

THIẾT KẾ BỘ CÂN BẰNG LMS CHO HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG IM/DD TẦM NGẮN SỬ DỤNG ĐỊNH DẠNG PAM4

Vương Quang Phước*, Nguyễn Đức Nhật Quang,
Lê Văn Thanh Vũ, Hồ Đức Tâm Linh

Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

*Email: vqphuoc@husc.edu.vn

Ngày nhận bài: 3/6/2023; ngày hoàn thành phản biện: 9/6/2023; ngày duyệt đăng: 4/12/2023

TÓM TẮT

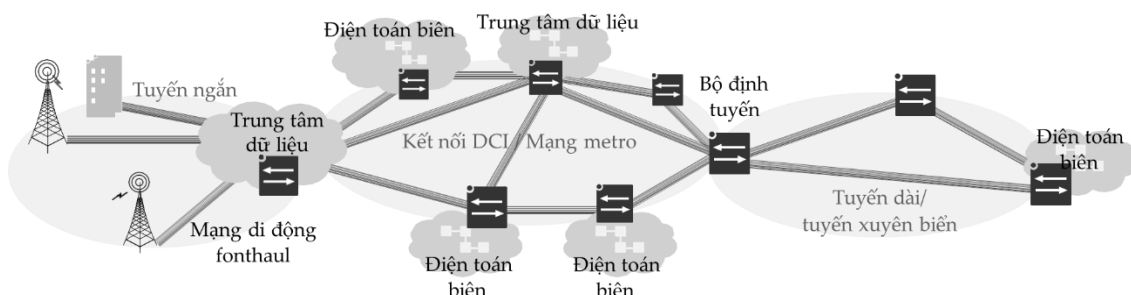
Bài viết này tập trung vào việc sử dụng bộ cân bằng LMS trong hệ thống truyền thông quang IM/DD tầm ngắn sử dụng điều chế PAM4. Việc sử dụng PAM4 cho phép truyền dữ liệu tốc độ cao và tăng hiệu suất phổ trong hệ thống thông tin quang tầm ngắn. Một trong các nguyên nhân chính làm giảm hiệu năng của hệ thống là nhiễu liên ký tự, gây ra bởi tán sắc trên kênh truyền hay giới hạn băng thông do thiết bị giá rẻ. Bộ cân bằng LMS, một kỹ thuật lọc thích nghi, đóng vai trò quan trọng trong cải thiện chất lượng tín hiệu, bù méo cho các hiện tượng trên. Hiệu suất bộ cân bằng LMS được đánh giá thông qua tỷ lệ lỗi bit và tỷ số tín hiệu trên nhiễu. Bằng cách sử dụng bộ cân bằng LMS, chất lượng và cự ly truyền dẫn của hệ thống thông tin quang tầm ngắn được cải thiện đáng kể. Bên cạnh đó, các tham số của bộ cân bằng như số lượng tap và kích thước bước cũng được khảo sát và đánh giá trong bài báo này.

Từ khóa: Bộ cân bằng, hệ thống thông tin quang, thuật toán LMS - least mean square.

1. TỔNG QUAN

Hệ thống thông tin quang truyền thống rất quan tâm đến việc phát triển các tuyến đường dài tốc độ cao như tuyến đường dài và tuyến xuyên biển. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, cùng sự phát triển nhanh chóng của các ứng dụng và dịch vụ băng rộng như: Internet of Things (IoT), điện toán đám mây, thực tế ảo tăng cường VR, hay mạng di động thế hệ 5G. đã đặt một áp lực rất lớn lên nền tảng hạ tầng hệ thống thông tin quang. Trong đó, phần lớn lưu lượng internet được thực hiện dựa trên hạ tầng tuyến kết nối giữa các trung tâm dữ liệu (DC – data center), mạng đô thị hay mạng truy cập quang. Đây chính là yếu tố thúc đẩy cho sự phát triển của hệ thống thông tin quang tầm ngắn. So sánh với các tuyến truyền cự ly lớn, tuyến quang tầm ngắn được triển khai với

quy mô lớn hơn nhiều, do đó các yếu tố về chi phí, độ phức tạp và kích thước là các tiêu chí được quan tâm [1]. Xét về các yếu tố trên, kỹ thuật điều chế biên độ và giải điều chế trực tiếp (IM/DD - intensity modulation with direct detection) [2] được xem là lựa chọn tốt hơn so với kỹ thuật tách sóng Coherent [3]. Tuy nhiên, hệ thống thông tin quang IM/DD truyền thống gặp phải nhiều khó khăn trong việc tăng tốc độ truyền dẫn do sử dụng định dạng điều chế NRZ-OOK (non-return-to-zero on-off-keying). Thay thế cho định dạng cũ, hiện nay, PAM4 được xem là một kỹ thuật điều chế phù hợp với hệ thống thông tin quang cự ly ngắn đặc biệt là cho thế hệ Ethernet 200G và 400G [4].



