THIẾT KẾ BỘ CÂN BẰNG DỰA TRÊN ANN CHO HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG CỰ LY NGẮN TỐC ĐỘ CAO

ANN-BASED EQUALIZER FOR HIGH-SPEED SHORT-RANGE OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS

Vương Quang Phước[1,2]*, Đào Duy Tuấn[1], Trần Thị Minh Hạnh[1], Nguyễn Văn Điền[3], Hồ Đức Tâm Linh[2], Nguyễn Văn Tuấn[1], Lê Thái Sơn[4], Nguyễn Tấn Hưng[5]

[1]Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam
[2]Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế, Việt Nam
[3]Trường Đại học FPT, Việt Nam
[4]Nubis Communications, Hoa Kỳ
[5]Viện Khoa học và Công nghệ Tiên tiến - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: vqphuoc@hueuni.edu.vn

(Nhận bài / Received: 18/6/2024; Sửa bài / Revised: 30/7/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 09/9/2024)

Tóm tắt - Kỹ thuật điều chế cường độ/ phát hiện trực tiếp (IM/DD) là phương thức truyền dẫn quang được ưa chuộng cho các ứng dụng tầm ngắn nhờ tính đơn giản, chi phí thấp và kích thước nhỏ gọn. Tuy nhiên, hiện tượng méo tín hiệu gây ra bởi thiết bị giá rẻ và tán sắc của sợi quang dẫn đến hạn chế về hiệu suất hệ thống khi tốc độ dữ liệu tăng lên 100 Gbps hoặc cao hơn. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chứng minh rằng bộ cân bằng dựa trên mạng neuron nhân tạo (ANN) là một giải pháp hiệu quả hơn so với các phương pháp truyền thống để cải thiện hiệu suất truyền dẫn của hệ thống IM/DD tốc độ cao. Hơn nữa, bộ cân bằng dựa trên ANN với độ phức tạp thấp có thể nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống truyền thông PAM4 ở 50 Gbaud. Kết quả mô phỏng cho hệ thống 50 Gbaud sử dụng bộ cân bằng ANN cho thấy kết quả vượt trội hơn trong nhiều trường hợp so với bộ cân bằng (FFE) truyền thống.

Từ khóa - Hệ thống thông tin quang cự ly ngắn; Mạng neuron nhân tạo; Điều chế cường độ/giải điều chế trực tiếp; Bộ cân bằng

Abstract - For short-range applications, the intensity modulation/direct detection (IM/DD) technique is preferred because of its low cost, small size, and simplicity. However, when the data rate rises to 100 Gbps or more, signal distortion brought on by low-cost components and fiber dispersion leads to system performance limitations. In this study, we show that an artificial neural network (ANN) based equalizer is a more efficient way to enhance the transmission performance of high-speed IM/DD systems than traditional methods. Furthermore, a 50 Gbaud PAM4 communication system's overall performance can be improved by an ANN-based equalizer with low complexity. When compared to the conventional feed-forward equalizer (FFE), the simulation results for the 50 Gbaud system using the ANN equalizer generally demonstrate better performance.

Key words - Short-reach Optical Communication System; ANN; IM/DD; Equalizer

1. Mở đầu

Nhu cầu dữ liệu ngày càng tăng đang gây áp lực lớn lên dung lượng mạng quang. Nguyên nhân chính là sự gia tăng mạnh mẽ của các ứng dụng dựa trên internet như điện toán đám mây, dịch vụ video theo yêu cầu, triển khai 5G và các công nghệ phát triển khác. Để đáp ứng các yêu cầu cụ thể, các nhà nghiên cứu đã nghiên cứu kỹ lưỡng các hệ thống thông tin quang cự ly ngắn cho các ứng dụng như kết nối trung tâm dữ liệu (data center interconnect – DCI), 5G fronthaul, mạng truy cập quang, v.v [1]. Tuy nhiên, tăng tốc độ truyền dẫn luôn là mục tiêu hàng đầu, một số tiêu chuẩn mới, như NG-PON2 [2] và High Speed PON [3], chỉ cho phép tốc độ lên đến 40 hoặc 50 Gbps mỗi bước sóng. Do đó, lĩnh vực truyền dẫn 100G+ trở nên khá hấp dẫn trong bối cảnh nhu cầu hiện tại phát triển nhanh chóng.

Vì các hệ thống thông tin quang cự ly ngắn được triển khai với quy mô lớn, chi phí và độ phức tạp được coi là những yếu tố quan trọng, trái ngược với truyền dẫn đường dài. Phương pháp phù hợp nhất để đạt được các yếu tố trên là sử dụng kỹ thuật điều chế cường độ trực tiếp với giải điều chế trực tiếp thay vì tách sóng Coherence [4]. Tuy nhiên, việc tăng tốc độ truyền dẫn là thách thức đối với các hệ thống thông tin quang IM/DD truyền thống, vốn sử dụng định dạng điều chế bật-tắt truyền thống (on-off keying – OOK). Do đó, một số định dạng điều chế tiên tiến được sử dụng để giảm băng thông và tăng hiệu quả phổ (spectral efficiency – SE) cho các thành phần điện tử và quang học. Xét về độ phức tạp khi triển khai và mức tiêu thụ năng lượng, PAM4 là định dạng hấp dẫn nhất cho các hệ thống thông tin quang cự ly ngắn [5]. So với điều chế OOK, PAM4 cho phép tốc độ dữ liệu tăng gấp đôi khi truyền dẫn ở cùng tốc độ baud.

