

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG  
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**



**NGÔ THỊ THU TRANG**

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP NÂNG CAO HIỆU NĂNG  
HỆ THỐNG OFDM QUANG**

**CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG  
MÃ SỐ: 9.52.02.08**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HÀ NỘI - 2021**

Công trình hoàn thành tại:

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

Người hướng dẫn khoa học:

**1. PGS.TS. Bùi Trung Hiếu**

**2. TS. Nguyễn Đức Nhân**

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước hội đồng chấm luận án cấp Học viện tại:

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

vào hồi:     **giờ   ,ngày   tháng   năm**

Có thể tìm hiểu luận án tại:

**1. Thư viện Quốc gia Việt Nam**

**2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**

## MỞ ĐẦU

### 1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA LUẬN ÁN

Kỹ thuật ghép kênh phân chia theo tần số trực giao (OFDM) quang được đề xuất như là hướng nghiên cứu cơ bản cho mạng truyền dẫn quang tốc độ cao không dây và qua sợi trong nhiều năm gần đây. Những ưu điểm vượt trội của kỹ thuật OFDM có thể kể đến là nâng cao hiệu quả sử dụng băng tần, khả năng chống nhiễu giao thoa giữa các ký tự (ISI) do giãn xung và tạo tín hiệu OFDM quang trong miền số nhờ kỹ thuật DSP tốc độ cao, giúp giải quyết được các thách thức về tính trực giao và nhạy cảm với nhiễu pha khi thực hiện trong miền quang.

Kỹ thuật OFDM không chỉ được đề xuất triển khai trong các hệ thống truyền dẫn quang dung lượng lớn tách sóng coherent và tách sóng trực tiếp mà còn ứng dụng rộng rãi trong các mạng truy nhập quang. Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho hệ thống truyền dẫn quang ứng dụng OFDM có dung lượng nhiều Tb/s, hiệu suất phổ lên tới 11 bit/s/Hz được công bố và kỳ vọng tốc độ truyền dẫn trên từng bước sóng đạt 100 Gbit/s vào năm 2025. Việc triển khai thương mại hoá các hệ thống OFDM quang đáp ứng yêu cầu về hiệu suất phổ cao và cấu trúc mạng linh hoạt của các mạng quang tương lai là hoàn toàn khả thi.

Thách thức lớn nhất của kỹ thuật OFDM trong truyền dẫn quang là tỉ số công suất đỉnh trên công suất trung bình (PAPR) cao, dẫn đến ảnh hưởng phi tuyến trở thành giới hạn chính đối với các hệ thống OFDM quang. Công suất đỉnh tín hiệu OFDM lớn sẽ gây ra ảnh hưởng phi tuyến tại bộ phát, bộ thu và trên sợi quang. Ngoài ra, nhiễu pha sinh ra do sự thăng giáng pha ngẫu nhiên của nguồn quang laser cũng gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến hiệu năng hệ thống OFDM quang. Vì thế, việc nghiên cứu đề xuất các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố tác động lên hệ thống nhằm nâng cao hiệu năng cho các hệ thống OFDM quang là hết sức cần thiết. Xuất phát từ các phân tích trên, nghiên cứu sinh đã quyết định chọn đề tài **“Nghiên cứu giải pháp nâng cao hiệu năng cho hệ thống OFDM quang”** cho luận án Tiến sĩ của mình.

## **2. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI NGHIÊN CỨU**

Đối tượng nghiên cứu của Luận án này là các hệ thống truyền dẫn quang có ứng dụng ghép kênh theo tần số trực giao.

Luận án tập trung nghiên cứu trong phạm vi áp dụng ghép kênh theo tần số trực giao cho các hệ thống truyền dẫn quang điều chế cường độ - tách sóng trực tiếp, hướng đến các giải pháp nhằm ứng dụng PON thế hệ kế tiếp.

## **3. MỤC TIÊU, NHIỆM VỤ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

Mục tiêu chính của luận án này là nghiên cứu đề xuất được giải pháp cải thiện hiệu năng cho các hệ thống OFDM quang. Các hướng nghiên cứu được lựa chọn để đạt được mục tiêu này là tìm kiếm các giải pháp để giảm thiểu PAPR và các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng của méo và của các hiệu ứng phi tuyến, từ đó cải thiện hiệu năng của các hệ thống OFDM quang.

Để đạt được mục tiêu nêu trên, các nhiệm vụ cụ thể cho quá trình nghiên cứu được xây dựng. Thứ nhất, nghiên cứu để nắm chắc, hiểu sâu sắc về hệ thống OFDM quang và những kết quả nghiên cứu tiêu biểu liên quan đến vấn đề này. Thứ hai, đề ra các hướng để từ đó xây dựng giải pháp cải thiện hiệu năng cho các hệ thống OFDM quang. Thứ ba, thực hiện khảo sát, kiểm chứng hiệu quả cải thiện hiệu năng của các giải pháp xây dựng, từ đó chọn ra các giải pháp có tính khả thi và phù hợp.

Nhằm thực hiện các nhiệm vụ nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng được lựa chọn và tiến hành qua các bước gồm nghiên cứu, phân tích và tổng hợp các nội dung lý thuyết về OFDM quang để đánh giá hiệu năng hệ thống và mức độ cải thiện hiệu năng hệ thống của các giải pháp đề xuất (1), mô phỏng Monte-Carlo được sử dụng để kiểm chứng theo các sơ đồ hệ thống tương ứng với các giải pháp đã đề xuất (2), nhận xét, đánh giá dựa trên các kết quả (3).

## **4. CÁC ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN**

Hai giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống OFDM quang được đề xuất, cũng chính là hai đóng góp quan trọng của Luận án.

**Thứ nhất** là đề xuất giải pháp thiếu ảnh hưởng phi tuyến trong miền số sử dụng bộ nén giãn, gồm theo luật A và dựa trên mô hình Rapp. Các giải pháp này cho phép giảm PAPR của tín hiệu OFDM, giúp làm giảm ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến tại bộ phát và của sợi quang lên hiệu năng hệ thống.

**Thứ hai** là đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống OFDM quang trên kỹ thuật truyền ngược trong miền quang, cho phép giảm thiểu ảnh hưởng của cả hiệu ứng tán sắc và phi tuyến trên sợi, giúp cải thiện rõ rệt hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM.

## **5. BỐ CỤC CỦA LUẬN ÁN**

Ngoài phần mở đầu và phần kết luận, Luận án được chia thành 4 chương với nội dung cụ thể như sau. Chương 1 trình bày các vấn đề về kỹ thuật OFDM và triển khai trong truyền dẫn quang cũng như các kết quả nghiên cứu tiêu biểu liên quan, từ đó đề xuất hướng nghiên cứu thực hiện Luận án. Mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống OFDM quang dưới ảnh hưởng của tổng thể các yếu tố tác động đến từ các thành phần của hệ thống được xây dựng trong chương 2. Nội dung hai đóng góp được trình bày lần lượt trong chương 3 và chương 4 của Luận án.

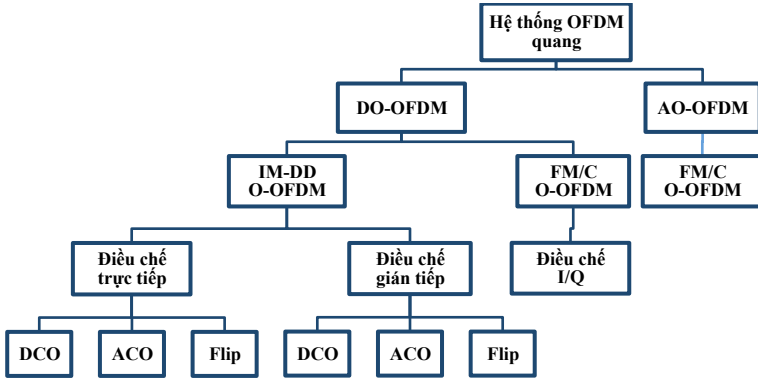
## **CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU**

### **1.1 KỸ THUẬT GHÉP KÊNH PHÂN CHIA THEO TẦN SỐ TRỰC GIAO - OFDM**

Tín hiệu OFDM hoàn toàn có thể tạo và khôi phục một cách đơn giản nhờ các bộ IFFT và FFT trong miền số giúp cho bộ thu/ phát tín hiệu OFDM quang trở nên đơn giản hơn nhiều, đồng thời giải quyết được các thách thức về tính trực giao và sự nhạy cảm về nhiễu pha.