Hình 1. Mô tả về hệ thống thông tin sợi quang phân theo các nhóm khoảng cách phát.

Sự suy giảm hiệu suất của hệ thống xảy ra do nhiều yếu tố. Dễ nhận thấy nhất là sự xuất hiện của hiện tượng nhiễu liên ký tự (ISI - inter-symbol interference), khi các xung lân cận chồng lấn lên nhau gây ra nhiễu, và dẫn đến sự suy giảm của SNR (signal-to-noise ratio) và tăng tỉ lệ lỗi bit (BER – bit error rate). Nguyên nhân chính dẫn đến hiện tượng trên ở hệ thống tầm ngắn là do hiện tượng giãn xung gây ra bởi tán sắc (CD – chromatic dispersion). Bên cạnh đó, hiệu ứng lọc thông thấp xuất hiện ở máy phát và máy thu giá rẻ cũng có thể gây nhiễu ISI (intersymbol interference) nghiêm trọng. Để hạn chế các nhược điểm nói trên và nâng cao tốc độ/cự ly truyền dẫn cho hệ thống, một số kỹ thuật cân bằng khác nhau dựa trên xử lý tín hiệu số (DSP - digital signal processing) đã được nghiên cứu cho các hệ thống thông tin quang tầm ngắn trong những năm qua. Xét về các yêu cầu của hệ thống cự ly ngắn, bộ cân bằng FFE (feed forward equalizer) với thuật toán LMS có thể xem làm một giải pháp hiệu quả để bù cho các suy hao tuyến tính gây ra bởi hiện tượng giới hạn băng thông và tán sắc.

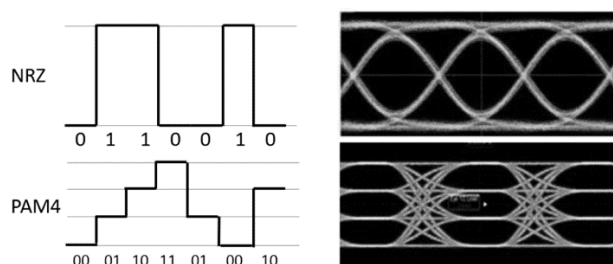
Bài báo trình bày về một số ứng dụng quan trọng của DSP nhằm nâng cao tốc độ/cự ly truyền dẫn cho tuyến quang tầm ngắn bằng việc kết hợp sử dụng định dạng điều chế PAM4 và bộ cân bằng sử dụng thuật toán LMS. Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau. Trong phần 2, bài báo sẽ trình bày vắn tắt về một số giải pháp sử dụng kỹ thuật DSP giúp cải thiện chất lượng hệ thống như ứng dụng định dạng điều chế bậc cao và kỹ thuật cân bằng. Phần 3, đưa ra mô hình mô phỏng hệ thống thông tin sử dụng kỹ thuật IM/DD với điều chế PAM4 cho truyền dẫn cự ly ngắn. Phần này cũng thực hiện khảo sát nhằm làm rõ vai trò của bộ cân bằng trong việc cải thiện chất lượng

hệ thống, bên cạnh đó, một số tham số chính của bộ cân bằng cũng được đánh giá để làm rõ. Cuối cùng là kết luận được đưa ra ở phần 4.

2. MỘT SỐ KỸ THUẬT DSP CHO HỆ THỐNG IM/DD TẦM NGẮN

2.1. Định dạng điều chế

Kỹ thuật Điều chế cường độ kết hợp với tách sóng trực tiếp (IM/DD) được xem là giải pháp tối ưu cho hệ thống tầm ngắn nhờ các ưu điểm: công nghệ đơn giản, tiết kiệm chi phí và có kích thước bé [5]. Tuy nhiên, các hệ thống IM/DD cổ điển được triển khai với định dạng NRZ-OOK, không có bất kỳ DSP đặc biệt nào, và chỉ cho phép tốc độ truyền/nhận lên đến 25 Gbit/s. Hệ thống IM/DD hiện nay đã có nhiều thay đổi khác biệt so với truyền thống. Cụ thể, để có thể tối ưu hóa băng thông và tăng tốc độ truyền của các hệ thống tầm ngắn, nhiều định dạng cao cấp đã được đề xuất, trong đó PAM4 là lựa chọn được ưu tiên hàng đầu [6, 7].



Hình 2. Minh họa về 2 kỹ thuật điều chế NRZ-OOK và PAM4 [8].

