

XÁC ĐỊNH SỐ KÊNH CỰC ĐẠI TRONG HỆ THỐNG SỢI QUANG - VÔ TUYẾN BĂNG TẦN CAO CHO THÔNG TIN DI ĐỘNG THẾ HỆ MỚI

DETERMINING MAXIMUM NUMBER OF CHANNELS IN FIBER OPTICAL-WIRELESS HIGH BAND SYSTEM FOR NEW GENERATION MOBILE COMMUNICATIONS

Nguyễn Văn Tuấn

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; nvtuan@dut.udn.vn

Tóm tắt - Bài báo khảo sát mô hình tính toán hệ thống truyền dẫn tín hiệu vô tuyến sóng milimét qua sợi quang ghép kênh theo bước sóng (WDM MMW/RoF) với khoảng cách truyền dẫn lớn sử dụng bộ khuếch đại quang EDFA đặt tại các vị trí khác nhau trên đường truyền và sử dụng máy thu Coherence để tăng độ nhạy cho hệ thống. Sau đó, xác định được tỉ số tín hiệu trên nhiễu (*SNR*), tỉ lệ lỗi bit (*BER*) của hệ thống. Tiếp đến, bài báo lập lưu đồ thuật toán tính toán số kênh quang cực đại tương ứng với từng vị trí khác nhau của EDFA đặt trên đường truyền khi thay đổi công suất máy phát đưa vào từng kênh, độ khuếch đại EDFA, công suất dao động nội của máy thu Coherence sao cho chất lượng của hệ thống thỏa mãn yêu cầu cho trước. Trên cơ sở đó, tác giả lập thành bảng thống kê và vẽ đồ thị biểu diễn số kênh truyền cực đại của hệ thống tại các vị trí đặt EDFA khác nhau thuận tiện cho công tác thiết kế, xây dựng và khai thác hệ thống trong thực tế.

Từ khóa - WDM; MMW; RoF; Coherence; thuật toán; *SNR*; *BER*

1. Đặt vấn đề

Công nghệ IoT và thông tin di động thế hệ mới cần cơ sở hạ tầng mạng cung cấp băng thông rất rộng để đáp ứng với nhu cầu thông tin tích hợp đồng thời nhiều loại hình dịch vụ băng rộng từ các thiết bị thông tin liên lạc khác nhau. Đặc biệt vài năm gần đây, nhu cầu thông tin di động băng tần rộng tăng lên nhanh chóng. Trên toàn cầu, lưu lượng dữ liệu di động sẽ tăng gấp 7 lần từ năm 2017 đến năm 2022, với tốc độ tăng trưởng là 46% đạt 77,5 exabyte mỗi tháng vào năm 2022 (một exabyte bằng một tỉ gigabyte). Lưu lượng truy cập từ thiết bị không dây và thiết bị di động sẽ chiếm 71% tổng lưu lượng IP vào năm 2022 [1], [2]. Trong bối cảnh đó, hệ thống thông tin quang-vô tuyến MMW/RoF (Milimeter Wave Radio-over-Fiber) còn được gọi là hệ thống truyền dẫn fronthaul di động (Mobile Fronthaul) được tập trung nghiên cứu để truyền tín hiệu di động giữa các trạm trung tâm CS (Central Station) và các đầu cuối vô tuyến ở xa RRH (Remote Radio Head) của mạng thông tin di động [3], [6]. Với ưu điểm vượt trội là băng thông rất rộng của công nghệ quang tử và sợi quang trong việc xử lý và truyền tín hiệu hệ thống MMW/RoF cho phép tăng đáng kể dung lượng, giảm trễ tín hiệu, năng lượng tiêu thụ, chi phí và độ phức tạp của mạng thông tin di động. Do đó, nó là xu thế ứng dụng tất yếu trong hệ thống thông tin di động thế hệ mới (5G và sau 5G).

Đặc biệt, tiềm năng ứng dụng vào hệ thống MMW/RoF khoảng cách truyền dẫn lớn để thông tin di động liên lạc giữa đất liền và các đảo là rất lớn. Áp dụng cụ thể vào vùng biển của nước ta: Việt Nam có hơn 3.000 hòn đảo lớn, nhỏ trong đó có các quần đảo, đảo lớn là Hoàng Sa, Trường Sa, Phú Quốc, Côn đảo... Đảo của Việt Nam được chia thành hệ thống các đảo ven bờ và hệ thống các đảo xa bờ. Hệ thống đảo ven bờ có khoảng 2.800 đảo. Các đảo cách đất

Abstract - In this paper, we investigate a calculating model of WDM Milimeter-Wave (MMW) Radio-over-Fiber Communication System (WDM MMW/RoF) with long distance using EDFA located at different positions on the link and Coherent receiver for enhancing the system's sensitivity. We then determine the *SNR*, *BER* of this system. After that, algorithm chart is built to calculate and determine maximum number of optical channels corresponding to each different position of EDFA on the link when we change channel power launched to the fiber, EDFA gain, oscillator power of coherent receiver so that system quality satisfies the given requirements. Based on data collected, we build statistic table and draw graph to show maximum number of channels corresponding to different positions. These results are useful for designing, building and exploiting this WDM MMW/RoF system in reality.

