

BÙ ẢNH HƯỞNG TÁN SẮC VÀ PHI TUYẾN CHO HỆ THỐNG WDM ĐƯỜNG TRỰC SỬ DỤNG GIẢI PHÁP TRUYỀN NGƯỢC TRONG MIỀN QUANG

Ngô Thị Thu Trang, Nguyễn Viết Đảm
Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Tóm tắt: Hệ thống WDM đường trực yêu cầu dung lượng trên một kênh bước sóng ngày càng lớn để đáp ứng sự bùng nổ dung lượng truyền dẫn dữ liệu toàn cầu hiện nay. Kỹ thuật OFDM cho phép tăng dung lượng trên một kênh bước sóng. Tuy nhiên, hiệu ứng phi tuyến Kerr và tán sắc sợi là các yếu tố chính giới hạn hiệu năng của hệ thống OFDM-WDM. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất sử dụng giải pháp truyền ngược trong miền quang (OBP), dựa trên phương pháp Fourier tách bước, đóng vai trò như bộ bù trước để bù lại ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc trong hệ thống OFDM-WDM đường trực. Cấu trúc bộ OBP đề xuất chỉ gồm các phần tử quang có sẵn trong thực tế, đó là sợi quang phi tuyến lớn (HNLF) đóng vai trò toán tử phi tuyến, cách tử Bragg sợi (FBG) đóng vai trò toán tử tuyến tính và ống dẫn sóng phi tuyến đóng vai trò phần tử liên hợp pha nên hiệu quả chi phí thấp, dễ dàng triển khai. Hiệu quả của bộ OBP đề xuất trong hệ thống WDM đường trực được khảo sát dựa trên mô phỏng Monte-Carlo cho thấy bằng việc lựa chọn các tham số phù hợp về chiều dài sợi HNLF và hệ số tán sắc của FBG, bộ OBP đề xuất cải thiện đáng kể hiệu năng của hệ thống WDM-OFDM đường trực.

Từ khóa: Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao (OFDM), Ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM), Các giải pháp bù phi tuyến, Truyền ngược trong miền quang (OBP), Mạng WDM đường trực.

1. MỞ ĐẦU

Kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng trực giao (OFDM) kết hợp với các kỹ thuật điều chế băng gốc có hiệu quả sử dụng phổ cao đang trở thành giải pháp hứa hẹn cho các hệ thống WDM đường trực [1], [2]. Nhờ sự phát triển vượt bậc gần đây của kỹ thuật xử lý tín hiệu số, các bộ tạo tín hiệu OFDM tốc độ cao dễ dàng được thực hiện tại các bộ phát quang và bộ thu quang [3]. Thành phần tiền tố chu kỳ (CP) trong mỗi khung tín hiệu cho phép kỹ thuật OFDM chống chịu ảnh hưởng tán sắc sợi quang vốn là nguyên nhân giới hạn tốc độ và khoảng cách truyền dẫn của tuyến quang [3]. Do vậy, hệ thống WDM đường trực ứng dụng OFDM có thể đạt tới dung lượng tổng lên tới nhiều Tb/s và tốc độ truyền dẫn trên mỗi kênh bước sóng đạt tới hàng trăm Gb/s với hiệu suất phổ cao là hoàn toàn khả thi. Tín hiệu OFDM

thu được do sự chồng chất ngẫu nhiên của nhiều tín hiệu sóng mang con, làm xuất hiện các đỉnh biên độ rất lớn gây ảnh hưởng phi tuyến trầm trọng tại bộ phát, bộ thu và trên sợi quang [4], [5]. Đây chính là một trong các giới hạn chính khi ứng dụng kỹ thuật OFDM trong truyền dẫn quang.

Nhiều giải pháp giải pháp bù ảnh hưởng phi tuyến cho các hệ thống OFDM quang trong miền điện đã được nhiều nhóm nghiên cứu đề xuất gần đây [6-7]. Các giải pháp này đều tập trung theo hướng làm giảm giá trị công suất đỉnh của tín hiệu OFDM giúp cho giảm thiểu ảnh hưởng phi tuyến tại bộ phát, bộ thu và trên sợi quang. Các giải pháp này đã cho thấy hiệu quả giảm ảnh hưởng phi tuyến đáng kể cho hệ thống truyền dẫn quang đơn kênh. Tuy nhiên, việc ứng dụng các giải pháp này cho hệ thống WDM còn cần nhiều nghiên cứu thêm nữa do các giải pháp bù ảnh hưởng phi tuyến trong miền điện này chỉ cho phép triển khai trên từng kênh bước sóng độc lập. Vì thế, khi số lượng kênh bước sóng tăng lên, số lượng bộ bù phi tuyến tăng lên khiến cho độ phức tạp và chi phí bù phi tuyến cho hệ thống OFDM-WDM sẽ tăng theo hàm mũ.

