



Kỹ thuật thông tin quang

Optical Communications

(TEL1406)

Bộ môn Tín hiệu và Hệ thống

11/05/2022 1



Chương 5

Một số phần tử quang cơ bản khác

11/05/2022 2



Nội dung chương 5

5.1. Các phần tử quang thụ động

5.2. Khuếch đại quang

5.3. Bù tán sắc

5.4. Bù phi tuyến

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

3



Các phần tử quang thụ động

- Khái niệm
 - Các phần tử quang thụ động là các phần tử quang hoạt động dựa trên các nguyên lý cơ bản của truyền dẫn ánh sáng mà không cần sử dụng nguồn điện cung cấp
- Đặc điểm
 - Là cơ sở để xây dựng hệ thống truyền dẫn toàn quang
 - Các phần tử quang thụ động thường có tính hai chiều
- Một số phần tử quang thụ động
 - Coupler
 - Bộ cách ly quang/ bộ quay vòng quang
 - Bộ lọc quang
 - Bộ tách/ ghép bước sóng
 - ...

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

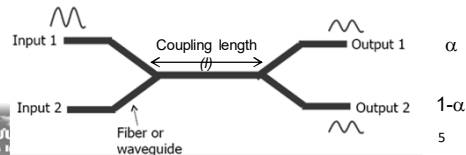
4



Các phần tử quang thụ động

• Coupler

- Cho phép kết hợp hoặc tách tín hiệu quang thành nhiều tín hiệu thành phần có công suất nhỏ hơn:
 - Không lựa chọn bước sóng \rightarrow ứng dụng làm các bộ *splitter*
 - Cho phép lựa chọn bước sóng \rightarrow ứng dụng làm bộ tách/ ghép bước sóng
- Tín hiệu quang được ghép từ một ống dẫn sóng này sang ống dẫn sóng khác do sự giao thoa của mode lan truyền tại phần ghép chung của hai ống dẫn sóng
- Coupler: định hướng và song hướng
- Tham số quan trọng: tỉ lệ ghép cặp α (coupling ratio).
- Loại phổ biến: coupler 3dB



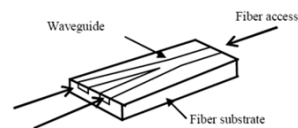
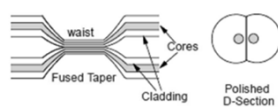
11/05/2022

 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU
Posts & Telecommunications Institute of Technology

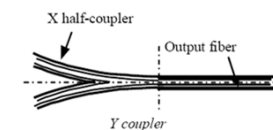
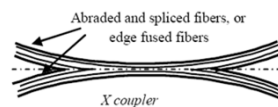

Các phần tử quang thụ động

• Coupler

- Được chế tạo dựa trên sợi quang hoặc ống dẫn sóng phẳng (waveguide)



- Có nhiều loại cấu hình khác nhau:



11/05/2022

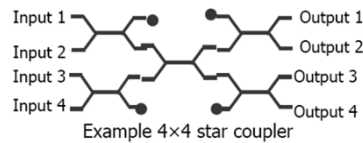
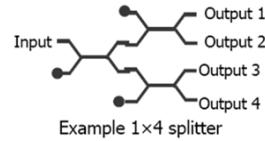
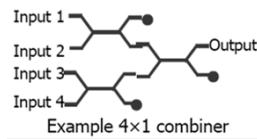
 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

6



Các phần tử quang thụ động

- Coupler sao
 - Là coupler gồm 1 đầu vào x N đầu ra, N đầu vào x 1 đầu ra và N đầu vào x N đầu ra được tạo ra từ các coupler 2x2



11/05/2022

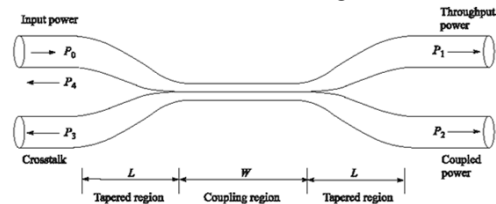
 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

7



Các phần tử quang thụ động

- Coupler – Các tham số đặc trưng



- Tỉ lệ ghép cặp: $\alpha(dB) = 10 \log \frac{P_1}{P_1 + P_2}$
- Suy hao xen (insertion loss) tại cổng 1: $I(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_1}$
- Suy hao vượt (excess loss): $L(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_1 + P_2}$
- Độ định hướng hay xuyên nhiễu (directivity hay crosstalk): $D(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_3}$
- Tín hiệu quang tại hai cổng đầu ra lệch pha $\pi/2$

11/05/2022

 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

8



Các phần tử quang thụ động

• Ví dụ 5.1

- Coupler 2x2 có $P_0 = 200 \mu W$, $P_1 = 90 \mu W$, $P_2 = 85 \mu W$, $P_3 = 6,3 \text{ nW}$.
- Hãy xác định tỉ lệ ghép cặp tính theo %, suy hao xen tại cổng 1 và cổng 2, suy hao vượt và độ định hướng

HD:

- Tỉ lệ ghép cặp: $\alpha = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \times 100\% = \frac{90}{90 + 85} \times 100\% = 51,4\%$
- Suy hao xen (insertion loss) tại cổng 1: $I_1(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_1} = 10 \log \frac{200}{90} = 3,47 \text{ dB}$
- Suy hao xen (insertion loss) tại cổng 2: $I_2(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_2} = 10 \log \frac{200}{85} = 3,72 \text{ dB}$
- Suy hao vượt (excess loss): $L(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_1 + P_2} = 10 \log \frac{200}{90 + 85} = 0,58 \text{ dB}$
- Độ định hướng: $D(dB) = 10 \log \frac{P_0}{P_3} = 10 \log \frac{200}{6,3 \times 10^{-3}} = 45,02 \text{ dB}$

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

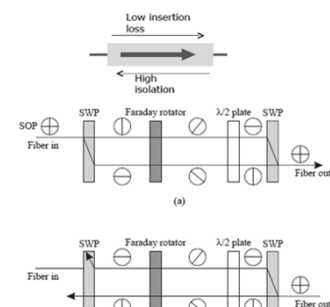
9



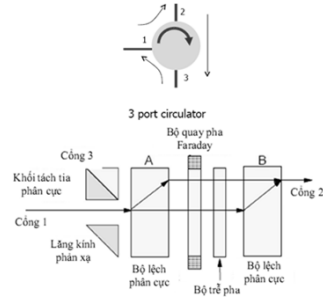
Các phần tử quang thụ động

• Bộ cách ly quang/ bộ quang vòng quang

- Chỉ cho tín hiệu quang đi theo một chiều, chặn tín hiệu ở chiều ngược lại.
- Cấu tạo: gồm các bộ phân cực và bộ quay pha Faraday