Đánh giá về ưu điểm, so với kỹ thuật cổ điển như NRZ-OOK, PAM4 có được 2 ưu điểm nổi bật sau: *Thứ nhất*, PAM4 cho phép tăng gấp đôi tốc độ bit truyền dẫn. Điều chế PAM4 sử dụng 2 bit cho mỗi ký tự mã hóa, trong khi đó NRZ-OOK chỉ sử dụng 1 bit cho mỗi ký tự, dẫn đến việc cùng 1 tốc độ ký tự (baud rate) thì tốc độ bit (bit rate) của PAM4 sẽ cao hơn NRZ. *Thứ hai*, giảm được sự mất mát tín hiệu. Khi truyền cùng một tốc độ bit, do có tốc độ ký tự cao hơn, PAM4 sẽ sử dụng tốc độ truyền thấp hơn và hạn chế được các hiện tượng sai lệch (ví dụ như nhiễu liên ký tự ISI) tốt hơn. Do ưu điểm quan trọng này, có thể sử dụng PAM4 cho các tuyến hiện có (vốn sử dụng NRZ) với tốc độ dữ liệu lớn hơn mà không phải tăng gấp đôi tốc độ truyền dẫn.

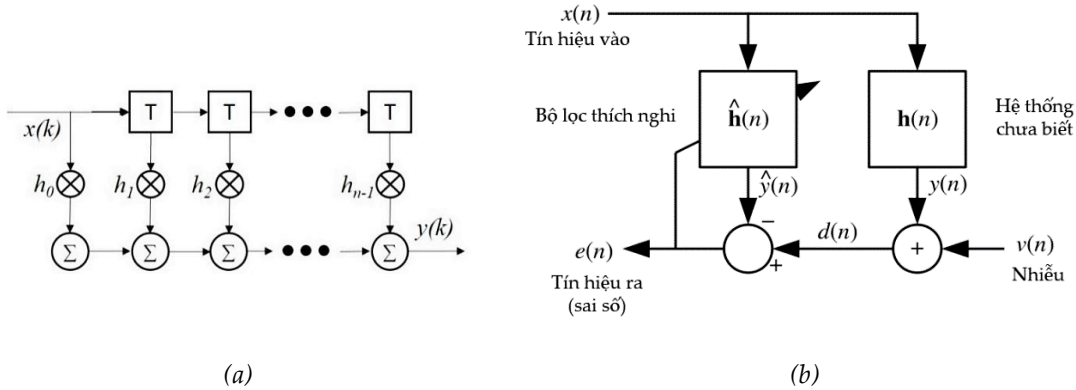
2.2. Kỹ thuật cân bằng và thuật toán LMS

2.2.1. Bộ cân bằng FFE - Feed Forward Equalizer

Đây một phương pháp hiệu quả để bù cho các suy giảm tuyến tính (như CD hay giới hạn băng thông). Thành phần cơ bản nhất của FFE là bộ lọc đáp ứng xung hữu hạn (FIR), có cấu trúc được thể hiện trong Hình 3a. Tín hiệu ngõ ra của bộ lọc FIR được xác định [9] như sau:

$$y(k) = \sum_{l=0}^{n-1} h_l x(k-l) \quad (1)$$

với $x(k)$ và $y(k)$ tương ứng với tín hiệu ngõ vào và ra của bộ lọc FIR tại vị trí mẫu thứ k . $h = [h_0 h_1 h_2 \dots h_{n-1}]$ là mảng các trọng số của các tap T, và n là số lượng các tap.



Hình 3. Cấu trúc của một bộ lọc FIR (a) và cân bằng FFE sử dụng thuật toán LMS (b).

Hình 3 (b) mô tả cấu trúc bộ lọc FFE sử dụng thuật toán LMS, trong đó bộ lọc FIR được ký hiệu là $\hat{h}(n)$. Trọng số của các tap có thể được cập nhật bằng các thuật toán zero-forcing (ZF), thuật toán least mean squares (LMS), thuật toán recursive least squares (RLS), v.v. Tuy nhiên, các thuật toán hội tụ khác nhau chỉ ảnh hưởng đến tốc độ đạt được trọng số tap tối ưu và không phải là trọng tâm của bài đánh giá này. Ở đây, bài báo trình bày một trong những kỹ thuật phổ biến nhất được gọi là thuật toán LMS.

2.2.2. Thuật toán Least Mean Square - LMS

Ý tưởng cơ bản đằng sau bộ lọc sử dụng LMS là tìm kiếm tập trọng số tối ưu $\mathbf{h}(n)$ của bộ lọc bằng cách dùng thuật toán giảm độ dốc (gradient descent) để cập nhật các trọng số của bộ lọc. Thuật toán khởi tạo với các trọng số rất nhỏ (bằng 0 trong hầu hết các trường hợp) và ở mỗi bước sẽ thực hiện cập nhật các trọng số dựa vào độ dốc của sai số bình phương trung bình (MSE-gradient). Nghĩa là, nếu MSE-gradient dương, điều đó có nghĩa là lỗi sẽ tiếp tục tăng dương nếu cùng một trọng số được sử dụng cho các lần lặp tiếp theo, do đó hệ thống cần điều chỉnh giảm trọng số. Theo cách tương tự, nếu độ dốc âm, các trọng số sẽ được tăng lên.

