TRƯỜNG ĐẠI HỌC SÀI GÒN
TẠP CHÍ KHOA HỌC
ĐẠI HỌC SÀI GÒN
ISSN 1859 - 3208
Số 89, Tập 02/2023

SAIGON UNIVERSITY
SCIENTIFIC JOURNAL
OF SAIGON UNIVERSITY
No. 89, Vol 02/2023

Email: tcdhsg@sgu.edu.vn ; Website: http://sj.sgu.edu.vn/

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TÁN SẮC TÍCH LŨY ĐẾN CỰ LY VÀ TỐC ĐỘ BÍT TRONG HỆ THỐNG TRUYỀN DẪN QUANG BĂNG RỘNG

Research on the effects of cumulative dispersion on distance and bit rate in broadband optical communication systems

Hồ Văn Cừu[(1)], Nguyễn Thị Hiền Nga[(1)], Nguyễn Thị Thu Hằng[(1)]
Nguyễn Thị Hậu[(1)], Hồ Minh Nhật[(2)]

[(1)]Trường ĐH Sài Gòn
[(2)]Công ty TNHH Momo

TÓM TẮT

Giải pháp sử dụng kỹ thuật ghép bước sóng WDM có ưu điểm là tăng dung lượng truyền dẫn nhưng có nhược điểm là làm tăng tán sắc, tăng hiệu ứng phi tuyến, tăng tỷ số bít lỗi BER, giảm chất lượng truyền dẫn, nội dung bài báo đề xuất phương trình toán tính tham số tán sắc, ảnh hưởng của tán sắc đến cự ly, dung lượng kênh truyền và thiết lập mô hình mô phỏng mạng truyền dẫn quang 40 Gbps theo chuẩn kỹ thuật của Việt Nam để áp dụng vào bài toán thiết kế mạng truyền dẫn quang băng rộng trong thực tế.

Từ khóa: *tán sắc, WDM, mạng truyền dẫn quang băng rộng.*

ABTRACT

The solution using WDM wavelength multiplexing technique has the advantage of increasing transmission capacity but has the disadvantage of increasing dispersion, increasing nonlinear effects, increasing bit error ratio BER, reducing transmission quality and content. The article proposes a mathematical equation to calculate dispersion parameters and the effect of dispersion on distance and channel capacity and establishes a simulation model for a 40 Gbps optical transmission network according to Vietnamese technical standards for application into the problem of designing broadband optical transmission networks in practice.

Keywords: *dispersion, WDM, broadband optical transmission network.*

1. Tổng quan

Tán sắc là độ giãn xung tín hiệu quang truyền trong sợi quang theo nhiều nhóm vận tốc khác nhau, ký hiệu là D(ps/nm.km). Sợi quang đơn - mốt có hai loại tán sắc là tán sắc vật liệu hay vận tốc nhóm và tán sắc dẫn sóng [1], [2], [3].

Mạng truyền dẫn cáp quang của Việt Nam do VNPT và Viettel xây dựng có công nghệ hiện đại, tốc độ truyền dẫn mỗi bước sóng là 2.5 Gbps, hệ thống tuân thủ theo tiêu chuẩn kỹ thuật của Liên minh viễn thông quốc tế ITU, có chất lượng tốt và độ tin cậy cao và đang nghiên cứu nâng dung lượng truyền dẫn trên mỗi bước sóng là 10 Gbps và sử dung công nghệ ghép kênh theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing) để năng tiếp tốc độ truyền lên 40 Gbps và tương lai là 320 Gbps, do đó, việc nghiên cứu về sự gia tăng tán sắc, hiệu ứng phi tuyến, tỷ số bít lỗi BER là rất quan trọng.

*Tác giả liên hệ: cuuhovan@sgu.edu.vn

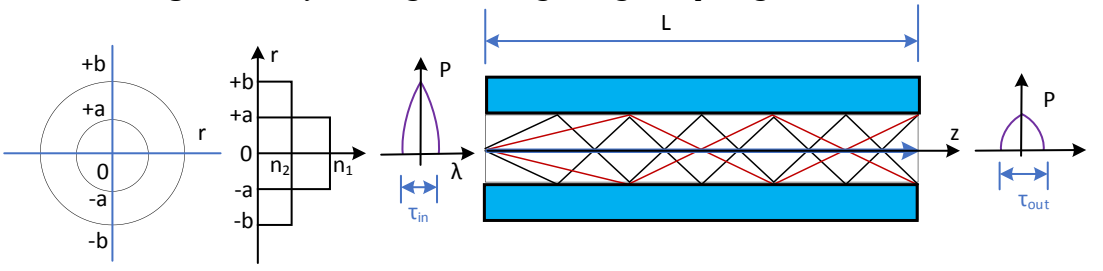
Trên thế giới, đã công bố nhiều kết quả nghiên cứu giảm ảnh hưởng tán sắc trong các hệ thống truyền dẫn quang, đặc biệt là kết quả nghiên cứu của Affida MZin, Sevia M. Idrus [4] nghiên cứu ứng dụng hệ thống truyền dẫn quang tiếp cận thuê bao Gpon, nhưng dung lượng truyền ở mức thấp, nghiên cứu của Dubovitky [5] tập trung nghiên cứu về điều chế dữ liệu số vào hệ thống truyền dẫn quang để tăng hiệu quả sử dụng băng thông nhưng BER cũng tăng, chất lượng giảm, nhóm nghiên cứu của Gerard Lachs [6], John Gowar [8] về lý thuyết hình thành tán sắc trong sơi quang, nhóm nghiên cứu của Peter A. Andrekson [7] sử dụng hốc cộng hưởng Bragg Gratting để khắc phục tán sắc do chất liệu và bước sóng truyền trong hệ thống quang 10 Gbps. Tuy nhiên khi ứng dụng công nghệ WDM thì BER tăng, nhóm nghiên cứu của Kishore Bhowmik [9], Bipul Hosain [10], Sachindev,Col [12] nghiên cứu sự hình thành tán sắc do độ lệch phổ nguồn quang và đề xuất sử dụng điều chế ngoài MZ (Math Zender) để giảm hiện tượng tà (chirp) đỉnh xung, nghiên cứu của Egon Astra.

Tại Việt Nam, có nhóm nghiên cứu của Ngô Thị Thu Trang, Nguyễn Viết Đảm [3], N.D. Nhan, T.T. Bình [11] đề xuất giải pháp sử dụng điều chế pha vuông pha, và khuếch đại quang để nâng cao dung lượng kênh truyền tuy nhiên giá trị BER tăng hơn điều chế nhị phân. Đặc biệt, Bộ Thông tin và Truyền thông, đã sử dung tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế IUT-T G6951, 691, 655, 656 để ban hành 2 bộ tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia về thiết bị quang từ STM-1, đến STM-64 và tiêu chuẩn quốc gia về sợi quang đơn - mốt G-652, G-653, G-654, G-655 [1],[2] để áp dụng vào mạng truyền dẫn quang Việt Nam.

