが大きくなり、RC の動作が不安定になっていることがわかる。遅延タップ数が 9 のときの SIR を見ると、遅延タップ数の分だけ縦にグラフが平行移動しており、小さいスペクトル半径でも多くの信号を保持することが可能となることが確認できる[11-13]。また、9 タップの PMR と SMR の場合においても、SIR と同様のインパルス応答長を実現できることが確認できた。

次に RC の遅延特性について考える。RC をイコライザとして用いるためには、上記で説明したように FIR フィルタの場合と同様、信号を遅延させて動作させることが必要な場合がある。そのため、入力信号をそのままの形でどれだけの時間遅延させられるかは、イコライザとして重要な特性になる。図 9 に遅延特性の評価方法を示す。無限長の $[0, 1]$ バイナリ信号をランダムに生成し、RC へ入力した。教師信号は k シンボル遅延させた入力信号とし、RC を k シンボル単純に遅延させる遅延器として機能するように学習させた。このとき、出力信号と教師信号との誤差を EVM で評価した。図 10(a)-(d) に遅延タップ数を 3、5、7、9 と変化した場合の各構成の遅延量に対する EVM 特性を示す。スペクトル半径 (SR) は、0.1、0.5、0.9 と変化した。このとき、SIR のリザーバ層ユニット数は遅延タップ数によらず、300 ユニットとした。PMR と SMR のリ

ザーバ層ユニット数は、遅延タップ数が 3 の場合、100 ユニット×3 並列、遅延タップ数が 5 の場合、60 ユニット×5 並列、遅延タップ数が 7 の場合、42 ユニット×7 並列、遅延タップ数が 9 の場合 33 ユニット×9 並列となっている。遅延タップを増やすことによって、遅延を大きくかけた場合に対しても EVM の急激な劣化を抑えることが可能となる[11-13]。しかし、SIR と PMR では、タップ数が増加するにつれて、EVM 特性が全体的に劣化していることが確認できる。これは遅延タップ数が増加することによって、不要な時間のタップからの入力信号がリザーバで混ざり合い、出力側から所望の信号を抜き出せなくなっていると考えられる。これに対し、提案する SMR では、遅延タップ数を増加させても EVM が劣化することなく信号を遅延させることに成功している。これは、遅延タップを介した入力信号が時間方向に分離されているため、リザーバ層での過度な混ざり合いを防いでいるのに加え、不要な時間の信号を学習によって切り離しているためだと考えられる。これらの結果から、SMR は、時定数自体は SIR や PMR と変わらないが、データを遅延させイコライザとして動作させる際には、より良好な特性を得られると言える。