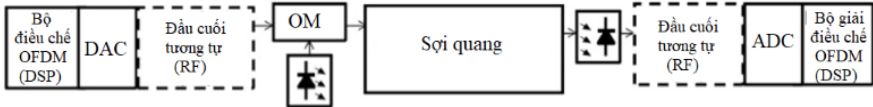
### **1.2 OFDM TRONG TRUYỀN DẪN QUANG**

Kỹ thuật OFDM được ứng dụng trong nhiều hệ thống OFDM quang khác nhau. Trong phạm vi luận án này, dựa trên cơ chế tổ hợp tín hiệu OFDM, hệ thống OFDM quang được phân loại như trong hình 1.1.



Hình 1.1: Phân loại hệ thống OFDM quang

### 1.3 HỆ THỐNG IM-DD O-OFDM



Hình 1.2: Sơ đồ khối hệ thống IM-DD O-OFDM

Giải pháp điều biến cường độ tại phía phát và tách sóng trực tiếp tại phía thu được sử dụng rất phổ biến trong các hệ thống thông tin quang trước đây, vì thế hệ thống IM-DD O-OFDM dễ dàng nâng cấp từ các hệ thống truyền dẫn quang sẵn có. Sơ đồ khối hệ thống IM-DD O-OFDM được đưa ra trong hình 1.2

### 1.4 CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG OFDM QUANG

- Tỷ số công suất đỉnh trên công suất trung bình (PAPR) cao
- Nhiễu pha
- Suy hao
- Tán sắc
- Ảnh hưởng phi tuyến

## 1.5 CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

### 1.5.1 Các công trình nghiên cứu tại Việt Nam

Tại Việt Nam các kết quả nghiên cứu liên quan đến hệ thống OFDM quang mới dừng ở việc nghiên cứu cơ bản về tạo tín hiệu OFDM quang hay thực hiện khảo sát hệ thống trong điều kiện kênh đơn giản.

### 1.5.2 Các công trình nghiên cứu trên thế giới

#### 1.5.2.1 Các nghiên cứu về giảm ảnh hưởng phi tuyến trong miền quang

Các giải pháp giảm ảnh hưởng phi tuyến trong miền quang cho phép triển khai các hệ thống trong suốt trong miền quang và giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng phi tuyến trên sợi quang cho tất cả các kênh bước sóng một cách đồng thời. Hai nhóm giải pháp điển hình là đảo phổ giữa tuyến (MSSI) và truyền ngược trong miền quang (OBP).

#### 1.5.2.2 Các nghiên cứu về giảm ảnh hưởng phi tuyến trong miền điện

Các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến trong miền điện chủ yếu thực hiện dựa trên các thuật toán xử lý tín hiệu, hướng đến làm giảm đồng thời ảnh hưởng phi tuyến của các phần tử tại bộ thu, phát và ảnh hưởng phi tuyến trên sợi gây ra. Các nhóm giải pháp điển hình gồm có giảm PAPR, truyền ngược trong miền điện, sử dụng xung RF-pilot, phối hợp pha số, giải pháp loại bỏ nhiễu phách tín hiệu - tín hiệu.

#### 1.5.2.3 Các giải pháp giảm ảnh hưởng phi tuyến trong cả hai miền quang, điện

Giải pháp giảm ảnh hưởng phi tuyến trong cả hai miền quang điện kết hợp kỹ thuật tách sóng trực tiếp và điều chế pha quang.

### 1.5.3 Nhận xét các công trình nghiên cứu

Các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng phi tuyến trên đây còn một số những điểm tồn tại khi ứng dụng cho các hệ thống OFDM quang, cụ thể như sau

- Hạn chế của các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến khi ứng dụng cho hệ thống IM-DD O-OFDM: Chưa có nhiều các giải pháp trong miền số với các đánh giá đầy đủ khi ứng dụng cho hệ thống

- IM-DD O-OFDM. Các giải pháp đã công bố trong miền quang không phù hợp cho ứng dụng trong mạng truy nhập quang thụ động.
- Hạn chế của các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến trong hệ thống O-OFDM WDM: vấn đề về độ phức tạp của các giải pháp bù phi tuyến trong miền số khi ứng dụng cho hệ thống O-OFDM WDM.
  - Hạn chế của các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến trong các hệ thống yêu cầu về thời gian thực: Các giải pháp trong miền số sử dụng các vi mạch DSP đặt tại các bộ thu, phát luôn phải đối mặt với sự trả giá giữa hiệu suất bù phi tuyến và độ phức tạp tính toán của từng giải pháp.

## **1.6 ĐỀ XUẤT HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN**

Qua các khảo sát, nghiên cứu và phân tích cho thấy hệ thống OFDM quang chịu nhiều ảnh hưởng, đặc biệt là ảnh hưởng phi tuyến. Vì thế, trong quá trình thực hiện luận án, nghiên cứu sinh sẽ tập trung phân tích, hướng đến đề xuất mô hình cho phép đánh giá hiệu năng chính xác hơn và đề xuất các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến phù hợp để cải thiện hiệu năng cho các hệ thống IM-DD O-OFDM.

## **1.7 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1**

Chương 1 trình bày tổng hợp các vấn đề lý thuyết liên quan đến luận án. Những vấn đề cơ bản về OFDM, OFDM quang, các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống OFDM quang (PAPR cao, ảnh hưởng phi tuyến tại các bộ phát/thu và ảnh hưởng của các hiệu ứng phi tuyến trên sợi,...) đã được phân tích. Từ tổng hợp, phân tích các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về các hệ thống OFDM quang, nghiên cứu sinh đã xác định hướng nghiên cứu thực hiện luận án của mình.

## **CHƯƠNG 2: ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG**

### **2.1 ĐẶT VẤN ĐỀ**

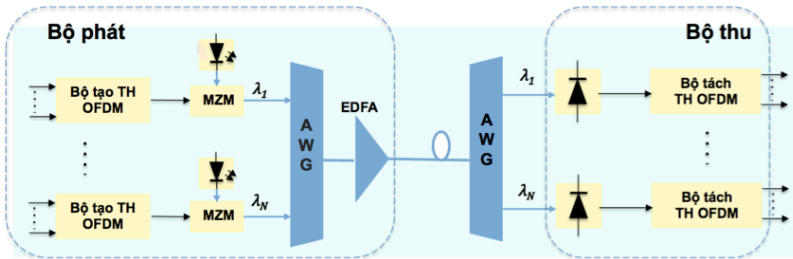
Sự kết hợp giữa kỹ thuật IM-DD O-OFDM và công nghệ WDM, vượt qua được ảnh hưởng của tán sắc, cho phép triển khai các hệ thống dung



lượng rất lớn. Đây là giải pháp rất hứa hẹn cho mạng truy nhập quang thụ động thể hệ kế tiếp khoảng cách dài (LR-PON), thu hút rất nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Trong chương này, mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM WDM dưới ảnh hưởng của đầy đủ các nguồn nhiễu đến từ tất cả các thành phần của hệ thống được xây dựng. Từ đó, làm cơ sở cho việc đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống, cho phép đánh giá mức độ khả thi khi triển khai hệ thống và thu được các thông tin hữu ích trong thiết kế hệ thống.

## 2.2 HỆ THỐNG O-OFDM WDM ĐIỀU BIẾN CƯỜNG ĐỘ TÁCH SÓNG TRỰC TIẾP

Hệ thống IM-DD O-OFDM WDM gồm ba phần chính gồm có bộ phát, sợi quang và bộ thu như biểu diễn trong hình 2.1.