Mặc khác, hệ thống mạng truyền dẫn quang Việt Nam đang hoạt động, có cự ly khác nhau, nên khi nâng dung lượng truyền lên 40 Gbps, thì rất cần nghiên cứu đánh giá mức độ ảnh hưởng của tán sắc trên hệ thống và đưa ra các giải pháp bù tán sắc hiệu quả để đảm bảo chất lượng truyền dẫn và thông tin không bị gián đoạn. Do đó, chúng tôi đề xuất hướng nghiên cứu mới về việc lập mô hình toán để tính tham số tán sắc, phân tích ảnh hưởng của tán sắc đến tham số cự ly truyền dẫn, băng thông và thiết lập mô hình mô phỏng hệ thống truyền dẫn quang 40 Gbps theo chuẩn kỹ thuật của Bộ Thông tin và Truyền thông để đo lường các tham số chất lượng về công suất, tỷ số Q, giản đồ mắt (Eye) và tỷ số bít lỗi BER (Bit Error Rate), so sánh đánh giá chất lượng hệ thống theo từng độ dài khác nhau để áp dụng trên các hệ thống truyền dẫn quang thực tế tại Việt Nam.

2. Phân tích ảnh hưởng tán sắc đến cự ly và dung lương trong hệ thống truyền dẫn quang băng rộng

2.1. Phương trình truyền sóng ánh sáng trong sợi quang đơn-mốt



Hình 1. Mô hình truyền sóng ánh sáng trong sợi quang đơn-mốt

Xem tín hiệu quang truyền trong sợi quang đơn mode, như truyền trong ống dẫn sóng hình trụ, có độ dài là L. Công thức cường độ điện trường các mode sóng truyền trong sợi quang theo tần số được viết dưới dạng sau [6],[8]:

$$\tilde{E}(r,\omega) = \tilde{x}F(x,y).\tilde{B}(0,\omega)exp(i\beta z) \quad (1)$$

Trong đó, $\tilde{x}$ là véc-tơ phân cực, $\tilde{B}(0,\omega)$ là biên độ ban đầu, β là hằng số lan truyền, $F(x,y)$ là hàm phân bố Gaussian trường mode sóng quang, gọi ω_0 là tần số sóng mang, $\tilde{B}(z,t) = \tilde{B}(0,\omega)exp(i\beta z)$ là thành phần phổ biên độ theo tần số, và biên độ trong miền thời gian sẽ là $B(z,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} B(z,\omega)\exp(-i\omega t)\,d\omega$, kết quả tích phân sẽ được công thức tương đương là:

$$B(z,t) = A(z,t)exp[i(\beta_0 z - \omega_0 t)] \quad (2)$$

Trong đó $A(z,t)$ là biên độ xung được xác định theo các mốt sóng bậc cao như sau [6],[8]:

$$A(z,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\tilde{A}(0,\Delta\omega)exp\left(i\beta_1\Delta\omega + \frac{i}{2}\beta_2 z(\Delta\omega)^2 + \frac{i}{6}\beta_3 z(\Delta\omega)^3 - i\Delta\omega t\right)d\Delta\omega \quad (3)$$

Hiện tượng giãn xung truyền trong sợi quang là do tính phụ thuộc của biên độ A(z,t) theo tần số và hệ số mốt truyền β, đối với các xung đơn sắc $\Delta\omega << \omega_0$, khai triển chuỗi Taylor $\beta(\omega)$ theo tần số mang ω_0 đến hài bậc ba, công thức tính gần đúng như sau [6],[8]:

$$\beta(\omega) = n(\omega).\frac{\omega}{C} \approx \beta_0 + \beta_1(\Delta\omega) + \frac{1}{2}\beta_2(\Delta\omega)^2 + \frac{1}{6}\beta_3(\Delta\omega)^3 \quad (4)$$

Trong đó, độ dịch tần số $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ và $\beta_m = (d^m\beta/d\omega^m)_{\omega=\omega 0}$. $\tilde{A}(0,\Delta\omega)$ là biến đổi Fourier của $A(0,t)$. Kết quả tính toán $\partial A/\partial z$ từ biểu thức (3) và sử dụng Δω để thay thế $i(\partial A/\partial t)$, phương trình truyền dẫn sóng quang cơ bản trong sợi quang đơn-mốt như sau [6],[8]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3\frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = 0 \quad (5)$$

Biến đổi, $t' = t - \beta_1 z$ và z'= z thì phương trình truyền dẫn sóng quang trong sợi quang đơn-mốt (5) được viết lại như sau:

$$\frac{\partial A}{\partial \acute{z}} + \frac{1}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial \acute{t}^2} - \frac{1}{6}\beta_3\frac{\partial^3 A}{\partial \acute{t}^3} = 0 \quad (6)$$

Khi phân tích sự lan truyền của các xung quang theo phân bố Gaussian trong sợi quang, khi không có tán sắc ($\beta_2 = \beta_3 = 0$), xung quang truyền không thay đổi dạng phân bố Gaussian, tức là $A(z,t) = A(0,t - \beta_1 z)$, kết quả tích phân (3) xác định được biên độ xung quang tại đầu vào sợi quang như sau [6],[8]:

$$A(z,t) = A_0 exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right] \quad (7)$$

Trong đó, A_0 là biên độ đỉnh, T_0 biểu thị là một nửa độ rộng tại điểm cường độ 1/e, $T_0 = \frac{T_{FWHM}}{2.\sqrt{ln2}}$; T_{FWHM} là độ rộng toàn phần tại nửa lớn nhất FWHM (Full Width at Half Maximum) của xung, tham số C sẽ tạo nên sự lệch tần số tuyến tính tác động vào xung. Xung được gọi là bị tà đỉnh xung (chirp) nếu như tần số mang của nó thay đổi theo thời gian, sự thay đổi tần số có liên quan đến pha ϕ(t) theo phép toán $\delta\omega(t) = -\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{C}{T^2{}_0}t$.

Sự dịch tần số δω(t) được gọi là tà (chirp) đỉnh xung quang [6],[8]

2.2. Phương trình toán tham số tán sắc truyền trong sợi quang đơn-mốt

Biến đổi Fourier biểu thức (7) thành công thức sau:

$$\tilde{A}(0,\omega) = A_0\left(\frac{2\pi T_0^2}{1+iC}\right)^{1/2} exp\left[-\frac{\omega^2 T_0^2}{2(1+iC)}\right] \quad (8)$$

Nữa độ rộng phổ tại điểm cường độ

sóng quang bằng 1/e là: $\Delta\omega_0 = \frac{\sqrt{1+C^2}}{T_0}$. Khi không có chirp thì (C = 0), độ rộng phổ thỏa mãn quan hệ [$\Delta\omega.T_0$ =1], xung sẽ có phổ hẹp nhất và được gọi là xung biên độ giới hạn. Khi có chirp thì độ rộng phổ tăng theo hệ số $(1 + C^2)^{1/2}$. Khi tính tích phân từ biểu thức (3) bằng giải tích toán học, dựa theo bảng tra hàm tích phân tương đương của Gradshteyn [13], thu được kết quả gần đúng là[6],[8],[13]:

$$A(z,t) = \left(\frac{A_0 T_0}{[T_0^2 - i\beta_2 z(1+iC)]^{1/2}}\right) exp\left(-\frac{(1+iC)t^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 z(1+iC)]}\right) (9)$$