Key words - WDM; MMW; RoF; Coherent; algorithm; *SNR*; *BER*

liên của nước ta từ vài km đến vài trăm km [4]. Những năm gần đây, việc thông tin liên lạc của dân cư trên các đảo với đất liền không thuận lợi, có thể sử dụng dịch vụ VSAT truyền dẫn IP từ 2 vệ tinh VINASAT1 và VINASAT2 của Việt Nam, chủ yếu là dịch vụ truyền hình và truyền số liệu một chiều. Bài toán đặt ra là làm thế nào tăng cường thông tin liên lạc cũng như cung cấp nhiều dịch vụ băng rộng cho dân cư trên các đảo bằng thông tin di động thế hệ mới như trong đất liền. Giải pháp hữu hiệu trong trường hợp này là xây dựng các trạm thu phát gốc BTS trong đất liền và trên các đảo, sau đó liên lạc chúng bằng cáp quang thả dưới biển. Để tăng khoảng cách truyền dẫn lên đến vài trăm km, chúng ta lắp đặt các bộ khuếch đại quang trên đường truyền. Kỹ thuật RoF ở đây cho phép truyền trực tiếp tín hiệu sóng mang thông tin di động 3G, 4G ở dải tần vô tuyến vài GHz hoặc thông tin di động thế hệ mới ở dải tần vô tuyến băng tần cao (vài chục GHz đến vài trăm GHz) qua sợi quang xuyên biển, lên đảo để đến các trạm BTS và phát trực tiếp cho các điện thoại di động của người dân trên đảo và theo hướng ngược lại.

Để tăng khoảng cách truyền dẫn dưới biển và tăng dung lượng thông tin, bài báo khảo sát hệ thống ghép kênh quang theo bước sóng (WDM) sử dụng bộ khuếch đại quang sợi (EDFA) và máy thu Coherence. EDFA bù tổn hao trên sợi quang và máy thu Coherence cho phép tăng độ nhạy nhờ sự phối hợp công suất tín hiệu quang đến đầu vào máy thu và công suất quang đủ lớn của bộ dao động nội tại máy thu. Tuy nhiên, chất lượng tín hiệu nhận được tại máy thu phụ thuộc vào rất nhiều thông số như số kênh quang truyền trong sợi, tổng công suất quang đưa vào sợi ($P_{Tx\text{total}}$), công suất quang dao động nội của máy thu Coherence (P_{LO}), độ khuếch đại của EDFA (G), đồng thời cũng phụ thuộc vào vị trí đặt EDFA trên đường truyền. Đặc biệt, khi tăng số

kênh quang để tăng dung lượng thì các kênh ảnh hưởng, tác động lẫn nhau, sinh ra nhiễu sóng quang mới do hiệu ứng phi tuyến trong sợi làm chất lượng máy thu suy giảm... Bài toán đặt ra là với một khoảng cách truyền dẫn (L) cho trước, tương ứng với một vị trí đặt EDFA trên đường truyền cần xác định $P_{TXtotal}$, P_{LO} , và G để số kênh quang cực đại sao cho SNR thỏa mãn yêu cầu cho trước. Để giải quyết bài toán này, nhóm tác giả lập lưu đồ thuật toán tính toán để xác định tập giá trị của các thông số nêu trên để hệ thống có thể truyền dẫn được tối đa dung lượng thông tin mà vẫn thỏa mãn yêu cầu chất lượng đặt ra. Số kênh cực đại này sẽ được xác định tương ứng với nhiều vị trí đặt EDFA trên đường truyền.

Bài báo mở rộng tài liệu tham khảo [5], trong đó vị trí của EDFA được đặt ở vị trí bất kỳ trên đường truyền thay vì chỉ đặt ngay trước máy thu (tiền khuếch đại) như trong [5]. Nếu [5] chỉ dừng lại ở việc khảo sát đặc tính (SNR và BER) tương ứng với một số kênh nhất định thì bài báo mở rộng bằng cách xây dựng lưu đồ thuật toán để tính toán và xác định được số kênh truyền quang cực đại tại rất nhiều vị trí đặt EDFA trên đường truyền.

2. Mô hình tính toán và biểu thức SNR , BER

Hình 1 biểu diễn mô hình tính toán hệ thống WDM MMW/RoF sử dụng máy thu Coherence và EDFA tại vị trí bất kỳ trên đường truyền. Tín hiệu số từ thông tin di động ở kênh thứ i được đưa vào bộ điều chế RF để điều chế số ASK sóng mang vô tuyến, băng tần cao (hàng chục đến hàng trăm GHz). Sau đó, đưa vào bộ điều chế quang để điều chế Laser phát quang bước sóng λ_i theo phương pháp điều chế AM nên phổ tín hiệu quang có 3 vạch phổ như Hình 1. Tiếp đến, tín hiệu quang được đưa qua bộ ghép quang để ghép nhiều kênh và đưa vào sợi quang truyền đến cuối tuyến. Tại đây, tín hiệu quang bước sóng λ_i sẽ được qua bộ lọc quang lọc lấy bước sóng λ_i và đưa vào máy thu Coherence thứ i để giải điều chế quang, khôi phục sóng vô tuyến RF mang tín hiệu thông tin di động. Tín hiệu này sau đó sẽ vào trạm BTS, khuếch đại để truyền đến mạng điện thoại di động/máy điện thoại di động. Kỹ thuật WDM cho phép ghép N kênh quang bằng cách sử dụng N bộ điều chế quang, N Laser phát quang, N máy thu Coherence.