Hoạt động của bộ cách ly với một trạng thái phân cực của ánh sáng



Hoạt động của bộ quay vòng quang 3 cổng với một trạng thái phân cực của ánh sáng

11/05/2022

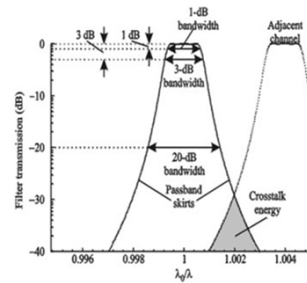
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

10



Các phần tử quang thụ động

- Bộ lọc quang
 - Được ứng dụng làm bộ tách và bộ ghép trong hệ thống WDM
 - Loại nhiễu ASE trong các tuyến truyền dẫn dùng khuếch đại quang
 - Cân bằng hệ số khuếch đại của các bộ khuếch đại quang
 - Tái tạo dạng phổ hoặc cắt phổ băng rộng của tín hiệu quang
- Yêu cầu
 - Suy hao xen thấp
 - Ít nhạy cảm phân cực
 - Chi phí chế tạo thấp
 - Hàm truyền đạt có đáp ứng phẳng trong băng thông hoạt động
 - Hàm truyền đạt có độ dốc lớn để giảm thiểu xuyên nhiễu giữa các kênh
 - Ổn định trong điều kiện môi trường hoạt động



11/05/2022

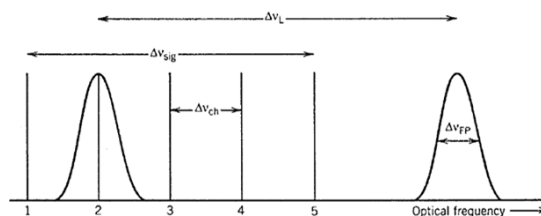
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

11



Một số bộ lọc quang

- Bộ lọc Fabry-Perot
 - Hoạt động dựa trên nguyên lý cộng hưởng của khoang cộng hưởng Fabry-Perot
 - Tham số đặc trưng: Băng thông bộ lọc (FWHM) và dải phổ tự do (FSR – Free Spectrum Range) phụ thuộc vào chiều dài khoang cộng hưởng D , chiết suất khoang cộng hưởng n (hay độ phản xạ R của gương)



$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nD}$$

$\Delta\nu_{sig}$ - độ rộng băng tần của tín hiệu đa kênh.

$\Delta\nu_{ch}$ - khoảng cách kênh.

$\Delta\nu_L$ - dải phổ tự do (FSR).

11/05/2022

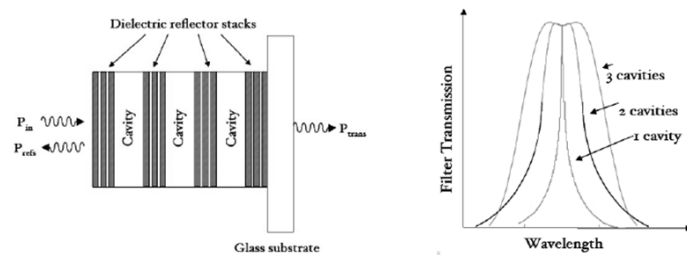
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

12



Một số bộ lọc quang

- Bộ lọc màng mỏng đa lớp
 - Hoạt động dựa trên nguyên lý cộng hưởng Fabry-Perot nhưng gồm nhiều lớp cộng hưởng
 - Càng nhiều lớp cộng hưởng → đỉnh băng thông phẳng hơn và hàm truyền có độ dốc lớn hơn



11/05/2022

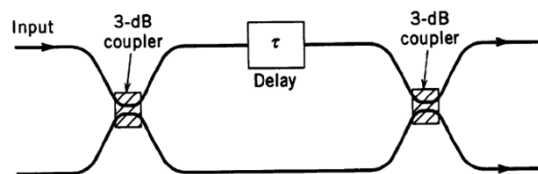
 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

13



Một số bộ lọc quang

- Bộ lọc giao thoa Mach-Zehnder
 - Cấu tạo: gồm 2 coupler 3 dB kết nối với nhau trên hai nhánh có độ trễ khác nhau
 - Nguyên lý: có sự dịch pha phụ thuộc λ giữa hai nhánh → giao thoa cộng hưởng hoặc triệt tiêu tại các cổng đầu ra



11/05/2022

 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

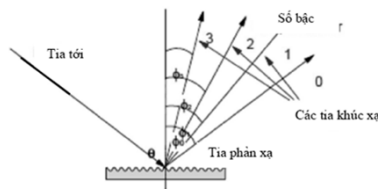
14



Một số bộ lọc quang

- Bộ lọc dựa trên cách tử
 - Nguyên lý: hoạt động dựa trên hiện tượng nhiễu xạ, tán xạ, giao thoa tại các điểm không đồng nhất của môi trường truyền dẫn → nhờ đó làm cho ánh sáng ở bước sóng nhất định được tăng cường hoặc đổi hướng
 - Cách tử nhiễu xạ phẳng: tạo trên bề mặt phẳng các đường nổi (hoặc rãnh song song) **hẹp** cách nhau những khoảng cố định

$$m\lambda = a(\sin\theta - \sin\phi_m)$$



- m là bậc phản xạ,
- θ là góc tới,
- ϕ_m là góc phản xạ tương ứng với bậc m ,
- a là chu kỳ cách tử (khoảng cách giữa các khe hẹp liên kế)
- λ là bước sóng tới
- Tại $m = 0$, góc phản xạ bằng góc tới

11/05/2022

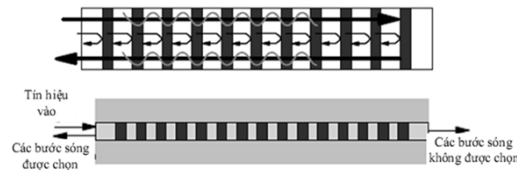
 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