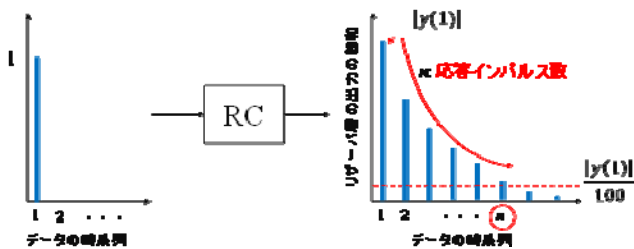


図 7. RC のインパルス応答長の定義

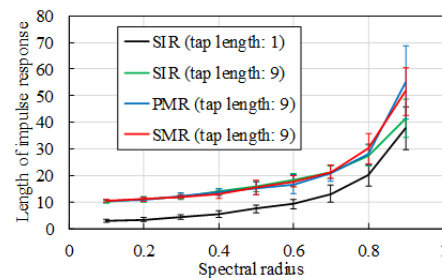


図 8. 各構成のスペクトル半径に対する応答インパルス数の変化

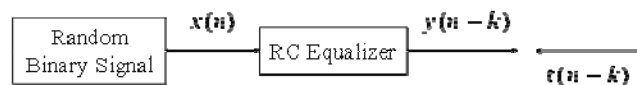
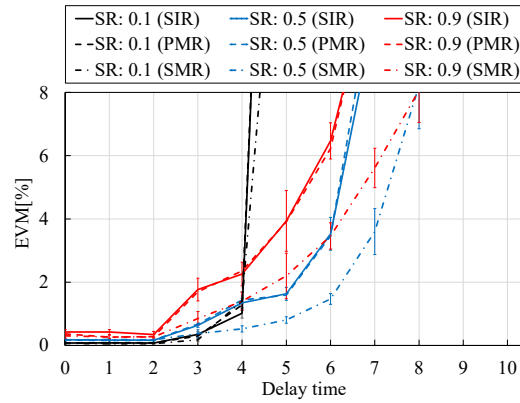
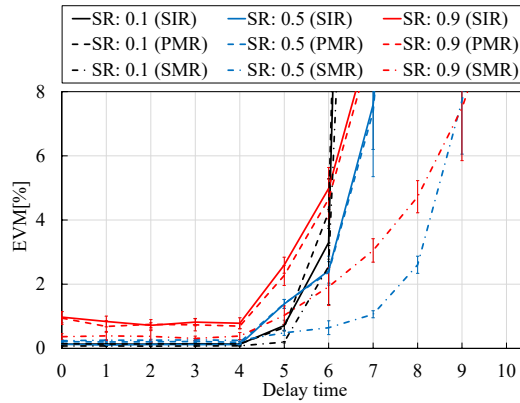


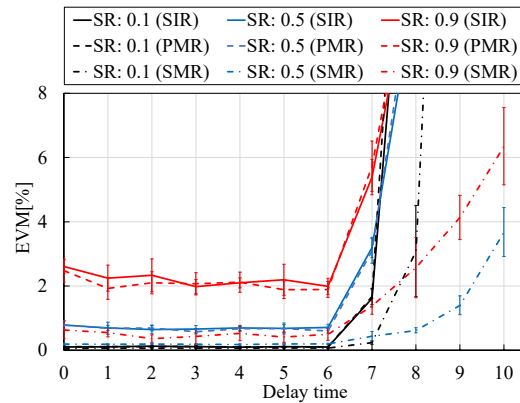
図 9. 遅延特性の評価方法



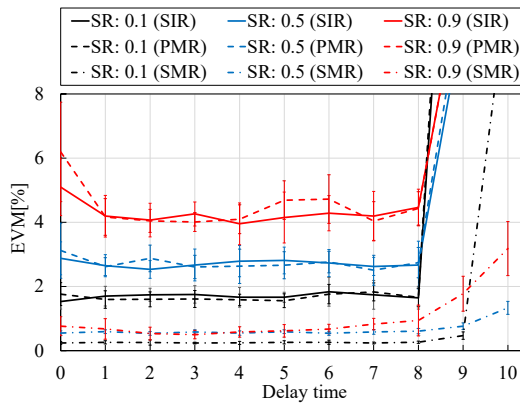
(a) 遅延タップ数: 3



(b) 遅延タップ数: 5



(c) 遅延タップ数: 7



(d) 遅延タップ数: 9

図 10. 遅延量に対する EVM 特性 (SR : スペクトル半径)

5 光ファイバ伝送における光学非線形補償の実験

図 11 は、シミュレーション及び実験に用いた 16QAM 光ファイバ伝送システムの構成である。10 GSymbol/s の 16QAM 信号をスタンダードシングルモードファイバ (SSMF) で伝送させ、ディジタルコヒーレント受信を行い、DSP 内で歪み補償を行った。SSMF への光入力パワーは、非線形歪みを生じさせるために 12.5 dBm と大きく設定した。

まずシミュレーションにおいては、伝送距離を 20、50、100 km と変化させ、受信パワーは光アッテネータ (ATT) により -10 dBm で一定とした。伝送データは無限長ランダム信号を用いた。図 12 に、受信信号を SIR、PMR、SMR 各構成の RC で非線形補償を行った場合の、伝送距離に対する EVM 特性を示す。このとき、どの構成も遅延タップ数は 3 であり、SIR のリザーバ層ユニット数は 300 ユニット、PMR と SMR は 100 ユニット×3 並列となっている。SIR と PMR では、どの伝送距離においても有意な特性の差は見られなかったが、SMR では 2% を超える EVM の改善が達成されている。図 13(a)–(d) に 20 km 伝送時の補償前と SIR、PMR、SMR 各構成の RC による歪み補償後のコンスタレーションをそれぞれ示す。SMR 構成を用いることで、良好な歪み補償性能が実現されていることが確認できる。図 14(a)–(d) は、100 km 伝送時の補償前と SIR、PMR、SMR 各構成の RC による歪み補償後のコンスタレーションである。100 km 伝送の場合、補償後のコンスタレーションに分散の影響が残ってしまっている。これはリザーバのユニット数が不足しているためであり、ユニット数をより大きくすることで良好な補償性能を実現することが可能である。分散が大きい環境では、必要なリザーバユニット数が極端に大きくなってしまふことが知られており、これに対しては、RC を用いる前に、線形イコライザで分散補償の前処理をする方法が検討されている [17]。