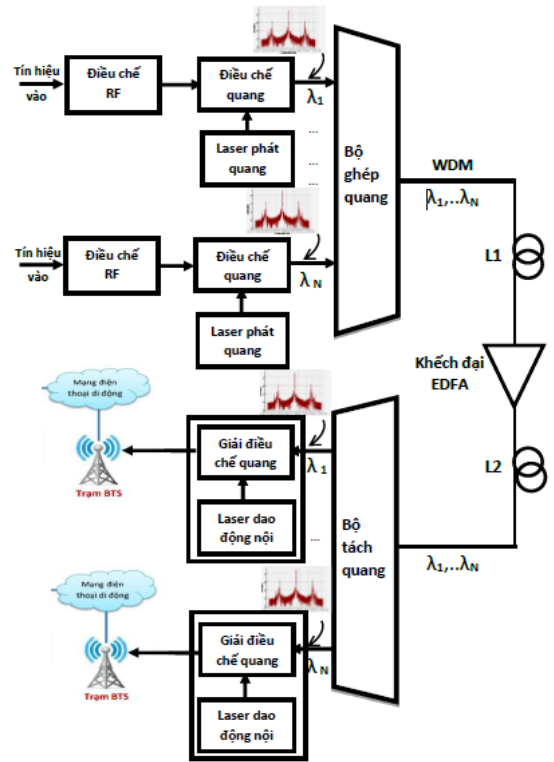
Công suất tín hiệu điện tại đầu ra của photodiode trong bộ giải điều chế quang được biểu diễn như sau [5]:

$$P_{signal} = \frac{1}{4} R_L I_p^2 = \frac{1}{4} R_L (2R \sqrt{P_S P_{LO}} \cos \theta(t))^2 = R_L R^2 P_S P_{LO} \cos^2 \theta(t) \tag{1}$$

Trong đó: R_L là điện trở tải của photodiode [Ω].

P_S [W], P_{LO} [W] lần lượt là công suất quang đến máy thu và công suất quang từ Laser dao động nội. Thông thường người ta chọn $P_{LO} \gg P_S$. R là hệ số chuyển đổi quang điện, $\cos \theta(t)$ thể hiện độ lệch pha cực giữa hai sóng quang.

Hệ thống sử dụng EDFA và ghép kênh quang theo bước sóng nên xuất hiện 2 loại nhiễu trội ở miền quang, tác động đến ngõ vào máy thu là nhiễu phát xạ tự phát ASE và nhiễu trộn bốn bước sóng FWM. Các loại nhiễu này sau đó vào máy thu, qua photodiode, chuyển đổi sang miền điện thì tạo ra các loại nhiễu điện. Ngoài ra, tín hiệu



Hình 1. Mô hình hệ thống WDM/MMW/RoF

quang đến đầu vào máy thu và tín hiệu quang tạo ra từ dao động nội sau khi qua photodiode cũng tạo ra các thành phần nhiễu điện. Do đó, tổng công suất nhiễu ($P_{NoiseTotal}$) bao gồm các công suất: nhiễu bắn ($\sigma_{SH}^2 R_L$), nhiễu nhiệt ($\sigma_{TH}^2 R_L$), nhiễu phách ($\sigma_{ASE}^2 R_L$) được biểu diễn như sau [5], [7], [8], [9]:

$$P_{NoiseTotal} = \sigma_{\Sigma}^2 R_L = (\sigma_{SH}^2 + \sigma_{ASE}^2 + \sigma_{TH}^2) R_L \tag{2}$$

$$\sigma_{SH}^2 = \sigma_{SH_S}^2 + \sigma_{SH_LO}^2 + \sigma_{SH_FWM}^2 + \sigma_{SH_ASE}^2 = 2 \frac{\eta e^2}{hf} (\alpha G P_{phat} + P_{LO} + P_{FWM}(f)) B_e + 4 \eta e^2 \alpha_b n_{sp} (G-1) B_e B_o \tag{3}$$

$$\sigma_{TH}^2 = \frac{4KTB_e}{R_L} \tag{4}$$

$$\sigma_{ASE}^2 = \sigma_{ASE_S}^2 + \sigma_{ASE_LO}^2 + \sigma_{ASE_FWM}^2 + \sigma_{ASE_ASE}^2 + \sigma_{FWM_S}^2 + \sigma_{FWM_LO}^2 = 4 \frac{(\eta e)^2}{hf} (\alpha G P_{phat} + P_{LO} + P_{FWM}(f)) \alpha_b n_{sp} (G-1) B_e + 4(\eta e)^2 [\alpha_b n_{sp} (G-1)]^2 B_e B_o + 2 \left(\frac{\eta e}{hf} \right)^2 (\alpha G P_{phat} + P_{LO}) P_{FWM}(f) \tag{5}$$

Với: B_e [Hz] và B_o [Hz] lần lượt là băng thông nhiễu điện của máy thu và bộ lọc quang. P_{phat} [W] là công suất phát của từng kênh đưa vào sợi quang. n_{sp} là hệ số nhiễu phát xạ tự phát của EDFA. η là hiệu suất lượng tử của photodiode, e là điện tích electron. hf là năng lượng photon của ánh sáng đến. α [1/lần] là tổn hao công suất do sợi gây ra trên toàn tuyến. α_b [1/lần] là tổn hao công suất do sợi gây ra tính từ EDFA đến máy thu. G là độ khuếch

đại của EDFA. $K [J/^{\circ}K]$ là hằng số Boltzmann. $T [^{\circ}K]$ là nhiệt độ tại máy thu.