Giải pháp đảo phổ giữa tuyến (MSSI) được đề xuất bởi M. Morshed và các cộng sự [8] cho phép bù ảnh hưởng phi tuyến Kerr và tán sắc vận tốc nhóm trong các hệ thống WDM. Giải pháp này khá đơn giản khi chỉ cần sử dụng một mô-đun liên hợp pha (OPC) kết hợp với chính sợi quang truyền dẫn để thực hiện bù phi tuyến và tán sắc trên sợi. Tuy nhiên, giải pháp này yêu cầu OPC phải được đặt chính xác tại chính giữa tuyến truyền dẫn và tạo ra sự đối xứng về phân bố công suất trên sợi giữa hai phía của OPC [9], [10]. Giải pháp truyền ngược trong miền quang (OBP) được đề xuất lần đầu bởi S. Kumar và các cộng sự [11] cho phép đặt bộ bù phi tuyến tại phía thu, đã giải quyết được yêu cầu nghiêm ngặt về vị trí đặt OPC của giải pháp MSSI. Giải pháp này sử dụng sợi quang bù tán sắc (DCF) và các đoạn sợi quang có độ phi tuyến cao (HNLF) cũng đã thu được hiệu quả bù phi tuyến nhất định nhưng có cấu hình tương đối phức tạp. Giải pháp sử dụng OBP đặt tại phía phát đã được chứng minh sự hiệu quả khi ứng dụng cho OFDM-WDM LR-PON [12] với khoảng cách truyền dẫn tối đa chỉ đạt tới 100 km.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất giải pháp sử dụng kỹ thuật truyền ngược trong miền quang cho phép bù ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc trên sợi quang cho hệ thống WDM đường trực với khoảng cách truyền dẫn rất lớn. Bộ OBP được đặt tại phía phát và có cấu trúc như đã đề xuất trong [12], gồm có các đoạn sợi HNLF đóng vai trò phần tử bù phi tuyến, các cách tử Bragg sợi (FBG) đóng vai trò

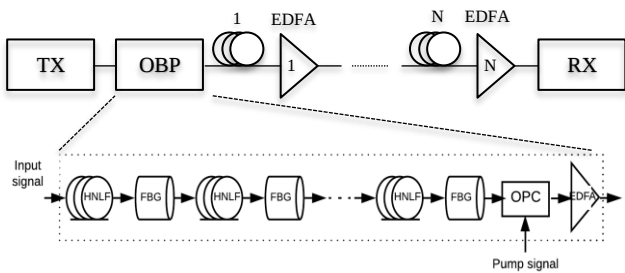
Tác giả liên hệ: Ngô Thị Thu Trang,
Email: trangntt1@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 05/12/2021, chỉnh sửa: 24/02/2022, chấp nhận đăng: 25/03/2022.

phần tử bù tán sắc và một mô đun OPC thực hiện nhiệm vụ tạo tín hiệu liên hợp pha. Tín hiệu OFDM-WDM từ bộ phát sẽ được đưa qua các phần tử HNLF và FBG trước khi đưa đến OPC để thực hiện liên hợp pha. Tín hiệu sau OPC sẽ có pha đảo ngược với tín hiệu trước OPC. Vì thế, lượng ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc tác động lên tín hiệu OFDM-WDM tạo ra bởi các đoạn HNLF và FBG sẽ bù lại được ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc gây ra bởi sợi quang đơn mode tiêu chuẩn (SMF) sử dụng trong hệ thống WDM đường trực cho truyền dẫn tín hiệu. Các kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng đều cho thấy hiệu năng hệ thống WDM đường trực được cải thiện khi sử dụng bộ OBP để xuất với các tham số phù hợp.

Bài báo được bố cục gồm bốn phần. Phần I trình bày các vấn đề liên quan đến tình hình nghiên cứu về các giải pháp bù phi tuyến cho các hệ thống OFDM WDM quang. Phần II trình bày sơ đồ hệ thống WDM đường trực có ứng dụng bộ OBP đề xuất và các sở cứ lý thuyết cho đề xuất này. Kịch bản mô phỏng, các kết quả mô phỏng thu được cùng với các phân tích được đưa ra trong Phần III. Cuối cùng, các nhận định và thảo luận về giải pháp đề xuất được kết luận trong Phần IV.

II. GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống WDM đường trực sử dụng bộ OBP đóng vai trò bù trước.

Sơ đồ khối hệ thống WDM đường trực sử dụng bộ OBP đề xuất đặt tại phía phát được biểu diễn như trong hình 1. Tại bộ phát TX, tín hiệu OFDM được tạo ra trong miền số và được điều chế lên từng sóng mang quang trước khi thực hiện ghép kênh theo bước sóng quang. Tín hiệu OFDM-WDM từ TX được đưa đến OBP trước khi truyền đi trên tuyến truyền dẫn. Bộ OBP gồm nhiều đoạn nhỏ, mỗi đoạn gồm một phần tử HNLF và một phần tử FBG, mô đun OPC tạo tín hiệu liên hợp pha quang và bộ khuếch đại EDFA được sử dụng để điều khiển công suất quang phát vào sợi truyền dẫn như mô tả trong [12]. Sự lựa chọn các phần tử phi tuyến và phần tử tán sắc trong OBP dựa trên nguyên lý của phương pháp Fourier tách bước trong miền quang [16]. Phần tử HNLF đóng vai trò toán tử phi tuyến để bù lại ảnh hưởng phi tuyến trên tuyến truyền dẫn. Hệ số tán sắc và hệ số suy hao của HNLF rất nhỏ, có thể bỏ qua, nên không gây ảnh hưởng tán sắc phát sinh lên tín hiệu khi truyền qua OBP. Phần tử FBG đóng vai trò toán tử tuyến tính cho phép bù lại ảnh hưởng tán sắc trên tuyến truyền dẫn. FBG có kích thước nhỏ gọn và khả năng điều chỉnh tán sắc, đồng thời có hệ số phi tuyến và hệ số suy hao rất nhỏ nên không gây ảnh hưởng phi tuyến phát sinh lên tín hiệu khi truyền qua OBP. Mô đun OPC là một ống dẫn sóng phi tuyến tạo tín hiệu liên hợp pha chủ yếu nhờ quá trình trộn bốn sóng. Bộ khuếch đại EDFA điều khiển công suất tín hiệu liên hợp pha để phù hợp cho tuyến truyền dẫn. Tuyến truyền dẫn của hệ thống WDM đường trực được chia thành nhiều chặng, mỗi chặng sẽ gồm sợi quang truyền dẫn đơn mode tiêu