Hình 2.1: Mô hình hệ thống O-OFDM WDM điều biến cường độ tách sóng trực tiếp

## 2.3 CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG LÊN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG IM-DD O-OFDM WDM

### 2.3.1 Các ảnh hưởng tuyến tính

#### 2.3.1.1 Nhiễu xén

Nhiễu xén phát sinh tại bộ tạo tín hiệu OFDM điều chế cường độ. Công suất nhiễu xén gây ra trên từng kênh bước sóng tại phía phát sẽ là

$$P_{xén} = Q^2 \left( \frac{\eta_{OCPR}}{\sqrt{2\pi}} \right) \left( h_2 \eta_{OCPR}^2 \frac{N}{4\pi(N-1)} - h_1 \eta_{OCPR} \sqrt{\frac{N}{4\pi(N-1)}} + \frac{h_0}{4} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Khi đó, công suất nhiễu xén sau photodiode tại phía thu có dạng sau

$$N_{xén} = (RmP_{xén}e^{-\alpha_f L})^2 \quad (2.3)$$

### 2.3.1.2 Nhiều ASE

Công suất nhiễu phách gây ra bởi sự có mặt của EDFA trên hệ thống sau photodiode tại phía thu được tính như sau

$$N_{ASE} = 4R^2 \left( (P_{OFDM} + P_{OC}) G e^{-\alpha_f L} S_{ASE} B_e + S_{ASE}^2 \left( \frac{B_o - B_e}{2} \right) B_e e^{-2\alpha_f L} \right) \quad (2.5)$$

### 2.3.1.3 Nhiều tại bộ tách sóng quang

Công suất nhiễu gây ra bởi bộ thu PIN sau bộ tách sóng quang sẽ là

$$N_{PD} = 2qB_e [R(P_{in} + P_{ASE}) + I_d] + S_T^2 B_e \quad (2.7)$$

## 2.3.2 Các ảnh hưởng phi tuyến

Nguồn nhiễu phi tuyến gây ra bởi các hiệu ứng XPM, SPM và FWM luôn tồn tại và ảnh hưởng đáng kể tới hiệu năng hệ thống. Giả thiết rằng, các hiệu ứng này được xem là độc lập với nhau thì công suất nhiễu phi tuyến tổng gây ra bởi các hiệu ứng XPM, SPM và FWM ở sau bộ tách sóng quang sẽ là

$$N_{NL} = N_{XPM} + N_{SPM} + N_{FWM} \quad (2.9)$$

### 2.3.2.1 Nhiều phi tuyến gây bởi XPM

Công suất nhiễu XPM trên từng kênh bước sóng, sau bộ tách sóng quang sẽ là

$$N_{XPM} = \frac{1}{\pi B_e} R^2 e^{-2\alpha_f L} P_{OFDM}^4 G^4 \gamma^2 \int_{-B_e}^{B_e} \frac{\sin^2(\beta_2 \omega L / 2)}{\alpha_f^2 + \omega^2 d_{j,i}^2} d\omega \quad (2.10)$$

trong đó  $d_{j,i} \approx \left( \frac{D_{cc}}{f_j} \right) \frac{|f_j - f_i|}{f_j + |f_j - f_i|}$  là tham số walk-off với chỉ số  $i$  đại diện cho  $k$ ,  $l$ ,  $m$  và  $f_j$  là tần số sóng mang quang của kênh bước sóng  $j$ .

### 2.3.2.2 Nhiều phi tuyến gây bởi SPM

Công suất nhiễu SPM trên một kênh bước sóng, sau bộ tách sóng quang được xác định như dưới đây

$$N_{SPM} = \frac{1}{2\pi B_e \alpha_f^2} R^2 e^{-2\alpha_f L} P_{OFDM}^4 G^4 \gamma^2 \int_{-B_e}^{B_e} \sin^2(\beta_2 \omega L / 2) d\omega \quad (2.11)$$

### 2.3.2.3 Nhiều phi tuyến gây bởi FWM

Công suất nhiễu FWM trên từng kênh bước sóng ở sau bộ tách sóng quang sẽ được biểu diễn một cách đơn giản hơn như sau

$$N_{FWM} = 2R^2 e^{-2\alpha_f L} L_{eff} P_{OC}^3 P_{OFDM} G^4 \sum_{j=k+l-m} a_{d,j} n_j(f) \left(\frac{Dy}{3}\right)^2 \quad (2.13)$$

## 2.4 ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG OFDM QUANG

### 2.4.1 Biểu thức hiệu năng

Các nguồn nhiễu có thể coi là các biến ngẫu nhiên phân bố Gauss độc lập, vì thế nhiễu tổng trên từng kênh bước sóng của hệ thống được tính tại phía thu, sau bộ tách sóng quang, sẽ là

$$N_{total} = N_{xén} + N_{ASE} + N_{NL} + N_{PD} \quad (2.14)$$

Tỉ số SNR trên từng kênh bước sóng, sau bộ tách sóng quang là

$$SNR = \frac{(RP_{rec})^2}{N_{total}} = \frac{(RP_{OFDM} G e^{-\alpha_f L})^2}{N_{xén} + N_{ASE} + N_{NL} + N_{PD}} \quad (2.16)$$

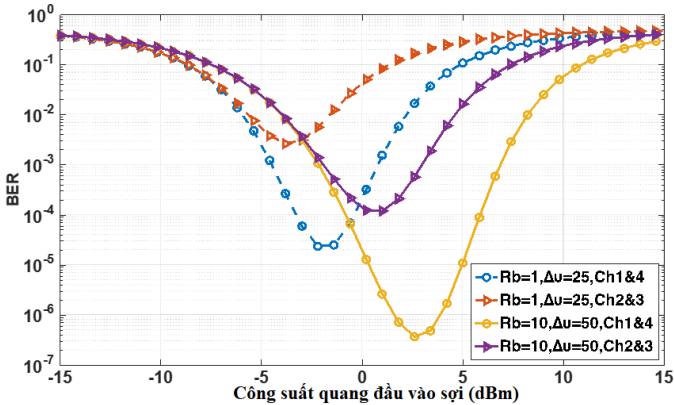
Với hệ thống IM-DD O-OFDM WDM sử dụng điều chế M-QAM, BER sẽ phụ thuộc vào SNR của tín hiệu OFDM trên mỗi kênh bước sóng theo dạng

$$BER = \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left( \sqrt{\frac{3}{M-1}} SNR \right) \quad (2.17)$$

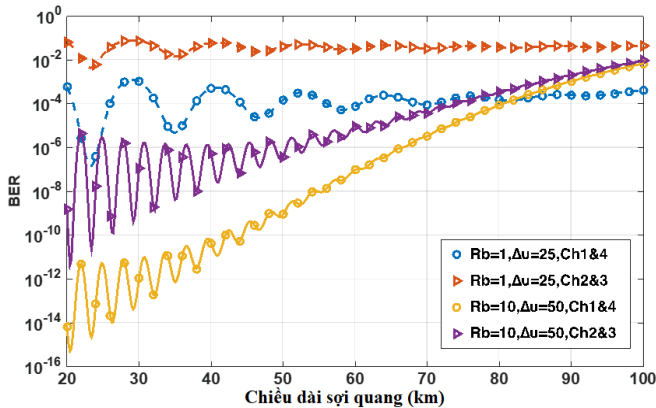
M là bậc điều chế QAM và,  $Q(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^\infty \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv$  là hàm bù lỗi.

### 2.4.2 Kết quả đánh giá hiệu năng hệ thống OFDM quang

Hình 2.3 cho thấy tồn tại giá trị công suất đầu vào tối ưu của mỗi kênh bước sóng mà tại đó BER của hệ thống là nhỏ nhất. Tại vùng công suất đầu vào lớn, hiệu năng của hệ thống giảm mạnh do ảnh hưởng phi tuyến. BER và công suất tối ưu của từng kênh bước sóng đều được cải thiện khi khoảng cách kênh lớn và tại vị trí các kênh biên.