15



Một số bộ lọc quang

- Bộ lọc dựa trên cách tử
 - Cách tử Bragg trong ống dẫn sóng hoặc sợi quang: tạo ra sự **thay đổi chiết suất** của môi trường truyền ánh sáng một cách có chu kỳ
 - Nhiệm vụ: phản xạ một bước sóng xác định và cho qua các bước sóng còn lại



$$\lambda_B = 2an_{eff} \quad (a \sim 0,5 \mu m)$$

- λ_B là bước sóng Bragg
- a là chu kỳ cách tử
- n_{eff} là chiết suất hiệu dụng

11/05/2022

 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

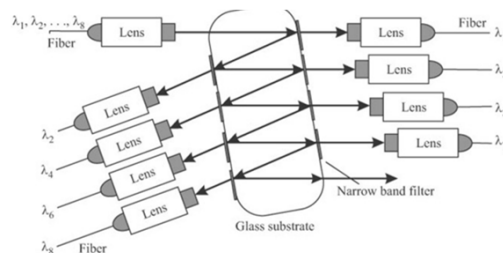
16



Các phần tử quang thụ động

- Bộ tách/ ghép bước sóng
 - Thực hiện ghép các tín hiệu quang một bước sóng thành tín hiệu quang tổng gồm nhiều bước sóng và ngược lại, tách tín hiệu quang tổng nhiều bước sóng thành các tín hiệu quang một bước sóng.
 - Được cấu tạo dựa trên các bộ coupler, các bộ lọc quang và các phần tử quang thụ động khác

Bộ tách/ ghép bước sóng sử dụng 8 bộ lọc màng mỏng đa lớp. Mỗi bộ lọc cho 1 bước sóng đi qua và phản xạ các bước sóng còn lại.



11/05/2022

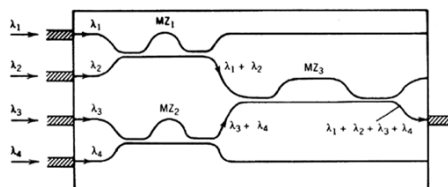
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

17



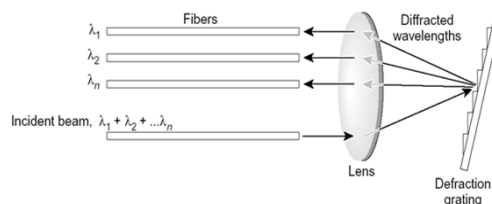
Các phần tử quang thụ động

- Bộ tách/ ghép bước sóng



Sử dụng 3 bộ MZI nối tầng với nhau để tách/ ghép 4 bước sóng

Sử dụng cách tử phẳng để chế tạo bộ tách/ ghép bước sóng



11/05/2022

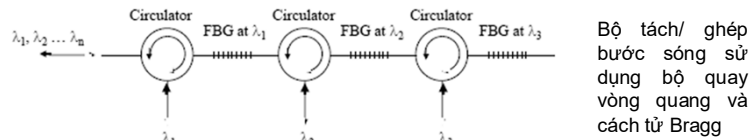
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

18

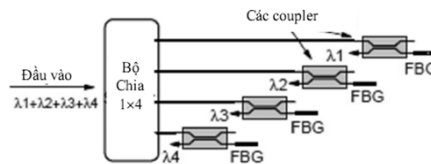


Các phần tử quang thụ động

- Bộ tách/ ghép bước sóng



Bộ tách/ ghép bước sóng sử dụng bộ chia quang (coupler) và cách tử Bragg sợi



11/05/2022

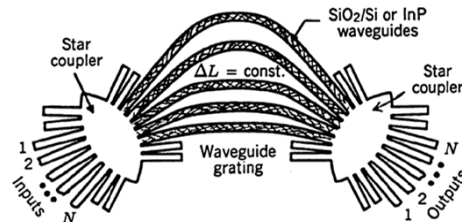
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

19



Các phần tử quang thụ động

- Bộ tách/ ghép bước sóng
 - Được cấu tạo dựa trên mảng cách tử ống dẫn sóng (AWG) gồm 2 coupler sao kết nối với nhau qua mảng ống dẫn sóng có độ trễ lan truyền khác nhau \rightarrow gây ra sự dịch pha phụ thuộc bước sóng trên ống dẫn sóng \rightarrow các bước sóng khác nhau sẽ giao thoa cộng hưởng tại các cổng đầu ra khác nhau



11/05/2022

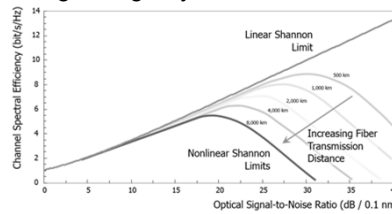
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

20



Các giới hạn của hệ thống truyền dẫn quang

- Suy hao sợi quang làm giới hạn khoảng cách truyền dẫn
 - Trạm lặp quang – điện – quang
 - Bộ khuếch đại quang: mở ra giải pháp cho hệ thống toàn quang
- Tán sắc sợi quang làm giới hạn dung lượng truyền dẫn
 - Bù tán sắc trong miền điện sử dụng kỹ thuật xử lý tín hiệu số
 - Bù tán sắc trong miền quang
- Hiệu ứng phi tuyến giới hạn dung lượng truyền dẫn của hệ thống
 - Bù phi tuyến trong miền điện nhờ kỹ thuật xử lý tín hiệu số
 - Bù phi tuyến trong miền quang



11/05/2022

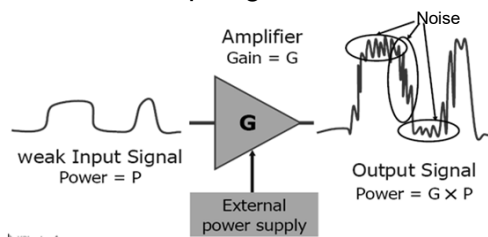
 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

21



Bộ khuếch đại quang

- Khái niệm khuếch đại quang



- Các loại khuếch đại quang
 - Bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA – Semiconductor Optical Amplifier)
 - Bộ khuếch đại quang EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)
 - Bộ khuếch đại quang Raman

11/05/2022

 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

22

Bộ khuếch đại quang

- Nguyên lý khuếch đại quang
 - Tín hiệu được khuếch đại dựa trên nguyên lý phát xạ kích thích
 - Nhiều của khuếch đại quang: ASE – Amplified Spontaneous Emission

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

23

Bộ khuếch đại quang

- Tham số bộ khuếch đại quang
 - Hệ số khuếch đại/ Độ lợi (G – Gain)

$$G(dB) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \text{ hoặc } G = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$
 - P_{out} : công suất đầu ra (không có nhiễu ASE)
 - P_{in} : công suất đầu vào
 - Băng tần khuếch đại (B_o : optical bandwidth)
 - Đáp ứng tần số của bộ khuếch đại: cho biết hệ số khuếch đại G tại các tần số khác nhau
 - Yêu cầu có độ bằng phẳng và độ rộng lớn (~ vài chục THz)
 - Công suất ra bão hòa
 - Công suất đầu ra không tăng dù công suất đầu vào tăng \rightarrow hệ số khuếch đại giảm khi công suất đầu vào tăng

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

24



Bộ khuếch đại quang

- Nguyên lý khuếch đại quang

- Công suất nhiễu ASE

- Hệ số phát xạ tự phát: $n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$
với N_2 và N_1 lần lượt là nồng độ hạt tải tại mức kích thích và tại mức nền ($n_{sp} = 1$ đối với $\lambda_p = 980$ nm và bằng 1,6 đối với $\lambda_p = 1480$ nm).

