

# MÔ PHỎNG TRUYỀN TÍN HIỆU TRONG SỢI QUANG SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP CHIA BƯỚC FOURIER

## SIMULATION OF FIBER-OPTICS SIGNAL TRANSMISSION USING SPLIT-STEP FOURIER METHOD

Nguyễn Văn Điền<sup>1,2,3</sup>, Mai Xuân Hùng<sup>1</sup>, Đào Thị Vân Khánh<sup>1</sup>, Võ Văn Huy<sup>1</sup>,  
Nguyễn Văn Tuấn<sup>1</sup>, Nguyễn Quang Như Quỳnh<sup>1</sup>, Nguyễn Tấn Hưng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; nguyenvandienuih@gmail.com

<sup>2</sup>Viện Khoa học và Công nghệ Tiên tiến - Đại học Đà Nẵng

<sup>3</sup>Trường Đại học Công nghiệp Tp Hồ Chí Minh

(Nhận bài: 08/12/2020; Chấp nhận đăng: 15/01/2021)

**Tóm tắt** - Bài báo nghiên cứu nền tảng việc truyền tín hiệu trong sợi quang. Bằng việc ứng dụng phương pháp số chia bước Fourier, nhóm tác giả đã đưa ra mô hình hệ thống truyền thông tin trong sợi quang và sơ đồ giải thuật để mô phỏng quá trình truyền này. Tiếp đến, dựa vào chương trình mô phỏng bằng Matlab, đánh giá chất lượng hệ thống truyền dẫn thông qua việc khảo sát các thông số như suy hao, tán sắc, phi tuyến, băng thông, khoảng cách truyền dẫn và công suất tín hiệu đưa vào sợi quang. Từ đó, đánh giá được ảnh hưởng của hiện tượng giãn nở xung do tán sắc, nhiễu phát xạ tự phát tích lũy (ASE) trong các bộ khuếch đại quang pha tạp Erbium (EDFA), tính phi tuyến sợi đến đặc tính hệ thống. Mô hình, lưu đồ giải thuật và kết quả đạt được có thể được sử dụng hiệu quả, linh hoạt để mô phỏng truyền tín hiệu trong hệ thống thông tin sợi quang.

**Từ khóa** - Thông tin sợi quang; khuếch đại quang sợi pha tạp erbium; phương pháp chia bước Fourier; phi tuyến sợi

### 1. Đặt vấn đề

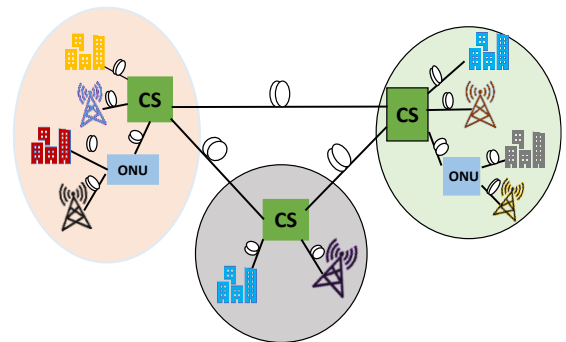
Trong những năm gần đây, lưu lượng dữ liệu trong các mạng thông tin tăng trưởng vượt bậc theo cấp số nhân. Điều này được thúc đẩy mạnh mẽ bởi sự gia tăng số lượng người sử dụng internet và các nhu cầu đòi hỏi băng thông rộng như video chất lượng cao, điện toán đám mây, dữ liệu lớn ... Hiện nay, số lượng người sử dụng mạng truy cập và thiết bị điện thoại đã đạt đến 5,1 tỉ người trong năm 2018 và được dự đoán sẽ gia tăng lên 5,7 tỉ người vào năm 2023 [1]. Sự tăng trưởng nhanh chóng này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc nâng cao dung lượng truyền dữ liệu trên toàn bộ cơ sở hạ tầng mạng mà các mạng này đang phụ thuộc chủ yếu vào công nghệ truyền dẫn quang (như Hình 1). Hiện nay, dung lượng các kênh truyền 100 Gigabit đã được thương mại hóa và dự báo sẽ tăng lên 400 Gigabit, 1 Terabit hoặc hơn trong tương lai gần [2].

Việc nâng cao dung lượng kênh truyền đặt ra rất nhiều thách thức đặc biệt là do các hiện tượng phi tuyến trong sợi quang, điều này dẫn đến khoảng cách truyền bị giới hạn [3, 4]. Vì thế, việc hiểu và nắm bắt việc truyền tín hiệu trong sợi quang cùng với các hiện tượng diễn ra trong quá trình truyền tín hiệu qua sợi quang rất quan trọng. Phương trình phi tuyến Schrödinger dùng để mô tả trường điện từ của tín hiệu truyền trong sợi quang. Tuy nhiên, phương trình phi tuyến với vi phân từng phần này không có nghiệm phân tích chính xác, vì thế các phương pháp tiếp cận số rất

**Abstract** - In this paper, we investigate the principle of optical signal transmissions in the optical fiber. By applying a numerical method, namely split-step Fourier method, we simulate the optical communication system and show the algorithm to solve the optical pulse propagation in the optic fiber. Next, by using MatLab-based program, we evaluate the system performance by investigating different parameters such as loss, dispersion, nonlinearity in the optic fiber and bandwidth, transmission distance, launch power. Hence, we can evaluate the influence of the effect of pulse broadening caused by dispersion, ASE noise by EDFA amplifiers, nonlinearity on system performance. Model, detailed algorithm, and achieved results could be used effectively, flexibly to simulate optical pulse propagation.