Hình 2.3. BER phụ thuộc vào công suất quang của một kênh bước sóng (sợi SMF ( $D_c = 17\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ) có chiều dài  $L = 75\text{km}$ , chỉ số điều chế  $m = 0,2$ , độ lợi EDFA  $G = 10\text{dB}$  và sử dụng 4-QAM.



Hình 2.4: BER phụ thuộc vào chiều dài sợi quang SMF (công suất quang 0 dBm, chỉ số điều chế  $m = 0,2$ , độ lợi EDFA  $G = 10\text{ dB}$  và sử dụng 4-QAM

BER biến đổi theo chiều dài sợi quang dưới dạng hàm dao động tắt dần do sự phụ thuộc của hiệu suất FWM vào điều kiện phối hợp pha như biểu diễn trong hình 2.4. Trong khoảng chiều dài hiệu dụng, ảnh hưởng phi tuyến trên sợi rất lớn nên BER dao động với biên độ lớn. Khi khoảng cách vượt quá chiều dài hiệu dụng, công suất trên sợi giảm đi nên ảnh hưởng phi tuyến giảm, biên độ dao động của BER giảm theo. Khi công

suất tín hiệu bị suy giảm nhiều tại khoảng cách dài, sự khác biệt về hiệu năng giữa các kênh trung tâm và các kênh biên cũng được thu hẹp. Khi đó, nhiễu EDFA và nhiễu bộ thu chiếm ưu thế, hiệu năng hệ thống suy giảm mạnh.

## 2.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương 2 tập trung phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM WDM dưới ảnh hưởng tổng thể của các yếu tố tác động khác nhau đến từ bộ phát, sợi quang và bộ thu. Trên cơ sở đó đã xây dựng mô hình giải tích đánh giá sự phụ thuộc của hiệu năng hệ thống vào các yếu tố ảnh hưởng này thông qua tính toán công suất nhiễu tổng của hệ thống. Các nguồn nhiễu khác nhau bao gồm nhiễu xén tại bộ tạo tín hiệu OFDM, nhiễu ASE của EDFA, nhiễu phi tuyến trên sợi quang và nhiễu bộ thu đóng góp vào nhiễu tổng của hệ thống. Kết quả phân tích cho thấy ảnh hưởng phi tuyến là yếu tố chính làm giới hạn hiệu năng hệ thống. Đây chính là cơ sở cho việc đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng cho hệ thống IM-DD O-OFDM trong các chương tiếp theo.

## CHƯƠNG 3: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG SỬ DỤNG BỘ NÉN GIÃN

### 3.1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Cho đến nay, nhiều giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến trong miền số đã được đề xuất. Các giải pháp này cho phép giảm ảnh hưởng phi tuyến tại cả sợi quang và các phần tử tại bộ phát/ thu. Trong đó, nhiều phương pháp được kế thừa từ hệ thống truyền thông tín hiệu điện, cải thiện hiệu năng của hệ thống IM-DD O-OFDM bằng cách giảm PAPR của tín hiệu OFDM. Tuy nhiên, các giải pháp này làm tăng thêm độ phức tạp tại cả bộ phát/ thu của hệ thống OFDM quang. Một giải pháp khác là thực hiện nén/ giãn để giảm PAPR của tín hiệu OFDM, từ đó giảm ảnh hưởng phi tuyến của hệ thống. Tuy nhiên, giải pháp này đồng thời cũng gây méo tín hiệu. Hiệu quả cải thiện hiệu năng của hệ thống phụ thuộc rất nhiều vào tham số của bộ nén giãn, do vậy cần phải

khảo sát cụ thể để đạt được tối ưu cân bằng giữa giảm PAPR và méo phát sinh.

Trong chương này, giải pháp sử dụng bộ nén giãn dựa trên luật A và mô hình Rapp để cải thiện hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM truyền qua sợi quang khoảng cách dài được đề xuất. Tín hiệu OFDM khi đưa qua bộ nén sẽ làm giảm PAPR, làm cho dải động của tín hiệu nằm gọn trong vùng đặc tuyến tuyến tính của phần tử điều chế và ADC tại bộ phát, đồng thời giảm các giá trị công suất quang lớn đưa vào sợi. Điều này cho phép giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến, từ đó đạt được cải thiện hiệu năng của hệ thống. Mức độ cải thiện hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM áp dụng nén/ giãn theo luật A và dựa theo mô hình Rapp đề xuất được đánh giá thông qua các tính toán lý thuyết và kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo.

## 3.2 NÉN GIẢN TÍN HIỆU

### 3.2.1 Luật nén A

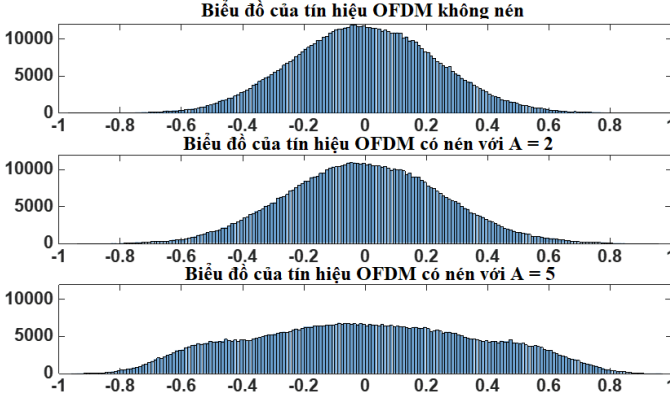
Quá trình nén và giãn tuân theo luật A, với A là tham số nén, x là biên độ tức thời chuẩn hoá của tín hiệu đầu vào được định nghĩa lần lượt như sau:

$$y = \begin{cases} \operatorname{sgn}(x) \frac{A|x|}{1+\ln A} & |x| < \frac{1}{A} \\ \operatorname{sgn}(x) \frac{1+\ln(A|x|)}{1+\ln A} & \frac{1}{A} \leq |x| \leq 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$x = \begin{cases} \operatorname{sgn}(y) \frac{1+\ln A}{A} |y| & |y| < \frac{1}{1+\ln A} \\ \operatorname{sgn}(y) \frac{e^{(1+\ln A)|y|-1}}{A} & \frac{1}{1+\ln A} \leq |y| \leq 1 \end{cases} \quad (3.6)$$

Áp dụng luật A, các biên độ tín hiệu lớn được nén theo hàm logarithm, các biên độ tín hiệu nhỏ được được khuếch đại tuyến tính bởi hằng số  $A/(1 + \ln A)$  nên biên độ tín hiệu sau nén có PAPR giảm. Hình 3.3 biểu diễn phân bố của biên độ tín hiệu OFDM không nén và sau nén với tham số nén lần lượt là 2 và 5. Hệ số A càng lớn, vùng nén phi tuyến được mở rộng về phía giá trị biên độ nhỏ, khiến cho phân bố của biên độ tín hiệu OFDM tiến dần đến phân bố đều. Khi đó, PAPR giảm nhưng mức độ

méo tín hiệu OFDM tăng lên, dẫn đến giảm hiệu quả của giải pháp bù phi tuyến. Do vậy, việc lựa chọn tham số nén  $A$  cần thỏa mãn được hai yêu cầu là giảm PAPR và tối thiểu lượng méo phát sinh để đảm bảo cho phép cải thiện hiệu năng hệ thống.



Hình 3.3. Biểu đồ của các tín hiệu OFDM không nén và sau nén với 256-IFFT và 64-QAM (trục hoành: biên độ tín hiệu chuẩn hoá; trục tung: số lượng biên độ tín hiệu có giá trị tương ứng).