Biểu thức (9) chỉ ra các xung Gaussian có biến dạng trong quá trình lan truyền từ đầu vào đến điểm z. Tỷ số độ giãn xung thay đổi theo cự ly truyền tại điểm z so với độ rộng xung tại đầu vào được công thức tính theo tỷ số giãn xung như sau [6],[8]:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2\right]^{1/2} (10)$$

Trong đó, T_1 là một nửa độ rộng tại điểm z, đường biểu diễn tỷ số giãn xung T_1/T_0 là một hàm số của cự ly truyền dẫn z/L_D, trong đó L_D được gọi là độ dài tán sắc, $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$. Tuy nhiên, trong thực tế, xung Gaussian đầu vào không duy trì Gaussian trong khi truyền và tạo ra đuôi dài có dạng dao động, giá trị đúng của độ rộng xung là độ rộng hiệu dụng trung bình quân phương RMS (Root mean square) của xung được xác định như sau [8],[11],[12]:

$$\sigma = \sqrt{\langle t^2\rangle - \langle t\rangle^2} (11)$$

Trong đó, các dấu móc nhọn ký hiệu giá trị trung bình có liên quan đến cường độ bậc cao của xung quang [8],[11],[12], $\langle t^m\rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t^m |A(z,t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} |A(z,t)|^2 dt}$, hệ số giãn xung được xác định theo tỷ số σ/σ_0, ở đây σ_0 là độ rộng RMS của xung Gaussian đầu vào, $\sigma_0 = T_0/ 2^{1/2}$ và tính như sau [8]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{C.\beta_2.L}{2.\sigma_0^2}\right) + \left(\frac{\beta_2.L}{2.\sigma_0^2}\right)^2 + \frac{1}{2}(1+C^2).\left(\frac{\beta_3.L}{4.\sigma_0^3}\right)^2} (12)$$

Trong thực tế, độ rộng phổ nguồn xung quang phát quang là một quá trình ngẫu nhiên Gaussian, độ rộng phổ RMS là σ_ω thì hệ số giãn xung tính như sau[8]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{\left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2.\sigma_0^2}\right)^2 + (1+V_\omega^2)\left(\frac{\beta_2 L}{2.\sigma_0^2}\right)^2 + \frac{1}{2}(1+C^2+V_\omega^2)\left(\frac{\beta_3 L}{4.\sigma_0^3}\right)^2} (13)$$

Trong đó gọi hai lần tích số giãn xung là V_ω, $V_\omega = 2\sigma_\omega\sigma_0$. Biểu thức (13) thể hiện dạng diễn giải cho sự giãn do tán sắc của xung Gaussian đầu vào của các hệ thống thông tin quang.

2.3. Các loại tán sắc trong sợi quang đơn-mốt

Tán sắc vận tốc nhóm (GVD) là do sóng quang khi lan truyền trong sợi quang theo nhiều vận tốc khác nhau và không đến cùng lúc tại đầu ra. Gọi τ_n là sự trễ nhóm đối theo một đơn vị độ dài, λ_0 là bước sóng trung tâm và σ_λ là độ rộng trung bình bình phương RMS của phổ nguồn phát, sự giãn rộng xung quang và có công thức tính như sau [4],[12]:

$$\sigma_z = L.\left(\frac{d\tau_n}{d\lambda}\right)\lambda_s\sigma_\lambda (14)$$

Gọi $\Delta\omega$ là độ rộng phổ của xung thì độ giãn xung khi truyền qua sợi có độ dài L thì tán sắc nhóm (GVC) được tính theo công thức như sau [4],[12]:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega}\Delta\omega = \frac{d}{d\omega}\left(\frac{L}{V_g}\right)\Delta\omega = L.\frac{d^2\beta}{d\omega^2}.\Delta\omega = L.\beta_2.\Delta\omega (15)$$

trong đó, $\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}$ được gọi là hệ số tán sắc vận tốc nhóm (GVD) truyền trong sợi quang đơn – mốt. Khi sử dụng $\delta_\lambda = \Delta\lambda$

thay cho δ_ω=Δω thì tán sắc GVD được tính theo công thức [4],[12]:

$$\Delta T = \frac{d}{d\omega}\left(\frac{L}{V_g}\right)\Delta\omega = L.\frac{d}{d\lambda}\left(\frac{1}{V_g}\right) = -L.\frac{2\pi C}{\lambda^2}\beta_2.\Delta\lambda = D.L.\Delta\lambda \quad (16)$$

trong đó, $D = \frac{d}{d\lambda}\left(\frac{1}{V_g}\right) = -\frac{2\pi C}{\lambda^2}\beta_2$ là hệ số tán sắc nhóm và chuẩn hóa theo đơn vị (*ps/km.nm*).

Tán sắc GVG là do vật liệu chế tao sợi quang hay còn gọi là tán sắc vật liệu, ký hiệu D_M, tán sắc xuất hiện khi sự thay đổi chỉ số chiết suất n(r) của vật liệu chế tạo ra sợi quang, Công thức tính tán sắc vật liệu như sau [7],[8],[9]:

$$D = D_M = -\frac{2\pi}{\lambda^2}.\frac{dn_{2g}}{d\omega} = \frac{1}{C}.\frac{dn_{2g}}{d\lambda} \quad (17)$$

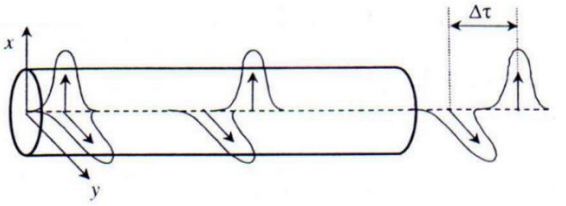
Tán sắc dẫn sóng là do sợi quang đơn mốt chỉ giữ được khoảng 80% năng lượng truyền trong lõi sợi, còn 20% ánh sáng truyền trong lớp vỏ, có chiết suất thấp hơn nên truyền nhanh hơn. Tán sắc dẫn sóng phụ thuộc vào hằng số mốt truyền bậc cao β và hệ số (a/λ), tán sắc ống dẫn sóng ký hiệu là D_W là một hàm phụ thuộc vào tần số chuẩn hóa V_b của sợi quang và được tính theo công thức như sau [10]:

$$D = D_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2}.\left[\frac{n_{2g}^2}{n_2\omega}.\frac{Vd^2(V_b)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega}.\frac{d(V_b)}{dV}\right] \quad (18)$$

Trong đó, n_{2g} là chỉ số nhóm của vật liệu vỏ, V_b là hằng số lan truyền chuẩn. Tham số Δ được gọi là độ lệch chiết suất giữa lõi và vỏ sợi quang. Sử dụng mô hình toán tính độ dốc đường bao tán sắc theo công thức $S = \frac{dD}{d\lambda}$, tham số S cũng được gọi là độ dốc tán sắc bậc cao, $S = \left(\frac{2\pi C}{\lambda^2}\right)^2\beta_3 + \left(\frac{4\pi C}{\lambda^3}\right)\beta_2$; Trong đó; $\beta_3 = d\beta_2/d\omega = d^3\beta/d\omega^3$. Tại bước sóng tán sắc không, $\lambda = \lambda_{ZD}$, $\beta_2 = 0$, và S tỷ lệ với β_3; nguồn phát có độ rộng phổ Δλ, giá trị hiệu dụng của tham số tán sắc trở thành theo công thức sau [5],[9],[10],[12]:

$$D = S(ps/nm^2).\Delta\lambda(nm) \quad (19)$$

Tán sắc phân cực mode PMD (Polarization Mode Dispersion) là do hai mode phân cực trực giao của nguồn quang truyền trong sợi quang đơn-mốt theo các vận tốc khác nhau như Hình 2.