chuẩn có chiều dài 80 km và một bộ khuếch đại EDFA để bù đủ suy hao của từng chặng. Hai ảnh hưởng chính của sợi quang làm giới hạn khoảng cách và dung lượng truyền dẫn của hệ thống là hiệu ứng phi tuyến Kerr và tham số tán sắc được bù lần lượt bởi các phần tử HNLF và FBG trong OBP đặt ngay tại phía phát. Với cách thức này, việc thiết lập bộ bù ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc của hệ thống WDM đường trực trong miền quang sẽ đơn giản và hiệu quả chi phí hơn nhiều. Tại RX, tín hiệu OFDM-WDM được tách kênh bước sóng và giải phép OFDM để khôi phục tín hiệu ban đầu.

Hiệu ứng phi tuyến Kerr trên sợi quang bao gồm hiệu ứng tự điều chế pha (SPM), hiệu ứng điều chế pha chéo (XPM) và hiệu ứng trộn bốn sóng (FWM) là nguyên nhân chính làm giới hạn dung lượng và khoảng cách truyền dẫn của các hệ thống truyền dẫn quang đa kênh. Trong đó, các hiệu ứng SPM và XPM có thể coi là các trường hợp đặc biệt của FWM nên hoàn toàn có thể dùng các phân tích của FWM cho hai hiệu ứng này bằng cách đưa thêm vào hệ số suy biến D. Với giả thiết, hệ thống WDM sử dụng ba bước sóng truyền dẫn có tần số lần lượt là ω_k , ω_l , ω_m thì khi đó SPM chính là trường hợp các sóng tham gia quá trình FWM có tần số trùng nhau, tức là $\omega_k = \omega_l = \omega_m$ và $D = 1$. Trong khi, XPM tương ứng với trường hợp có hai trong số các sóng tham gia quá trình FWM có tần số trùng nhau, tức là $\omega_k = \omega_l \neq \omega_m$ và $D = 3$. Hai trường hợp này được gọi là FWM suy biến. FWM không suy biến nếu các sóng tham gia quá trình FWM có tần số hoàn toàn khác nhau, tức là $\omega_k \neq \omega_l \neq \omega_m$ và $D = 6$, đây là trường hợp FWM xảy ra phổ biến nhất. Như vậy, dạng sóng FWM, có tần số tại ω_F , là kết quả của quá trình FWM của ba sóng mang quang truyền dẫn trên tuyến gồm N chặng với chiều dài mỗi chặng là L sẽ được biểu diễn như sau [13]

$$E_F(N) = i\gamma \frac{D}{3} E_k(0) E_l(0) E_m^*(0) \exp(i\alpha\beta NL) L_{klm} F_{klm} \quad (1)$$

với L_{klm} đặc trưng cho hiệu suất FWM trên mỗi chặng khuếch đại quang và F_{klm} đặc trưng cho ảnh hưởng giao thoa giữa các sản phẩm FWM được tạo ra từ các chặng truyền dẫn. L_{klm} và F_{klm} được xác định theo công thức dưới đây [14]

$$L_{klm} = \frac{1 - \exp\{-(\alpha + i\Delta\beta)L\}}{\alpha + i\Delta\beta} \quad (2)$$

$$F_{klm} = \exp\{-i\Delta\beta(N-1)L/2\} \frac{\sin(\delta\Delta\beta NL/2)}{\sin(\delta\Delta\beta L/2)} \quad (3)$$

Trong đó:

- $E_s(z)$ là trường quang OFDM tại tần số ω_s và khoảng cách z.

- Các hệ số γ , α và β lần lượt là hệ số phi tuyến, hệ số suy hao và hằng số lan truyền của sợi.

- Tần số của sóng FWM: $\omega_F = \omega_k + \omega_l - \omega_m$

- Hệ số phối hợp pha: $\Delta\beta = \beta_k + \beta_l - \beta_m - \beta_F$ liên quan đến hệ số tán sắc D_c của sợi theo công thức sau [14]

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} D_c \Delta f^2 (k - m)(l - m) \quad (4)$$

với Δf là khoảng cách kênh giữa các bước sóng.

- δ là tỉ số giữa độ dư tán sắc và tán sắc của sợi trên mỗi

chặng truyền dẫn. Khi không bù tán sắc thì $\delta = 1$.