Công suất nhiễu trộn 4 bước sóng (tổng nhiễu tích lũy) tại tần số f_h được tính theo biểu thức [10]:

$$P_{FWM}(f_h) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_h} \sum_{f_i} \sum_{f_j} P_{pqr}(f_h) \quad (6)$$

Với f_i, f_j, f_k là tần số của 3 kênh bất kỳ trong N kênh.

Hệ thống khảo sát gồm 2 phân đoạn $L_1 = L_1^{(1)} + L_2^{(1)}$ và $L_2 = L_1^{(2)} + L_2^{(2)}$ thì công suất nhiễu từng thành phần $P_{pqr}(f_h)$ được biểu diễn như sau [10]:

$$P_{pqr}(f_h) = \frac{1024\pi^6}{n_0^4 \lambda^2 c^2} (d\chi)^2 \frac{P_{phat}^3}{A_{eff}^2} \exp[-(\alpha_1(L_1^{(1)} + L_1^{(2)}) + \alpha_2(L_2^{(1)} + L_2^{(2)}))] \times \left[\sqrt{G^3} \exp[-(\alpha_1 L_1^{(1)} + \alpha_2 L_2^{(1)}) + i\Delta\psi^{(1)}] \times \left(\frac{1 - \exp(-\alpha_1 + i\Delta\beta_1)L_1^{(1)}}{\alpha_1 - i\Delta\beta_1} + \exp[-(-\alpha_1 + i\Delta\beta_1)L_1^{(1)}] \frac{1 - \exp[-(-\alpha_2 + i\Delta\beta_2)L_2^{(1)}]}{\alpha_2 - i\Delta\beta_2} \right) \right]^2 \quad (7)$$

Trong đó: $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2$, và $\Delta\psi^{(1)}$ được định nghĩa như trong [5]. $L_1 = L_1^{(1)} + L_2^{(1)}$ và $L_2 = L_1^{(2)} + L_2^{(2)}$ tương ứng với 2 phân đoạn (giữa bộ khuếch đại EDFA), trong mỗi phân đoạn (chẳng hạn L_1) sử dụng đoạn $L_1^{(1)}$ là sợi quang đơn mode (SMF) và đoạn $L_2^{(1)}$ là sợi quang tán sắc dịch chuyển (DSF) theo phương pháp bù tán sắc hoàn toàn: $D_1 L_1^{(1)} + D_2 L_2^{(1)} = 0$ trong đó D_1 và D_2 tương ứng là hệ số tán sắc của sợi SMF và sợi DSF. $c [m/s]$ là vận tốc ánh sáng; n_0 là chiết suất của sợi; $\lambda [m]$ là bước sóng; d là hệ số suy giảm ($d=3$ nếu $i \neq j \neq k$, $d=6$ nếu $i \neq j \neq k$); $\chi [m^3/W.s]$ là độ cảm ứng phi tuyến bậc 3; $A_{eff} [m^2]$ là diện tích hiệu dụng của lõi sợi. $\alpha_1, \alpha_2 [1/m]$ lần lượt là suy hao của 2 loại sợi SMF và DSF. $D_{1,2}(\lambda_k) [s/m^2]$ là tán sắc của 2 loại sợi tại bước sóng λ_k . $dD_{1,2}/d\lambda [s/m^3]$ là độ biến thiên tán sắc của sợi. Từ các biểu thức (1) đến (7), tỉ số công suất tín hiệu và công suất nhiễu (SNR) ở đầu ra của photodiode trong bộ giải điều chế quang ở kênh h tương ứng với tần số f_h trong N kênh được biểu diễn như sau:

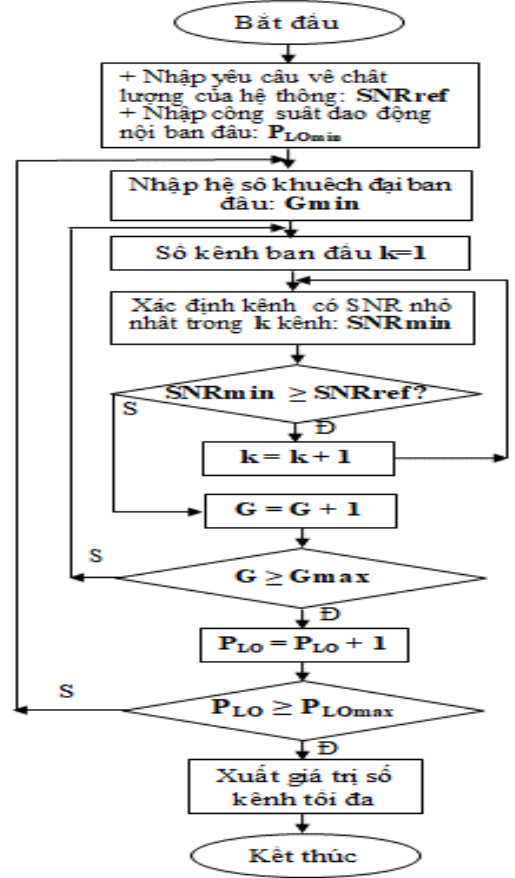
$$SNR(f_h) = \frac{P_{signal}(f_h)}{P_{NoiseTotal}(f_h)} \quad (8)$$

Tín hiệu quang sau khi được tách sóng và xử lý trong máy thu Coherence thì được khôi phục thành tín hiệu dạng sóng vô tuyến tần số RF bằng tần cao (sóng milimet-MMW) mang thông tin di động (hoặc dữ liệu).