- Mật độ phổ nhiễu phát xạ tự phát: $S_{sp}(f) = (G - 1)n_{sp}hf$

- Công suất nhiễu ASE: $P_{ASE} = 2S_{sp}B_o$

- Hệ số nhiễu (NF – Noise Figure)

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

- Ta có:

$$SNR_{in} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{in})^2}{2qRP_{in}\Delta f} = \frac{P_{in}}{2hf\Delta f}$$

$$SNR_{out} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_{signal-ASE}^2} \approx \frac{(RG P_{in})^2}{4(RG P_{in})(RS_{sp})\Delta f} \approx \frac{GP_{in}}{4S_{sp}\Delta f}$$

$$NF = 2n_{sp}(G - 1)/G \approx 2n_{sp}$$

11/05/2022

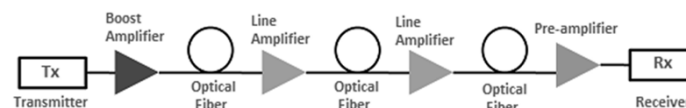
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

25



Bộ khuếch đại quang

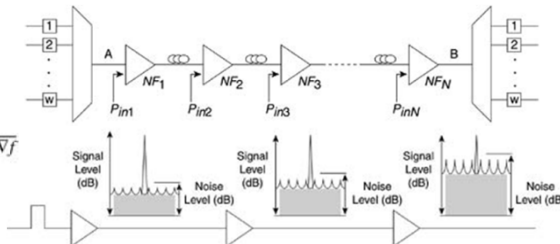
- Ứng dụng khuếch đại quang



- Tích lũy nhiễu trong hệ thống cự li dài

$$OSNR = \frac{P_{in}}{P_{ASE}} = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1)hf\Delta f}$$

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \sum_i \frac{1}{OSNR_i}$$



11/05/2022

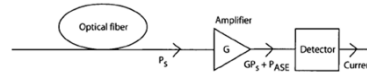
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

26



Bộ khuếch đại quang

- Công suất nhiễu tại bộ thu khi hệ thống có khuếch đại quang



- Công suất quang đi đến bộ thu: công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu ASE
- Dòng tách quang sau PD: xuất hiện thêm dòng nhiễu do tương tác giữa tín hiệu quang có ích và nhiễu ASE được gọi là nhiễu phách

$$I = RGP_{in} + i_{sig-ASE} + i_{ASE-ASE} + i_s + i_T$$

với $i_{sig-ASE}$ là nhiễu phách tín hiệu – ASE và $i_{ASE-ASE}$ là nhiễu phách ASE – ASE

- Phương sai nhiễu: $\sigma^2 = \sigma_{signal-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2 + \sigma_s^2 + \sigma_T^2$

$$\sigma_{signal-ASE}^2 = 4(RGP_{in})(RS_{sp})\Delta f$$

$$\sigma_s^2 = 2q[R(P_{in} + P_{ASE}) + I_d]\Delta f$$

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = 4R^2S_{ASE}^2\Delta f(B_o - \Delta f/2)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} = S_T^2 \Delta f$$

- Tỉ số SNR tại bộ thu: $SNR_e = \frac{i_{sig}^2}{\sigma^2}$

Trường hợp: Nhiễu phách tín hiệu – ASE chiếm ưu thế và bỏ qua nhiễu nhiệt

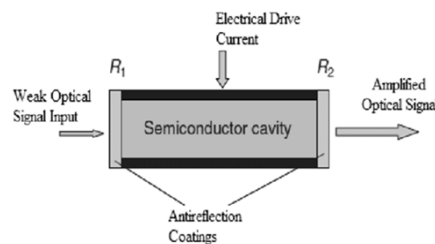
$$SNR_e = \frac{GP_s}{(4S_{ASE} + 2h\nu_0)\Delta f} \quad \text{với: } S_{ASE}(\nu) = n_{sp}h\nu_0(G-1),$$

11/0



Bộ khuếch đại quang SOA

- Cấu trúc và nguyên lý hoạt động
 - Có cấu trúc là khoang cộng hưởng Fabry-Perot và hoạt động dựa trên phát xạ kích thích giống như LD
 - Nguồn bơm là dòng điện
 - Điểm khác LD: tín hiệu cần khuếch đại phải được đưa vào khoang cộng hưởng
 - Phổ hệ số khuếch đại phụ thuộc vào hệ số phản xạ của gương: hệ số phản xạ càng nhỏ thì phổ khuếch đại càng bằng phẳng
 - băng thông khuếch đại lớn



11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

28



Bộ khuếch đại quang SOA

- Các đặc tính của SOA
 - Ưu điểm:
 - Độ rộng băng tần khuếch đại lớn: 30 – 100nm
 - Dễ dàng tích hợp với các linh kiện khác
 - Hệ số khuếch đại cao (25 – 30dB)
 - Nhược điểm
 - Công suất bão hoà thấp (5mW)
 - Hệ số nhiễu NF cao (NF ~ 5– 7dB)
 - Nhạy cảm với phân cực
 - Nhiễu xuyên âm lớn
 - Kém ổn định
 - SOA hoạt động ở chế độ bão hoà (phi tuyến): hoạt động như các bộ chuyển đổi bước sóng, xử lý tín hiệu quang

11/05/2022

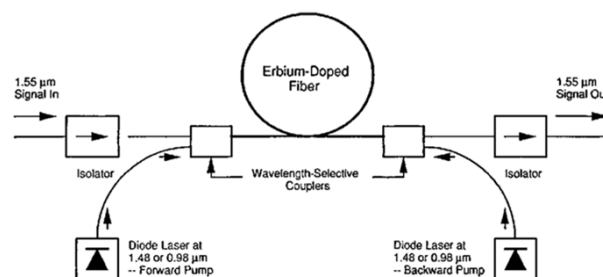
 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