### 3.2.2 Nén giãn dựa trên mô hình Rapp

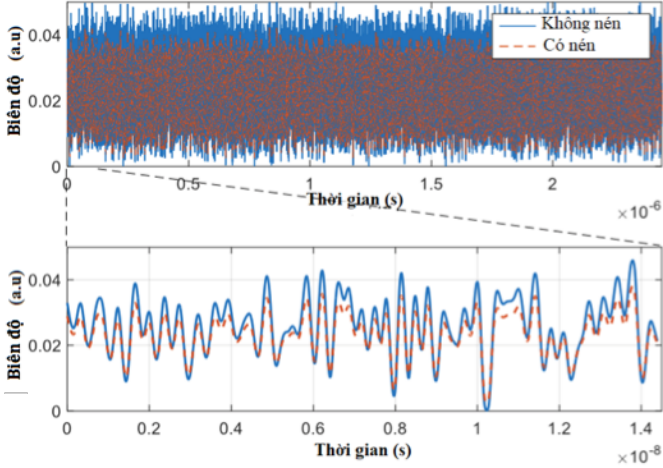
Nén đề xuất dựa trên mô hình Rapp được định nghĩa là

$$y = \frac{\varepsilon x}{\left[1 + \left(\frac{|x|}{a_{sat}}\right)^{2\alpha}\right]^{1/2\alpha}} \quad (3.7) \quad x = \frac{y}{\varepsilon \left[1 - \left(\frac{|y|}{a_{sat}}\right)^{2\alpha}\right]^{1/2\alpha}} \quad (3.8)$$

với  $x$  là biên độ tức thời chuẩn hoá của tín hiệu đầu vào ( $-1 \leq x \leq 1$ ),  $\varepsilon$  là hệ số tỉ lệ để duy trì công suất của tín hiệu trước và sau nén là không đổi,  $a_{sat}$  là tham số mức bão hoà quyết định đầu ra giới hạn của đường cong nén,  $\alpha$  là tham số độ mịn xác định độ cong của đặc tuyến nén hay độ mịn chuyển tiếp từ vùng tuyến tính sang vùng bão hoà.

Với nén theo mô hình Rapp, công suất của tín hiệu sau nén và tín hiệu trước nén được giữ không đổi ( $E\{|s_n^c|^2\} = E\{|s_n|^2\}$ ), nhưng biên độ lớn

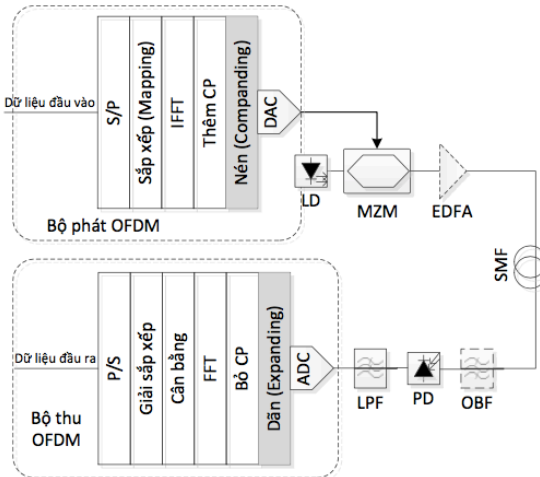
nhất của tín hiệu sau nén lại nhỏ đi để giảm PAPR như mô tả trong hình 3.6, giúp cho PAPR giảm.



Hình 3.6. Dạng sóng của tín hiệu OFDM trước nén và sau nén.

### 3.2.3 Cấu trúc hệ thống IM-DD O-OFDM sử dụng bộ nén giãn

Sơ đồ khối hệ thống IM-DD O-OFDM có sử dụng bộ nén giãn được đưa ra trong hình 3.8.

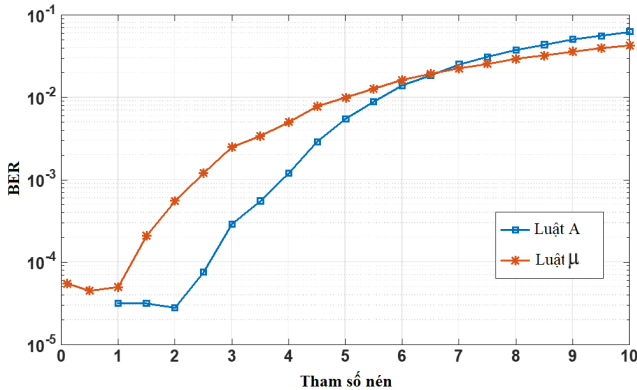


Hình 3.8. Sơ đồ khối hệ thống IM-DD O-OFDM sử dụng bộ nén giãn.

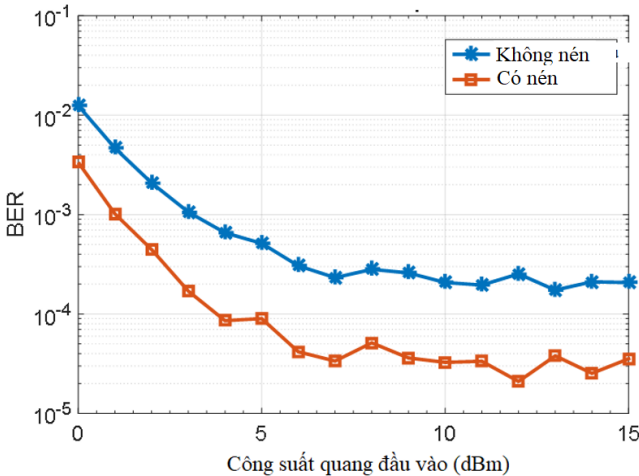


### 3.3 HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG SỬ DỤNG BỘ NÉN GIẢN TUẦN THEO LUẬT A

Hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM với chiều dài truyền dẫn 80 km phụ thuộc vào tham số nén được biểu diễn ở hình 3.9. Tham số nén tối ưu của luật A nằm trong khoảng từ  $1 \div 2$ , tại đó BER của hệ thống là nhỏ nhất.



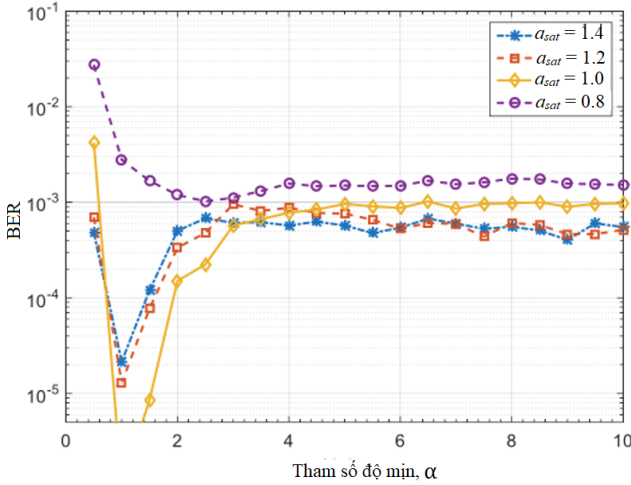
Hình 3.9. BER phụ thuộc vào tham số nén theo luật A và luật  $\mu$  (chiều dài sợi  $L = 80\text{km}$ , công suất quang phát  $P_0 = 13\text{dBm}$ ).



Hình 3.14. BER phụ thuộc vào công suất quang đầu vào khi sử dụng luật A (chiều dài sợi  $L = 80\text{km}$ , chỉ số điều chế  $m = 0,57$  và tham số nén  $A = 2$ ).

Hiệu năng BER của hệ thống có sử dụng bộ nén giãn theo luật A với  $A = 2$  luôn được cải thiện cỡ một bậc về độ lớn so với trường hợp không sử dụng bộ nén giãn, như cho thấy trong hình 2.14.