Bên cạnh các ưu điểm, PAM4 dễ gặp lỗi hệ thống và yêu cầu tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu quang (optical signal to noise ratio – OSNR) cao hơn. Hệ thống PAM4 có cả các suy giảm tuyến tính và phi tuyến, như tán sắc, băng thông hạn chế, phi tuyến của thiết bị, v.v., gây ra hiện tượng giao

[1] The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Vuong Quang Phuoc, Dao Duy Tuan, Tran Thi Minh Hanh, Nguyen Van Tuan)
[2] Hue University - University of Sciences, Vietnam (Vuong Quang Phuoc, Ho Duc Tam Linh)
[3] FPT University, Vietnam (Nguyen Van Dien)
[4] Nubis Communications, USA (Le Thai Son)
[5] The University of Danang - Advanced Institute of Science and Technology, Vietnam (Nguyen Tan Hung)

thoa liên ký tự (inter-symbol interference – ISI) nghiêm trọng và tăng tỷ lệ lỗi bit (bit error ratio – BER) của hệ thống. Để khắc phục những thách thức này, xử lý tín hiệu số (digital signal processing – DSP) là rất quan trọng trong việc bù đắp các khiếm khuyết này. Các kỹ thuật cân bằng tiên tiến là giải pháp tối ưu để cải thiện hiệu suất của các liên kết IM/DD [6]. Thông thường, các hệ thống IM/DD sử dụng bộ cân bằng FFE nhằm hạn chế nhiễu ISI và cân bằng kênh, tuy nhiên FFE chỉ bù méo được cho một số hiện tượng méo tuyến tính. Một tồn tại của FFE là không thể xử lý được hiện tượng suy giảm công suất gây ra bởi sự tương tác của tán sắc và giải điều chế trực tiếp. Bộ cân bằng DFE đã được nghiên cứu và khai thác nhằm giải quyết vấn đề trên, nhược điểm là DFE dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu, và không hiệu quả đối với tín hiệu bị ảnh hưởng bởi méo phi tuyến. Để bù méo tín hiệu phi tuyến, các bộ cân bằng Volterra đã được nghiên cứu, tuy nhiên độ phức tạp cao đã hạn chế khả năng triển khai thực tế của chúng [7].

Gần đây, sự phát triển của trí thông minh nhân tạo, đặc biệt là các kỹ thuật học máy, đã đặt nền tảng phát triển mới cho nhiều kỹ thuật DSP [8, 9]. Với khả năng trích xuất và học tập các đặc tính từ dữ liệu đầu vào, các mạng neuron nhân tạo có thể xấp xỉ hầu hết mọi mối quan hệ đầu vào-ngõ ra của hệ thống. Tận dụng ưu điểm này, nhóm tác giả đề xuất một bộ cân bằng dựa trên mạng neuron nhân tạo nhằm thực hiện bù méo cho tín hiệu gây ra bởi đường truyền/thiết bị, và tăng hiệu suất cho hệ thống thông tin quang cự ly ngắn tốc độ cao. Thiết kế này được xây dựng dựa trên việc kết hợp ANN với bộ cân bằng truyền thống FFE. Trong đó, các tín hiệu trước khi đi vào mô hình ANN để thực hiện huấn luyện sẽ được tiền xử lý bởi bộ cân bằng FEE và được đưa vào mô hình thông qua các bộ trễ. Thông qua việc học, một mô hình ANN đơn giản có thể mô hình hóa các mối quan hệ phi tuyến giữa tín hiệu đầu vào và đầu ra, đây cũng chính là điều mà bộ cân bằng tuyến tính FFE không thể thực hiện được. Kết quả mô phỏng trong nhiều trường hợp cũng chỉ ra được hiệu quả của bộ cân bằng dựa trên ANN tối ưu hơn bộ cân bằng truyền thống, giúp tăng độ nhạy máy thu và giảm tỉ lệ lỗi bit. Các kết quả trên cũng hứa hẹn khả năng ứng dụng của thiết kế trên vào các hệ thống thực tế.