次に、20km の伝送実験を行った。図 15(a)–(d) に、補償前と SIR、PMR、SMR 各構成の RC による歪み補償後のコンスタレーションを示す。実験では、図 11 の伝送システムの OBPF1 は使っていない。SSMF への入力パワーは 12.5 dBm で、受信パワーは -22 dBm となっており、伝送データは PRBS²¹⁵⁻¹ である。実験においても、SMR 構成を用いることで最も良好な EVM 特性が実現できることを確認した。

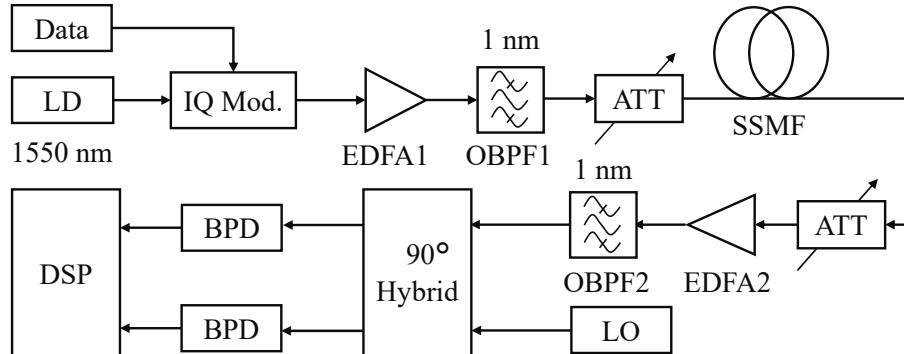


図 11. 16QAM 光ファイバ伝送システムの構成

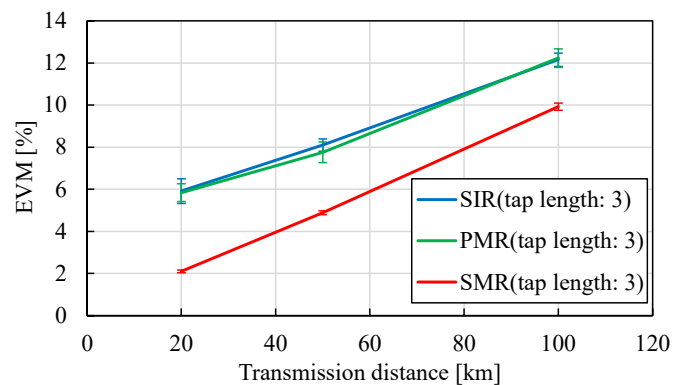


図 12. 各構成の伝送距離に対する EVM 特性

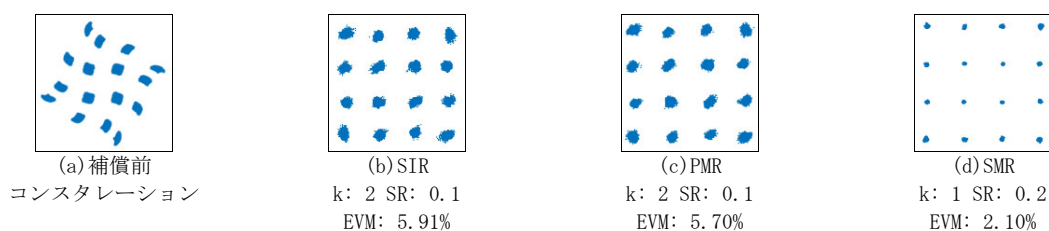


図 13. 20 km 伝送後のコンスタレーション
(シミュレーション、 k : 教師信号の時間シフト量、SR: スペクトル半径)