**Key words** - Fiber-optics communications; erbium-doped fiber amplifier; split-step Fourier method; fiber nonlinearity

cần thiết để hiểu sự truyền tín hiệu trong sợi quang và các hiện tượng phi tuyến trong sợi quang. Có rất nhiều phương pháp được nghiên cứu và ứng dụng [5, 6, 7], trong đó phương pháp chia bước Fourier (Split-Step Fourier Method – SSFM) được sử dụng rộng rãi để giải phương trình phi tuyến Schrödinger này.



**Hình 1.** Mô hình hệ thống thông tin quang tiêu biểu với trạm trung tâm (CS) và đơn vị kết nối quang (ONU)

Hiện nay, việc nâng cao phẩm chất hệ thống truyền dẫn quang trong nước ta đang được nghiên cứu rộng khắp. Các hiện tượng trong sợi quang được phân tích theo tính toán lý thuyết [8, 9] và việc truyền tín hiệu được mô phỏng thông qua các phần mềm chuyên dụng như Optisystem, VPIcomponentMaker... Những phần mềm này có nhiều ưu điểm về mô phỏng hệ thống thông tin quang. Tuy nhiên,

<sup>1</sup> The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Van Dien, Mai Xuan Hung, Dao Thi Van Khanh, Vo Van Huy, Nguyen Van Tuan, Q. Nguyen Quang Nhu, Nguyen Tan Hung)

với sự phát triển mạnh mẽ về các hướng nghiên cứu mới như mạng truy cập sóng vô tuyến qua sợi quang, hệ thống ghép lại sợi quang kết hợp ánh sáng truyền trong không khí... [10, 11], các phần mềm kể trên chỉ đáp ứng được một phần và cần được cập nhật thường xuyên với chi phí cao. Vì thế, để chủ động về công nghệ, nhu cầu về việc mô phỏng truyền tín hiệu qua sợi quang với độ chính xác cao, linh hoạt, chi phí thấp, dễ tiếp cận đang rất cấp thiết.

Trong bài báo này, nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu mô phỏng về truyền tín hiệu qua sợi quang sử dụng phương pháp chia bước Fourier trên nền chương trình mô phỏng Matlab. Thông qua chương trình mô phỏng được thiết lập, chúng tôi thực hiện khảo sát và đánh giá chất lượng hệ thống thông qua việc khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số hệ thống sợi quang như suy hao, tán sắc, hệ số phi tuyến Kerr và băng thông, khoảng cách truyền dẫn, công suất tín hiệu đưa vào sợi quang.

## 2. Nền tảng của truyền tín hiệu trong sợi quang và phương pháp chia bước Fourier

### 2.1. Truyền tín hiệu trong sợi quang

Việc truyền của tín hiệu trong sợi quang được tuân thủ theo hệ phương trình Maxwell. Do sợi quang là môi trường không có điện tích tự do và không nhiễm từ nên hệ phương trình Maxwell được mô tả như sau [12]

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Trong đó,  $\vec{E}$  và  $\vec{H}$  là các vector trường điện và trường từ. Vector  $\vec{D}$  và  $\vec{B}$  tương ứng là vector cảm ứng điện và cảm ứng từ.  $\epsilon_0$  là hằng số điện môi và  $\mu_0$  là độ từ thẩm của sợi quang. Việc triển khai và giải hệ phương trình này ở miền tần số ta thu được phương trình Helmholtz mô tả trường điện của tín hiệu

$$\nabla^2 \vec{E} + n^2(\omega) k_0^2 \vec{E} = 0 \quad (5)$$

Trong đó,  $\vec{E}(\mathbf{r}, \omega)$  là vector trường điện trong miền tần số.  $n(\omega)$  là chỉ số chiết suất. Hệ số sóng không gian tự do  $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  và  $\lambda$  là bước sóng của trường quang trong chân không dao động tại tần số  $\omega$ .

Bằng phương pháp tách biến, nghiệm trường điện của phương trình (5) được mô tả như sau

$$\vec{E}(\mathbf{r}, \omega - \omega_0) = F(x, y) \tilde{A}(z, \omega - \omega_0) \exp(i\beta_0 z) \quad (6)$$

Với,  $F(x, y)$  là phương trình mode,  $\tilde{A}(z, \omega)$  là thành phần biên độ biến đổi chậm của xung và  $\beta_0$  là số bước sóng. Để thỏa mãn phương trình Helmholtz (5), từ phương trình (6) ta thu được:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + (\epsilon(\omega) k_0^2 - \tilde{\beta}^2) F = 0 \quad (7)$$

$$2i\beta_0 \frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + (\tilde{\beta}^2 - \beta_0^2) \tilde{A} = 0 \quad (8)$$

Trong đó,  $\epsilon(\omega)$  là hằng số điện môi. Phương trình mode  $F(x, y)$  được thỏa mãn với sợi quang đơn mode [12] nên nhóm tác giả chỉ đề cập đến thành phần biên độ biến đổi chậm của xung  $\tilde{A}(z, \omega)$ .