Hình 2. Hiện tượng lệch phân cực xung ánh sáng truyền qua sợi quang đơn mode

Sự giãn xung là thời gian trễ ΔT giữa hai thành phần trực giao của sóng truyền trong sợi quang, có độ dài là L, công thức tính ΔT được viết như sau [6],[8]:

$$\Delta T = \left|\frac{L}{V_{gx}} - \frac{L}{V_{gy}}\right| = L.\left|\beta_{1x} - \beta_{1y}\right| = L.\Delta\beta_1; \quad (20)$$

Tán sắc phân cực mode PMD, có tính ngẫu nhiên, xác định trung phép toán trung bình quân phương và có công thức tính [6],[8]:

$$\sigma = \sigma_T^2 = \langle(\Delta T)^2\rangle = \frac{1}{2}\Delta\beta_1^2h^2\left[\frac{2.L}{h} - 1 + exp\left(-\frac{2L}{h}\right)\right] \quad (21)$$

Khi h << L thì công thức tính hệ số tán sắc phân cực là[11]:

$$\sigma_T \approx \Delta\beta_1.\sqrt{h.L} = D_{PMD}.\sqrt{L} \quad (22).$$

Trong đó, giá trị của hệ số tán sắc lệch phân cực được chuẩn hóa $D_{PMD} = 0{,}1 \div 1.0\frac{ps}{\sqrt{km}}$.

Từ mô hình toán tán sắc, các nhà sản xuất cáp sợi quang đã lựa chọn vật liệu và công nghệ chế tạo để tạo ra các sản phẩm cáp sợi quang đạt chuẩn, ứng dung vào thực tế là sợi G652, G653, G654, G655[1],[2], trong đó hệ sô tán sắc theo công thức như sau [1],[2]:

$$\frac{\lambda.S_{0max}}{4}\left[1-\left(\frac{\lambda_{0max}}{\lambda}\right)^4\right]A \le D(\lambda) \le \frac{\lambda.S_{0max}}{4}\left[1-\left(\frac{\lambda_{0mix}}{\lambda}\right)^4\right] \quad (23)$$

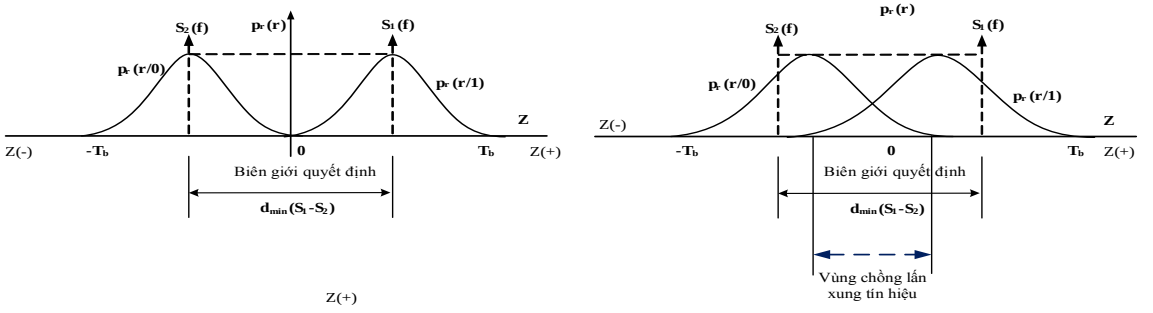
Trong đó, $\lambda, \lambda_{max}, \lambda_{min}, S_{0max}$ là các tham số bước sóng và độ dốc đường bao tán sắc được chuẩn hóa quy chuẩn kỹ thuật của Bộ Thông tin và Truyền thông [1],[2].

2.4. Phân tích ảnh hưởng của tán sắc đến cự ly và dung lượng trong hệ thống truyền dẫn quang băng rộng

Tín hiệu số là chuỗi các bít 1, 0, được điều chế với nguồn quang, truyền qua sợi quang đến đầu thu được giải điều chế, khôi phục lại chuỗi bit số tương ứng. Gọi véc-tơ tín hiệu điều chế số phát bít 1 là $s_1(t)$ và bít 0 là $s_2(t)$; xác suất phát bít 1 là P(1); xác suất phát bit "0" là P(0). Giả sử, xác suất phát bit 1 và xác suất phát bít 0 là bằng nhau và bằng ½. Xác suất thu sai bít 1 bằng xác suất thu sai bít 0, xác suất thu sai bít 1, tức là thu được bít 0 khi phát bit 1 và xác suất thu sai bít 0, tức là thu bít 1 khi phát bit 0, Công thức tính xác suất lỗi bít tín hiệu số trong hệ thống truyền dẫn quang sẽ là [7],[11]:

$$P_E(b) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \le \frac{1}{2}e^{-\left(\frac{\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)^2}{2}\right)} = \frac{1}{2}e^{-\frac{E_b}{N_0}} \quad (24)$$

Biểu đồ mô tả miền xác định của tín hiệu số nhị phân phát và miền xác định của hàm mật độ khả năng thu nhận tín hiệu số nhị phân ở máy thu mô tả như hình 3, điều kiện để giảm xác suất thu sai bít là giảm chồng lấn miền xác định giữa hai bít liền kề nhau sao cho không quá 25% độ rộng bít, $(\le \frac{1}{4T_b})$ [11]:



Hình 3. Không gian quan sát và hàm mật độ xác định bít số của bộ giải điều chế thu

a. Xét trường hợp nguồn phát quang có độ rộng phổ lớn

Trong trường hợp hệ thống truyền dẫn quang tốc độ cao sử dụng nguồn phát quang có độ rộng phổ lớn thì $V_\omega >> 1$, nếu hệ thống hoạt động ở bước sóng chệch khỏi bước sóng có tán sắc bằng không, số hạng β_3 có thể được bỏ qua, các ảnh hưởng của lệch tần số là không đáng kể, C = 0. Tỷ số giãn xung sẽ là [6],[8]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{1+\left(\frac{\beta_2 L \sigma_\omega}{\sigma_0}\right)^2} = \sqrt{1+\left(\frac{\beta_2 L \sigma_\lambda}{\sigma_0}\right)^2} \quad (25.a)$$