Từ (1), (2) và (3) có thể thấy, hiệu ứng FWM phụ thuộc nhiều vào tham số $\Delta\beta$, là tham số đặc trưng cho sự phù hợp về pha giữa các photon tham gia hiệu ứng FWM. Trong điều kiện khuếch đại quang được sử dụng để bù hoàn toàn suy hao trên mỗi chặng truyền dẫn, công suất nhiễu FWM gây ra bởi các thành phần tần số $\omega_k, \omega_l, \omega_m$ tại cuối tuyến truyền dẫn, với giả thiết công suất tín hiệu OFDM trên mỗi kênh bước sóng đều bằng nhau và bằng P , rút ra từ (1) sẽ có dạng

$$P_F(NL) = \gamma^2 \frac{D_x^2}{9} P^3 |L_{klm}|^2 |F_{klm}|^2 = \eta P^3 \quad (5).$$

Trong đó, η là tham số đặc trưng cho hiệu suất của quá trình FWM và bằng

$$\eta = \gamma^2 \frac{D_x^2}{9} |L_{klm}|^2 |F_{klm}|^2 \quad (6)$$

$$|L_{klm}|^2 \approx \frac{1}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \quad (7)$$

$$|F_{klm}|^2 \approx \frac{\sin^2(N\delta\Delta\beta L/2)}{\sin^2(\delta\Delta\beta L/2)} \quad (8).$$

Như vậy, với hệ thống WDM đường trục đa chặng, ảnh hưởng phi tuyến sẽ trầm trọng hơn do có thêm lượng công suất nhiễu phi tuyến đến từ sự giao thoa giữa các sản phẩm FWM tạo ra trong từng chặng, đặc trưng bởi hệ số $|F_{klm}|^2$.

Tiếp theo, quá trình bù phi tuyến và tán sắc sử dụng bộ OBP cho hệ thống WDM đường trục đa chặng được phân tích. Hệ thống WDM đa chặng sử dụng OBP được chia làm hai đoạn, đoạn OBP và đoạn SMF. Tín hiệu OFDM-WDM được đưa qua đoạn OBP trước, tại đây các tham số của HNLF và FBG sẽ tạo ra ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc lên tín hiệu. Sau đó, tín hiệu đã bị ảnh hưởng tán sắc và phi tuyến được liên hợp pha nhờ OPC và đưa lên đoạn SMF để truyền tới phía thu. Ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc lên tín hiệu OFDM-WDM tại đoạn SMF sẽ ngược pha với ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc lên tín hiệu OFDM-WDM tại đoạn OBP, kết quả là tín hiệu OFDM-WDM được bù hoàn toàn ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc trên toàn hệ thống. Áp dụng công thức (1) cho đoạn OBP với số chặng $N = 1$ do chiều dài phần OBP rất nhỏ sẽ thu được biểu thức biểu diễn trường FWM tại phía cuối đoạn OBP như sau [12]

$$E_F(OBP) =$$

$$i \frac{\gamma_{OBP} D}{3} E_k(0) E_l(0) E_m^*(0) e^{i\beta_{OBP} L_{OBP}} \frac{e^{(-\alpha + i\Delta\beta_{OBP}) L_{OBP}} - 1}{-\alpha + i\Delta\beta_{OBP}} \quad (9)$$

Trong đoạn OBP, suy hao của các đoạn HNLF và FBG rất nhỏ có thể bỏ qua, vì thế suy hao của đoạn OBP cũng được bỏ qua. Tuy nhiên, điều này gây ra sự mất đối xứng về phân bố công suất của tín hiệu OFDM-WDM khi truyền trên đoạn OBP và đoạn SMF. Đây là một trong các yếu tố làm suy giảm hiệu quả bù phi tuyến của các giải pháp dựa trên nguyên lý truyền ngược trong miền quang. Để đảm bảo rằng tán sắc phát sinh trong đoạn OBP hoàn toàn bù đủ cho

tán sắc phát sinh trong đoạn SMF, thì hằng số lan truyền của FBG và sợi SMF phải thỏa mãn điều kiện sau $\beta_{OBP} L_{OBP} = \beta NL$ và $\beta_{FBG} L_{FBG} = \beta NL$. Để thuận tiện trong tính toán, đặt $K = \beta_{FBG}/\beta$, khi đó, trường FWM tại phía cuối đoạn OBP được rút gọn về

$$E_F(OBP) = i \frac{\gamma_{HLNF} D}{3} E_k(0) E_l(0) E_m^*(0) e^{i\beta NL} \frac{e^{i\Delta\beta NL} - 1}{iK\Delta\beta} \quad (10).$$

Khi lan truyền đến cuối đoạn OBP, các trường quang tham gia quá trình trộn bốn sóng (k, l và m) sẽ bị dịch pha một lượng do ảnh hưởng tán sắc dọc theo đoạn OBP một lượng $e^{i\Delta\beta_{OBP} L_{OBP}} = e^{i\beta NL}$. Sau đó, chúng được liên hợp và truyền đi trên đoạn SMF, kết quả là chúng sẽ tạo ra một trường quang phi tuyến ở cuối đoạn SMF như sau

$$E_F(SMF) = i\gamma \frac{D}{3} E_k^*(0) E_l^*(0) E_m(0) L_{klm} F_{klm} \quad (11).$$

Như vậy, trường nhiễu phi tuyến FWM tổng tại phía thu của hệ thống WDM đường trục sẽ là

$$E_F(N) = E_F(SMF) + [E_F(OBP)]^* e^{i\beta L} \quad (12).$$

Thay biểu thức (9) và (11) vào biểu thức (12), thu được

$$E_F(N) = i \frac{D}{3} E_k^*(0) E_l^*(0) E_m(0) \left[\gamma L_{klm} F_{klm} - \gamma_{HLNF} \frac{e^{-i\Delta\beta_{OBP} L_{OBP}} - 1}{-i\Delta\beta_{OBP}} \right] \quad (13).$$