### 3.3 HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG SỬ DỤNG BỘ NÉN GIÃN DỰA TRÊN MÔ HÌNH RAPP

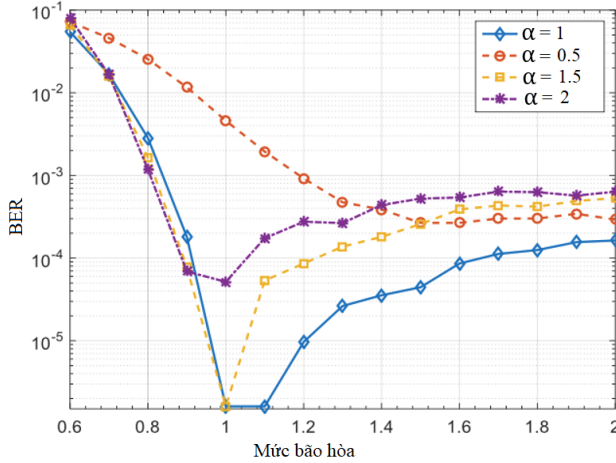


Hình 3.15. BER phụ thuộc vào tham số độ mịn  $\alpha$  (chiều dài sợi  $L = 80$  km, công suất quang đầu vào  $P_0 = 14$  dBm).

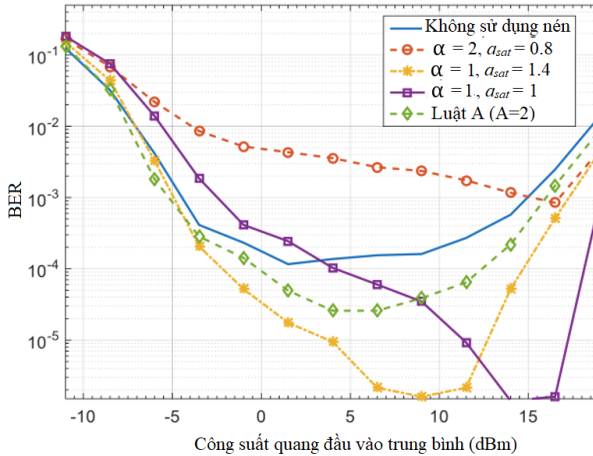
Với giải pháp nén đề xuất theo mô hình Rapp, hiệu năng tốt nhất của hệ thống IM-DD O-OFDM đạt được phụ thuộc cả hai tham số, độ mịn  $\alpha$  và mức bão hoà  $a_{sat}$  như biểu diễn trong hình 3.15 và 3.16. Tại các mức bão hoà  $a_{sat}$  khác nhau, BER của hệ thống nhỏ nhất với  $\alpha$  trong khoảng  $1 \div 2,5$ . Tại các giá trị  $\alpha$  khác nhau, BER của hệ thống nhỏ nhất với  $a_{sat}$  trong khoảng  $0,9 \div 1,4$ . Kết hợp các kết quả, BER tốt nhất đạt được khi  $\alpha = 1$  và  $a_{sat}$  trong khoảng từ 1 đến 1,2.

Hiệu năng BER của hệ thống khi sử dụng bộ nén giãn theo mô hình Rapp tại vùng tham số tối ưu cải thiện hơn một bậc về biên độ so với trường hợp sử dụng luật A. Với giải pháp đề xuất này, dải công suất quang đầu vào tối ưu cải thiện tới 12 dB so với khi không sử dụng nén và 10 dB so với nén theo luật A như ở hình 3.17. Đây là ưu điểm lớn khi

ứng dụng hệ thống IM-DD O-OFDM cho các mạng truy nhập quang thụ động thể hệ mới với khoảng cách truyền dẫn lớn.



Hình 3.16. BER phụ thuộc vào tham số mức bão hoà (chiều dài sợi  $L = 80$  km, công suất quang đầu vào  $P_0 = 14$  dBm).



Hình 3.17. BER phụ thuộc vào công suất quang đầu vào khi sử dụng mô hình Rapp (chiều dài sợi  $L = 80$  km).

### **3.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3**

Giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến trong miền số cho hệ thống IM-DD O-OFDM sử dụng bộ nén giãn theo luật A và mô hình Rapp được đề xuất trong chương này. Dựa trên nghiên cứu lý thuyết và kiểm chứng bằng mô phỏng, hiệu quả cải thiện hiệu năng của mỗi luật nén được định lượng một cách cụ thể thông qua đánh giá sự phụ thuộc của BER vào các tham số hệ thống như tham số bộ nén, công suất phát quang, chỉ số điều chế và công suất quang thu, từ đó cung cấp thông tin hữu ích cho việc thiết kế hệ thống. Giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống trong miền số yêu cầu thêm mạch xử lý số để thực hiện nén và giãn tín hiệu, làm tăng tải xử lý cũng như chi phí cho hệ thống. Tuy nhiên, nén theo luật A và mô hình Rapp đã chín muồi về kỹ thuật mạch điện tử nên dễ dàng cải tiến, tích hợp vào các bộ tạo và tách tín hiệu OFDM trong hệ thống truyền dẫn quang. Giải pháp đề xuất có tính khả thi cao và chi phí hợp lý, phù hợp cho các mạng truy nhập quang, đặc biệt với LR-PON.

## **CHƯƠNG 4: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG DỰA TRÊN KỸ THUẬT TRUYỀN NGƯỢC TRONG MIỀN QUANG**

### **4.1 ĐẶT VẤN ĐỀ**

Các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến trong miền quang đã công bố cho phép giảm cả ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến và tán sắc trên sợi. Tuy nhiên, ở các giải pháp này có những nhược điểm nhất định, chẳng hạn yêu cầu về vị trí đặt MSSSI chính giữa tuyến truyền dẫn hay đặc tính của phần tử quang chưa tối ưu.

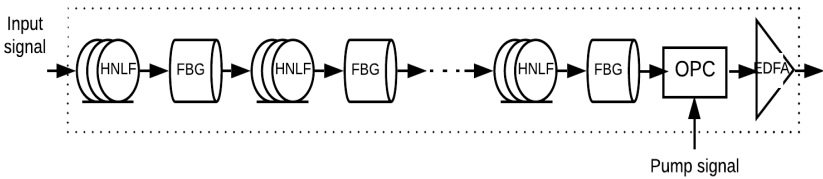
Giải pháp giảm ảnh hưởng phi tuyến dựa trên kỹ thuật truyền ngược trong miền quang sử dụng các phần tử quang sẵn có, chi phí thấp và đặt tại phía phát được đề xuất trong chương này. Tín hiệu quang lan truyền trong OBP, sau đó được liên hợp pha trước khi đưa đến sợi quang truyền dẫn để tới phía thu. Như vậy, bộ OBP đề xuất đóng vai trò như một bộ bù trước trong miền quang, nhờ đó, tăng cường sự linh hoạt khi ứng

dụng giải pháp trong nhiều kiểu mạng quang khác nhau. Mức độ cải thiện hiệu năng của hệ thống IM-DD O-OFDM sử dụng giải pháp đề xuất được đánh giá thông qua các tính toán lý thuyết và kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo.

## 4.2 ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP GIẢM THIỂU ẢNH HƯỞNG PHI TUYẾN DỰA TRÊN KỸ THUẬT TRUYỀN NGƯỢC TRONG MIỀN QUANG

### 4.2.1 Bộ OBP đề xuất

Cấu tạo của bộ OBP đề xuất gồm nhiều đoạn nhỏ, mỗi đoạn gồm một phần tử HNLF và một phần tử FBG, phía cuối có thêm mô đun liên hợp pha quang (OPC) để tạo tín hiệu liên hợp và bộ khuếch đại EDFA để điều khiển công suất quang phát vào sợi truyền dẫn. Hình 4.1 biểu diễn sơ đồ chi tiết bộ OBP đề xuất.



Hình 4.1. Sơ đồ bộ OBP đề xuất.

### 4.2.2 Phương pháp tách sóng trong miền quang

Mục này phân tích từng bước bù phi tuyến và tán sắc của bộ OBP đề xuất. Ở bước bù phi tuyến, đoạn sợi HNLF đóng vai trò toán tử phi tuyến của OBP, nếu bỏ qua suy hao sợi quang, ảnh hưởng phi tuyến sẽ được bù hoàn toàn nếu như dịch pha phi tuyến tại OBP và SMF là hoàn toàn bằng nhau. Ở bước bù tán sắc, phần tử FBG đóng vai trò phần tử tuyến tính của OBP, ảnh hưởng tán sắc gây ra bởi OBP cần phải bằng ảnh hưởng tán sắc gây ra bởi đoạn SMF.