Với việc tính gần đúng  $\tilde{\beta}^2 - \beta_0^2$  bởi  $2\beta_0(\tilde{\beta} - \beta_0)$  và khai triển  $\beta(\omega)$  trong chuỗi Taylor về tần số sóng mang  $\omega_0$  và xét đến ảnh hưởng của suy hao và phi tuyến

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega - \omega_0)\beta_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{6}(\omega - \omega_0)^3\beta_3 \quad (9)$$

phương trình (8) được viết lại

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (10)$$

Trong đó,  $A(z, t)$  là đường bao xung thay đổi chậm của điện trường ở miền thời gian.  $\alpha$  là hệ số suy hao,  $\beta_2$  là hệ số tán sắc vận tốc nhóm và  $\gamma$  là hệ số phi tuyến Kerr. Lưu ý rằng, tán sắc bậc ba rất nhỏ được bỏ qua trong bài báo này. Sử dụng khung tham chiếu chuyển động với xung ở vận tốc nhóm  $v_g$

$$T = t - z/v_g \equiv t - \beta_1 z \quad (11)$$

Phương trình (10) được viết thành phương trình phi tuyến Schrödinger:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma |A|^2 A \quad (12)$$

### 2.2. Phương pháp chia bước Fourier (Split-step Fourier Method)

Phương trình phi tuyến Schrödinger không có nghiệm phân tích chính xác, kết quả xấp xỉ gần đúng được thực hiện thông qua phương pháp chia bước Fourier theo phương trình (12)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N}) A \quad (13)$$

$$\hat{D} = -\frac{\alpha}{2} A - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} \quad (14)$$

$$\hat{N} = i\gamma |A|^2 \quad (15)$$

Trong đó,  $\hat{D}$  là một toán tử vi phân tính toán tán sắc và suy hao trong môi trường tuyến tính và  $\hat{N}$  là một toán tử chi phối hiệu ứng phi tuyến của sợi quang.

Do  $\hat{D}$  là một toán tử vi phân nên việc giải phương trình (13) được thực hiện thông qua việc chuyển đổi Fourier từ miền tần số sang miền thời gian và ngược lại. Phương pháp chia bước Fourier được thực hiện gần đúng bằng cách truyền tín hiệu qua một khoảng cách nhỏ  $h$ , hiệu ứng tuyến tính thông qua toán tử  $\hat{D}$  và hiệu ứng phi tuyến thông qua toán tử  $\hat{N}$  có thể được độc lập. Cụ thể hơn trong việc truyền từ  $z$  đến  $z + h$  được thực hiện theo phương trình:

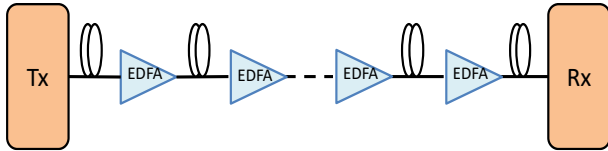
$$A(z + h, T) \approx \exp(h\hat{D}) \exp(h\hat{N}) A(z, T) \quad (16)$$

Độ chính xác của phương pháp Fourier chia bước sóng có thể được cải thiện bằng cách truyền tín hiệu qua một phân đoạn từ  $z$  đến  $z + h$  theo phương trình:

$$A(z + h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left(\int_z^{z+h} \hat{N}(z') dz'\right) \cdot \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T) \quad (17)$$

3. Sơ đồ hệ thống và giải thuật mô phỏng

3.1. Sơ đồ hệ thống và thông số thiết lập



Hình 2. Mô hình hệ thống thông tin sợi quang với đường truyền sử dụng bộ khuếch đại EDFA

Sơ đồ hệ thống mô phỏng được mô tả trong Hình 2. Tại phía phát  $2^{16}$  bit được tạo ra ngẫu nhiên, độc lập với nhau. Chuỗi bit này được điều chế biên độ cầu phương 16 QAM. Trong bài báo này, nhóm tác giả dùng kênh truyền đơn được điều chế với xung căn bậc hai cosine nâng (raised root cosine – RRC) có hệ số uốn lợc là 0,05. Tín hiệu được truyền qua sợi quang đơn mode. Hệ thống sử dụng bộ khuếch đại sợi quang pha tạp Erbium (erbium-doped fiber amplifier – EDFA) để bù suy hao trong sợi quang. Phương sai nhiễu phát xạ tự phát (amplified spontaneous emission – ASE) được tính toán theo công thức [12]:

$$\rho_{ASE} = F_n (G - 1) h\nu_0 / 2 \tag{18}$$

Trong đó,  $F_n$  và  $G$  lần lượt là hệ số nhiễu và hệ số khuếch đại của EDFA,  $h\nu_0$  là năng lượng của photon.

Tại phía thu, tín hiệu ánh sáng sau khi qua sợi quang vào bộ thu quang kết hợp được đưa vào bộ xử lí số. Tại đây tín hiệu được giải điều chế bằng xung cosine nâng tương ứng như phía phát. Sau khi xử lí xoay pha chung (common phase error – CPE), các ký tự được giải điều chế thành các chuỗi bit và hệ số phẩm chất hệ thống như độ lớn vector lỗi (error vector magnitude – EVM) và tỷ lệ công suất tín hiệu trên nhiễu (signal-to-noise ratio – SNR) được đo đạc.