Nếu bỏ qua suy hao của cả OBP và sợi SMF cũng như không xét đến ảnh hưởng giao thoa giữa các sản phẩm FWM tạo ra trong từng chặng, tức là bỏ qua hệ số F_{klm} , thì trường FWM tại phía thu sẽ tiến tới 0 nếu như bộ OBP được lựa chọn các giá trị chiều dài bộ OBP, hệ số phi tuyến của HNLF và hằng số lan truyền của FBG phù hợp với các tham số tương ứng của đoạn SMF. Khi đó, hệ thống WDM đường trục được bù hoàn toàn ảnh hưởng tán sắc và phi tuyến nhờ bộ OBP đề xuất. Tuy nhiên, trên thực tế, suy hao của đoạn SMF không thể bỏ qua và hệ số F_{klm} là đáng kể trong hệ thống đa chặng khiến cho điều kiện đối xứng công suất bị phá vỡ dẫn đến làm suy giảm hiệu quả của bộ OBP khi triển khai trên hệ thống. Vì thế, việc lựa chọn tham số phù hợp cho các phần tử HNLF và FBG để bộ OBP đạt được hiệu quả bù ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc lớn nhất là rất cần thiết.

Trong hệ thống WDM đường trục sử dụng kỹ thuật OFDM, ảnh hưởng phi tuyến lên tín hiệu truyền dẫn trên mỗi bước sóng gồm sóng FWM gây ra bởi các sóng mang con OFDM và sóng FWM gây ra bởi các kênh quang WDM. Biểu thức (4), (5), (6), (7) cho thấy công suất sóng FWM tỉ lệ thuận với công suất của từng tín hiệu quang và tỉ lệ nghịch với khoảng cách kênh giữa các bước sóng. Vì thế, công suất trên từng sóng mang con OFDM rất nhỏ nhưng do khoảng cách kênh giữa chúng cũng rất nhỏ nên công suất nhiễu FWM gây ra bởi các sóng mang con OFDM không thể bỏ qua. Trong khi đó, công suất nhiễu

FWM gây ra bởi các sóng mang quang chủ yếu gây ra bởi công suất quang của từng kênh bước sóng phải đủ lớn để đạt được khoảng cách truyền dẫn theo yêu cầu.

III. THỰC HIỆN MÔ PHỎNG

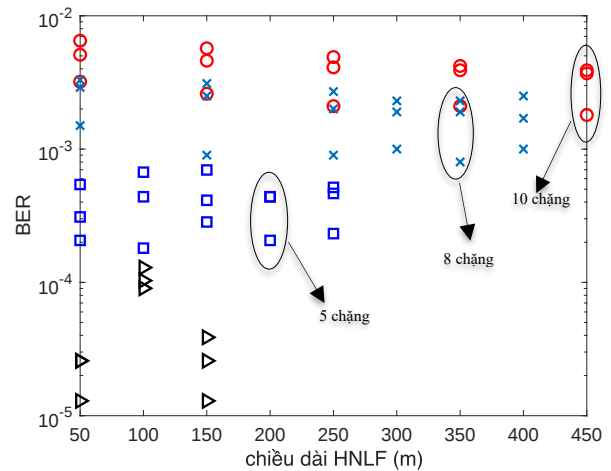
Trong phần này, mô phỏng Monte-Carlo được sử dụng để đánh giá hiệu quả cải thiện hiệu năng của giải pháp OBP đề xuất đối với hệ thống WDM đường trực. Sơ đồ hệ thống mô phỏng tương tự với sơ đồ khối của hệ thống WDM đường trực đưa ra tại hình 1 gồm bộ phát, kênh truyền dẫn và bộ thu. Tại bộ phát TX, tín hiệu OFDM được tạo ra trong miền số tuân theo phương pháp DCO sử dụng 256 sóng mang con, trong đó 190 sóng mang con mang tín hiệu và 66 sóng mang con mang giá trị đệm toàn 0. Kỹ thuật điều chế băng gốc 64-QAM được sử dụng cho phép tín hiệu OFDM đạt tới tốc độ 100 Gbit/s. Mỗi tín hiệu OFDM số được điều chế lên sóng mang quang tương ứng nhờ bộ điều chế ngoại MZM. Hệ thống WDM sử dụng ba kênh bước sóng quang với tần số trung tâm là 193.1 THz với khoảng cách kênh 25 GHz. Sau đó, các kênh bước sóng được ghép kênh theo bước sóng thành tín hiệu quang tổng trước khi truyền vào bộ OBP. Sau khi được bù trước tại OBP, tín hiệu được liên hợp pha và phát vào tuyến truyền dẫn gồm N chặng. Mỗi chặng gồm đoạn sợi quang đơn mode tiêu chuẩn (SSMF) có chiều dài 80 km và một bộ khuếch đại EDFA để bù đủ suy hao của đoạn sợi. Tại phía thu, dữ liệu được khôi phục theo quá trình ngược với phía phát. Các tham số và hằng số quan trọng của hệ thống được liệt kê trong bảng 1 [17].