Trong đó, σ_λ là độ rộng phổ RMS của nguồn. Độ rộng xung đầu ra sẽ được viết

như sau: $\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_D^2}$, với $\sigma_D \equiv |D|L\sigma_\lambda$ là độ giãn xung do tán sắc gây ra. Theo giả thuyết độ giãn xung σ không được lớn hơn 25% độ rộng bít dữ liệu truyền T_b, mà $T_b = 1/B$, trong đó B là tốc độ bit. Công thức tính độ giãn xung do tán sắc $\sigma \le T_b/4$ sẽ là:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_D^2} \le \frac{T_b}{4} \text{ (25.b)}$$

Khi độ giãn xung tại đầu vào rất nhỏ, thì độ giãn xung tại đầu ra $\sigma_D >> \sigma_0$, nên $\sigma \approx \sigma_D$, $\sigma = \sigma_D \equiv |D|L.\sigma_\lambda \le \frac{T_b}{4} = \frac{1}{4B}$ và phương trình quan hệ tán sắc, cự ly, băng thông được viết như sau[6],[8]:

$$\mathbf{4}.\boldsymbol{B}.|\boldsymbol{D}|.\boldsymbol{L}.\boldsymbol{\sigma_\lambda} \le \mathbf{1} \text{ (26)}$$

Trong trường hợp hệ thống truyền dẫn quang tốc độ cao hoạt động chính xác tại bước sóng có tán sắc bằng không, thì $\beta_2 = 0$, C = 0, và $V_\omega >> 1$, thì biểu thức tỷ số giãn xung có thể xác định xấp xỉ như sau:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_3 L\sigma_\omega^2}{\sigma_0}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{S.L\sigma_\lambda}{\sigma_0}\right)^2} \text{ (27)}$$

Trong đó, β_3 tính theo công thức công thức độ dốc đường bao tán sắc S. Như vậy, độ rộng xung đầu ra được viết như sau:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{\left(S.L\sigma_\lambda^2\right)^2}{2}} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_D^2} \le \frac{T_b}{4} = \frac{1}{4.B} \text{ (28)}$$

Khi độ giãn xung tại đầu vào rất nhỏ, thì độ giãn xung tại đầu ra $\sigma_D >> \sigma_0$, giới hạn về tốc độ bit được viết như sau:

$$\sigma_D \gg \sigma_0;\ \sigma \cong \sigma_D = \frac{|S|.L.\sigma_\lambda^2}{\sqrt{2}} = \frac{1}{4.B} \text{ (29)}$$

Phương trình quan hệ tán sắc, cự ly, băng thông được viết như sau:

$$\mathbf{B}.|\mathbf{S}|.\mathbf{L}.\boldsymbol{\sigma_\lambda^2} \le \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{8}}} \text{ (30)}$$

b. Xét trường hợp nguồn phát quang có độ rộng phổ nhỏ

Nguồn quang có độ rộng phổ hẹp, thì $V_\omega << 1$, nếu chúng ta bỏ qua số hạng β_3 và chọn C=0, thì biểu thức tính độ giãn xung sẽ là:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \left(\frac{\beta_2.L}{2\sigma_0}\right)^2} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_D^2} \le \frac{T_b}{4} = \frac{1}{4.B} \text{ (31)}$$

Đối với phổ nguồn phát hẹp, độ giãn xung do tán sắc gây ra sẽ phụ thuộc vào độ rộng ban đầu σ_0, σ có thể giảm nhỏ tối thiểu bằng cách chọn giá trị tối ưu của σ_0, và có công thức là:

$$\sigma_0 = \sigma_D = \sqrt{\frac{\beta_2.L}{2}} \text{ (32)}$$

Giới hạn tốc độ bit có thể nhận được khi sử dụng $\sigma \le 1/4B$ như sau:

$$\boldsymbol{B}.\sqrt{\boldsymbol{\beta_2}.\boldsymbol{L}} \le \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{4}} \textbf{ hay } \mathbf{4}.\boldsymbol{B}.\sqrt{\boldsymbol{\beta_2}.\boldsymbol{L}} \le \mathbf{1} \quad \text{(33)}$$

Đối với hệ thống thông tin quang hoạt động ở bước sóng rất gần với bước sóng có tán sắc bằng không, $\beta_2 \approx 0$, $V_\omega << 1$ và C = 0, độ giãn xung sẽ là:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_3.L}{4.{\sigma_0}^2}\right)^2} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_D^2} \le \frac{T_b}{4} = \frac{1}{4.B} \text{ (34)}$$

Tương tự, độ giãn xung tối thiểu σ bằng cách tối ưu độ rộng xung đầu vào σ_0, khi giá trị nhỏ nhất của σ_0 được tìm $\sigma_{0-min} = (\beta_3.L/4)^{1/3}$, công thức tính như sau [6],[8]:

$$\sigma = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2}.\left(\frac{\beta_3.L}{4}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ (35)}$$

Giới hạn tốc độ bit theo điều kiện $\sigma \le 1/4B$ sẽ là:

$$\mathbf{B}.(\boldsymbol{\beta_3}.\mathbf{L})^{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}}} \le \mathbf{0.324} \text{ (36)}$$

Bàn luận: *Việc tính mối quan hệ giữa tán sắc D với tốc độ B và cự ly truyền dẫn L trong các hệ thống truyền dẫn quang sử dụng nguồn quang có phổ rộng là LED và LASER, làm việc ở vùng bước sóng 1550nm thì sử dụng công thức (26) và công thức (30) khi nguồn quang hoạt động trong vùng bước sóng 1300 nm. Tương tự, áp dung công thức (33) để tính mối quan hệ giữa tán sắc D với tốc độ B và cự ly truyền dẫn L trong các hệ thống truyền dẫn quang có phổ hẹp dùng LASER đặc biệt ở vùng bước sóng 1550nm và dùng công thức (36) ở vùng bước sóng 1300nm.*

3. Thiết lập mô hình mô phỏng mạng truyền dẫn quang 40 Gbps

3.1. Lựa chọn tham số mô phỏng

Thiết lập mạng truyền dẫn quang điểm điểm, dung lượng truyền 40 Gbps, cự ly truyền dẫn L(km) chọn giá trị cực đại từ bảng tiêu chuẩn kỹ thuật [1],[2], ký hiệu I(25km), S(40km), L(80km), V(120km), U(160km), sử dụng bộ ghép kênh theo bước sóng WDM, với 4 bước sóng 1551nm/193.4 THz; 1559nm/192.4 THz, 1567nm/191.4 THz, 1575.78nm/190.4 THz, giao diện quang STM-64 có dung lượng 10Gbps, công suất LASER phát 13dBm, độ nhạy thu là -20dBm, mức BER 10^{-12}, độ tán sắc tích lũy cực đại 440 ps và sợi quang sử dụng theo chuẩn G.655.D, mức suy hao cáp là 0,2dB/km, hệ số tán sắc D(λ) tính theo công thức (23).

3.2. Kết quả tính giới hạn băng thông, tham số tán sắc tích lũy của các tuyến truyền quang băng rộng 40Gbps theo tiêu chuẩn kỹ thuật QCQG-7-2010/BTTTT

Kết quả tính băng thông theo tham số tán sắc tích lũy theo theo công thức (23) của hệ thống truyền dẫn quang 40Gbps.