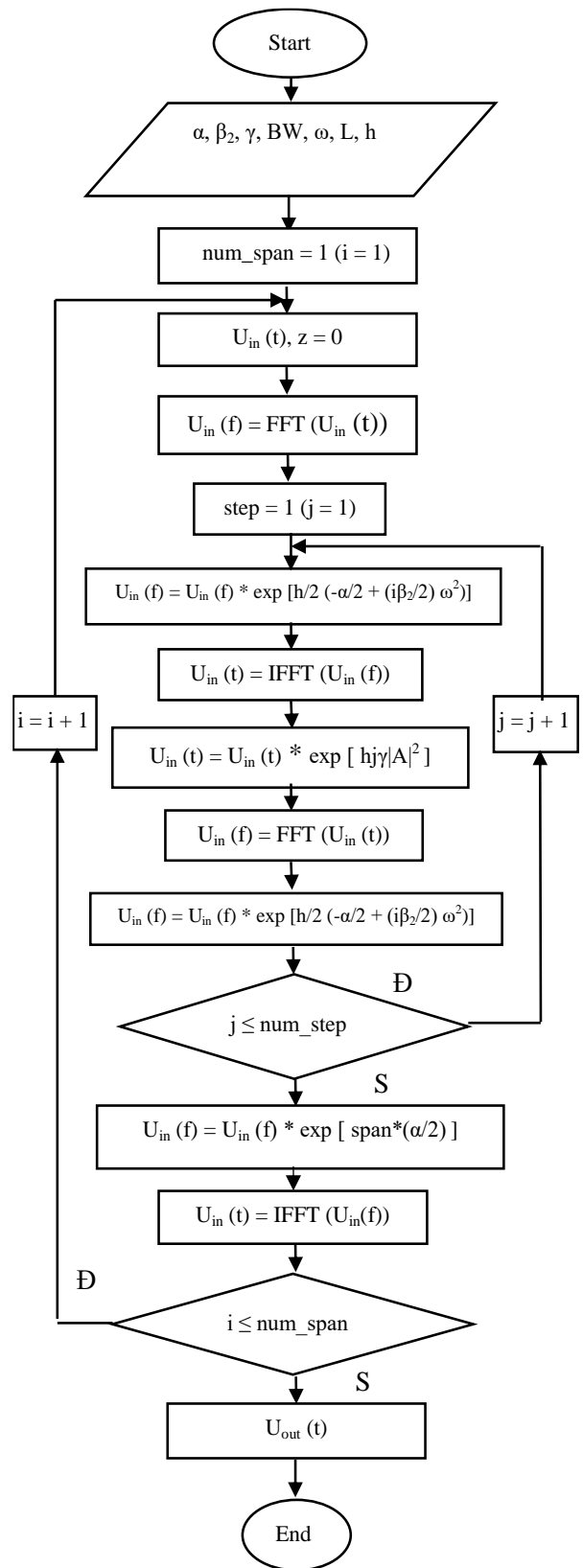
3.2. Giải thuật mô phỏng

Hình 3 trình bày giải thuật mô phỏng hệ thống thông tin sợi quang sử dụng phương pháp chia bước Fourier với hệ thống truyền dẫn sử dụng bộ khuếch đại EDFA. Do suy hao trên trong quá trình truyền dẫn, nên chiều dài tuyến được chia thành nhiều nhịp (span). Khi tín hiệu đã suy hao được truyền đến cuối mỗi nhịp sẽ được khuếch đại bằng bộ khuếch đại EDFA. Chiều dài sợi quang trong mỗi nhịp được chia thành nhiều bước rất nhỏ có chiều dài  $h$ . Như theo phương trình (17), trường điện từ được truyền với chiều dài  $h/2$  với chi thành phần tuyến tính  $\hat{D}$  sử dụng chuyển đổi Fourier. Tại phần giữa của mỗi bước  $z = h/2$ , trường điện từ được nhân với thành phần phi tuyến  $\hat{N}$ . Trong khoảng  $h/2$  còn lại của mỗi bước, trường điện từ này được nhân với thành phần tuyến tính  $\hat{D}$ . Quá trình được lặp lại cho đến khi tín hiệu được truyền đến hết chiều dài sợi quang  $L$ .

4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

4.1. Ảnh hưởng của tán sắc đến hệ thống truyền thông tin quang

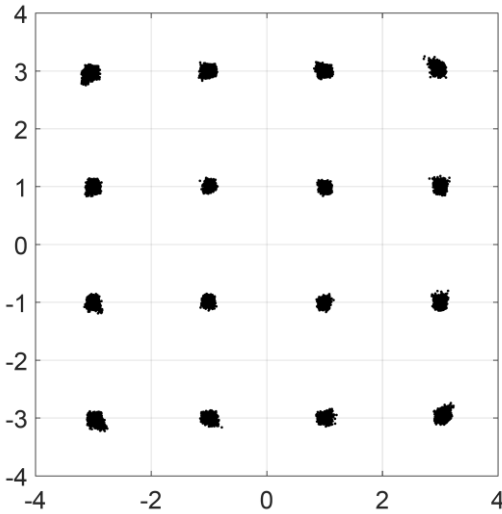
Quá trình giãn nở xung gây ra méo dạng tuyến tính do tán sắc như phương trình (14) ảnh hưởng đến chất lượng hệ thống được mô phỏng thông qua Hình 5 và 6. Tín hiệu 25 Gbaud 16 QAM được truyền qua hai loại sợi khác nhau là sợi tán sắc dịch chuyển không về 0 (non-zero dispersion