Thuật toán LMS với bộ lọc bậc p có thể được tóm tắt như sau:

Thông số: $p =$ chiều dài của bộ lọc (số tap)

$\mu =$ kích thước bước

Khởi tạo: $\hat{\mathbf{h}}(0) = \text{zeros}(p)$

Tính toán: For $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)]^T$$

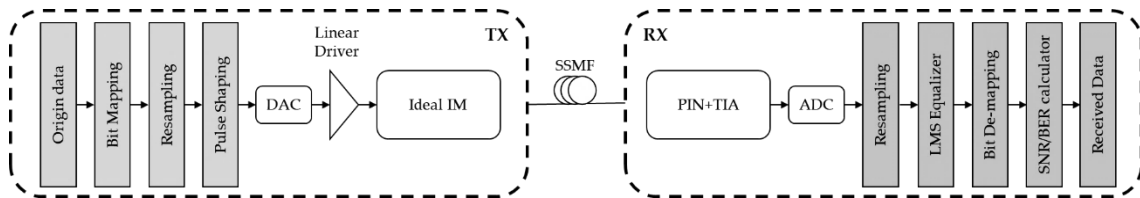
$$e(n) = d(n) - \hat{\mathbf{h}}^H(n)\mathbf{x}(n)$$

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + 2\mu e^*(n)\mathbf{x}(n)$$

Trong đó: μ là kích thước bước (chi tốc độ cập nhật cho trọng số bộ lọc) và hàm lỗi $e(k) = d(k) - y(k)$ nằm giữa tín hiệu mong muốn $d(k)$ và tín hiệu đầu ra $y(k) = \hat{\mathbf{h}}^H(n)\mathbf{x}(n)$. Và $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)]$ là vectơ của tín hiệu đầu vào.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình đánh giá



Hình 4. Mô hình khảo sát hệ thống IM/DD tầm ngắn sử dụng PAM4.

Hình 4 trình bày một hệ thống điển hình cho các hệ thống thông tin quang tầm ngắn dựa trên điều chế PAM4. Đầu tiên, dữ liệu gốc được tạo bởi chuỗi nhị phân ngẫu nhiên và sau đó sẽ được ánh xạ tới bộ chuyển đổi ký tự sử dụng định dạng PAM4. Sau khi lấy mẫu lại, tín hiệu được định dạng xung để tối ưu về hiệu suất sử dụng băng thông. Tín hiệu đã xử lý sau đó được đưa vào bộ chuyển đổi số sang tương tự (DAC – digital-to-analog converter) để thu được tín hiệu điện bằng cơ sở. Sau đó, các tín hiệu đầu ra của DAC được khuếch đại bởi một mạch điều khiển tuyến tính và sau đó được đưa vào một bộ điều chế để tạo ra tín hiệu quang PAM4. Ở đây, tín hiệu được đưa qua bộ lọc thông thấp LPF (giới hạn băng thông do thiết bị) và chuyển đến sợi quang. Đối với các liên kết quang dưới 300 m, sợi quang đa chế độ (MMF – multimode fiber) thường được sử dụng rộng rãi hiện nay. Khi khoảng cách truyền tăng lên đến vài kilomet, sự tán sắc trong sợi MMF sẽ làm biến dạng tín hiệu và sợi quang đơn mode tiêu chuẩn (SSMF – standard single mode fiber) trở thành lựa chọn phổ biến hơn. Tại máy thu, tín hiệu được tách sóng trực tiếp bởi bộ tách sóng PIN. Để cải thiện độ nhạy của máy thu, TIA (transimpedance amplifier) được xếp tầng phía sau để khuếch đại tín hiệu điện. Sau khi được xử lý bằng bộ chuyển đổi tương tự sang số (ADC – analog-to-digital converter), tín hiệu được lấy mẫu lại theo tốc độ lấy mẫu dự kiến cho các bước tiếp theo. Sau đó, kỹ thuật DSP được sử dụng để cân bằng tín hiệu nhận được nhằm cải thiện hiệu suất của hệ thống truyền dẫn. Cuối cùng, sau khi ánh xạ ngược các ký tự PAM4 về bit, thực hiện tính toán tỷ lệ lỗi bit (BER) cũng như tỷ lệ tín hiệu/nhiều SNR và đưa ra dữ liệu cần nhận.

3.2. Đánh giá hệ thống IM/DD sử dụng PAM4 với bộ cân bằng LMS

3.2.1. Thông số đánh giá và thiết lập hệ thống

Chất lượng của hệ thống được đánh giá thông qua SNR và BER.