2. Kỹ thuật cân bằng dựa trên ANN

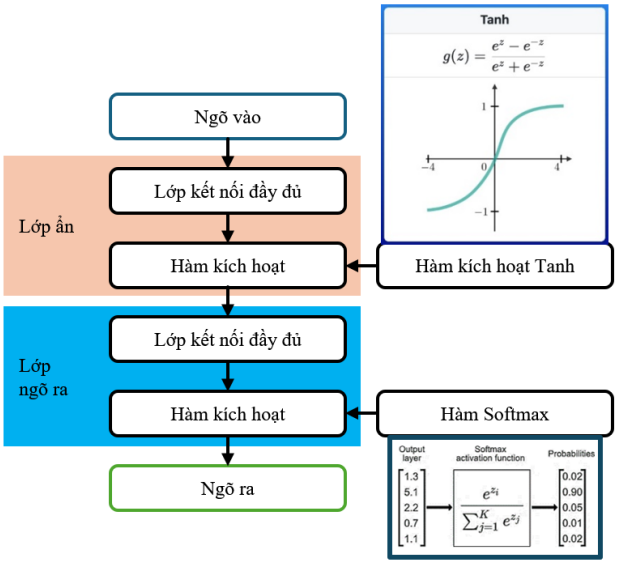
2.1. Mạng neuron nhân tạo – ANN

Mạng neuron nhân tạo (ANN) là một mô hình tính toán lấy cảm hứng từ cấu trúc sinh học của bộ não con người. Trong những năm gần đây, nó đã được đề xuất để giảm thiểu các hiện tượng méo trong hệ thống thông tin quang. Lợi ích chính của mạng ANN là khả năng khái quát hóa bất kỳ chuỗi đầu vào-đầu ra nào chỉ với một vài neuron/lớp ẩn. Trong nghiên cứu này, các mô hình ANN được thiết lập ngay phía sau bộ cân bằng FFE để ước lượng và khôi phục các tín hiệu PAM4 với tỷ lệ OSNR trong khoảng cho trước, từ đó cải thiện chất lượng tín hiệu ở phía máy thu.

Về cơ bản, các ANN truyền thống, còn được gọi là mạng neuron đa lớp (multi-layer perceptron – MLP), được sắp xếp thành một chuỗi các lớp. Cấu trúc này bao gồm 3 loại lớp chính: (i) lớp đầu vào chứa các ký tự cần được xử lý; (ii) lớp đầu ra xác định một ký tự được ước tính dựa trên các giá trị của lớp trước đó và (iii) lớp ẩn thực hiện vai trò thu thập thông tin từ lớp trước đó và truyền đến lớp phía sau. Trong đó, mỗi neuron sử dụng trọng số, bias và sau đó kết hợp với hàm kích hoạt để xác định đầu ra của neuron theo những điều kiện nhất định. Đầu ra của một neuron trong lớp ẩn có thể được mô tả theo [10]:

$$y_k = f\left(\sum_i^N x_i w_i + b\right) \quad (1)$$

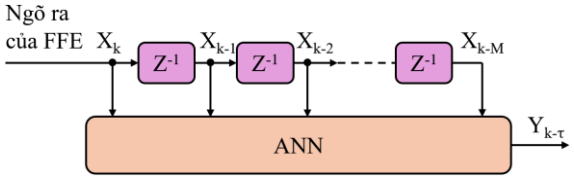
Lưu ý rằng, các giá trị trọng số (w) biểu thị mức độ ảnh hưởng của kết nối giữa các đầu vào (x) và đầu ra (y) của các neuron trong lớp ẩn hiện tại. Giá trị độ tinh chỉnh bias (b) là một giá trị hằng số cho phép kiểm soát đầu ra. Để ngăn mô hình trở nên tuyến tính, các mô hình ANN áp dụng hàm kích hoạt phi tuyến (f) cho mỗi neuron/perceptron ẩn. Hình 1 cho thấy sơ đồ của một ANN đơn giản với một lớp ẩn sử dụng hàm kích hoạt tanh.



Hình 1. *Một cấu trúc đơn giản của ANN với một lớp ẩn*

2.2. Ứng dụng ANN để phát triển bộ cân bằng

Đối với các hệ thống truyền thống, kỹ thuật cân bằng thường được sử dụng nhằm thực hiện bù cho các hiện tượng méo xảy ra trên đường truyền và thiết bị. Nổi bật trong đó chính là bộ cân bằng truyền thống FFE [11] được thiết kế dựa trên bộ lọc đáp ứng xung hữu hạn (finite impulse response – FIR) [12] với thuật toán LMS (least mean square).

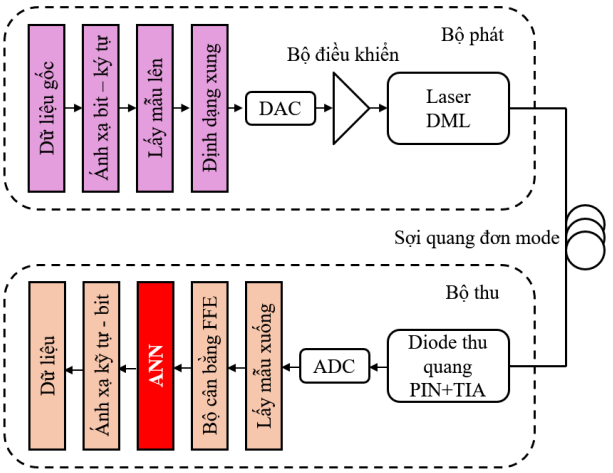


Hình 2. *Cấu trúc gán dữ liệu vào cho bộ cân bằng dựa trên ANN với M+1 ngõ vào*

Tuy nhiên, FFE chỉ hiệu quả đối với các hiện tượng méo tuyến tính và không có khả năng xử lý các vấn đề liên quan đến suy giảm công suất hay do các hiện tượng méo phi tuyến khác. Trong nghiên cứu này, ANN được sử dụng kết hợp với FFE để xây dựng bộ cân bằng nhằm thực hiện bù méo tuyến tính lẫn phi tuyến. Ngoài việc xử lý các hiện tượng méo tuyến tính, FFE còn đóng vai trò trong việc tiền xử lý dữ liệu cho bộ cân bằng dựa trên ANN. Các mô hình ANN sau đó sẽ thực hiện học thông qua quá trình huấn luyện. Từ đó có