Tín hiệu OFDM sau khi đi qua các đoạn HNLF và FBG sẽ được liên hợp pha tại OPC nhờ quá trình trộn bốn sóng. Tín hiệu liên hợp pha sẽ được truyền qua sợi quang truyền dẫn tới phía thu. Công suất tín hiệu OFDM liên hợp sau OPC được đưa ra như sau

$$P_{conj} = \rho \left( \frac{D}{3} \gamma_{NW} L_{NW} \right)^2 P_p^2 P_{OPC} \quad (4.19)$$

trong đó  $D$  là hệ số suy biến của FWM,  $P_p$  là công suất nguồn bơm của OPC. Hệ số  $\rho$  đặc trưng cho phần công suất sóng FWM trùng với tần số liên hợp, và  $0 < \rho < 1$ .

### 4.2.3 Tính toán lý thuyết

Phần này xác định hiệu quả cải thiện hiệu năng của giải pháp truyền ngược đề xuất bằng các tính toán lý thuyết. Công suất của trường quang FWM  $|E_F(L)|^2$ , còn được gọi là công suất phi tuyến, tại tần số  $\omega_F$  với giả thiết công suất tín hiệu bằng nhau tại tất cả các kênh con được tính như sau

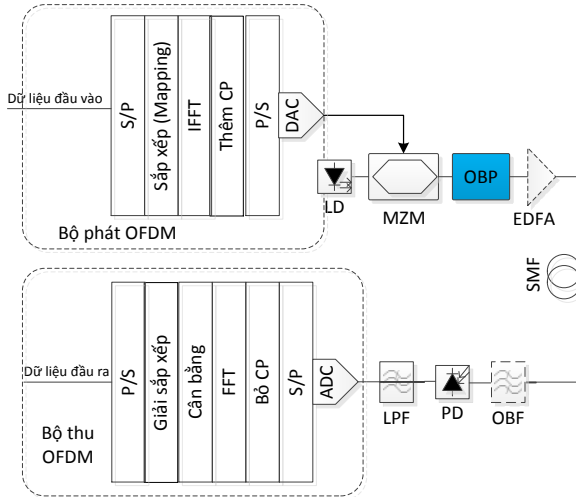
$$P_F^{wo}(L) = |E_F(L)|^2 = \frac{D^2 \gamma^2}{9} P^3 \left[ \frac{\alpha_f^2 L_{eff}^2}{\alpha_f^2 + \Delta\beta^2} \right] \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha_f L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha_f L})^2} \right] \quad (4.22)$$

Công suất FWM,  $|E_F^w(L)|^2$ , tại tần số  $\omega_F$  ở phía cuối hệ thống IM-DD O-OFDM có sử dụng OBP sẽ là

$$P_F^w(L) = \frac{D^2}{9} P^3 \left[ \frac{\gamma^2 \alpha_f^2 L_{eff}^2}{\alpha_f^2 + \Delta\beta^2} \left( 1 + \frac{4e^{-\alpha_f L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha_f L})^2} \right) + \frac{\gamma_{HLNF}^2}{K^2 \Delta\beta^2} 4 \sin^2 \left( \frac{\Delta\beta L}{2} \right) - \frac{4}{K \Delta\beta (\alpha_f^2 + \Delta\beta^2)} \sin \left( \frac{\Delta\beta L}{2} \right) \left[ \alpha_f (1 - e^{-\alpha_f L}) \cos \left( \frac{\Delta\beta L}{2} \right) + \Delta\beta (1 + e^{-\alpha_f L}) \sin \left( \frac{\Delta\beta L}{2} \right) \right] \right] \quad (4.28)$$

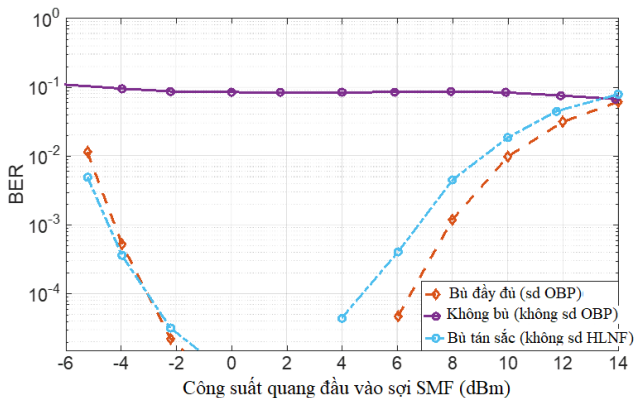
Trong công thức (4.28), số hạng thứ nhất là công suất FWM của đoạn SMF, số hạng thứ hai là công suất FWM của OBP, số hạng thứ ba là công suất của trường quang gây ra bởi quá trình trộn phi tuyến, thực hiện nhiệm vụ bù ảnh hưởng phi tuyến cho OBP và SMF. Hiệu quả bù phi tuyến của OBP sẽ tăng lên nếu như số hạng thứ ba lớn hơn nhiều số hạng thứ hai.

### 4.3 HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG ĐƠN KÊNH SỬ DỤNG BỘ OBP ĐỀ XUẤT



Hình 4.5. Sơ đồ khối hệ thống IM-DD O-OFDM sử dụng OBP.

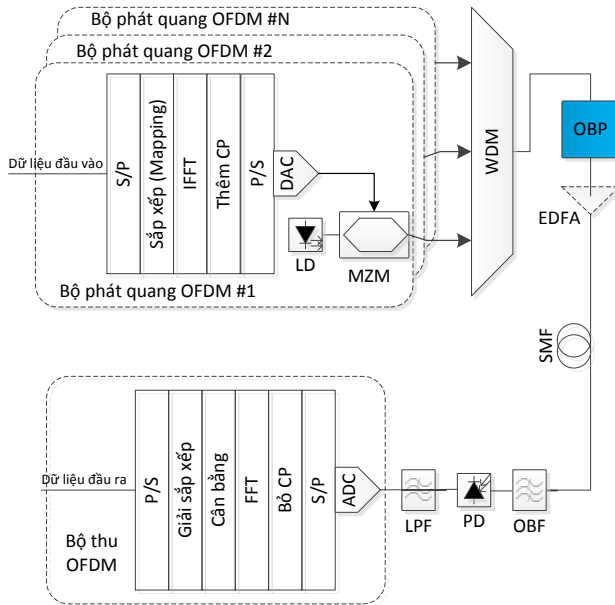
Trong phần này, mô phỏng Monte-Carlo được sử dụng để khảo sát hiệu quả cải thiện hiệu năng của giải pháp đề xuất ở hệ thống IM-DD O-OFDM đơn kênh theo sơ đồ được đưa ra trong hình 4.5, với OBP đóng vai trò bộ bù trước.



Hình 4.9. BER phụ thuộc công suất quang đầu vào đoạn SMF ở hệ thống không có OBP, chỉ bù tán sắc và có OBP.

Hình 4.9 cho thấy hiệu năng BER của hệ thống IM-DD O-OFDM đơn kênh được cải thiện cỡ 4 bậc về mặt độ lớn khi chỉ bù tán sắc và cải thiện thêm 1 bậc nữa khi sử dụng OBP đề xuất. Dải công suất quang đầu vào sợi SMF tối ưu khi sử dụng OBP cũng tăng thêm ít nhất 2 dB so với chỉ bù tán sắc.