Trong đó, SNR là tỷ số giữa công suất tín hiệu và công suất tạp âm. Hệ thống có SNR lớn sẽ cho chất lượng tốt. Trong hệ thống thông tin quang được xét dưới đây, SNR được tính toán sau khi đã được xử lý ở máy thu thông qua tham số EVM (error vector magnitude).

$$SNR = -20 \log_{10}(EVM) [dB] \quad (2)$$

Tỷ số lỗi bit (BER) được xác định tại bộ thu, là tỷ số giữa số bit thu bị lỗi trên tổng số bit được phát đi trong một khoảng thời gian xác định. Ví dụ: BER = 10^{-6} có nghĩa là cứ cứ 1 triệu bit truyền đi thì có 1 bit xảy ra lỗi. Việc xác định BER được thực hiện thông qua công thức sau:

$$BER = \frac{\text{Số bit lỗi}}{\text{Tổng số bit truyền đi}} \quad (3)$$

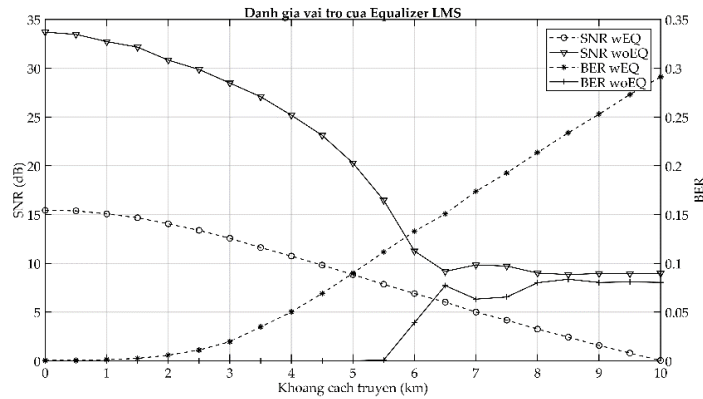
Để có thể tham chiếu khi thực hiện đánh giá, các thông số khởi tạo của hệ thống hoạt động ở băng tần C được thiết lập như sau:

Bảng 1. Thiết lập khởi tạo các thông số cho hệ thống được khảo sát

<i>Các thông số của hệ thống khảo sát</i>		
N	Số lượng bit dữ liệu	2^{18} bit
$Baudrate$	Tốc độ truyền ký tự	50 GBaudps
$P_{Tx/Rx}$	Công suất truyền/nhận	0 dBm (~1mW)
BW	Băng thông của máy phát/thu	25 GHz
λ	Bước sóng quang	1510 nm
D	Hệ số tán sắc	17.6 ps/nm/km
l	Cự ly truyền dẫn	0 ~ 10 km
R	Hệ số chuyển đổi quang điện	0.7 A/W

3.2.2. Đánh giá vai trò của bộ cân bằng đến hệ thống

Đầu tiên, để đánh giá vai trò của bộ cân bằng của hệ thống, thực hiện chạy thử nghiệm hệ thống trong 2 trường hợp có và không có sử dụng bộ cân bằng, thông qua đó xác định được giới hạn của hệ thống cũng như khả năng cải thiện hệ thống của bộ cân bằng. Các thông số thiết lập ban đầu của hệ thống được thiết lập theo *Bảng 1*.

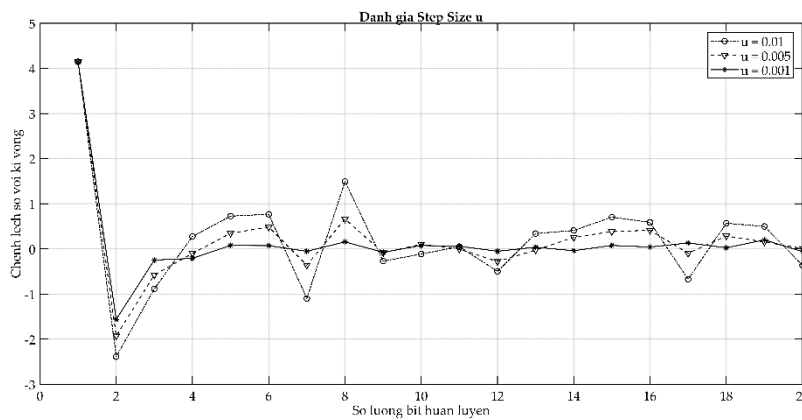


Hình 5. Đánh giá chất lượng của hệ thống trong 2 trường hợp: Có/không có sử dụng bộ cân bằng.

Hình 5 mô tả chất lượng của hệ thống trong 2 trường hợp: có sử dụng/không có sử dụng bộ cân bằng LMS. Đánh giá chất lượng được thực hiện dựa trên 2 thông số SNR và BER. Dựa vào hình vẽ, có thể dễ dàng nhận thấy SNR giảm dần theo khoảng cách truyền, điều ngược lại xảy ra đối với BER. Một điểm khác, trường hợp có sử dụng bộ cân bằng LMS cho kết quả tốt hơn, tương ứng với tỷ lệ SNR cao hơn và BER nhỏ hơn. Cụ thể, xét về SNR, trong trường hợp có sử dụng bộ cân bằng, hệ thống có độ lợi SNR chênh lệch khi truyền B2B (Back-to-back) là 18.27 dB. Cụ ly truyền tối đa cũng được cải thiện từ ~2.5 km lên đến ~5.5 km khi sử dụng thêm bộ cân bằng, xét trong trường hợp BER = 10⁻², đây cũng chính là khoảng cách giới hạn mà hệ thống có thể đạt đến, sau khoảng cách truyền dẫn này chất lượng hệ thống suy giảm nhanh.