thể mô hình hóa các mối quan hệ tuyến tính lẫn phi tuyến giữa các ký tự ở ngõ vào từ đó đưa ra dự đoán tín hiệu ở phía ngõ ra, với mục đích giảm thiểu tác động của các hiện tượng méo lên tín hiệu, giảm được tỉ lệ lỗi ở phía máy thu và nâng cao chất lượng của hệ thống. Theo đó, dữ liệu ở ngõ ra của bộ cân bằng FFE sẽ được đưa vào mạng ANN thông qua $M + 1$ bộ trễ, như được hiển thị trong Hình 2.

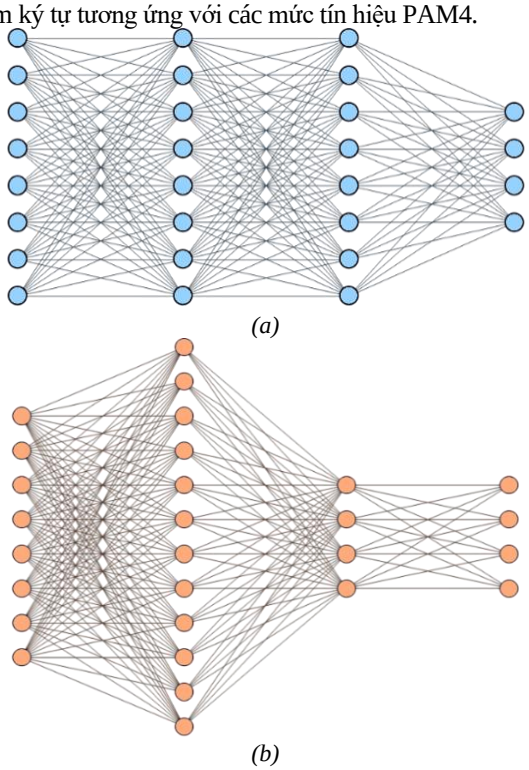
3. Mô hình đánh giá và khảo sát



Hình 3. *Minh họa mô hình IM/DD sử dụng PAM4 với bộ cân bằng ANN*

Hình 3 minh họa một hệ thống điển hình cho hệ thống thông tin sợi quang 100 Gbps PAM4 ở bước sóng λ=1550 nm. Đầu tiên, khởi tạo dữ liệu gốc là một chuỗi nhị phân ngẫu nhiên có 2^{19} bit và sau đó ánh xạ thành các mức tín hiệu PAM4. Sau khi lấy mẫu với 8 mẫu/ký tự, tín hiệu được định dạng xung sử dụng hàm Raise Cosine (RC) để tối ưu hóa việc sử dụng băng thông. Tín hiệu đã được xử lý sau đó được đưa vào một bộ chuyển đổi số - tương tự (digital-analog converter – DAC). Tiếp theo, các tín hiệu đầu ra của DAC được cho qua một mạch điều khiển tuyến tính và sau đó được điều chế ở bước sóng 1550 nm để tạo ra các tín hiệu quang PAM4 ở tốc độ 50 Gbaud (100 Gbps). Các tín hiệu được truyền qua sợi quang với hệ số tán sắc d = 17,6 ps/nm/km. Tại bộ thu, tín hiệu được phát hiện trực tiếp bởi một bộ thu quang PIN với độ nhạy được đặt ở 0,7 A/W. Để cải thiện độ nhạy của bộ thu, một mạch khuếch đại điện trở (transimpedance amplifier – TIA) được sử dụng để tăng cường tín hiệu đầu ra. Trong khảo sát này, cả laser và PIN-TIA đều được đặt với băng thông 3-dB là 25 GHz. Sau khi được xử lý bởi một bộ chuyển đổi tương tự-số (analog-digital converter – ADC), tín hiệu được lấy mẫu xuống thành 1 mẫu/ký tự. Tiếp theo, một bộ cân bằng FFE sử dụng bộ lọc FIR được sử dụng để cân bằng tín hiệu nhận được. Sau đó, bộ cân bằng ANN được sử dụng để giảm thiểu các tác động do biến dạng trên kênh truyền và thiết bị chi phí thấp gây ra. Cuối cùng, sau khi ánh xạ đầu ra của ANN thành ký hiệu PAM4, các ký tự được chuyển về lại thành chuỗi bit dữ liệu. Ở đây, hệ thống cũng thực hiện tính toán tỷ lệ lỗi bit (BER) của dữ liệu nhận được.