Quan hệ giữa BER và SNR theo phương pháp giải điều chế ASK được biểu diễn như biểu thức [7], [8], [9]:

$$BER = 0,5 \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{SNR}{2}}\right) \quad (9)$$

3. Lưu đồ thuật toán tính toán số kênh cực đại tương ứng với một vị trí đặt EDFA trên đường truyền



Hình 2. Lưu đồ thuật toán tính toán số kênh cực đại tương ứng với một vị trí đặt EDFA trên đường truyền

Khi ta tăng số kênh truyền thì dung lượng của hệ thống tăng lên nhưng nhiễu trộn 4 bước sóng cũng tăng theo nên tỉ số SNR của hệ thống giảm. Ngoài ra, SNR cũng bị ảnh hưởng bởi các thông số như: $P_{TXtotal}$, G , P_{LO} , vị trí đặt EDFA trên đường truyền. Do đó, cùng với việc tăng số kênh truyền N đưa vào sợi, chúng ta cần phải xác định giá trị tổ hợp các thông số nêu ở trên để SNR tại ngõ ra của máy thu đạt được giá trị tốt nhất và giá trị này phải lớn hơn giá trị chuẩn (SNR_{ref}) theo yêu cầu cho trước của hệ thống. Khoảng cách truyền dẫn được chọn là 150km, tốc độ dữ liệu mỗi kênh là 1Gb/s, tổng công suất quang tín hiệu ($P_{TXtotal}$) đưa vào sợi được chọn không đổi và bằng 100mW (20dBm) để có thể bỏ qua các loại nhiễu do hiện tượng phi tuyến trên sợi tạo ra như tự điều chế pha SPM, điều chế pha chéo XPM... nhằm tăng chất lượng hệ thống [11].

Quá trình thực thi của thuật toán để xác định số kênh quang tối đa truyền trong hệ thống được trình bày tóm tắt như sau: Thuật toán thực thi 3 vòng lặp:

- Vòng lặp thứ 1: duyệt các giá trị hệ số khuếch đại (G) của EDFA, G chạy từ 10dB đến 40dB (là dải giá trị tiêu biểu của EDFA) [12], bước chạy là 1dB.

- Vòng lặp thứ 2: duyệt các giá trị công suất quang (P_{LO}) của bộ dao động nội: P_{LO} chạy từ 0dBm đến 5dBm (là dải giá trị tiêu biểu của P_{LO}) [13], [14], bước chạy là 1dBm.

- Vòng lặp thứ 3: ứng với mỗi cặp giá trị của G và P_{LO} , thuật toán thực thi việc tính toán SNR của tất cả N kênh theo biểu thức (9), xác định SNR của một kênh nào đó trong N kênh có giá trị nhỏ nhất (SNR_{min}) để so sánh với SNR_{ref} (vì nếu kênh có SNR nhỏ nhất mà đạt yêu cầu thì tất cả các kênh khác đều vượt yêu cầu chất lượng đề ra của hệ thống).

Trường hợp SNR_{min} lớn hơn SNR_{ref} thì có nghĩa là, hệ thống vẫn còn có thể tăng thêm số kênh để tăng thêm dung lượng truyền tải mà vẫn đảm bảo yêu cầu chất lượng cho trước của hệ thống. Đến khi SNR_{min} vừa đạt giá trị nhỏ hơn SNR_{ref} thì thuật toán sẽ thực thi tuần tự hai vòng lặp 1 và 2 bằng cách tăng giá trị của G và P_{LO} từng bước, sau đó lặp lại việc kiểm tra so sánh các tỉ số tín hiệu trên nhiều. Các vòng lặp cứ tiếp tục cho đến khi SNR_{min} vừa nhỏ hơn SNR_{ref} thì xuất giá trị số kênh cực đại tương ứng với bước trước đó ($SNR_{min} \geq SNR_{ref}$) cùng với các giá trị tương ứng của G , P_{LO} . Điều đó có nghĩa là thuật toán sẽ xác định được tổ hợp các giá trị (G , P_{LO}) sao cho số kênh quang đạt giá trị cực đại tương ứng với một vị trí của EDFA đặt trên đường truyền. Ta tiến hành tương tự với các vị trí EDFA khác nhau, chẳng hạn cách máy phát lần lượt 0km, 10km, 20km, ... 130km, 140km và 150km thì sẽ có các giá trị số kênh N cực đại tương ứng với tất cả các vị trí này.