#### 4.4 HIỆU NĂNG HỆ THỐNG OFDM QUANG ĐA KÊNH SỬ DỤNG BỘ OBP ĐỀ XUẤT



Hình 4.10. Sơ đồ khối hệ thống IM-DD O-OFDM WDM sử dụng OBP

Trong hệ thống IM-DD O-OFDM WDM, ảnh hưởng phi tuyến trên một sóng mang con của tín hiệu OFDM tạo thành từ hai nguồn nhiễu chính sau:

- + Hiệu ứng FWM phát sinh do sự tương tác giữa các sóng mang con của tín hiệu OFDM, gây ra lượng công suất phi tuyến  $P_F^{OFDM}(L)$ .

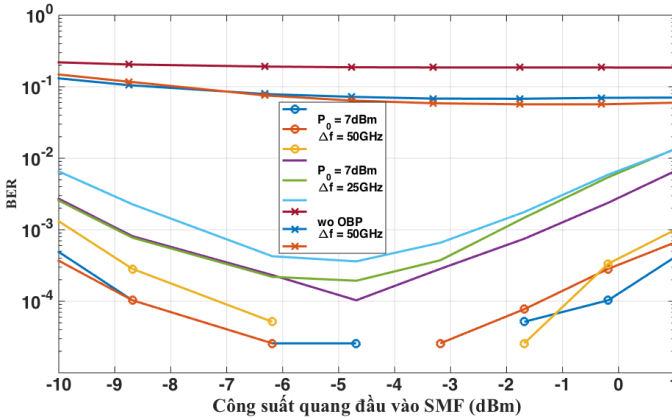


- + Hiệu ứng FWM phát sinh do sự tương tác giữa các kênh quang của hệ thống WDM, gây ra công suất phi tuyến  $P_F^{WDM}(L)$ .

Công suất phi tuyến tổng trên mỗi sóng mang con của tín hiệu OFDM trong trường hợp có hoặc không sử dụng OBP sẽ thu được như sau:

$$P_F^{total}(L) = P_F^{WDM}(L) + P_F^{OFDM}(L) \quad (4.29)$$

Hiệu ứng phi tuyến ảnh hưởng lên tín hiệu OFDM của hệ thống IM-DD O-OFDM đa kênh lớn hơn nhiều so với hệ thống đơn kênh. Mô phỏng Monte-Carlo được sử dụng để đánh giá hiệu năng hệ thống trong các trường hợp có và không có OBP theo mô hình đưa ra ở hình 4.10.



Hình 4.11. BER phụ thuộc vào công suất của mỗi kênh WDM tại đầu vào SMF

Hình 4.11 cho thấy, với công suất đầu vào OBP là 7 dBm, tồn tại một dải công suất đầu vào SMF trong khoảng  $(-8 \div 2)$  dBm có BER là nhỏ nhất, trong cả hai trường hợp khoảng cách kênh 25 GHz và 50 GHz. Khi khoảng cách kênh quang là 50 GHz, BER thấp nhất khoảng  $10^{-5}$ , nhỏ hơn cỡ 10 lần so với khi khoảng cách kênh là 25 GHz.

#### 4.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Trong chương này, giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống IM-DD O-OFDM đóng vai trò như bộ bù trước dựa trên kỹ thuật truyền ngược trong miền quang được đề xuất. Bộ OBP đề xuất được cấu tạo từ các phần tử quang nhỏ gọn, có sẵn gồm có HNLF, FBG và ống dẫn sóng phi

tuyến. Các tính toán lý thuyết đã khẳng định được hiệu quả của giải pháp này và chỉ ra rằng OBP cho phép giảm thiểu đáng kể ảnh hưởng của cả tham số tán sắc và phi tuyến của hệ thống IM-DD O-OFDM đơn kênh và đa kênh khi lựa chọn các tham số phù hợp. Bộ OBP đề xuất được đặt tại phía phát cũng giúp cho khả năng ứng dụng OBP cho các mạng truy nhập quang khoảng cách dài trở nên khả thi do chỉ cần sử dụng một bộ OBP tại OLT để cải thiện hiệu năng cho LR-PON, trong khi vẫn giữ nguyên sự đơn giản tại ONU.

## KẾT LUẬN

Trong Luận án, hai giải pháp nâng cao hiệu năng hệ thống OFDM quang đã được trình bày. Nghiên cứu sinh cũng đã thực hiện xây dựng được mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống OFDM quang dưới ảnh hưởng của tổng thể các yếu tố tác động. Kết quả thu được cho thấy, ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến là nghiêm trọng hơn cả so với các yếu tố khác. Ảnh hưởng phi tuyến lên hệ thống chủ yếu đến từ đặc tuyến không hoàn toàn tuyến tính của nguồn quang hoặc MZM tại bộ phát và hiệu ứng phi tuyến trên sợi. Trên cơ sở đó, nghiên cứu sinh hướng đến đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống OFDM quang bằng cách giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến. Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể chia thành hai nhóm như sau:

- 1. Đề xuất giải pháp sử dụng bộ nén giãn để cải thiện hiệu năng về tỉ số lỗi bit cho hệ thống OFDM quang trong miền điện**
- 2. Đề xuất giải pháp sử dụng kỹ thuật truyền ngược để cải thiện hiệu năng hệ thống OFDM quang trong miền quang**

**Hướng nghiên cứu tiếp theo** của luận án sẽ tập trung vào nghiên cứu khả năng kết hợp giữa các giải pháp bù phi tuyến đã đề xuất cho hệ thống IM-DD O-OFDM, đồng thời mở rộng nghiên cứu các hướng tiếp cận bù phi tuyến mới để có thể đưa ra các giải pháp cải thiện hiệu năng phù hợp cho các hệ thống OFDM quang khác nhau.

## CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

### BÀI BÁO KHOA HỌC

- [J1] Trang. T. T. Ngo., Thu. A. Pham, Nhan. D. Nguyen, Ngoc. T. Dang, “Hybrid OFDM RoF-Based WDM-PON/MMW Backhaul Architecture for Heterogeneous Wireless Networks,” REV Journal of Electronics and Communications, vol. 7, no. 3-4, pp. 57-64, 2017. (Tập chí Điện tử và Truyền thông – Hội vô tuyến điện tử)
- [J2] Ngô T. T. Trang., Nguyen D. Nhan, Bui T. Hieu, “Optical back propagation for nonlinear comensation in OFDM-based long-rangep assive optical networks”, VNU Journal of Science: Mathematics – Physics, vol. 36, no. 1, pp. 54-63, 2020. (Tập chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội: Toán – Lý)
- [J3] Trang. T. T. Ngo., Nhan. D. Nguyen, “A simple nonlinear companding transform for nonlinear compensation of direct-detection optical OFDM systems”, Intl Journal of Electronics and Telecommunications, vol. 66, no. 3, pp. 515-520, 2020. (Tập chí quốc tế ISI)
- [J4] Ngô Thi Thu Trang., Tran Thuy Binh, Bui Trung Hieu, Nguyen Duc Nhan, “Efficiency of nonlinear compensation for WDM-PON based OFDM using optical back propagation”, Journal of Science and Technology on Information and Communications, vol. 4, pp. 21-27, 2020. (Tập chí Khoa học Công nghệ Thông tin và Truyền thông).

### HỘI NGHỊ KHOA HỌC

- [C1] Trang T. Ngo., Hieu B. Trung, Nhan D. Nguyen, “A simple performance analysis of IM-DD OFDM WDM systems in long-range PON application,” In the Proc. of the Seventh Symposium on Information and Communication Technology (SOICT 2016), Hochiminh, Vietnam, 2016, pp. 216-223.
- [C2] Binh T. Tran, Nhan D. Nguyen, Trang T. Ngo., “A comparison for improving the performance of two-stage Optical Phase Conjugation using the third-order nonlinearity,” In the Proc. of the forth IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2017), Hanoi, Vietnam, 2017, pp. 153-158.
- [C3] Trang T. Ngo., Hieu B. Trung, Nhan D. Nguyen, “Performance improvement of IM-DD Optical OFDM system using A-law companding transform,” In the Proc. of the 2018 IEEE International Conferences on Advanced Technologies for Communications (ATC 2018), Hochiminh, Vietnam, 2018, pp. 203-207.