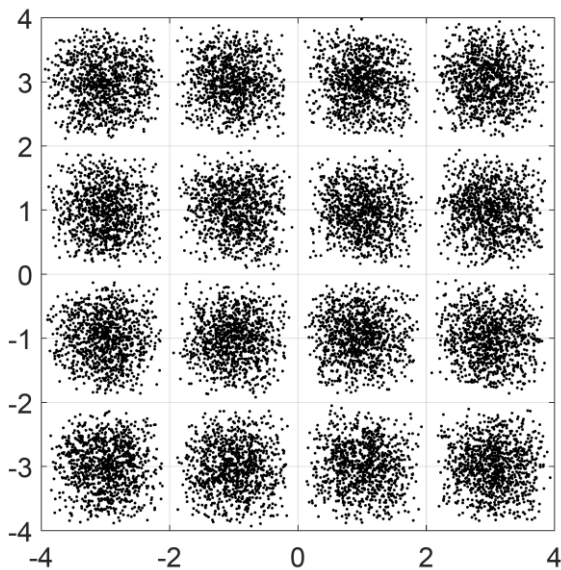
Hình 3. Sơ đồ khối giải thuật mô phỏng hệ thống thông tin quang với đường truyền chỉ sử dụng bộ khuếch đại EDFA

shifted fiber – NZ DSF) có các thông số về suy hao, tán sắc bậc hai và hệ số phi tuyến Kerr của sợi này lần lượt là  $\alpha = 0,24 \text{ dB/km}$ ,  $D = 2,61 \text{ ps/km/nm}$ ,  $\gamma = 3,9/W/\text{km}$  [13] và sợi đơn mode tiêu chuẩn (standard single mode

fiber - SSMF) với các thông số về suy hao, tán sắc bậc hai và hệ số phi tuyến Kerr của sợi này lần lượt là  $\alpha = 0,2 \text{ dB/km}$ ,  $D = 17 \text{ ps/km/nm}$ ,  $\gamma = 1,2/W/\text{km}$ . Do quá trình truyền dẫn ngắn nên nhiễu phát xạ tự phát ASE tích lũy và hiệu ứng phi tuyến không đáng kể. Hiệu ứng này được đề cập ở những phần sau với khoảng cách truyền dài lớn và băng thông thay đổi.



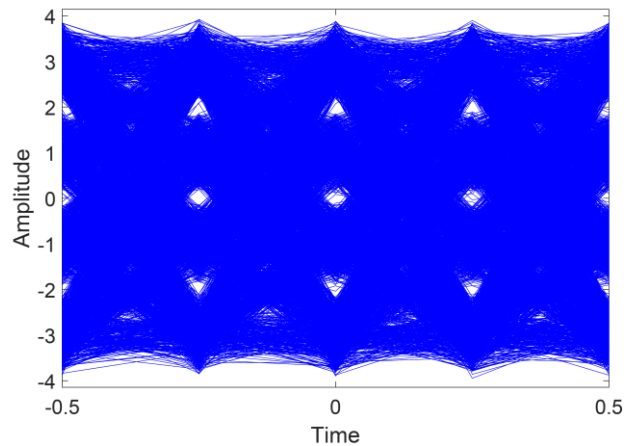
**Hình 4.** Giản đồ chòm sao tín hiệu 25 Gbaud 16 QAM khi truyền qua 8 km sợi quang NZ-DSF chưa có kỹ thuật bù



**Hình 5.** Giản đồ chòm sao tín hiệu 25 Gbaud 16 QAM khi truyền qua 8 km sợi quang SSMF chưa có kỹ thuật bù

Hình 4 diễn tả hình chòm sao của tín hiệu 25 Gbaud 16 QAM khi truyền qua 8 km sợi quang NZ DSF với công suất phát 0 dBm khi chưa kết hợp các kỹ thuật bù. Kết quả trên hình cho thấy, với sợi quang có hệ số tán sắc thấp, méo dạng do tán sắc gây ra trong khoảng truyền ngắn là không đáng kể. Trong trường hợp này EVM đạt đến 2,8%. Tuy nhiên, với cùng một tín hiệu quang 25 Gbaud 16 QAM và cùng khoảng cách truyền với sợi quang đơn mode tiêu chuẩn. Do hệ số tán sắc lớn, hiện tượng méo do tán sắc này làm phổ tín hiệu sau thời gian truyền sẽ được giãn nở nhiều gây nên nhiễu giữa các ký tự (intersymbol interference – ISI). Sự giãn nở các xung ở phía thu này được diễn tả qua

giản đồ mắt như Hình 6. Lúc này do độ giãn nở xung lớn nên con mắt bị thu hẹp. Trong trường hợp này EVM đạt đến 16,1%. Đặc biệt, khi tăng khoảng cách truyền hoặc băng thông, theo phương trình (14), thành phần tuyến tính này sẽ được cộng dồn nhiều hơn, sự giãn nở các xung trở nên trầm trọng hơn lúc này biểu đồ mắt sẽ ở trạng thái đóng. Tín hiệu sẽ không được khôi phục chính xác. Với lưu ý rằng, méo do tán sắc gây ra là méo dạng tuyến tính với các điểm trên chòm sao có xu hướng phân tán đều như nhau. Để truyền xa, chúng ta cần dùng các kỹ thuật bù tán sắc. Có rất nhiều kỹ thuật bù tán sắc được đưa ra, tuy nhiên trong phạm vi bài báo này, nhóm tác giả sử dụng bù tán sắc kỹ thuật số ở phía thu (electrical dispersion compensation – EDC). Kỹ thuật này làm co lại xung đã bị giãn nở khi truyền dẫn do tán sắc ở phía thu [15], và được sử dụng ở những phần sau.