Trong các trường hợp khảo sát được đề xuất, số lớp ẩn được đặt lần là 1, 2 và 4 lớp. Về số lượng tổng neuron ẩn được xét trong các khảo sát được lựa chọn tương đương với chiều dài của bộ cân bằng truyền thống FFE. Hàm kích hoạt sử dụng trong các lớp ẩn là tanh. Mô hình được huấn luyện với hàm tối ưu Adam với hàm mất mát Cross-entropy, và tốc độ học ban đầu được đặt là 10^{-3}. Đối với việc đánh giá mô hình, tập dữ liệu 2^{18} ký tự được chia thành hai phần, 75% cho việc huấn luyện và phần còn lại cho việc kiểm tra và xác thực. Dữ liệu đầu ra được phân loại với hàm kích hoạt SoftMax để phân nhóm ký tự tương ứng với các mức tín hiệu PAM4.



Hình 4. *Hai cấu trúc mạng ANN với cấu trúc khác nhau, gồm 2 lớp ẩn với số lượng neuron ẩn trong mỗi lớp được phân bổ (a) phân bổ đồng đều, (b) phân bổ không đồng đều*

Lưu ý rằng, việc xác định cấu trúc tối ưu của một ANN đối với số lượng các lớp ẩn cũng như số neuron ẩn đòi hỏi nhiều mô phỏng thử nghiệm và chưa có một phương pháp tối ưu cụ thể nào. Một số ý kiến cho rằng thực hiện tăng độ phức tạp (tăng số lượng neuron ẩn) hoặc tăng chiều sâu (tăng số lớp ẩn) của mô hình mạng có thể giúp cải thiện hiệu suất của mô hình. Xét trong trường hợp ứng dụng cân bằng cho mạng thông tin quang tốc độ cao, bộ cân bằng dựa trên ANN sẽ được khảo sát và làm rõ hơn trong những nội dung kế tiếp.

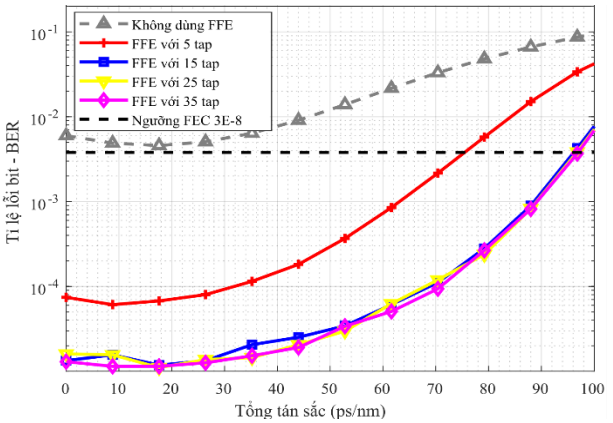
Hình 4 minh họa hai kiến trúc mạng ANN sẽ được sử dụng cho một số khảo sát ở dưới. Cả hai cấu trúc đều có một lớp đầu vào, một lớp đầu ra, sự khác biệt là phân phối số lượng các neuron trong hai lớp ẩn. Trong trường hợp (a), số lượng neuron trong mỗi lớp ẩn là như nhau, trong khi trường hợp (b) số lượng neuron trong 2 lớp ẩn được phân bổ khác nhau. Các khảo sát này cho phép đánh giá việc học các đặc tính của dữ liệu khi sử dụng một mô hình mạng neuron sâu.

Trong các trường hợp trên, tỷ lệ lỗi bit (BER) được sử dụng để đánh giá chất lượng hệ thống. Giá trị BER càng thấp cho thấy mô hình phân loại càng đáng tin cậy hơn.

4. Kết quả và thảo luận

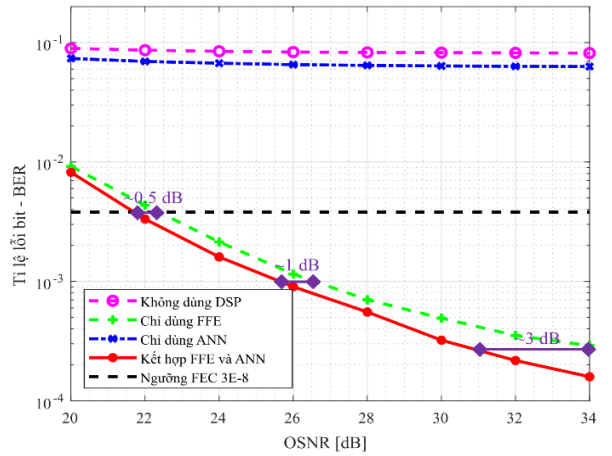
Đầu tiên, trước khi đánh giá vai trò của bộ cân bằng dựa trên ANN, hệ thống được đánh giá với bộ cân bằng FFE truyền thống, đồng thời cũng tìm chiều dài tối ưu cho bộ cân bằng. Trong trường hợp này, bộ cân bằng FFE được

thiết lập tại bộ thu nhằm bù nhiễu liên ký tự (ISI) và cân bằng kênh truyền. Hiệu suất của hệ thống được đánh giá thông qua tỷ lệ lỗi bit (BER). Các hệ số của bộ cân bằng được điều chỉnh bằng thuật toán LMS. Chiều dài của bộ cân bằng, thể hiện thông qua số lượng tap, được khảo sát tăng dần từ 5 đến 35 với bước tăng 10.