29



Bộ khuếch đại quang EDFA

- Cấu trúc bộ khuếch đại EDFA



- Môi trường khuếch đại là sợi quang pha Er^{3+}
- Nguồn bơm là nguồn quang ở bước sóng 1480 nm và 980 nm
- Bơm thuận, bơm ngược và bơm hai chiều

11/05/2022

 HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
 Posts & Telecommunications Institute of Technology

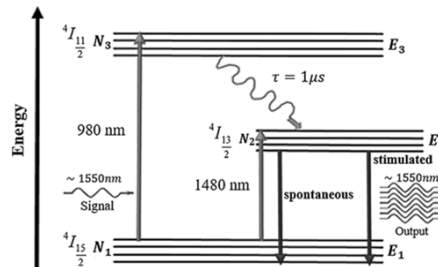
30



Bộ khuếch đại quang EDFA

• Nguyên lý bộ khuếch đại EDFA

- N_1, N_2, N_3 : nồng độ hạt tải tại mức nền, mức giả bền và mức cao
- E_1, E_2, E_3 : năng lượng tại mức nền, mức giả bền và mức cao



- Ion Er^{3+} hấp thụ photon của LD bơm chuyển lên mức năng lượng cao
- Ion kích thích sau một thời gian tồn tại sẽ chuyển về mức năng lượng nền phát xạ photon theo hai quá trình: phát xạ kích thích (khuếch đại tín hiệu) và phát xạ tự phát (gây nhiễu ASE).

11/05/2022

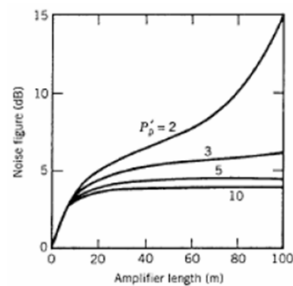
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

31

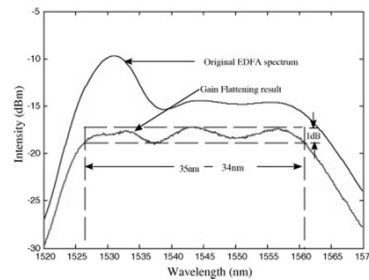


Bộ khuếch đại quang EDFA

• Đặc trưng bộ khuếch đại EDFA



Hệ số nhiễu phụ thuộc chiều dài sợi EDF tại các công suất bơm khác nhau.



Phổ khuếch đại bộ EDFA

11/05/2022

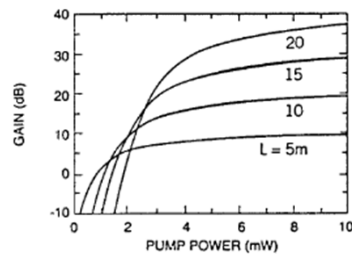
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

32



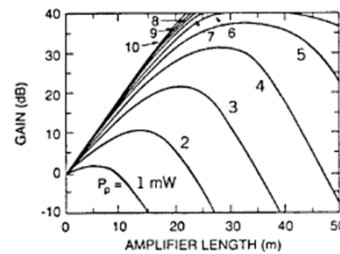
Bộ khuếch đại quang EDFA

- Sự phụ thuộc của G vào công suất bơm và chiều dài EDF



(a)

Hệ số khuếch đại bão hoà tại công suất bơm lớn với các chiều dài EDF khác nhau.



(b)

Hệ số khuếch đại suy giảm tại chiều dài EDF lớn với các công suất bơm khác nhau.

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

33



Bộ khuếch đại quang EDFA

- Nguồn bơm có công suất < 100mW

Bước sóng bơm	980nm	1480nm
Hệ số khuếch đại	Cao hơn	Thấp hơn
Độ lợi công suất bơm	Thấp hơn	Cao hơn
Suy hao công suất bơm	Cao hơn	Thấp hơn
Hệ số nhiễu	Thấp hơn	Cao hơn
Ứng dụng	Tiền khuếch đại	KĐ công suất

- Đặc điểm bộ khuếch đại

– Ưu điểm:

- Cấu hình đơn giản, nhỏ gọn
- Công suất nguồn nuôi nhỏ
- Không nhạy phân cực
- Nhiều xuyên kênh bé

– Nhược điểm:

- Phổ khuếch đại không bằng phẳng
- Băng tần khuếch đại bị giới hạn ở băng C và L

11/05/2022

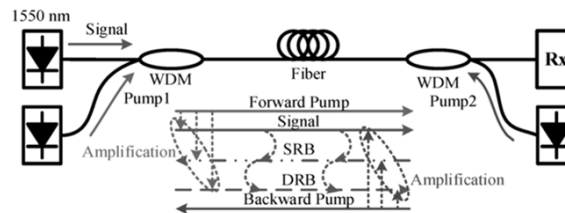
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

34



Bộ khuếch đại quang Raman

- Cấu trúc bộ khuếch đại Raman



- Môi trường khuếch đại là sợi quang truyền dẫn
- Nguồn bơm là nguồn quang ở bước sóng ngắn hơn bước sóng tín hiệu
- Khuếch đại tín hiệu nhờ tán xạ Raman kích thích (SRS), tán xạ Rayleigh (SRB – Single Rayleigh Backscattering và DRB – Double Rayleigh Backscattering) gây nhiễu cho bộ khuếch đại
- Bơm thuận, bơm ngược và bơm hai chiều

11/05/2022

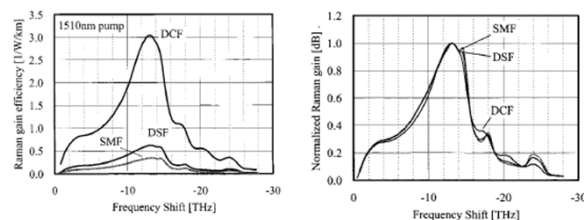
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

35



Bộ khuếch đại quang Raman

- Độ rộng băng tần và hệ số khuếch đại



- Hệ số khuếch đại quang phụ thuộc hệ số khuếch đại Raman

$$g(\omega) = g_R(\omega) \left(\frac{P_p}{a_p} \right)$$

- Hệ số khuếch đại Raman dịch đi 13,2 THz (khoảng 100nm) so với bước sóng bơm và có độ rộng băng tần khuếch đại khoảng 6 THz
- Phổ khuếch đại Raman có thể lớn đến hơn 20 THz