Bảng 1. Các tham số và hằng số của hệ thống

Tham số/ Hằng số	Kí hiệu	Giá trị
Các tham số sợi SMF		
Hệ số suy hao	α_{SMF}	0.2 dB/km
Hệ số tán sắc	D_{SMF}	17 ps/nm.km
Hệ số phi tuyến	γ_{SMF}	$1.4 \text{ W}^{-1}.\text{km}^{-1}$
Chiều dài sợi	L_{SMF}	80 km
Các tham số sợi HNLF		
Hệ số suy hao	α_{HNLF}	0.5 dB/km
Hệ số tán sắc	D_{HNLF}	1.7 ps/nm.km
Hệ số phi tuyến	γ_{HNLF}	$6.9 \text{ W}^{-1}.\text{km}^{-1}$
Chiều dài một đoạn	L_{HNLF}	50 m
Các tham số NW		
Hệ số suy hao	α_{NW}	50 dB/m
Hệ số tán sắc	D_{NW}	28 ps/nm.km
Hệ số phi tuyến	γ_{NW}	$10^4 \text{ W}^{-1}.\text{km}^{-1}$
Chiều dài ống dẫn sóng	L_{NW}	7 cm
Tham số hệ thống		
Tần số sóng mang quang trung tâm	f_s	193.1 THz
Hệ số đáp ứng PD	R	0.6 A/W
Dòng tối	I_d	0.2 nA
Mật độ phổ nhiễu nhiệt	S_T	$2 \times 10^{-24} \text{ A}/(\text{Hz})^{1/2}$

Bậc điều chế	M	64
Tốc độ bit	R_b	100 Gbit/s
Công suất nguồn bơm	P_p	450 mW
Tần số sóng bơm	f_p	193.3 THz

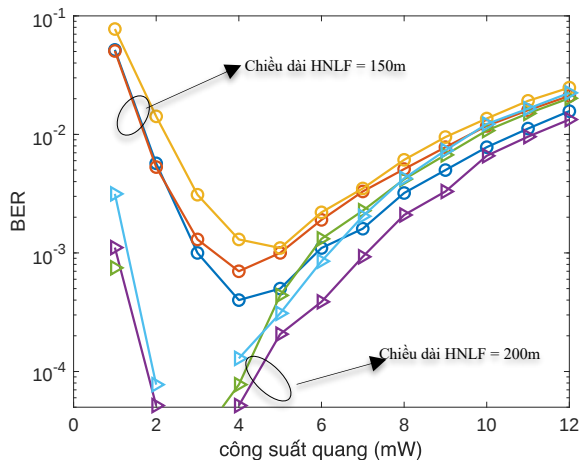
Tại bộ OBP, tín hiệu OFDM sau khi đi qua các đoạn HNLF và FBG sẽ được liên hợp pha nhờ mô đun OPC trước khi cho đi qua tuyến truyền dẫn để tới phía thu. Ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc gây ra bởi các đoạn HNLF và FBG sẽ bù đủ cho ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc trên tuyến truyền dẫn nếu tín hiệu liên hợp phức thu được thỏa mãn được các điều kiện về đối xứng công suất và lựa chọn tham số của đoạn HNLF và FBG phù hợp. Thứ nhất là phải có công suất đủ lớn để đánh bại được công suất nhiễu tổng của hệ thống như nhiễu tại bộ thu, nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại của bộ khuếch đại hay tại chính quá trình liên hợp pha tại ống dẫn sóng phi tuyến. Thứ hai là phải tránh được hiện tượng chống phổ giữa các sản phẩm phi tuyến thu được trong quá trình liên hợp pha để đảm bảo thu được tín hiệu liên hợp pha chính xác [15]. Để đảm bảo được các điều kiện này, công suất sóng bơm và công suất tín hiệu đầu vào bộ OPC cần lựa chọn cẩn thận để tránh làm phát sinh các ảnh hưởng tác động lên hiệu năng của hệ thống [12]. Công suất sóng bơm được đặt cố định tại mức 450mW trong tất cả các kịch bản mô phỏng. Các tham số liên quan đến bộ tạo tín hiệu OFDM được giữ không đổi để đảm bảo luôn duy trì tốc độ bit trên mỗi kênh sóng mang quang là 100 Gbit/s. Hằng số lan truyền của FBG được điều khiển linh hoạt theo số lượng chặng của tuyến truyền dẫn để đảm bảo hệ thống được quản lý tán sắc.



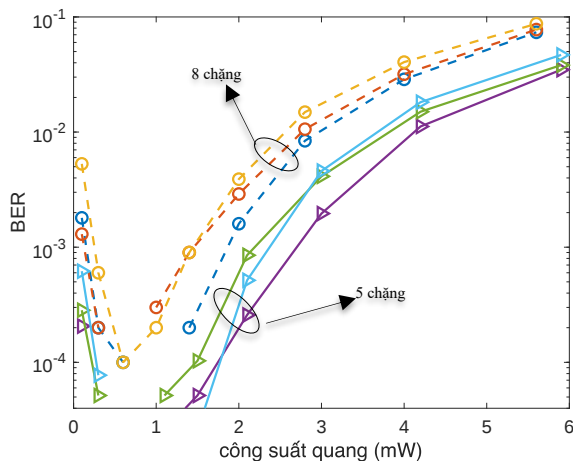
Hình 2. BER phụ thuộc vào chiều dài HNLF khi công suất quang trên từng bước sóng đặt vào OBP là 5mW.