4. Kết quả tính toán và thảo luận

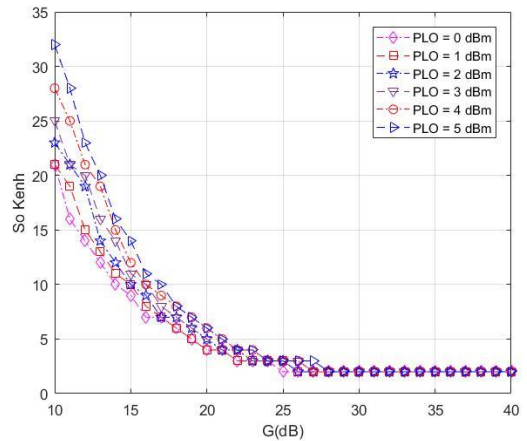
Bảng 1 trình bày các thông số tính toán của hệ thống WDM MMW/RoF sử dụng EDFA và máy thu Coherence để tính số kênh quang cực đại trong hệ thống.

Bảng 1. Các thông số của hệ thống WDM MMW/RoF sử dụng bộ khuếch đại EDFA và máy thu Coherence.

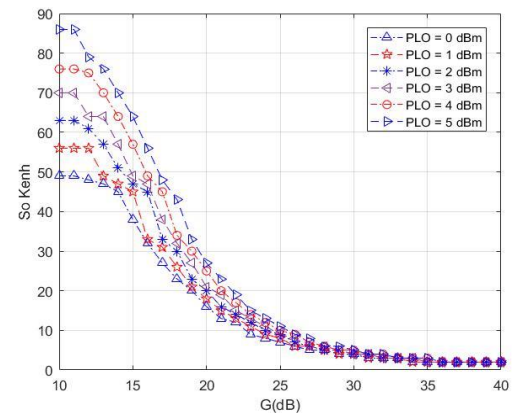
Thông số	Định nghĩa	Giá trị và đơn vị
R_L	Điện trở tải của photodiode	50Ω
R_b	Tốc độ bit mỗi kênh	1 Gbit/s
L	Chiều dài của sợi quang	150 km
f_{RF}	Tần số RF (được chọn cho thông tin di động thế hệ mới nên có giá trị lớn: 20GHz)	20 GHz
G	Độ khuếch đại EDFA	10 dB-40 dB[12]
n_{sp}	Hệ số nhiễu phát xạ tự phát của EDFA	1.26
$\lambda_{min}-\lambda_{max}$	Dải bước sóng ánh sáng (băng C)	1525nm-1565nm
P_{LO}	Công suất quang của Laser dao động nội	0 dBm – +5 dBm[13],[14]
$P_{TXtotal}$	Tổng công suất quang đưa vào sợi	20 dBm
χ	Độ cảm ứng phi tuyến bậc 3	$4.10^{-15} m^3/W.s$
A_{eff}	Diện tích hiệu dụng của lõi sợi	$50.10^{-12} m^2$
D_1	Hệ số tán sắc của sợi mode SMF	18ps/nm.km
D_2	Hệ số tán sắc của sợi tán sắc dịch chuyển DSF	-2ps/nm.km
$dD_{1,2}/d\lambda$	Độ biến thiên tán sắc của sợi	70[s/m ³]

4.1. Quan hệ giữa số kênh quang cực đại và hệ số khuếch đại của EDFA

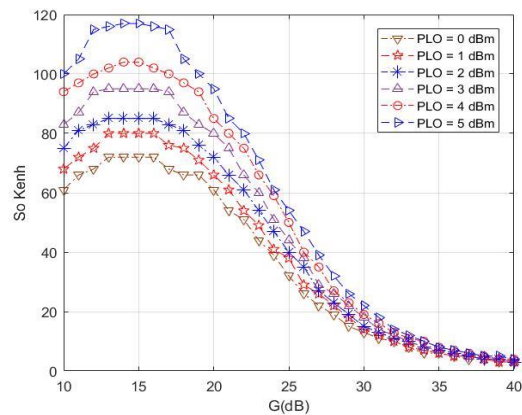
Các đường đặc tính biểu diễn mối quan hệ giữa số kênh quang cực đại và G của EDFA tương ứng với các vị trí đặt EDFA và các giá trị khác nhau của công suất quang bộ dao động nội được thể hiện trong các Hình 3, 4, 5, 6, 7.



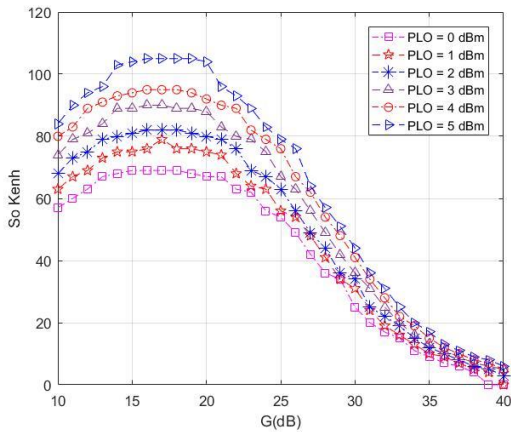
Hình 3. Quan hệ giữa số kênh N theo G khi EDFA đặt cách máy phát 10 km