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

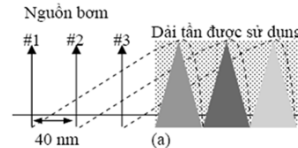
36



Bộ khuếch đại quang EDFA

- Nguồn bơm phải có công suất rất lớn

- Sử dụng nhiều nguồn bơm để mở rộng băng tần KĐ
- Thay đổi bước sóng bơm để thay đổi dải tần KĐ



- Đặc điểm bộ khuếch đại

- Ưu điểm:

- Không cần sợi đặc biệt
- Nhiều thấp
- Dễ chọn băng tần khuếch đại
- Băng tần khuếch đại rộng
- Khuếch đại phân bố và tập trung

- Nhược điểm:

- Xuyên nhiễu giữa các kênh
- Hệ số khuếch đại nhỏ
- Hiệu suất chuyển đổi thấp

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

37



Bù tán sắc

- Khái niệm bù tán sắc

- Bù tán sắc (Dispersion Compensation) hay quản lý tán sắc (Dispersion Management) đề cập đến các giải pháp nhằm giảm thiểu đến mức thấp nhất ảnh hưởng gây ra bởi tán sắc của tuyến truyền dẫn quang lên hiệu năng (tỉ số lỗi bit/ dung lượng) của hệ thống truyền dẫn quang

- Các loại bù tán sắc

- Bù tán sắc trong miền điện: Bù tán sắc điện tử (EDC – Electronic Dispersion Compensation), các bộ lọc số (Digital Filters)
- Bù tán sắc trong miền quang/ trên sợi: Các sợi quang bù tán sắc (DCF – Dispersion Compensation Fibers), cách tử Bragg sợi (FBG – Fiber Bragg Grating), kỹ thuật liên hợp pha quang (OPC – Optical Phase Conjugation), bộ lọc OAPF (Optical All Pass Filter), ...

11/05/2022

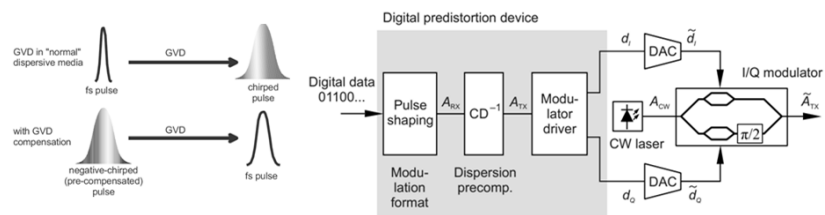
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

38



Bù tán sắc trong miền điện (EDC)

- Khái niệm:
 - Dựa trên các thuật toán xử lý tín hiệu được thực hiện trong miền điện, đặt tại bộ phát và bộ thu
- Bù trước (Pre-compensation)
 - Phần tử bù phi tuyến được đặt tại bộ phát quang: tín hiệu được méo trước đúng bằng lượng méo gây ra tán sắc trên tuyến truyền dẫn



Nguyên lý bù trước

Sơ đồ khối bộ phát quang có sử dụng bù trước

11/05/2022

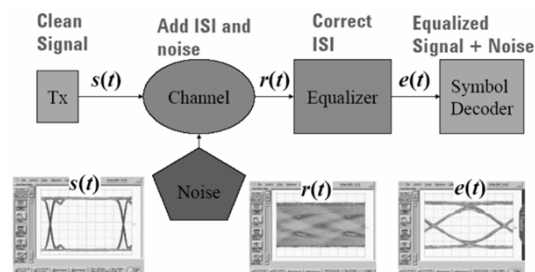
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

39



Bù tán sắc trong miền điện (EDC)

- Bù sau (Post-compensation)
 - Phần tử bù tán sắc được đặt tại bộ thu quang
 - Sử dụng các thuật toán để đảo ngược các ảnh hưởng do kênh truyền dẫn gây ra (Equalizer)



11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

40

Bù tán sắc trong miền điện (EDC)

- Một số thuật toán sử dụng trong EDC
 - CTF – Continuous-time Filter: bù tán sắc GVD, đơn giản, tiêu thụ năng lượng thấp nhất.
 - FFE – Feedforward-equalizer/ DFE – Decision-feedback-equalizer: giải pháp phổ biến nhất
 - MLSE – Maximum-likelihood-sequence-estimator: hiệu năng tốt nhất, phức tạp và tiêu thụ năng lượng lớn

Experimental Set-up

Electrical Eye Diagrams

11/05/2022 **HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG** Posts & Telecommunications Institute of Technology 41

Bù tán sắc

- Bù tán sắc trong miền quang
 - Nguyên lý chung là kết hợp sợi quang truyền dẫn với một phần tử quang khác (như sợi quang, bộ giao thoa kế, cách tử, ...) tạo thành một đoạn truyền dẫn (span) có tổng tán sắc trên đó đủ nhỏ.
- Một số kiểu bù tán sắc trong miền quang

	DSF Dispersion shifted fiber	DCF Dispersion compensating fiber	FBG Fiber Bragg grating	MZI Mach-Zehnder interferometer	OPC Optical phase conjugation	OAPF Optical all pass filter
Optical Bandwidth	Wide	Wide	Narrow	Narrow	Wide	Wide
Insertion Loss	Accept	High	Accept	Accept	Accept	Accept
Installation	Difficult	Difficult	Accept	Difficult	Difficult	Difficult
Dispersion Ripple	No Ripple	No Ripple	Rippled	No Ripple	No Ripple	No Ripple
Temperature	Stable	Stable	Unstable	Unstable	Stable	Stable
Dispersion Tunable	No	No	Possible	Possible	No	Possible
Cost	High	High	Accept	High	High	Accept

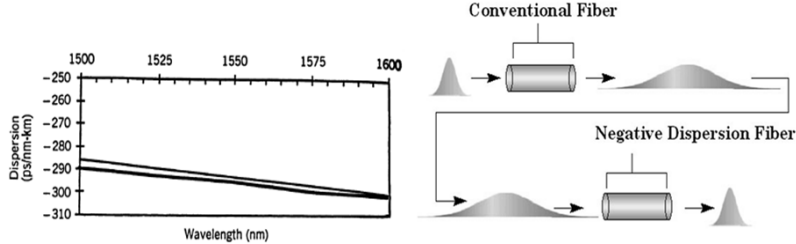
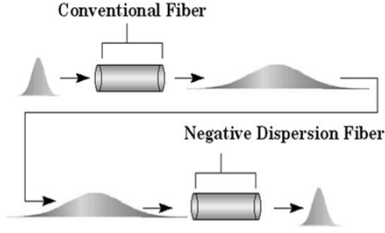
11/05/2022 **HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG** Posts & Telecommunications Institute of Technology 42