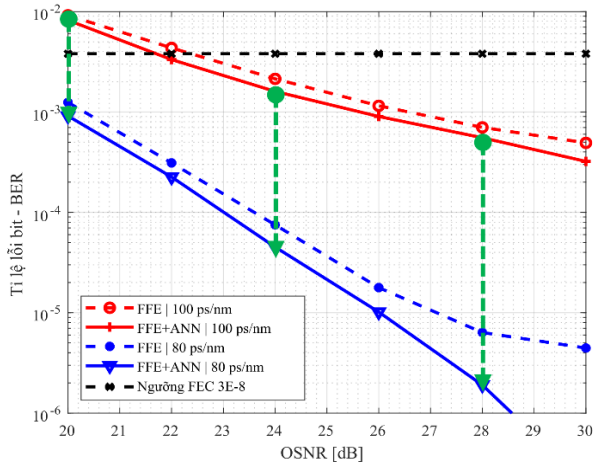
Hình 5. *Khảo sát vai trò và chiều dài tối ưu cho bộ cân bằng FFE cho hệ thống thông tin quang IM/DD 100 Gbps PAM4*

Hình 5 mô tả tỉ lệ lỗi bit của hệ thống thông tin quang 100 Gbps PAM4 trong các trường hợp có/không sử dụng bộ cân bằng với lượng tán sắc tổng của hệ thống được xét từ 0 đến 100 ps/nm. Có thể nhận thấy, BER của hệ thống tăng dần khi lượng tán sắc tổng tăng. Kết quả cũng chỉ ra rằng, bộ cân bằng FFE đã cải thiện đáng kể hiệu suất hệ thống trong việc giảm tỉ lệ lỗi bit theo các trường hợp khảo sát với các lượng tán sắc tổng khác nhau. Cụ thể, trong trường hợp hệ thống B2B (back-to-back với tán sắc tổng = 0 ps/nm), BER đã giảm xấp xỉ 100 lần từ $6*10^{-3}$ về gần $\sim 7*10^{-5}$ chỉ với 5 tap, và giảm xuống đến $\sim 10^{-3}$ khi số lượng tap là 15 trở lên. Kết quả cũng chỉ ra rằng, khi số lượng tap tăng, hiệu suất của hệ thống có xu hướng tăng, tuy nhiên, khi chiều dài bộ cân bằng FFE vượt qua 15 tap thì giá trị BER dao động xung quanh các giá trị không đổi. Qua khảo sát các trường hợp trên, chiều dài phù hợp nhất cho FFE để đạt được hiệu suất tối ưu là 15 tap. Xét tại ngưỡng sửa lỗi FEC (BER = $3,8*10^{-3}$) với FFE 15 tap thì giới hạn xử lý của hệ thống rơi vào khoảng xấp xỉ 100 ps/nm.



Hình 6. *Khảo sát vai trò và hiệu quả của bộ cân bằng dựa trên ANN với các mức OSNR khác nhau*

Kế đến, nghiên cứu cũng thực hiện đánh giá vai trò và ảnh hưởng của bộ cân bằng dựa trên ANN đến hệ thống. Hệ thống được thiết lập tại các mức xét ở ngưỡng giới hạn trong khảo sát ở trên với FFE 15 tap tại mức tán sắc tổng xấp xỉ 100 ps/nm. Hình 6 mô tả tỉ lệ lỗi bit của hệ thống xét dưới các trường hợp: không sử dụng bất kỳ kỹ thuật DSP nào ở phía thu, chỉ sử dụng FFE, chỉ sử dụng ANN và kết hợp FFE và ANN, xét trong điều kiện OSNR thay đổi từ 20 dB đến 34 dB.



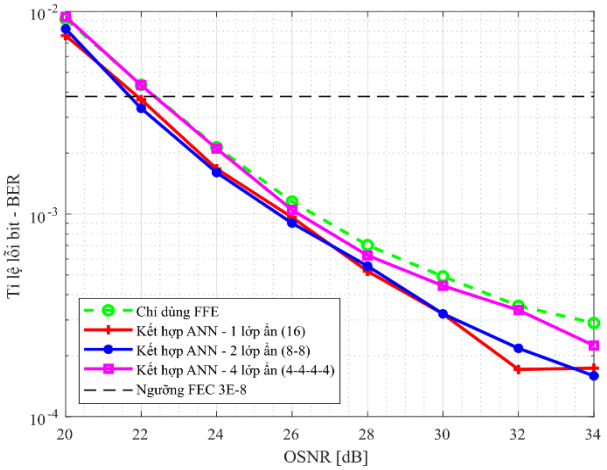
Hình 7. *Khảo sát với các điều kiện tán sắc và OSNR khác nhau*