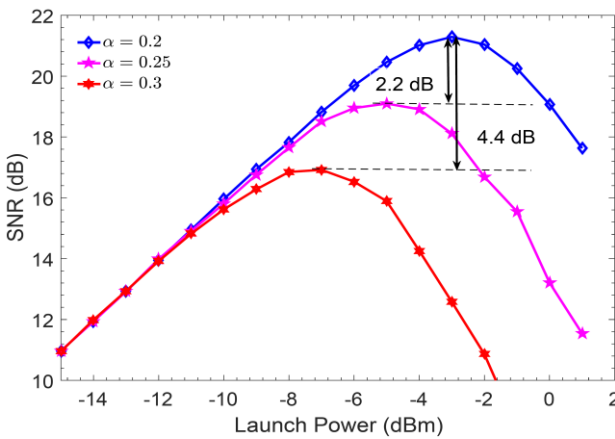
**Hình 6.** Giản đồ mắt tín hiệu 25 Gbaud 16 QAM khi truyền qua 8 km sợi quang SSMF chưa có kỹ thuật bù

#### 4.2. Ảnh hưởng của suy hao đến hệ thống truyền thông tin quang

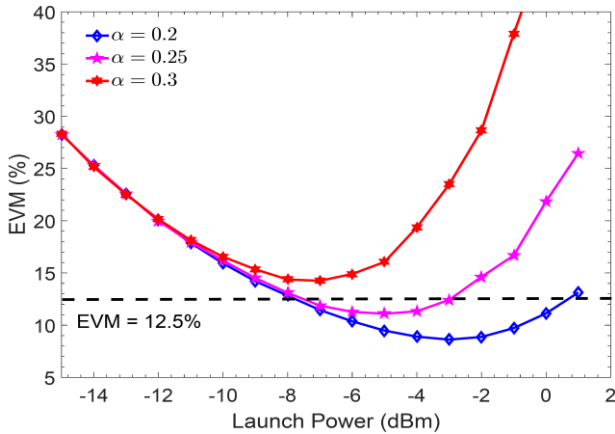
Do quá trình vận hành và sử dụng hệ thống, các sợi quang thường có hiện tượng lão hóa. Thông số suy hao của sợi quang tiêu chuẩn có thể tăng lên từ  $0,2 \text{ dB/km}$  đến  $0,35 \text{ dB/km}$  hoặc hơn ở một số tuyến. Vì thế đây là một thông số quan trọng cần được suy xét trong quá trình vận hành các tuyến đường trục có chiều dài truyền lớn. Hệ thống mô phỏng truyền dẫn thông tin được miêu tả như Hình 2 với chiều dài cả tuyến 800 km. Với cùng hệ số tán sắc và hệ số phi tuyến Kerr, thông số suy hao của sợi quang đơn mode lần lượt là  $0,2 \text{ dB/km}$ ,  $0,25 \text{ dB/km}$  và  $0,3 \text{ dB/km}$ . Sau 80 km truyền dẫn mỗi nhịp (span), với độ suy hao tương ứng lần lượt là 16 dB, 20 dB và 24 dB, tín hiệu được khuếch đại bởi các bộ khuếch đại EDFA với hệ số nhiễu (noise figure) 6 dB. Tại phía thu, bù tán sắc kỹ thuật số như đã nói trên được áp dụng.

Hình 7 và Hình 8 mô tả tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu SNR (dB) và EVM (%) là hàm của công suất phát (dBm) khi truyền tín hiệu quang 25 Gbaud 16 QAM với chiều dài tuyến 800 km qua ba sợi quang có độ suy hao khác nhau như đã nói trên. Kết quả Hình 7 cho thấy, SNR giảm đáng kể khi suy hao sợi tăng lên. Trong trường hợp này, khoảng cách giữa 2 điểm cực đại (hay còn gọi đỉnh phi tuyến) lên đến 2,2 dB và 4,4 dB khi suy hao sợi lần lượt tăng từ  $0,2 \text{ dB/km}$  đến  $0,25 \text{ dB/km}$  và  $0,3 \text{ dB/km}$

đến 0,3 dB/km. Điều này có thể dễ dàng được giải thích thông qua phương trình (18), khi độ suy hao sau mỗi nhịp lớn, khuếch đại  $G$  của bộ EDFA phải lớn theo tương ứng, công suất nhiễu tự phát trong các bộ EDFA tương ứng tăng lên. Từ đó, công suất nhiễu tích lũy trong suốt quá trình truyền lớn, dẫn đến tỷ lệ công suất tín hiệu trên nhiễu giảm mạnh.