3.2.3. Đánh giá về các thông số của bộ cân bằng

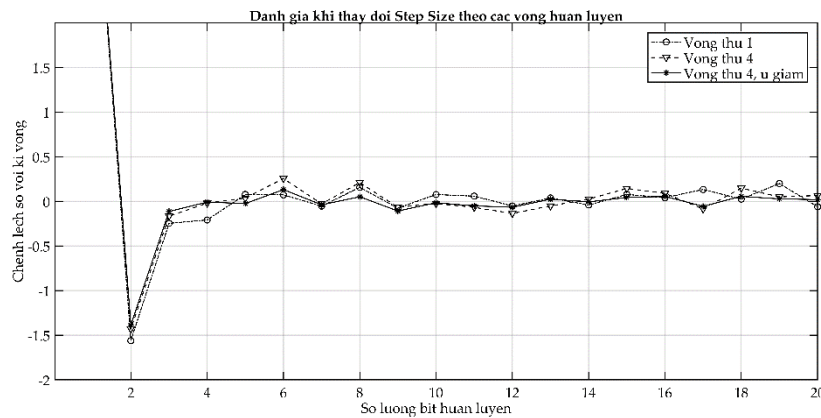
Để có đánh giá cụ thể hơn, bài báo phân tích các tham số của bộ cân bằng nhằm xác định vai trò của các tham số tác động đến quá trình xử lý dữ liệu. Hai tham số được đánh giá gồm Kích thước bước (step size μ) và Số lượng Tap được sử dụng cho bộ lọc.



Hình 6. Đánh giá vai trò của Kích thước bước μ đến khả năng hội tụ hàm lỗi.

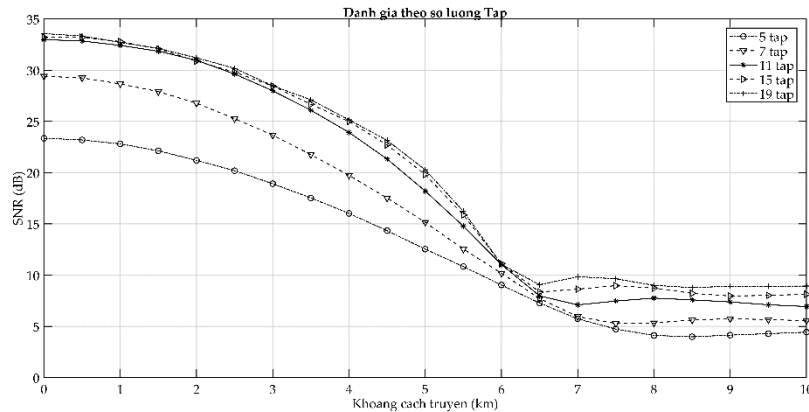
Hình 6 là kết quả khảo sát độ chênh lệch giữa kết quả dự đoán và kì vọng, hay hàm lỗi $e(n)$ thông qua các bước huấn luyện. Dựa vào đồ thị có thể nhận thấy việc thay đổi hệ số Kích thước bước có thể dẫn đến tốc độ hội tụ. Với $\mu = 0.001$ hệ thống có tốc độ hội tụ nhanh nhất (đạt tối ưu sớm) thể hiện từ bước thứ 4 trở đi, hàm lỗi đạt giá trị gần ổn định xung quanh 0. Trong khi đó, với các giá trị μ lớn hơn như 0.005 và 0.01, các đường thể hiện hàm lỗi dao động khá lớn, chất lượng cũng như khả năng hội tụ của hệ thống kém hơn. Trong các trường hợp này, cần thay giảm kích thước bước để việc cập nhật các trọng số được tối ưu hơn.

Thay đổi giá trị Kích thước bước theo các vòng huấn luyện là một giải pháp cho trường hợp trên. Hình 7 thể hiện kết quả khảo sát với $\mu = 0.001$ vòng huấn luyện thứ 1, và 2 trường hợp có thay đổi/không thay đổi μ sau 4 vòng huấn luyện. Có thể nhận ra, sau 4 vòng, trường hợp không thay đổi giá trị μ kết quả hàm lỗi có biên độ dao động khá lớn, một số trường hợp kết quả còn kém hơn so với vòng huấn luyện thứ 1. Trong khi đó, trường hợp thực hiện giảm dần giá trị của μ theo từng vòng huấn luyện cho kết quả dao động bé hơn, hay có thể nói sai số kết quả của hệ thống ít hơn.