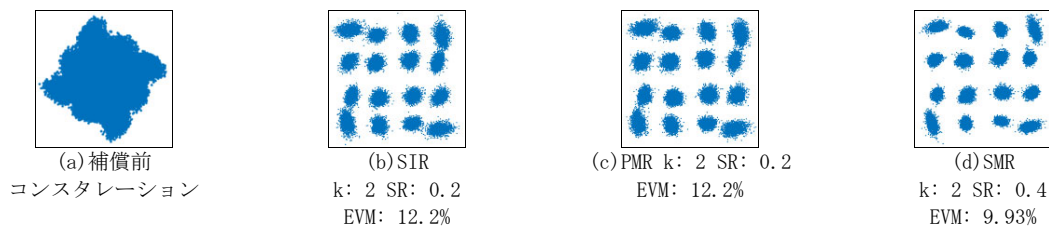


図 14. 100 km 伝送後のコンスタレーション (シミュレーション、 k : 教師信号の時間シフト量、SR: スペクトル半径)

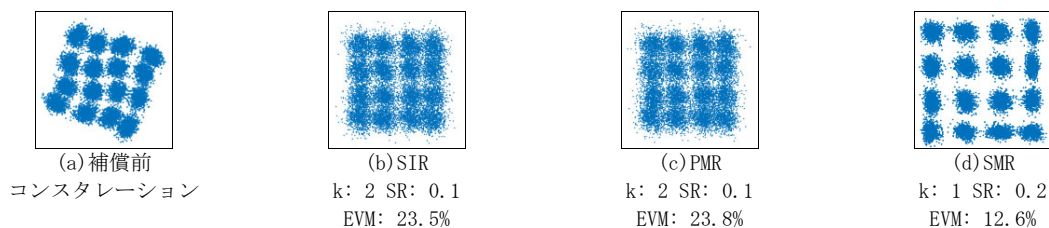


図 15. コンスタレーション (実験、 k : 教師信号の時間シフト量、SR: スペクトル半径)

6 まとめ

遅延タップを介した新しい RC の大規模化の方法として SMR 構成を提案した。インパルス応答による信号保持量の評価、遅延特性の評価、そして光ファイバ伝送に用いるイコライザとしての特性をシミュレーションと実験により評価した。SMR を用いて良好な特性が得られた一方で、分散補償には多くのユニットが必要となるため、周波数領域による分散の前処理などを検討する必要がある。

【参考文献】

- [1] E. Ip and J. M. Kahn, "Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation," J. Lightw. Technol., vol. 26, no. 20, pp. 3416-3425, Oct. 2008.
- [2] L. Liu, L. Li, Y. Huang, K. Cui, Q. Xiong, F. N. Hauske, C. Xie, and Y. Cai, "Intrachannel nonlinearity compensation by inverse Volterra series transfer function," J. Lightw. Technol., vol. 30, no. 3, pp. 310-316, Feb. 2012.
- [3] M. A. Jarajreh, E. Giacomidis, I. Aldaya, S. T. Le, A. Tsokanos, Z. Ghassemlooy, and N. J. Doran, "Artificial neural network nonlinear equalizer for coherent optical OFDM," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 27, no. 4, pp. 387-390, Feb. 2015.
- [4] S. Owaki, Y. Fukumoto, T. Sakamoto, N. Yamamoto, and M. Nakamura, "Experimental demonstration of SPM compensation based on digital signal processing using a three-layer