Trong các hệ thống WDM đường trực đa chặng, số lượng chặng thay đổi khiến cho số lượng đoạn HNLF và FBG trong OBP cũng phải thay đổi để bù đủ ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc trên tuyến. Như đã phân tích trong phần II, để đảm bảo bù tán sắc trên tuyến thì hằng số lan truyền của toàn bộ FBG trong OBP phải biến đổi theo hằng số lan truyền của tuyến truyền dẫn theo biểu thức $\beta_{FBG} L_{FBG} = \beta_{NL}$ với N là số chặng. Như vậy, tham số của FBG thay đổi tuyến tính theo số lượng chặng. Nếu chiều dài FBG không đổi thì hằng số lan truyền của FBG tăng tuyến tính theo số lượng chặng hoặc ngược lại, nếu hằng số lan truyền của FBG không đổi thì chiều dài của FBG tăng tuyến tính

theo số lượng chằng. Tuy nhiên, với phân tử bù phi tuyến HNLf, ảnh hưởng phi tuyến phụ thuộc vào công suất của tín hiệu trên sợi vì thế sự thay đổi về chiều dài HNLf không tuyến tính theo số lượng chằng. Hình 2 biểu diễn sự phụ thuộc của BER của hệ thống vào chiều dài HNLf với số lượng chằng khác nhau trong điều kiện công suất bơm và công suất tại đầu vào OBP không đổi. Trong OBP, giả thiết mỗi đoạn HNLf có chiều dài 50 m. Kết quả mô phỏng cho thấy, với mỗi số chằng, chiều dài HNLf có thể lựa chọn trong một dải mà vẫn cho phép đạt được hiệu quả bù phi tuyến. Do ảnh hưởng phi tuyến có dạng dao động tắt dần với biên độ lớn trong vùng chiều dài hiệu dụng của sợi [12], vì thế trong vùng chiều dài HNLf nhỏ, hiệu quả bù phi tuyến không ổn định thể hiện qua mức độ thăng giáng lớn của BER theo chiều dài HNLf. Khi chiều dài HNLf tăng lên vượt quá chiều dài hiệu dụng thì ảnh hưởng phi tuyến có xu hướng ổn định vì thế hiệu quả bù phi tuyến cho hệ thống cũng ổn định. Với số chằng là 5 thì chiều dài HNLf tối ưu trong khoảng từ 200 m đến 250 m, tương ứng với 4 hoặc 5 đoạn HNLf. Khi số chằng tăng lên 8 thì chiều dài HNLf tối ưu trong khoảng từ 300 m đến 400 m, tương ứng với từ 6 đến 8 đoạn HNLf và khi số chằng tăng lên 10 thì chiều dài HNLf tối ưu trong khoảng 350 m đến 450 m, tương ứng với từ 7 đến 9 đoạn HNLf.



Hình 3. BER phụ thuộc vào công suất trên từng bước sóng quang tại OBP với số chằng $N = 5$ và chiều dài HNLf khác nhau.



Hình 4. BER phụ thuộc vào công suất trên từng bước sóng quang tại SMF khi công suất quang tại đầu vào OBP không đổi.

Hình 3 mô tả sự phụ thuộc của hiệu năng hệ thống WDM 5 chằng trong cùng điều kiện quản lý tán sắc theo sự thay đổi của công suất quang đầu vào OBP tại các chiều dài HNLf khác nhau. Khi chiều dài HNLf là 150 m, không phải là giá trị tối ưu cho trường hợp $N = 5$, bộ OBP vẫn cho phép bù ảnh hưởng phi tuyến và tán sắc cho tuyến truyền dẫn. Tuy nhiên, hiệu quả bù sẽ tăng lên thể hiện qua giá trị BER giảm đến hơn một bậc tại vùng công suất tối ưu của hệ thống khi chiều dài HNLf là 200 m, chiều dài HNLf tối ưu khi số chằng $N = 5$ theo khảo sát trước đó.

Hình 4 biểu diễn sự phụ thuộc của BER vào sự thay đổi của công suất trên từng kênh bước sóng quang tại đầu vào sợi SMF của tuyến truyền dẫn với công suất tại OBP không đổi với số chằng khác nhau. Công suất tại OBP và công suất sóng bơm không đổi sẽ tạo ra một dịch pha phi tuyến xác định bởi OBP. Với mỗi lượng dịch pha phi tuyến tại OBP sẽ bù cho lượng dịch pha phi tuyến tương đương tại phần tuyến truyền dẫn. Vì thế, luôn tồn tại vùng công suất quang đầu vào của tuyến truyền dẫn tối ưu mà tại đó hiệu năng hệ thống có sử dụng OBP đạt nhỏ nhất. Tuy nhiên, khi số chằng tăng lên thì nhiễu giao thoa giữa các sản phẩm FWM tạo ra trong từng chằng cũng tăng lên, tức là hệ số F_{klm} tăng lên, dẫn đến làm giảm hiệu quả bù phi tuyến và tán sắc của OBP. Kết quả là, ở vùng công suất tối ưu của trường hợp 8 chằng, giá trị BER nhỏ nhất lớn hơn gần một bậc so với giá trị BER nhỏ nhất của trường hợp 5 chằng.

IV. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất sử dụng giải pháp bù phi tuyến và tán sắc dựa trên giải pháp truyền ngược trong miền quang cho mạng đường trục WDM. Bộ OBP đề xuất sử dụng các phần tử quang nhỏ gọn, có sẵn gồm HNLf, FBG và ống dẫn sóng phi tuyến, hoạt động như một bộ bù trước. Các kết quả khảo sát dựa trên phân tích lý thuyết và mô phỏng cho thấy bộ OBP đề xuất cho phép bù đồng thời ảnh hưởng phi tuyến Kerr và tán sắc cho hệ thống OFDM-WDM đường trục đa chằng khi lựa chọn các tham số OBP số phù hợp. Hằng số lan truyền của FBG trong OBP thay đổi tuyến tính theo số chằng của tuyến truyền dẫn. Khi số lượng chằng truyền dẫn càng lớn thì dải chiều dài HNLf khả thi cho OBP được mở rộng, cho phép linh hoạt trong việc lựa chọn tham số chiều dài HNLf. Giải pháp đề xuất đơn giản, khắc phục được khó khăn về yêu cầu nghiêm ngặt về vị trí của các giải pháp trước đó vì thế có tính ứng dụng thực tế cao.