Bù tán sắc

- Sử dụng sợi DCF

$$A(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}(0, \omega) \exp \left[\frac{j}{2} \omega^2 (\beta_{21} L_1 + \beta_{22} L_2) - i\omega t \right] d\omega$$

- Điều kiện: $\beta_{21} L_1 + \beta_{22} L_2 = 0 \leftrightarrow D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0$
- Hệ số tán sắc của DCF: $-60 \div -300 \text{ ps/nm/km}$

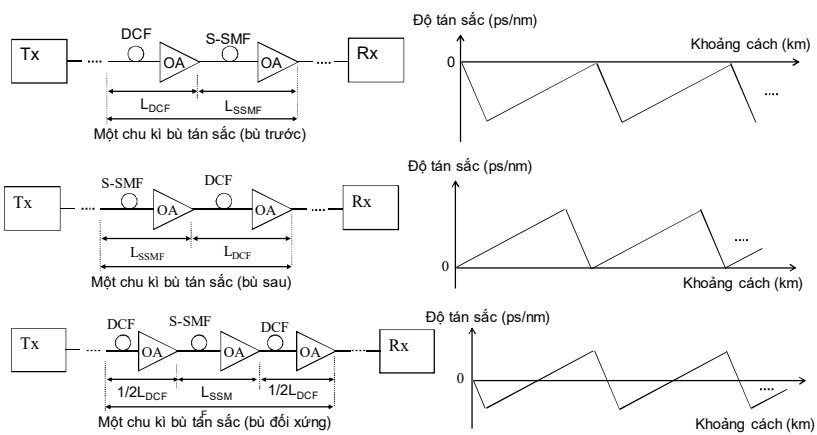
11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

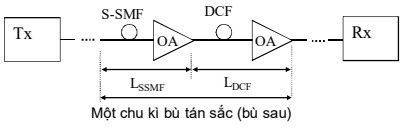
43

Bù tán sắc


- Sử dụng sợi DCF



Một chu kì bù tán sắc (bù trước)



Một chu kì bù tán sắc (bù sau)



Một chu kì bù tán sắc (bù đối xứng)

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

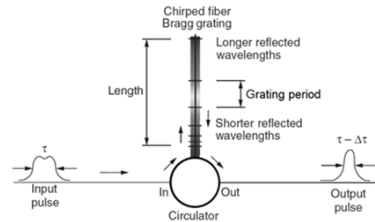
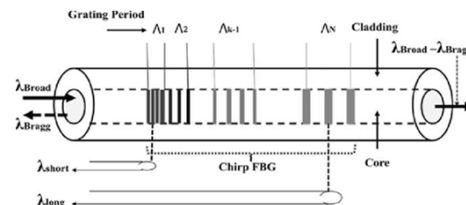
44



Bù tán sắc

- Cách tử Bragg sợi – FBG

- Tạo ra sự xáo trộn chiết suất có qui luật tại lõi sợi.
- Chu kỳ cách tử quyết định bước sóng phản xạ (bước sóng Bragg)
- Sử dụng cách tử Bragg chu kỳ biến đổi để bù tán sắc



$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda$$

- n_{eff} : Chiết suất hiệu dụng tại lõi sợi
- Λ : Chu kỳ cách tử

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

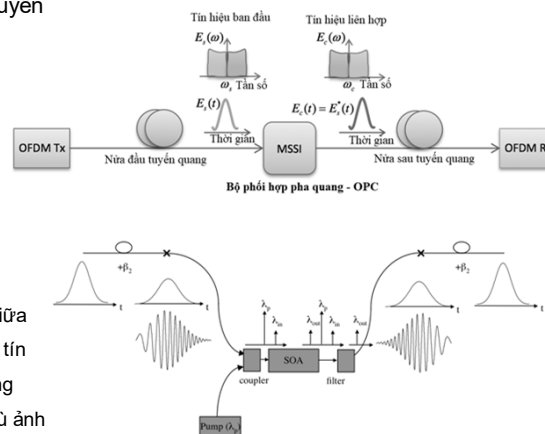
45



Bù tán sắc

- Kỹ thuật đảo phổ giữa tuyến (MSSI) dựa trên OPC

- Bộ liên hợp pha quang (OPC): gồm nguồn bơm, phần tử phi tuyến (SOA) thực hiện đảo pha tín hiệu nhờ hiệu ứng trộn bốn sóng (FWM)
- MSSI phải đặt chính giữa tuyến truyền quang \rightarrow tín hiệu ở nửa tuyến quang ngược pha nhau \rightarrow bù ảnh hưởng tán sắc, phi tuyến



11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

46

Bù phi tuyến

- Khái niệm bù phi tuyến
 - Bù phi tuyến (Nonlinear Compensation) đề cập đến các giải pháp nhằm giảm thiểu đến mức thấp nhất ảnh hưởng gây ra bởi các ảnh hưởng phi tuyến của tuyến truyền dẫn quang lên hiệu năng (tỉ số lỗi bit/ dung lượng) của hệ thống truyền dẫn quang

```

graph TD
    A[Các ảnh hưởng phi tuyến] --> B[Tại các bộ thu/ phát]
    A --> C[Trên sợi quang]
    B --> B1[Đặc tuyến phi tuyến của nguồn quang/ bộ điều chế ngoài]
    B --> B2[Nhiều phản xạ tại bộ thu]
    C --> C1[Hiệu ứng phi tuyến Kerr]
    C --> C2[Hiệu ứng tán xạ kích thích]
    C1 --> C1a[Tự điều chế pha SPM]
    C1 --> C1b[Điều chế pha chéo XPM]
    C1 --> C1c[Trộn bốn sóng FWM]
    C2 --> C2a[Tán xạ Raman kích thích SRS]
    C2 --> C2b[Tán xạ Brillouin kích thích SBS]
  