- neural-network for 40-Gbit/s optical 16QAM signal,” IEICE Commun. Express, vol. 7, no. 1, pp. 13-18, Jan. 2018.
- [5] F. D. Ros, S. M. Ranzini, H. Bülow, and D. Zibar, “Reservoir-computing based equalization with optical pre-processing for short-reach optical transmission,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 26, no. 5, Art no. 7701912, Sep./Oct. 2020.
 - [6] K. Ikuta, Y. Ito, T. Sakamoto, N. Yamamoto, and M. Nakamura, “Fiber nonlinearity compensation using nonlinear equalizer based on complex-valued reservoir computing,” IEICE Trans. Commun., vol. E108-B, no. 3, pp. 250-259, Mar. 2025.
 - [7] H. Jaeger, “The “echo state” approach to analysing and training recurrent neural networks,” Technical Report 148, German National Research Center for Information Technology, Dec. 2001.
 - [8] S. Sackesyn, C. Ma, J. Dambre, and P. Bienstman, “Experimental realization of integrated photonic reservoir computing for nonlinear fiber distortion compensation,” Opt. Express, vol. 29, no. 20, pp. 30991-30997, Sep. 2021.
 - [9] M. Sorokina, S. Sergeyev, and S. Turitsyn, “Fiber echo state network analogue for high-bandwidth dual-quadrature signal processing,” Opt. Express, vol. 27, no. 3, pp. 2387-2395, Feb. 2019.
 - [10] H. Hasegawa, K. Kanno, and A. Uchida, “Parallel and deep reservoir computing using semiconductor lasers with optical feedback,” Nanophotonics, vol. 12, no. 5 pp. 869-881, Oct. 2022.
 - [11] L. Jaurigue, E. Robertson, J. Wolters, and K. Lüdge, “Reservoir computing with delayed input for fast and easy optimization,” Entropy, vol. 23, no. 12, Art no. 1560, pp. 1-13, Nov. 2021.
 - [12] Y. Osadchuk, O. Jovanovic, D. Zibar, and F.D. Ros, “Reservoir computing-based multi-symbol equalization for PAM 4 short-reach transmission,” Proc. Conf. Lasers Electro-Opt., STu4G.3, May 2023.
 - [13] K. Ikuta, Y. Ito, and M. Nakamura, “Optical nonlinearity mitigation using reservoir computing with tapped -delay lines,” IEICE Commun. Express, vol. 13, no. 9, pp. 384-388, Sep. 2024.
 - [14] T. Yamada, K. Ikuta, Y. Ito, S. Shimomura, T. Yamamoto, S. Uchide, and M. Nakamura, “Delay characteristics of reservoir-computing-based nonlinear equalizer with tapped delay line for optical nonlinearity compensation,” OECC2025, WP-B-9, Jun. 2025.
 - [15] S. Khaleghi, O. F. Yilmaz, M. R. Chitgarha, M. Tur, N. Ahmed, S. R. Nuccio, I. M. Fazal, X. Wu, M. W. Haney, C. Langrock, M. M. Fejer, and A. E. Willner, “High-speed correlation and equalization using a continuously tunable all-optical tapped delay line,” IEEE Photon. J., vol. 4, no. 4, pp. 1220–1235, Aug. 2012.
 - [16] S. Shimomura, K. Ikuta, Y. Ito T. Yamada, T. Yamamoto, S. Uchide, and M. Nakamura, “Scalable reservoir computing connected via tapped delay lines and its application to nonlinear equalization in optical transmission systems,” OECC2025, WP-G-9, Jun. 2025.
 - [17] S. Uchide, S. Shimomura, T. Yamamoto, T. Yamada, Y. Ito, K. Ikuta, T. Sakamoto, N. Yamamoto, and M. Nakamura, “Dispersion Compensation Characteristics of Equalizers Using Complex-Valued Reservoir Computing for Optical Fiber Transmission,” OECC2025, WP-B-20, Jun. 2025.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Nonlinearity compensation for optical SSB transmission using frequency domain artificial neural networks	2026 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2026, Honolulu, Hawaii)	Feb. 2026
Delay characteristics of sparsified reservoir computing for fiber-optic nonlinearity mitigation	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Overfitting suppression in ANN-based fiber-nonlinearity mitigation via L1 and L2 regularization	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Nonlinearity compensation in optical SSB transmission using frequency-domain neural networks	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Spectral radius dependence of sparsified complex-valued RC for fiber nonlinearity compensation	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Optical twin-SSB Signal detection using a single Kramers-Kronig receiver	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Activation function effects in complex-valued ANN for OSSB signal nonlinearity compensation	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Scalable complex reservoir computing with tapped delay lines for fiber nonlinearity compensation	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Dispersion preprocessing for fiber nonlinearity compensation using complex reservoir computing	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Transmission-distance dependence of quaternion neural-network equalizers for optical fiber links	2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2025, Osaka, Japan)	Nov. 2025
Experimental demonstration of fiber nonlinearity compensation using scalable reservoir computing connected via tapped delay lines	IEEE Photonics Conference (IPC2025, Singapore)	Nov. 2025
Nonlinearity mitigation in optical fiber transmission using quaternion-valued neural networks: an experimental study	IEEE Photonics Conference (IPC2025, Singapore)	Nov. 2025
Scalable reservoir computing connected via tapped delay lines and its application to nonlinear equalization in optical transmission systems	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025, Sapporo, Japan)	Jun. 2025