Hình 7. Tác động của việc thay đổi Kích thước bước qua từng vòng huấn luyện.

Như vậy, việc thay đổi kích thước bước ảnh hưởng đến tốc độ hội tụ của bộ cân bằng, tuy nhiên việc lựa chọn giá trị khởi tạo và điều chỉnh giá trị μ sẽ tùy thuộc vào từng thuật toán và điều kiện cụ thể khác nhau.



Hình 8. Đánh giá chất lượng của hệ thống khi thay đổi số lượng tap (độ phức tạp) của bộ cân bằng.

Một yếu tố khác liên quan đến độ phức tạp và khả năng tính toán của bộ cân bằng chính là số lượng các Tap. Hình 8 mô tả quá trình khảo sát bộ cân bằng với các số lượng Tap khác nhau: 5 tap, 7 tap, 11 tap, 15 tap và 19 tap. Có thể nhận thấy, tăng số lượng các Tap cho phép bộ lọc xử lý được nhiều thông tin hơn, dẫn đến tín hiệu được xử lý tốt hơn, chất lượng hệ thống tăng. Tuy nhiên, giới hạn của hệ thống xuất hiện khi tăng dần cự ly truyền. Xét ngưỡng với tỷ lệ SNR ~ 14 dB, có thể thấy với 5 Tap, cự ly truyền tối đa có thể lên đến 4.5 km tại tốc độ 50 GBaudps, giá trị này tăng lên 5 km và 5.5 km tương ứng khi sử dụng 7 tap và nhiều hơn 11 tap. Một điểm thú vị nữa có thể nhận thấy, khi tăng số Tap lên quá lớn, không được lợi nhiều về mặt hiệu suất. Ví dụ trường hợp sử dụng 11, 15 và 19 tap, kết quả nhận được gần như tương đồng, tuy nhiên khối lượng tính toán và độ phức tạp của thiết bị lại tăng nhiều. Do đó, trong từng trường hợp cụ thể, cần có kế hoạch lựa chọn số tap phù hợp cho hệ thống sử dụng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày về hệ thống thông tin quang tầm ngắn, một số thách thức và tồn tại của hệ thống xuất phát từ các yêu cầu nghiêm khắc như: chi phí thấp, kích thước bé, công suất tiêu thụ thấp. Nội dung thực hiện thiết kế và khảo sát việc sử dụng bộ cân bằng LMS trong hệ thống thông tin quang IM/DD cự ly ngắn sử dụng định dạng điều chế bậc cao PAM4. Bộ cân bằng sử dụng thuật toán LMS đã cải thiện đáng kể hiệu suất hệ thống. Thể hiện được tính hiệu quả trong việc giảm nhiễu liên ký tự (ISI) và bù méo tuyến tính gây ra bởi tán sắc của kênh/giới hạn băng thông của thiết bị thu phát. Thể hiện rõ thông qua sự cải thiện rõ rệt của SNR, BER cũng như giới hạn cự ly truyền dẫn. Trong quá trình thiết kế bộ lọc, các yếu tố quan trọng như độ dài bộ lọc (số lượng tap) hay kích thước bước (μ) cần được đánh giá và khảo sát để xác định độ phức tạp tính toán và các thông số hệ thống. Tuy nhiên, việc đạt được sự cân đối giữa hiệu năng và độ

phức tạp/chi phí là một thách thức, đòi hỏi sự lựa chọn tỉ mỉ và tinh chỉnh trong mỗi trường hợp. Tổng kết lại, việc sử dụng bộ cân bằng LMS cho hệ thống IM/DD tầm ngắn đã giải quyết được vấn đề méo tuyến tính (tán sắc và sự giới hạn băng thông). Một hướng phát triển khác có thể xem xét là giải quyết các vấn đề liên quan đến méo phi tuyến (Chirp, nhiễu trộn bốn bước sóng FWM hay pha-đỉnh) cũng một số kỹ thuật cân bằng phi tuyến khác như Volterra series VNLE hoặc AI-based Equalizer.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Plant, D.V.; Morsy-Osman, M.; Chagnon, M. Optical communication systems for datacenter networks. In Proceedings of the Optical Fiber Communications Conference (OFC), Los Angeles, CA, USA, 19–23 March 2017; pp. 1–47.
- [2]. N. Eiselt, D. Muench, A. Dochhan, H. Griesser, M. Eiselt, J. J. V. Olmos, I. T. Monroy, J. Elbers, Performance comparison of 112-gb/s dmt, nyquist pam4, and partial-response pam4 for future 5g ethernet-based fronthaul architecture, *Journal of Lightwave Technology* 36 (10) (2018) 1807–1814.
- [3]. K. Kikuchi, Coherent optical communication technology, in: 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015, pp. 1–28. doi:10.1364/OFC.2015.Th4F.4.
- [4]. Ethernet Task Force. IEEE Standard P802.3bs 200 Gb/s and 400 Gb/s. Available online: <http://www.ieee802.org/3/bs/index.html>.
- [5]. J. L. Wei et al., “400 Gigabit Ethernet using advanced modulation formats: Performance, complexity, and power dissipation.” *Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 182-189, Feb. 2015.
- [6]. Zhong, K.; Zhou, X.; Gui, T.; Tao, L.; Gao, Y.; Chen, W.; Man, J.; Zeng, L.; Lau, A.P.T.; Lu, C. Experimental study of PAM4, CAP-16, and DMT for 100 Gb/s short reach optical transmission systems. *Opt. Express* 2015, 2, 1176–1189.
- [7]. Yekani, A.; Rusch, L.A. Interplay of Bit Rate, Linewidth, Bandwidth, and Reach on Optical DMT and PAM with IMDD. *Trans. Commun.* 2019, 4, 2908–2913.
- [8]. Jaewoo, Kim & Kim, Dong-Seong & Kim, Seung-Hwan & Shin, Sang-Moon. (2021). Design and Implementation Scheme of QSFP28 Optical Transceiver for Long-Reach Transmission Using PAM4 Modulation. *Applied Sciences*. 11. 2803. 10.3390/app11062803.
- [9]. Proakis, J.G.; Manolakis, D.G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*, 4th ed.; Pearson Education: London, UK, 2007.