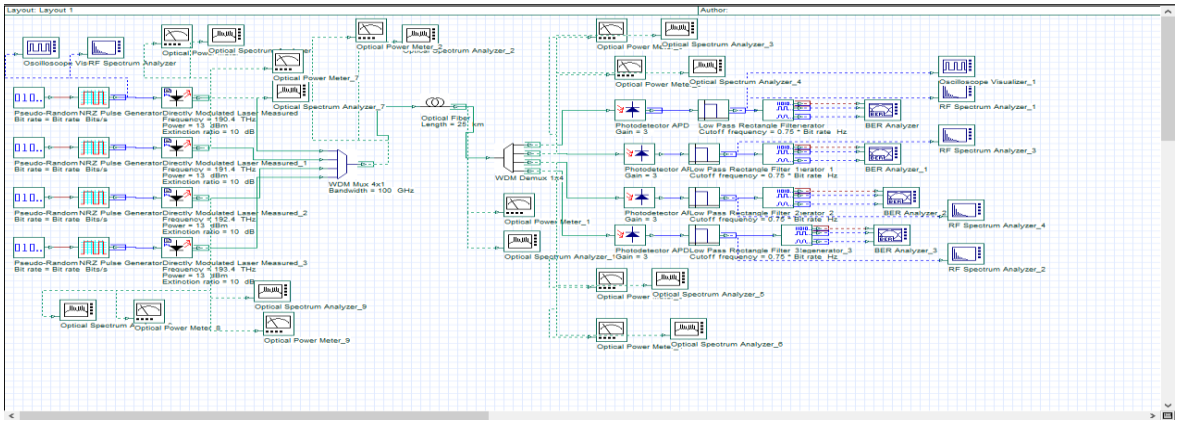
Bảng 1. Bảng tính giá trị tán sắc và giới hạn băng thông của 4 bước sóng truyền trong hệ thống truyền dẫn quang 40 Gbps

Mạng truyền dẫn quang	Cự ly (km)	Tham số/ Kênh bước sóng	Độ tán sắc tích lũy cực tiểu $\sigma_{min} = D_{(min)}.L.\sigma_\lambda$				Độ tán sắc tích lũy cực đại $\sigma_{max} = D_{(max)}.L.\sigma_\lambda$			
			1551	1559	1567	1575	1551	1559	1567	1575
I	25	Tán sắc (ps)	76.3	80.7	85.1	89.5	117.1	122.6	128.0	133.5
		Băng thông (Gbps)	262.1	247.8	235.0	223.5	170.9	163.2	156.2	149.8
S	40	Tán sắc	122.1	129.1	136.2	143.2	187.3	196.1	204.9	213.7
		B(Gbps)	102.4	96.8	91.8	87.3	66.7	63.7	61.0	58.5
L	80	Tán sắc	244.2	258.2	272.3	286.4	374.6	392.2	409.8	427.3
		B(Gbps)	25.6	24.2	23.0	21.8	16.7	15.9	15.3	14.6
V	120	Tán sắc	366.2	387.4	408.5	429.6	561.9	588.3	614.6	641.0
		B(Gbps)	11.4	10.8	10.2	9.7	7.4	7.1	6.8	6.5
U	160	Tán sắc	488.3	516.5	544.6	572.8	749.2	784.4	819.5	854.7
		B(Gbps)	6.4	6.1	5.7	5.5	4.2	4.0	3.8	3.7

Bàn luận: Kết quả tính cho thấy, các hệ thống truyền dẫn cáp quang có cự ly dưới 80km, có độ tán sắc cực đại nhỏ hơn 427ps, băng thông lớn hơn 14,6Gbps, so sánh với dung lượng truyền dẫn 10Gbps, và thiết bị quang STM 64 có độ tán sắc cho phép 480 thì đạt yêu cầu, trường hợp mạng truyền dẫn V(120km), U(160km) có giá trị tán sắc cực đại cao hơn 480ps, băng thông cho phép truyền thấp hơn 10Gbps nên không đạt yêu cầu.

3.3. Sơ đồ mô phỏng mạng truyền dẫn quang 40 Gbps trên phần mềm Optisystems

Thông số mô phỏng, dung lượng truyền trên mỗi kênh là 10Gbps, cự ly truyền dẫn I(25km), S(40km), L(80km), V(120km), U(160km), ghép theo 4 bước sóng 1551nm/193.4 THz; 1559nm/192.4THz, 1567nm/191.4 THz, 1575.78nm/190.4 THz, công suất LASER phát là 13dBm, độ nhạy thu là -20dBm, mức BER 10^{-12}, độ tán sắc tích lũy cực đại 440ps và sợi quang sử dụng theo chuẩn G.655.D, mức suy hao cáp là 0,2dB/km, độ dốc tán sắc S(ps/nm^2)=0,09761.



Hình 4. Sơ đồ mô phỏng mạng truyền dẫn quang 40Gbps, điều chế trực tiếp

3.4. Kết quả đo các tham số chất lượng tuyến truyền dẫn quang

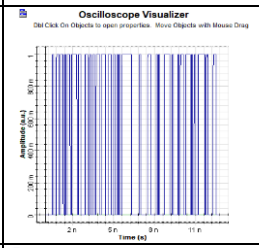
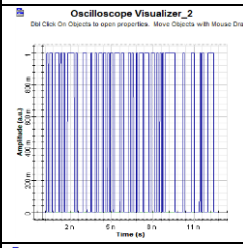
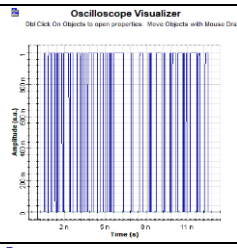
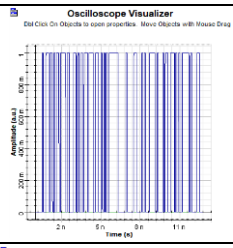
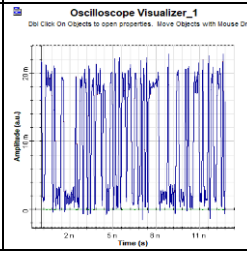
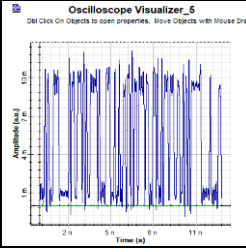
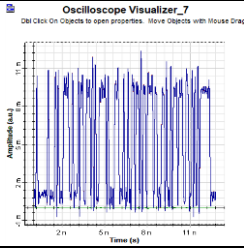
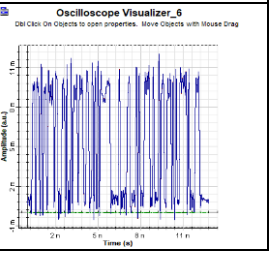
3.3.1. Kết quả đo công suất thu tín hiệu quang

Công suất tín hiệu quang phát trước điều chế là 13dBm, công suất tín hiệu quang phát sau điều chế là 10.3dBm, công suất phát quang sau bộ ghép kênh quang phát là 16.4dBm, kết quả đo công suất của tín hiệu quang thu trước và sau bộ ghép kênh theo bước sóng 4WDM.