**Hình 7.** SNR là hàm của công suất phát khi truyền 25 Gbaud 16 QAM qua 800 km sợi quang đơn mode với suy hao 0,2 dB/km, 0,25 dB/km và 0,3 dB/km



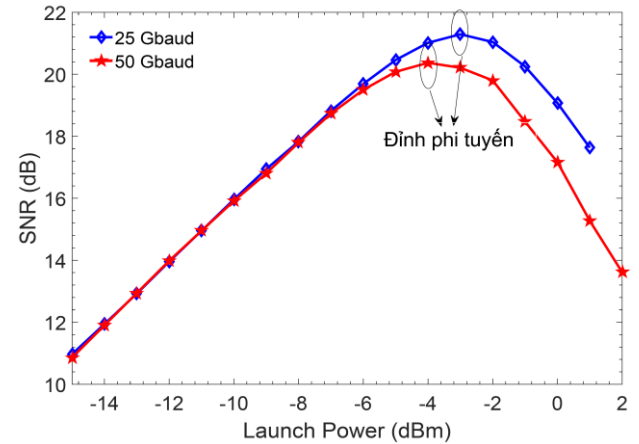
**Hình 8.** EVM là hàm của công suất phát khi truyền 25 Gbaud 16 QAM qua 800 km sợi quang đơn mode với suy hao 0,2 dB/km, 0,25 dB/km và 0,3 dB/km

Với giới hạn cho phép truyền 16 QAM, EVM phải dưới 12,5% [14] (theo Hình 8) thì sợi quang với suy hao 0,2 dB/km, 0,25 dB/km được thỏa mãn với một số các công suất phát được lựa chọn. Tuy nhiên, khi suy hao 0,3 dB/km điều kiện truyền không được thỏa mãn. Đặc biệt, khi khoảng cách truyền và băng thông tăng lên, sợi quang với suy hao càng lớn gần như không đảm bảo hệ số phẩm chất trong quá trình truyền dẫn. Vì thế đối với hệ thống quang có chiều dài tuyến lớn, sợi quang phải được bảo dưỡng thường xuyên.

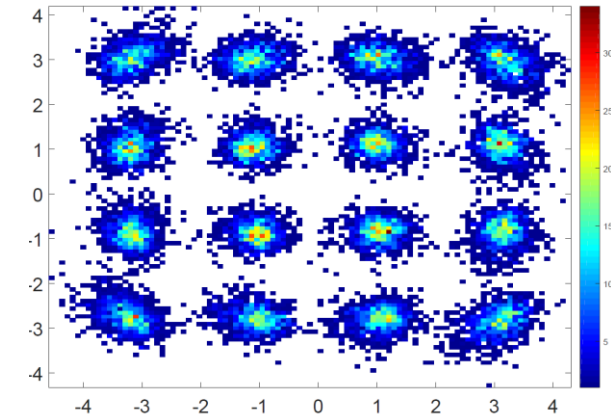
**4.3. Ảnh hưởng của hiện tượng phi tuyến đến hệ thống truyền thông tin quang**

Hình 9 diễn tả SNR (dB) là hàm của công suất phát khi truyền lần lượt tín hiệu quang 25 Gbaud và 50 Gbaud 16 QAM qua sợi quang đơn mode tiêu chuẩn. Từ kết quả trên ta thấy, khi tăng công suất phát lên, tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu cũng tăng theo. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng

mạnh công suất phát, tỉ số SNR giảm mạnh. Lúc này các hiện tượng phi tuyến trong sợi quang, đặc biệt là hiện tượng trộn bốn bước sóng (four-wave-mixing) diễn ra mạnh mẽ. Giá trị cực đại của SNR đạt được được định nghĩa là đỉnh phi tuyến. Từ hình trên, ta thấy khi tăng dung lượng kênh truyền thì quá trình phi tuyến diễn ra nhanh hơn và đỉnh phi tuyến có giá trị nhỏ hơn. Trong trường hợp này, khoảng cách giữa các đỉnh phi tuyến là 0,92 dB khi thay đổi dung lượng kênh truyền từ 25 Gbaud đến 50 Gbaud. Hiện tượng phi tuyến này có xu hướng làm xấu đi hệ số phẩm chất của hệ thống khi tăng chiều dài tuyến cũng như dung lượng kênh truyền. Vì thế, để tăng giới hạn khoảng cách truyền dẫn, các kỹ thuật bù méo tiên tiến được nghiên cứu và áp dụng [15].



**Hình 9.** SNR là hàm của công suất phát khi truyền 25 Gbaud và 50 Gbaud 16 QAM qua 800km SSMF



**Hình 10.** Giản đồ chòm sao khi truyền 25 Gbaud 16 QAM qua 800km SSMF tại công suất phát 1 dBm

Hình 10 diễn tả giản đồ chòm sao khi truyền tín hiệu quang 25 Gbaud 16 QAM qua 800 km sợi quang với công suất phát vào sợi 1 dBm. Theo kết quả ta nhận thấy, tại công suất phát 1 dBm vượt quá ngưỡng công suất để đạt đỉnh phi tuyến, trong trường hợp này là -1 dBm (như Hình 9), hiệu ứng phi tuyến diễn ra mạnh mẽ. Điều này dẫn đến hệ số phẩm chất của hệ thống bị suy giảm mạnh. Với lưu ý rằng, trong giản đồ chòm sao, các chòm sao của các điểm ở xa trong giản đồ bị méo dạng nhiều hơn so với chòm sao của điểm ở gần. Điều này được giải thích do ứng với mức năng lượng cao hơn, hiện tượng phi tuyến tại các điểm ở xa diễn ra mạnh mẽ hơn.