DESIGN LMS EQUALIZER FOR SHORT-REACH IM/DD OPTICAL SYSTEM USING PAM4

Vuong Quang Phuoc*, Nguyen Duc Nhat Quang,
Le Van Thanh Vu, Ho Duc Tam Linh

Faculty of Electronics, Electrical Engineering and Material Technology,
University of Sciences, Hue University

*Email: vqphuoc@husc.edu.vn

ABSTRACT

This article focuses on designing LMS equalizer for short-reach IM/DD optical communication system using PAM4 modulation. PAM4 format enables high-speed data transmission and increases spectral efficiency in short-reach systems. The major reason for system performance degradation is inter-character interference (ISI), caused by chromatic dispersion or bandwidth limitation due to low-cost equipment. Equalizer LMS, an adaptive filtering technique, plays an important role in improving signal quality, compensating for distortion for these phenomena. LMS equalizer performance is evaluated through bit error ratio - BER and signal-to-noise ratio - SNR. By applying LMS equalizer, the transmission quality and distance of short-range optical communication system are greatly improved. Besides, the parameters for the equalizer such as the number of taps and the step size are also investigated and evaluated in this paper.

Keywords: Equalizer, optical communication system, LMS algorithm - least mean square.



Vương Quang Phước sinh ngày 14/08/1990 tại Thừa Thiên Huế. Năm 2013, ông tốt nghiệp kỹ sư chuyên ngành Điện tử viễn thông, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Năm 2018, ông nhận bằng thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điện tử tại Trường Đại học Bách Khoa Đà Nẵng. Hiện nay, ông đang công tác tại Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Hệ thống thông tin quang, mạng máy tính, Trí thông minh nhân tạo (AI).



Nguyễn Đức Nhật Quang sinh ngày 08/10/1992 tại Thừa Thiên Huế. Năm 2015, ông tốt nghiệp kỹ sư chuyên ngành Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Năm 2020, ông nhận bằng thạc sĩ chuyên ngành Khoa học máy tính và Kỹ thuật thông tin (CSIE) tại Trường Đại học Quốc gia Thành Công (NCKU), Đài Loan. Hiện nay, ông đang công tác tại Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Thiết kế vi mạch số, Trí thông minh nhân tạo (AI), Internet vạn vật kết nối (IoT), Hệ thống nhúng.



Lê Văn Thanh Vũ sinh ngày 20/05/1977 tại TP Huế. Ông nhận bằng cử nhân đại học ngành Vật lý tại Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Năm 2004, ông nhận bằng thạc sĩ ngành Điện tử - Viễn thông tại Khoa Công nghệ thuộc Đại học Quốc gia Hà Nội. Năm 2017, ông nhận bằng tiến sĩ tại Trường ĐH Công nghệ - ĐHQG Hà Nội. Hiện đang là giảng viên tại Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học – Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Thiết kế vi mạch, hệ thống nhúng – IoT.



Hồ Đức Tâm Linh sinh ngày 03/02/1986 tại Thừa Thiên Huế. Ông tốt nghiệp kỹ sư ngành Điện tử - Viễn thông năm 2009 và thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điện tử tại Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội vào năm 2014. Ông nhận học vị tiến sĩ năm 2023 tại Trường Đại học Bách Khoa Đà Nẵng. Từ năm 2010 đến nay, ông công tác tại Khoa Điện, Điện tử và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Thông tin sợi quang, mạch tích hợp quang tử, mạng máy tính.