Các kết quả cho thấy, việc kết hợp cả hai bộ cân bằng mang lại hiệu suất tốt nhất. Khi không sử dụng DSP, hệ thống có tỷ lệ lỗi bit BER cao nhất và không đạt ngưỡng FEC, thể hiện hiệu suất kém. Sử dụng riêng FFE cải thiện BER so với không dùng bất kỳ kỹ thuật DSP nào, nhưng vẫn chưa đạt ngưỡng FEC ở mức OSNR thấp hơn 22 dB. Tương tự, bộ cân bằng ANN cũng giảm BER so với không dùng DSP, nhưng hiệu suất vẫn chưa đủ tốt ở tất cả các trường hợp OSNR được xét, có thể nhận thấy đối với các dữ liệu chưa được tiền xử lý thì ANN vẫn chưa thể hiện tốt được ưu điểm trong các trường hợp này. Quá trình trên được khắc phục và thể hiện rõ khi kết hợp cả FFE và ANN, trong trường hợp này, FFE đóng vai trò trong khâu tiền xử lý dữ liệu đầu vào cho ANN, giúp ANN có thể học và huấn luyện tốt hơn. Với cùng một mức tỉ lệ lỗi bit có thể thấy hệ thống đã đạt được độ lợi về mặt OSNR từ ~0,5 dB ở mức FEC lên gần 1 dB ở ngưỡng BER = 10^{-3} và lên gần 3 dB ở ngưỡng KP4-FEC (với BER = $2,2*10^{-4}$). Điều này cho thấy việc tích hợp FFE và ANN không chỉ cải thiện hiệu suất mà còn tăng cường chất lượng của hệ thống trước các thay đổi của OSNR, và cho thấy tiềm năng của phương pháp này cho hệ thống thông tin quang với tốc độ truyền dẫn cao.

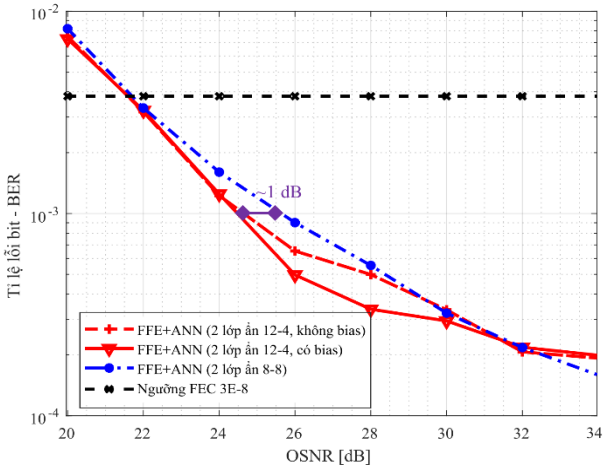
Trong một khảo sát khác được chỉ ra ở Hình 7, biểu đồ này đánh giá chất lượng tín hiệu của hệ thống dựa BER và OSNR trong hai trường hợp tán sắc tổng khác nhau: 100 ps/nm và 80 ps/nm. Các đường nét liền và đứt nét đại diện cho các phương pháp khác nhau: sử dụng bộ cân bằng FFE và sử dụng kết hợp FFE + ANN. Qua kết quả có thể nhận thấy, việc sử dụng kết hợp FFE và ANN giúp cải thiện BER đáng kể so với chỉ sử dụng FFE trong cả hai trường hợp tán sắc tổng 100 ps/nm và 80 ps/nm. Và với lượng tán sắc càng thấp thì BER được cải thiện càng tốt khi OSNR tăng.

Độ sâu của mô hình ANN cũng được xem xét, hệ thống được phân tích với 1, 2 và 4 lớp của bộ cân bằng ANN. Hình 8 cho thấy, thay đổi độ sâu của mô hình ANN bằng cách thêm nhiều lớp hơn có cải thiện hiệu suất nhưng không lớn như trong trường hợp 2 lớp ẩn (với phân bố 8 neuron/lớp ân). Bên cạnh đó, việc tăng số lượng lên 4 lớp

ẩn (với 4 neuron/lớp ẩn) còn làm giảm đi hiệu quả của bộ cân bằng dựa trên ANN, nguyên nhân chính xuất phát từ hiện tượng "overfitting" khi mô hình quá khớp với dữ liệu huấn luyện và trong trường hợp sử dụng các dữ liệu khác thì hiệu suất phân loại của hệ thống bị giảm. Từ đó có thể thấy được, đối với hệ thống IM/DD 100 Gbps PAM4 được trình bày ở trên thì chỉ cần sử dụng một kiến trúc ANN 1 hoặc 2 lớp là có thể đạt được kết quả tối ưu.