Bảng 2. Kết quả đo công suất thu tín hiệu quang

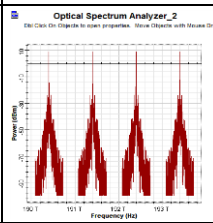
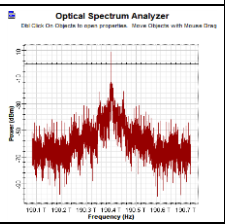
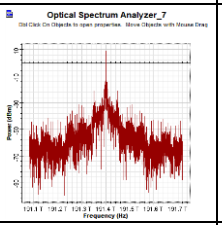
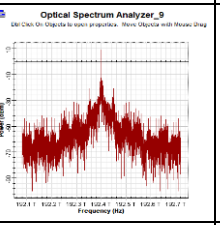
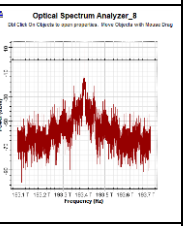
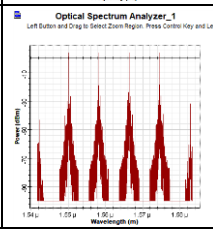
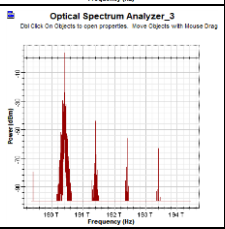
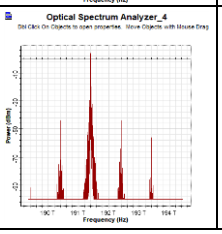
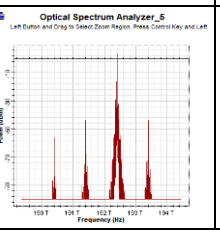
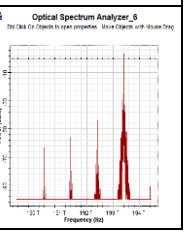
Mạng truyền dẫn quang	Cự ly (km)	Công suất tín hiệu quang thu (dBm)				
		$P_{r\text{-}4*WDM}$	$P_{r\text{-}\lambda1}$	$P_{r\text{-}\lambda2}$	$P_{r\text{-}\lambda3}$	$P_{r\text{-}\lambda4}$
I	25	11.4	5.37	5.47	5.47	5.37
S	40	8.40	2.37	2.48	2.47	2.37
L	80	0.40	-5.63	-5.51	-5.52	-5.63
V	120	-7.59	-13.62	-13.53	-13.52	-13.62
U	160	-15.59	-21.62	-21.53	-21.52	-21.62

3.3.2. Kết quả đo phổ tín hiệu số 10 Gbps phát và thu các kênh thành phần, sơ đồ I(25km)

Tx/Rx	$P_{r\text{-}\lambda1}$	$P_{r\text{-}\lambda2}$	$P_{r\text{-}\lambda3}$	$P_{r\text{-}\lambda4}$
Tín hiệu số phát				
Tín hiệu số thu				

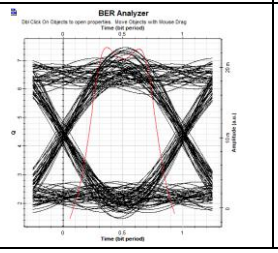
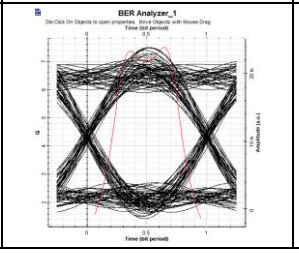
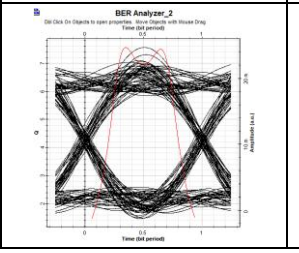
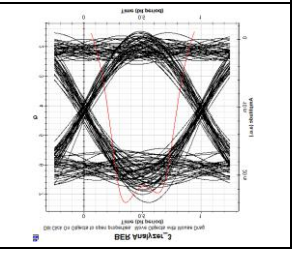
Hình 5. Đồ thị luồng tín hiệu số kênh thành phần mạng truyền dẫn quang 40Gbps I(25km)

3.3.3. Kết quả đo phổ tín hiệu quang phát và quang thu của mạng truyền dẫn quang 40Gbps

Tín hiệu	S_{4WDM}	$S_{r\text{-}\lambda1}$	$S_{r\text{-}\lambda2}$	$S_{r\text{-}\lambda3}$	$S_{r\text{-}\lambda4}$
Phổ tín hiệu phát Tx					
Phổ tín hiệu thu Rx					

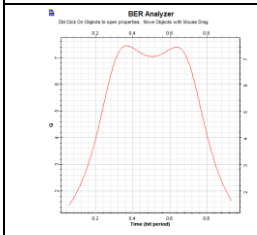
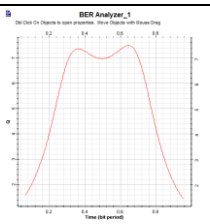
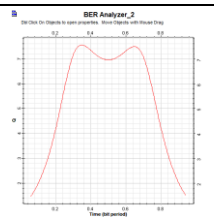
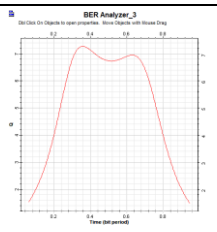
Hình 6. Biểu đồ đo dang phổ các luồng số và mạng truyền dẫn quang 40Gbps

3.3.4. Kết quả giản đồ mắt (EYE) của 4 kênh tín hiệu số thu thành phần.

Kênh λ1	Kênh λ2	Kênh λ3	Kênh λ4
			

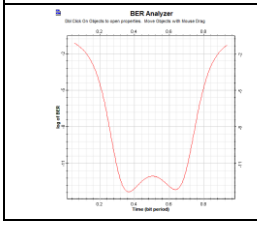
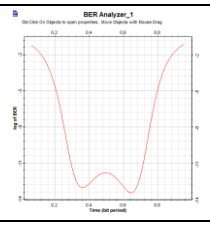
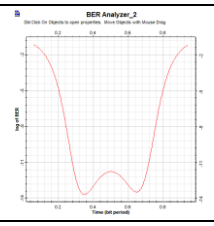
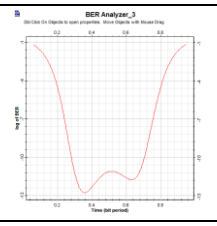
Hình 7. Biểu đồ mắt EYE của các luồng số mạng truyền dẫn quang 40Gbps

3.3.5. Kết quả đo biểu đồ tỷ số chất lương Q của 4 kênh tín hiệu số thu thành phần

Kênh λ1	Kênh λ2	Kênh λ3	Kênh λ4
			

Hình 8. Biểu đồ tỷ số chất lượng Q của các luồng số mạng truyền dẫn quang 40Gbps

3.3.6. Kết quả đo đồ thị tỷ số bít lỗi BER tín hiệu số thu thành phần

Kênh λ1	Kênh λ2	Kênh λ3	Kênh λ4
			

Hình 9. Biểu đồ đo tỷ số bít lỗi của các luồng số mạng truyền dẫn quang 40Gbps, I(25km)