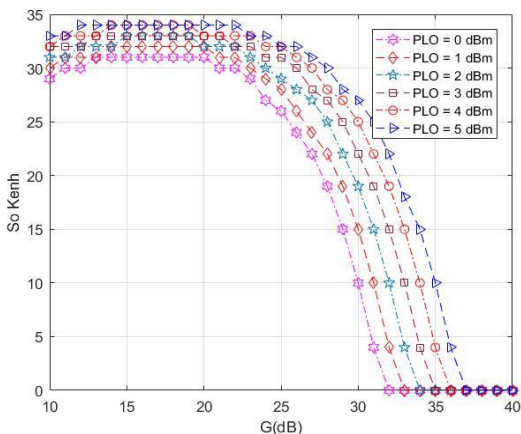
Hình 4. Quan hệ giữa số kênh N theo G khi EDFA đặt cách máy phát 50 km



Hình 5. Quan hệ giữa số kênh N theo G khi EDFA đặt cách máy phát 90 km



Hình 6. Quan hệ giữa số kênh N theo G khi EDFA đặt cách máy phát 110 km



Hình 7. Quan hệ giữa số kênh N theo G khi EDFA đặt cách máy phát 140 km

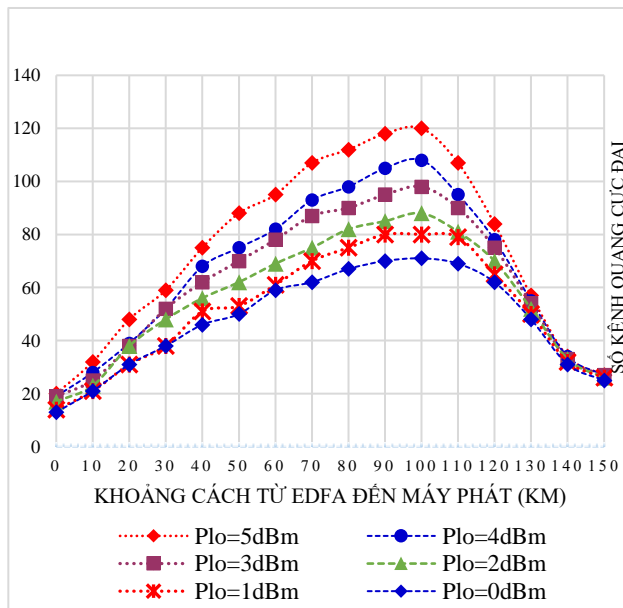
Từ các đồ thị trong Hình 3, Hình 4, Hình 5, Hình 6 và Hình 7 ta thấy, khi tăng dần công suất quang dao động nội từ giá trị $P_{LO} = 0\text{dBm}$ đến $P_{LO} = 5\text{dBm}$ thì số kênh quang truyền trong sợi cũng tăng lên. Điều này được giải thích là dựa vào biểu thức (1) ta thấy, khi tăng P_{LO} thì công suất tín hiệu điện P_{signal} ở đầu ra của photodiode tăng, dẫn đến từ số trong biểu thức (8) của tỉ số SNR cũng tăng; trong khi đó công suất nhiễu do EDFA và công suất nhiễu trộn bốn bước sóng (P_{FWM}) không phụ thuộc vào P_{LO} nên tỉ số SNR tăng làm cho số kênh quang tăng lên. Đồng thời trong mỗi hình ta thấy, 6 đường đặc tuyến có các điểm cực đại (số kênh cực đại) đều tương ứng với một giá trị hệ số khuếch đại G (Hình 3, 4) hoặc một khoảng giá trị của G (Hình 5, 6 và 7). Trong Hình 3 và Hình 4, số kênh cực đại của 6 đặc tuyến đều tương ứng với 1 giá trị $G = 10\text{dB}$; Hình 7 số kênh cực đại của 6 đặc tuyến tương ứng với khoảng giá trị của G từ (15-20)dB. Ngoài ra, khi EDFA đặt càng xa máy phát thì 6 đặc tuyến đạt giá trị cực đại tương ứng với hệ số khuếch đại G ngày càng tăng lên. Chẳng hạn khi EDFA cách máy phát từ 10km đến 50km thì $G = 10\text{ dB}$, khi khoảng cách này lần lượt là 90km, 110km và 140km thì số kênh cực đại của 6 đặc tuyến tương ứng với dải giá trị của G lần lượt là (14-15)dB, (16-17)dB và (15-20)dB.

4.2. Thống kê kết quả và thảo luận

Bảng 2. thống kê số kênh quang cực đại theo vị trí đặt EDFA tương ứng với các giá trị P_{LO} khác nhau.

Khoảng cách từ EDFA đến máy phát	Số kênh quang cực đại tương ứng với các giá trị công suất quang dao động nội tại máy thu: P_{LO} [dBm]					
	5 dBm	4 dBm	3 dBm	2 dBm	1 dBm	0 dBm
0 km	20	19	19	17	14	13
10 km	32	28	25	23	21	21
20 km	48	39	38	38	31	31
30 km	59	52	52	48	38	38
40 km	75	68	62	56	51	46
50 km	88	75	70	62	53	50
60 km	95	82	78	69	61	59
70 km	107	93	87	75	70	62
80 km	112	98	90	82	75	67
90 km	118	105	95	88	80	70
100 km	120	108	98	88	80	71
110 km	107	95	90	81	79	69
120 km	84	78	75	70	65	62
130 km	57	55	54	52	50	48
140 km	34	34	33	33	32	31
150 km	27	27	27	26	26	25

Bảng 2 thống kê số kênh quang cực đại tương ứng với các vị trí đặt EDFA trên đường truyền và các giá trị khác nhau của công suất quang dao động nội tại máy thu.