```

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

47

Bù phi tuyến

- Các kỹ thuật bù phi tuyến
 - Bù phi tuyến rất cần thiết cho các hệ thống truyền dẫn quang đa kênh
 - Bù phi tuyến được thực hiện trong cả miền điện và miền quang, được đặt tại phía phát, trên tuyến truyền dẫn và tại phía thu:
 - Kỹ thuật bù phi tuyến trong miền quang chủ yếu bù phi tuyến trên sợi
 - Kỹ thuật bù phi tuyến trong miền điện cho phép bù phi tuyến tại cả bộ thu/ phát và trên sợi
 - Các giải pháp bù phi tuyến tại phía thu thường được thực hiện trong miền điện, dựa trên các thuật toán xử lý tín hiệu số (DSP)

```

graph LR
    subgraph Tx
        PRBS --> DSP --> NLC --> DAC --> IQ --> Mux
    end
    Mux --> EDFA1[EDFA]
    EDFA1 --> NLC1[NLC]
    NLC1 --> EDFA2[EDFA]
    EDFA2 --> Demux
    subgraph Rx
        Demux --> ICR --> ADC --> NLC --> DSP --> Detection
    end
    NLC1 --- NLC2[NLC]
  
```

NLC: Non-Linear Compesator

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

48



Một số kỹ thuật bù phi tuyến

Technique	Type	Location	Fiber nonlinearity compensated	Transmission system
Digital back propagation (DBP)	Digital	Tx/Rx	Intra-subcarrier	Nyquist/OFDM
Total-field digital back propagation (TF-DBP)	Digital	Tx/Rx	Intra- and inter-subcarrier	Nyquist/OFDM
Volterra-based nonlinear equalizer (VNLE)	Digital	Tx/Rx	Intra-subcarrier	Nyquist/OFDM
Phase conjugation (PC)	Digital/Optical	Rx/Link	Nonlinear phase	Nyquist/OFDM
Perturbation-based NLC	Digital	Tx/Rx	Intra-subcarrier/XPM	Nyquist/OFDM
Inter-subcarrier nonlinear interference canceler (INIC)	Digital	Rx	Intra- and inter-subcarrier	Nyquist/OFDM
Nonlinear Fourier transform	Digital	Tx/Rx	Intra- and inter-subcarrier	Nyquist/OFDM
Wiener-Hammerstein	Digital	Rx	Intra-subcarrier	OFDM
Radio frequency (RF)-pilot tones	Digital	Rx	Nonlinear phase shift	OFDM
Support vector machine	Digital	Rx	Intra-subcarrier/nonlinear phase noise	Nyquist/OFDM
Optical back propagation	Optical	Link	Nonlinear phase	Nyquist
Code-aided expectation-maximization algorithm	Digital	Rx	Nonlinear phase noise	Nyquist
Electronic compensation technique	Digital	Rx	Nonlinear phase noise	Nyquist
Adaptive maximum likelihood sequence detection (MLSD)	Digital	Rx	Nonlinear phase noise	Nyquist
Nonlinear polarization crosstalk canceller	Digital	Rx	XPolM	Nyquist

11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

49



Một số kỹ thuật bù phi tuyến

- Một số hướng tiếp cận mới cho bù phi tuyến
 - Kết hợp nhiều giải pháp bù phi tuyến để tận dụng được đồng thời ưu điểm của từng giải pháp, như kết hợp DBP và OPC, kết hợp DBP với bù phi tuyến dựa trên nhiễu loạn, ...
 - Dựa trên truyền dẫn giá trị riêng bằng cách sử dụng biến đổi Fourier phi tuyến để mã hoá tín hiệu cần truyền → ứng cử viên cho các hệ thống truyền dẫn quang trong tương lai
 - Sử dụng các giải pháp dựa trên kỹ thuật học máy như SVM (Support Vector Machine), Artificial/ Deep Neural Network, ...

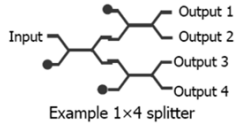
11/05/2022

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG
Posts & Telecommunications Institute of Technology

50

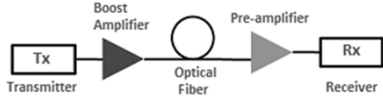


Bài tập

- 1- Cho coupler 2x2 có $P_0 = 200 \mu\text{W}$, $P_1 = 90 \mu\text{W}$, $P_2 = 90 \mu\text{W}$, $P_3 = 0$.
Hãy xác định tỉ lệ ghép cặp, suy hao vượt, suy hao xen và độ định hướng.
- 2- Giả sử coupler bài 1 được sử dụng để tạo bộ chia công suất như hình bên.
Hãy xác định công suất tại các đầu ra nếu công suất tại đầu vào là $500 \mu\text{W}$ và suy hao vượt, suy hao xen tại mỗi cổng của bộ chia.

- 3- Cho biết chiều dài cách tử là 10mm , hãy thiết kế cách tử Bragg sợi quang để phản xạ lần lượt theo thứ tự các bước sóng 1540nm , 1550nm và 1560nm nếu:
 - a) Giữ nguyên chu kì cách tử, thay đổi chiết suất hiệu dụng biết chiết suất hiệu dụng trung bình của cách tử là 4, độ lệch chiết suất hiệu dụng là $0,1\%$.
 - b) Giữ nguyên chiết suất hiệu dụng, thay đổi chu kì cách tử biết chu kì cách tử trung bình là 500nm , độ lệch chu kì là 10%



Bài tập

- 4- Hệ thống truyền dẫn quang IM-DD tốc độ 10Gb/s ($B_o = 3B_e/2$) hoạt động ở bước sóng 1550nm có các tham số sau: Công suất quang phát vào sợi 0dBm ; tham số bộ khuếch đại: $n_{sp} = 1,6\text{dB}$, $G = 10\text{dB}$; tham số sợi $L = 100\text{km}$, $\alpha = 0,2\text{dB/km}$; tham số bộ thu $R = 0,8\text{A/W}$, $I_d = 0,1\text{nA}$, $S_T = 2 \cdot 10^{-24}\text{A/(Hz)}^{1/2}$. Hãy xác SNR của hệ thống trong miền điện và miền quang trong các trường hợp sau:
 - a) Chỉ sử dụng KĐ công suất
 - b) Chỉ sử dụng tiền KĐ
 - c) Sử dụng cả hai bộ KĐ
- 5- Tính toán hệ thống truyền dẫn quang đa chặng quản lý tán sắc sử dụng DCF với các tham số sau: sử dụng xung RZ 50% ở tốc độ 10Gb/s , khoảng cách truyền dẫn 1000km , độ rộng phổ nguồn quang 100MHz , sợi quang có $D = 16\text{ps/nm.km}$, $\alpha = 0,2\text{dB/km}$.