Dispersion compensation characteristics of equalizers using complex-valued reservoir computing for optical fiber transmission	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025, Sapporo, Japan)	Jun. 2025
Fast digital coherent detection in optical communications enabled by quaternion operations	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025, Sapporo, Japan)	Jun. 2025
Activation-function-dependent characteristics of complex-valued reservoir-computing-based nonlinear equalizer for fiber-optic nonlinearity compensation	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025, Sapporo, Japan)	Jun. 2025
Delay characteristics of reservoir-computing-based nonlinear equalizer with tapped delay line for optical nonlinearity compensation	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025, Sapporo, Japan)	Jun. 2025
Optical twin-SSB detection scheme using single homodyne receiver and FDE-based digital signal processing	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025, Sapporo, Japan)	Jun. 2025
ChatGPT-assisted programming of split-step Fourier method for research applications in optical fiber communication education	2025 IEEE Conference on Education and Training in Optics and Photonics (ETOP2025, Glasgow, Scotland)	May 2025
光ファイバ光学非線形補償に用いる混合リザーバの基本特性評価	電子情報通信学会総合大会	Mar. 2026
光ファイバ光学非線形歪み補償に用いる Extreme Learning Machine の中間層重み設定の検討	電子情報通信学会総合大会	Mar. 2026
遅延タップを介した相互接続によるリザーバコンピューティングの大規模化と光ファイバ光学非線形補償実験におけるパラメータの最適化	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会（第31回）	Mar. 2026
偏波多重光ファイバ伝送における非線形歪み補償のための四元数ニューラルネットワークの学習特性	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会（第31回）	Mar. 2026
光ファイバ伝送路の光学非線形補償に用いるリザーバコンピューティングの過学習特性と L2 正則化の効果に関する検討	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会（第31回）	Mar. 2026
複素数型リザーバコンピューティングを用いた光ファイバ光学非線形補償におけるユニット数に対するパラメータの最適化に関する検討	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会（第31回）	Mar. 2026

光ファイバ伝送路の光学非線形補償に用いる複素リザーバコンピューティングのスパース化と活性化関数の最適化に関する検討	電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会（第31回）	Mar. 2026
位相共役 Twin-SSB 信号を用いた Kramers-Kronig 受信方式における波形歪み補償能力の検討	電子情報通信学会光通信システムシンポジウム	Dec. 2025
四元数ニューラルネットワークを用いた偏波多重光ファイバ伝送における非線形歪み補償	電子情報通信学会光通信システムシンポジウム	Dec. 2025
複素リザーバコンピューティングを用いた光ファイバ光学非線形補償における分散の影響に関する検討	電子情報通信学会光通信システムシンポジウム	Dec. 2025
遅延タップを介した相互接続によるリザーバコンピューティングの大規模化と光ファイバ光学非線形補償への応用	電子情報通信学会光通信システム研究会	Oct. 2025
四元数演算を用いたデジタルコヒーレント受信機の高速化に関する検討	電子情報通信学会光通信システム研究会	Oct. 2025
光 Twin-SSB 変調方式における MIMO を用いた位相追尾の検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
ニューラルネットワークを用いた周波数領域等化による SSB 光ファイバ伝送における非線形波形歪み補償の検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
光ファイバ伝送路の光学非線形補償に用いる複素リザーバコンピューティングのスパース化の最適設計に関する一検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
光ファイバ伝送路の光学非線形補償に用いるディープニューラルネットワークの過学習特性と L2 正則化による抑圧効果の検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
非線形イコライザを用いた光 Twin-SSB 信号の波形歪み補償の検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
複素リザーバコンピューティングを用いた光ファイバ光学非線形補償における分散補償前処理の効果についての検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
遅延タップを介した相互接続によるリザーバコンピューティングの大規模化と光ファイバ光学非線形補償の実験	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
四元数ニューラルネットワークを用いた光ファイバ伝送路の光学非線形補償	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2025
ニューラルネットワークによる非線形イコライザを用いた光 Twin-SSB 信号の非線形歪み補償	電子情報通信学会光通信システム研究会	Jun. 2025
光学非線形歪み補償に用いる遅延タップ付きリザーバコンピューティングのインパルス応答と遅延特性	電子情報通信学会光通信システム研究会	Jun. 2025