Hình 8. Quan hệ số kênh quang cực đại và các vị trí đặt EDFA trên đường truyền

Kết quả thống kê trong Bảng 2 có thể được biểu diễn dưới dạng đồ thị như trong Hình 8 - mô tả số kênh quang cực đại tương ứng với các vị trí đặt EDFA trên đường truyền và các giá trị khác nhau của công suất quang dao động nội tại máy thu.

Qua đó ta thấy, khi tăng dần công suất quang dao động nội từ giá trị $P_{LO} = 0\text{dBm}$ đến $P_{LO} = 5\text{dBm}$ thì số kênh quang cực đại trong hệ thống cũng tăng lên, nghĩa là dung lượng hệ thống tăng lên. Điều này được giải thích là Laser dao động nội tại máy thu (trong Hình 1) cung cấp nguồn ánh sáng quang để phối hợp với tín hiệu quang đến (rất bé do suy hao trên tuyến sợi quang) nhằm tăng cường công suất quang đến máy thu nên nó đóng vai trò như một bộ tiền khuếch đại. Vì vậy, khi P_{LO} tăng lên thì công suất tín hiệu tỉ lệ với P_{LO} cũng tăng, làm tăng tỉ số SNR (biểu thức (8)) và số kênh quang cực đại đạt được cũng tăng lên. Chẳng hạn, khi EDFA cách máy phát 100 km thì số kênh quang cực đại của 6 đặc tuyến tương ứng với $P_{LO} = 0\text{dBm}$, 1dBm , 2dBm , 3dBm , 4dBm và 5dBm lần lượt là 71, 80, 88, 98, 108 và 120 kênh. Ngoài ra, khi đặt EDFA càng xa máy phát (từ 0km đến khoảng 90km) thì số kênh cực đại trên 6 đặc tuyến cũng theo xu hướng tăng lên và đạt giá trị cực đại tương ứng với khoảng cách từ máy phát đến EDFA bằng 100km. Sau đó, số kênh quang cực đại sẽ giảm nhanh khi đặt EDFA càng xa máy phát (từ 110km đến 150km (cuối tuyến)).

5. Kết luận

Trên cơ sở đề xuất mô hình và xây dựng được các biểu thức tính toán hiệu năng của hệ thống WDM MMW/RoF sử dụng máy thu Coherence kết hợp bộ khuếch đại EDFA, bài báo đã lập lưu đồ thuật toán tính toán số kênh quang cực đại tương ứng với từng vị trí khác nhau của EDFA đặt trên đường truyền khi thay đổi công suất máy phát đưa vào từng kênh, độ khuếch đại EDFA, công suất dao động nội của máy thu Coherence sao cho chất lượng của hệ thống thỏa mãn yêu cầu cho trước. Trên cơ sở đó, bài báo lập thành bảng thống kê và vẽ đồ thị biểu diễn số kênh truyền cực đại của hệ thống tại các vị trí đặt EDFA khác nhau. Kết

quả thu được của bài báo có thể được sử dụng hiệu quả và thuận tiện trong công tác thiết kế, xây dựng và khai thác hệ thống trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cisco System Inc., "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022" White Paper, 26/11/2018.
- [2] P. Rost et al., "Mobile network architecture evolution toward 5G" IEEE Communication Magazine, Vol. 54, No. 5, pp. 84-91, 2016.
- [3] T. S. Rappaport *et al.*, "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!", IEEE Access, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [4] https://vi.wikipedia.org/wiki/Danh_s%C3%A1ch_%C4%91%E1%BA%A3o_Vi%E1%BB%87t_Nam
- [5] Nguyễn Văn Tuấn, Nguyễn Văn Điền, "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 công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 5(126), Quyển 1, trang 120-124, năm 2018.
- [6] D. Novak *et al.*, "Radio-Over-Fiber Technologies for Emerging Wireless Systems", in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2016.
- [7] K. Kikuchi, "Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications", in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 157-179, Jan.1, 1 2016.
- [8] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", John Wiley & Sons, Inc., New York, third Edition, 2002.
- [9] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, Inc., 2000.
- [10] W. Zeiler, F. D. Pasquale, P. Bayel, *Member, IEEE*, J. Midwinter, *Fellow, IEEE*, "Modeling of four-wave mixing and gain peaking in amplified WDM optical communication systems and networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 9, September 1996.
- [11] Yasin M., Karfaa, M. Ismail, F.M. Abbou, A.S. Shaari, "Theoretical Evaluation of Nonlinear Effects on Optical WDM with Various Fiber Types", *IJUM Engineering Journal*, Vol. 9, No. 2, 2008.
- [12] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=10680
- [13] http://www.idealphotonics.com/mod_product-view-p_id-864.html
- [14] http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/413578/OPTOWAY/DL-5100_07.html

(BBT nhận bài: 09/3/2019, hoàn tất thủ tục phản biện:20/5/2019)