Hình 8. *Thay đổi độ sâu của mô hình với tổng số neuron ẩn không thay đổi*



Hình 9. *Khảo sát với các mô hình ANN và OSNR khác nhau*

Tuy nhiên, trong Hình 9 cũng đã đưa ra được một kết quả tối ưu hơn, đó là sử dụng một cấu trúc ANN với 2 lớp ẩn để tận dụng được ưu điểm phân tầng cấu trúc khi trích xuất các đặc tính của dữ liệu. Điểm khác ở đây chính là cấu trúc này được thiết lập với phân bố số lượng neuron không đồng đều. Trong đó, lớp đầu tiên có thể học các đặc tính cơ bản của dữ liệu, và sau đó lớp ẩn thứ hai có thể học được các đặc tính trừu tượng và cao cấp hơn. Ở đây nhóm tác giả đề xuất mô hình với 2 lớp có số lượng neuron ở lớp ẩn 1 và lớp ẩn 2 lần lượt là 12 và 4 neuron. Nhóm cũng thực hiện khảo sát và đánh giá vai trò của tham số tinh chỉnh (bias) trong trường hợp này. Từ kết quả trong biểu đồ, có thể nhận thấy được, trường hợp sử dụng 2 lớp ẩn với phân bố 12-4 (nét liền/nét gạch) đã cho kết quả về độ lợi về OSNR tốt hơn so với sử dụng 2 lớp ẩn với phân bố 8-8 (nét gạch chấm) trong hầu hết các trường hợp, xét trong khoảng OSNR từ 22 dB đến 32 dB. Ví dụ như tại ngưỡng BER = 10-3 thì trường hợp phân bổ 12-4 có bias cho độ lợi OSNR lên đến 1 dB khi so sánh với trường hợp phân bổ 8-8. Cũng nhận thấy rằng, trường hợp mạng ANN sử dụng thêm tham số tinh chỉnh bias cho kết quả với độ dốc mượt hơn, và kết quả ổn định hơn trong các trường hợp đánh giá với các OSNR khác nhau.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã chứng minh hiệu quả của các bộ cân bằng dựa trên học máy trong việc cải thiện hiệu suất của các hệ thống truyền dẫn PAM4 tốc độ cao sử dụng IM/DD. Cụ thể, đối với truyền dẫn PAM4 ở 100 Gbps, kết quả cho thấy rằng cả bộ cân bằng ANN với chỉ 1 hoặc 2 lớp ẩn và 16 neuron, đều có thể cải thiện đáng kể độ nhạy của bộ thu (Rx) tại ngưỡng sửa lỗi FEC. Đối với tán sắc xấp xỉ 100 ps/nm, bộ cân bằng cải thiện 0,5 dB tại ngưỡng FEC và 3 dB tại ngưỡng KP4-FEC ($2{,}2*10^{-4}$) khi so sánh với hệ thống chỉ dùng bộ cân bằng truyền thống FFE 15 tap. Những kết quả này cho thấy tiềm năng của việc ứng dụng ANN cho kỹ thuật cân bằng, đồng thời cải thiện hiệu suất tổng thể của hệ thống truyền dẫn IM/DD. Hơn nữa, với cùng một số lượng các neuron ẩn, thì việc sử dụng phân phối không đồng đều hay sử dụng tham số bias có thể cung cấp một giải pháp cân bằng hiệu quả hơn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-DNA-10.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] K. Zhong *et al.*, "Recent advances in short reach systems", *2017* in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Los Angeles, CA, USA, 2017, pp. 1-3.

[2] *40-gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): general requirements*, ITU-T Recommendation G.989.1, 2015

[3] *50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification.* ITU-T Recommendation G.9804.3, 2021

[4] C. Kachris, K. Kanonakis, and I. Tomkos, "Optical interconnection networks in data centers: recent trends and future challenges", *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 9, pp. 39-45, 2013, https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6588648

[5] K. Zhong *et al.*, "Experimental study of PAM-4, CAP-16, and DMT for 100 Gb/s Short Reach Optical Transmission Systems", *Optics Express*, vol. 23, no. 2, p. 1176, 2015, https://doi.org/10.1364/oe.23.001176.

[6] H. Zhou *et al.*, "Recent Advances in equalization Technologies for Short-Reach Optical Links based on PAM4 modulation: A review", *Applied Sciences*, vol. 9, no. 11, p. 2342, Jun. 2019, https://doi.org/10.3390/app9112342.

[7] N. Stojanovic, F. Karinou, Z. Qiang, and C. Prodaniuc, "Volterra and Wiener Equalizers for Short-Reach 100G PAM-4 applications", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 21, pp. 4583–4594, 2017, https://doi.org/10.1109/jlt.2017.2752363.

[8] L. Yi, T. Liao, L. Huang, L. Xue, P. Li, and W. Hu, "Machine Learning for 100 Gb/s/λ Passive Optical Network", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1621-1630, 2019, https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2888547.

[9] X. Miao, M. Bi, J. Yu, L. Li, and W. Hu, "SVM-Modified-FFE Enabled Chirp Management for 10G DML-based 50Gb/s/λ PAM4 IM-DD PON", in *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019*, OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2019), paper M2B.5.

[10] M. A. Nielsen, "Neural networks and deep learning", *neuralnetworksanddeeplearning.com*, 2015. [Online]. AvailabLe: http://neuralnetworksanddeeplearning.com/ [accessed Jun. 19, 2024].

[11] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. The McGraw-Hill Companies: San Diego, CA, USA, 2008.

[12] S. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 5th ed. Pearson Education: Hamilton, ON, Canada, 2005.