3.3.7. Kết quả đánh giá chất lương mạng truyền dẫn quang 40Gbps

Bảng 3. Bảng tổng hợp kết quả đo tỷ số bít lỗi BER, tỷ số chất lượng Q

Mạng truyền dẫn	Cự ly (km)	Tham số chất lượng	Tham số chất lượng theo các kênh bước sóng thành phần				
			$P_{r\text{-}4*WDM}$	$P_{r\text{-}\lambda1}$	$P_{r\text{-}\lambda2}$	$P_{r\text{-}\lambda3}$	$P_{r\text{-}\lambda4}$
I	25	Pr	11.40	5.26	5.47	5.44	5.27
		Q		7.44			
		BER		$4.7.10^{-14}$			
S	40	Pr	8.40	2.34	2.40	2.33	2.36
		Q		7.18	7.36	7.28	7.19
		BER		$3.2.10^{-13}$	$8.6.10^{-14}$	$1.6.10^{-13}$	$3.0.10^{-13}$
L	**80**	**Pr**	**0.40**	**-5.66**	**-5.60**	**-5.63**	**-5.64**
		Q		**6.75**	**6.967**	**6.967**	**6.927**
		BER		$\mathbf{7.1.10^{-12}}$	$\mathbf{1.5.10^{-12}}$	$\mathbf{1.5.10^{-12}}$	$\mathbf{2.11.10^{-12}}$
V	120	Pr	-7.59	-13.66	-13.60	-13.62	-13.65
		Q		6.51	6.90	6.84	6.58
		BER		$3.36.10^{-11}$	$2.48.10^{-12}$	$3.45.10^{-12}$	$2.20.10^{-11}$
U	160	Pr	-15.59	-21.66	-21.60	-21.62	-21.65
		Q		6.28	5.75	6.15	5.8
		BER		$1.6.10^{-10}$	$4.3.10^{-9}$	$3.6.10^{-10}$	$2.5.10^{-9}$

Bàn luận: Kết quả mô phỏng cho thấy tỷ số bít lỗi BER của các cấu hình mạng I, S, L, V, khi sử dụng kỹ thuật điều chế trực tiếp luồng dữ liệu 10Gbps, theo 4 bước sóng thành phần, có công suất thu lớn hơn -20dBm và có tỷ số bít lỗi đều nhỏ hơn mức chuẩn 10^{-12} nên đạt yêu cầu. khi sử dụng cấu hình mạng U(160km) có cự 160km, suy hao lớn, mức công suất thu nhỏ hơn yêu cầu, độ tán sắc tích lũy lớn, tỷ số BER lớn hơn mức chuẩn nên không đạt yêu cầu.

4. Kết luận

Áp dụng phương trình $4.B.|D|.L.\sigma_\lambda \leq 1$ để tính mối quan hệ giữa tán sắc D với tốc độ B và cự ly truyền dẫn L trong các hệ thống truyền dẫn quang ở vùng bước sóng 1550nm. Kết quả tính cho thấy, băng thông cho phép trong các tuyến truyền dẫn quang có cự dưới 80km đều lớn hơn yêu cầu dung lượng truyền dẫn 10Gbps, đạt yêu cầu thiết kế, các mạng truyền dẫn quang V(120km), U(160km) có giá trị băng thông cho phép truyền thấp hơn 10Gbps nên không đạt yêu cầu.

Kết quả mô phỏng mạng truyền dẫn quang 40Gbps, sử dụng nguồn quang Laser điều chế trực tiếp, các thông số cài đặt theo tiêu chuẩn kỹ thuật TCVN [1],[2] cho thấy công suất tín hiệu thu cao hơn độ nhạy thu và tỷ số bít lỗi của các mạng I, S, L, V, thấp hơn mức chuẩn của thiết bị quang STM 64, đạt yêu cầu và tỷ số bít lỗi của mạng truyền dẫn quang U(160km) là 10^{-11} lớn hơn tỷ số lỗi bít cho phép là 10^{-12} nên không đạt yêu cầu.

Kết quả nghiên cứu có thể ứng dụng cho các mạng truyền dẫn quang tại Việt Nam, việc nâng dung lượng truyền dẫn mạng truyền dẫn quang lên 40Gbps, trên các đoạn có cự li truyền thấp hơn 80km, thì có tính khả thi cao và các tuyến có cự ly lớn hơn 80km thì cần tăng cường các giải pháp bù tán sắc.

Tiếp tục nghiên cứu các giải pháp bù tán sắc để phát triển các tuyến truyền dẫn quang tốc độ cao và cự ly lớn hơn 80km.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ TT&TT, (2010), "*Quy chuẩn quốc gia về giao diện quang cho thiết bị kết nối mạng SDH*", QCQG, 7-2010/BTTTT.

[2] Bộ TT&TT, (2011), "*Tiêu chuẩn quốc gia về sợi quang dung cho mạng viễn thông Việt Nam*", TCVN, 8665-2011, BTTTT.

[3] Ngô Thị Thu Trang, Nguyễn Viết Đảm, "*Bù tán sắc và phi tuyến cho hệ thống truyền dẫn quang đường trục sử dụng giải pháp truyền ngược trong miền quan*g", tạp chí khoa học công nghệ thông tin và truyền thông, số 01 (CS.01), 2022.

[4] Affida MZin, Sevia M. Idrus, (2011), "*The charactirization of radio optical fiber employ GPON architecture for wireles distribution network*", International journal machine learning and computer, Vol 01, No 5, 2011.

[5] Dubovitky, "*Analysis and improvement of mach zehnde modulations linearity performance for chirped and tunable optical carier*", Journal of lightwave technology, June, 2002.

[6] Gerard Lachs, (1998), "*Fibet optic comminications system, Analysis and Enhancements*", McGraw Hill Telecomminications, 1998

[7] Egon Astra, Peter A. Andrekson, "*Improveved mitigation of self phase modulation induced impaiments in 28 Gbaud phase semnitive amplifier link*", Research Article Vol 27, No 4, 2019.

[8] John Gowar, (1993), "*Optical communications system*", McGraw Hill Telecomminications.

[9] Kishore Bhowmik, UNSW Sydney, "*Reduction of dispersion in optical fiber communications by fiber Bragg gratting and optical phase conjugation techniques*", (2012)

[10] Md, Bipul Hosain, "*Performance invertigation of different dispersion compensation methodes in optical fiber communications*" Asian journal of research in computer science, No 5(2), 36-44, 2020.

[11] N.D. Nhan, T.T. Bình, "*A comparison for improving the performance of two-stage optical phase conjugation using the third order nonlinearity*", 4th, Nafosted 2017.

[12] Sachindev, Col. (Dv), Suresh Kumar, "*Dispersion compensation in optical fiber communications using Bragg Gratting*", International journal of Engineering technology science and research IETSR, Vol 03, Isue 9, September 2016.

[13] Stegun, Knovel, and I.S. Gradhteyn, D. Zwillingger. (1972), "*Handbook of mathematical function with table of integrals siries and producs, 7th, ed*". Amsterdam, Bostion Elsevier.

Ngày nhận bài: 15/3/2024 Ngày chấp nhận đăng: 08/4/2024