## 5. Kết luận

Bài báo nghiên cứu về nền tảng của truyền tín hiệu trong sợi quang, xây dựng mô hình truyền dẫn thông tin quang. Dựa vào phương pháp lộn cận số chia bước Fourier, nhóm tác giả đã xây dựng giải thuật để mô phỏng quá trình truyền tín hiệu. Thông qua việc phân tích, đánh giá các thông số sợi quang cũng như thông số hệ thống, nhóm tác giả đã đánh giá được tác động của các thông số này đến chất lượng đường truyền. Kết quả mô phỏng cho thấy đối với hệ thống truyền dẫn thông tin quang có chiều dài tuyến, sợi quang có suy hao lớn không đảm bảo hệ số phẩm chất hệ thống. Sợi tán sắc dịch chuyển NZ-DSF làm giảm hiện tượng méo do tán sắc gây ra. Tuy nhiên, khi truyền tín hiệu với khoảng cách truyền lớn, sợi quang đơn mode tiêu chuẩn kết hợp với kỹ thuật tiên tiến được lựa chọn. Ngoài ra, để tối ưu phẩm chất hệ thống truyền dẫn tránh các hiện tượng méo phi tuyến, công suất đưa vào sợi quang cần phải tại các ngưỡng phi tuyến.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo, Việt Nam trong đề tài có mã số B2018-DNA.06.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cisco System Inc., *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends*, White Paper, 11/2018.
- [2] IEEE 802.3 Ethernet Working Group, *400 Gigabit Ethernet Call-for-Interest Consensus*, IEEE 802, 2013.
- [3] C. Behrens, S. Member, R.I. Killey, S.J. Savory, M. Chen and P. Bayvel, "Nonlinear transmission performance of higher-order modulation formats", *IEEE Photon. Technol. Letter*, Vol. 23, No. 6, pp 377-379, 2011.
- [4] A.D. Ellis, D. Rafique and S. Sygletos, "Long-haul terabit transmission (2272 km) employing digitally pre-distorted quad-carrier PM-16QAM super channel", *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, 2011.
- [5] V. I. Karpman and E. M. Krushkal, "Modulated waves in nonlinear dispersive media", *Sov. Phys. JETP* 28, 277 (1969).
- [6] L. R. Watkins and Y. R. Zhou, "Modeling propagation in optical fibers using wavelets", *J. Lightwave Technol.* 12, 1536 (1994).
- [7] K.V. Peddanarappagari and M. Brandt-Pearce "Volterra Series Approach for Optimizing Fiber Optic Communications System Designs", *J. Lightwave Technol.* Volume: 16, Issue: 11, Nov 1998, 2046 (1998).
- [8] Tuan V. Nguyen, Dien V. Nguyen, "Khảo sát hiệu năng của hệ thống thông tin quang WDM mmW/RoF sử dụng tiền khuếch đại quang và máy thu coherence", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 5(126).2018, Quyển 1, 2018, Trang 120-124.
- [9] Tuan Nguyen Van, Nguyen Van Dien, Hung Nguyen Tan, "Khảo sát hiệu năng của hệ thống truy cập quang – vô tuyến ở dải bước sóng milimet cho thông tin di động thế hệ mới", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 18, No. 7, 2020, Trang 18-23.
- [10] Kiem Nguyen Hong, Nguyen Van Dien, Hung Nguyen Tan, Quang Nguyen The, Binh Nguyen Duc, Tuan Nguyen Van, Phuong Vuong Quang, Dong Nhat Nguyen, "Performance analysis and optimization of hybrid fiber/FSO dual-polarization 16-QAM data link under different weather condition", *Proceedings of The 2020 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2020, 10.1109/ATC50776.2020.9255363.
- [11] Kiem Nguyen Hong, Nguyen Van Dien, Quang Nguyen The, Binh Nguyen Duc, Tuan Nguyen Van, Hung Nguyen Tan, Vy Rin Nguyen, Dong Nhat Nguyen, "Đánh giá phẩm chất hệ thống RoF tín hiệu QPSK nhiều băng tại tần số 95 GHz", *Hội thảo Quốc gia lần thứ XXIII về Điện tử, truyền thông và Công Nghệ Thông tin (REV-ECIT)*, 2020.
- [12] G. Agrawal, *"Nonlinear Fiber Optics" Third Edition*, Academic Press, 2001.
- [13] Takashi Kunihiro, Atsushi Maeda, Shoichiro Oda, Akihiro Maruta, "Experimental Demonstration of All-Optical Tunable Delay Line Based on Slow Light Using Soliton Collision in Optical Fiber", *Optics Express*, Vol. 14, 2006, pp. 11736-11747.
- [14] Dong-Nhat Nguyen, J. Bohata, M. Komanec, S. Zvanovec, B. Ortega and Z. Ghasemlooy, "Seamless 25 GHz Transmission of LTE 4/16/64 QAM Signals over Hybrid SMF/FSO and Wireless Link", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 37, Issue 24, 2019, pp. 6040 – 6047.
- [15] Hung Nguyen Tan, Thai Son Le, "On the effectiveness of nonlinearity compensation for high baudrate single-channel transmissions", *Optics Communications*, Vol. 433, 2019, pp.36-43.