REFERENCES

- [1] J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications", invited, J. Light. Technol., vol. 27, no. 3, pp. 189-204, 2009.
- [2] W. Sheih, C. Athaudage, "Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing," Electronics Letters, vol. 42, pp.841-859, 2008.
- [3] W. Sheih, I. Djordjevic, *OFDM for Optical Communications*, Elsevier, San Diego.
- [4] S. Kumar, *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications*, Springer, 2011.
- [5] Y. London, D. Sadot, "Nonlinear effects mitigation in coherent optical OFDM system in presence of high peak power," J. Light. Technol., vol. 29, no. 21, Nov. 2011.
- [6] Y. Xiao, M. Chen, F. Li, J. Tang, Y. Liu, L. Chen, "PAPR reduction based on chaos combined with SLM technique in optical OFDM IM/DD system," Optical Fiber Tech., vol. 21, (2015), pp. 81-86.
- [7] Y. Yang, Z. Zeng, S. Feng, C. Guo, "A simple OFDM scheme for VLC systems based on μ -law mapping," IEEE Photonics Tech. Letters, vol. 28, (2015), pp. 641-644.

- [8] Trang. T. Ngo, Hieu T. Bui, Nhan D. Nguyen, "Performance improvement of IM-DD Optical OFDM system using A-law companding transform," in Proc. of The Inter. Conf. on Advanced Tech. for Comm. (ATC), Ho Chi Minh city, Vietnam, (2018), pp. 203-207.
- [9] A. Ellis, M. McCarthy, M. Al-Khateeb, S. Sygletos, "Capacity limits of systems employing multiple optical phase conjugators," Optics Express, vol. 23, no. 16, (2015), pp. 20381-20393.
- [10] M. Al-Khateeb, M. McCarthy, C. Sanchez, A. Ellis, "Nonlinearity compensation using optical phase conjugation deployed in discretely amplified transmission systems," Optics Express, vol. 26, no. 18, (2018), pp. 23954-23959.
- [11] S. Kumar, D. Yang, "Optical backpropagation for fiber-optic communications using highly nonlinear fibers," Optics Letters, vol. 36, (2011), pp. 1038-1040.
- [12] Ngo 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," Jour. of Science and Tech. on Inf. and Comm. (JSTIC), vol. 4, (2020), pp. 21-27.
- [13] V. Pechenkin, I. J. Fair, "Analysis of Four-Wave Mixing Suppression in Fiber-Optic OFDM Transmission Systems With an Optical Phase Conjugation Module", Optical Comm. Network, vol. 2, (2010).
- [14] X. Chen, W. Shieh, "Closed-form expression for nonlinear transmission performance of densely spaced coherent optical OFDM systems", Optics Express, vol. 18, no.18, (2010).
- [15] 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", 4th NAFOSTED Conf. on Inf. and Computer Science, (2017).
- [16] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 4th ed., 2007.
- [17] ITU-T Recommendations by series.

AN ADVANCED PRE-COMPENSATOR BASED OPTICAL BACK PROPAGATION FOR WDM LONGHAUL

Abstract: The orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technique applied in one channel is the promising solution that helps the WDM longhaul reach the extremely large capacity. However, Kerr nonlinearity and fiber dispersion are the main obstacles that limits the performance of the orthogonal frequency division multiplexing wavelength division multiplexing (OFDM-WDM) system. In this paper, we proposed an advanced pre-compensator based optical back propagation (OBP) to compensate both the nonlinear and dispersion of OFDM-WDM system. The proposed OBP based on split-step Fourier method comprises of the real optical devices such as the high-nonlinear fiber (HNLF), fiber Bragg grating (FBG) and nonlinear waveguide are used as a nonlinear operator, a dispersive operator and phase conjugated media, respectively. The obtained results from simulation of the OBP in WDM longhaul system show that the OBP can improve remarkably the system performance when the parameters of OBP such as HNLF length and FBG dispersion coefficient are properly selected.

Keywords: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Nonlinear compensation, Optical Back Propagation (OBP), Long-haul WDM.



Ngô Thị Thu Trang, nhận học vị Tiến sĩ Kỹ thuật tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông năm 2021. Hiện nay đang công tác tại Khoa Viễn thông 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Các lĩnh vực nghiên cứu: các hệ thống truyền dẫn quang, mô phỏng hệ thống truyền thông, xử lý tín hiệu số, các mạng truy nhập băng rộng, ...

Email: trangntt1@ptit.edu.vn



Nguyễn Viết Đàm, hiện đang là Nghiên cứu sinh ngành Kỹ thuật Viễn thông tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Hiện nay đang công tác tại Khoa Viễn thông 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Các lĩnh vực nghiên cứu: mô hình hoá và mô phỏng hệ thống truyền thông, truyền thông vô tuyến, vô tuyến hợp tác và khả tri, phân bổ tài nguyên vô tuyến, ...

Email: damnvptit@gmail.com