

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



# KỸ THUẬT THÔNG TIN QUANG 2

*(Dùng cho sinh viên hệ đào tạo đại học từ xa)*

Lưu hành nội bộ

HÀ NỘI - 2007

# **KỸ THUẬT THÔNG TIN QUANG 2**

**Biên soạn: THS. ĐỖ VĂN VIỆT EM**

---

---

## LỜI GIỚI THIỆU

Thế kỷ 21 là thế kỷ của công nghệ thông tin. Sự bùng nổ của các loại hình dịch vụ thông tin, đặc biệt là sự phát triển nhanh chóng của Internet và World Wide Web làm gia tăng không ngừng nhu cầu về dung lượng mạng. Điều này đòi hỏi phải xây dựng và phát triển các mạng quang mới dung lượng cao. Công nghệ ghép kênh theo bước sóng quang (DWDM) là một giải pháp hoàn hảo cho phép tận dụng hữu hiệu băng thông rộng lớn của sợi quang, nâng cao rõ rệt dung lượng truyền dẫn đồng thời hạ giá thành sản phẩm. Sự phát triển của hệ thống WDM cùng với công nghệ chuyển mạch quang sẽ tạo nên một mạng thông tin thế hệ mới-mạng thông tin toàn quang. Trong mạng toàn quang này, giao thức IP- giao thức chuẩn cho mạng viễn thông thế hệ sau (NGN) sẽ được tích hợp với WDM. Sự tích hợp này sẽ tạo ra một kết cấu mạng trực tiếp nhất, đơn giản nhất, kinh tế nhất rất thích hợp sử dụng cho cả mạng đường trục và mạng đô thị

Cấu trúc của Bài giảng bao gồm bốn chương:

- Chương I: Hệ thống thông tin quang WDM. Chương này trình bày các nguyên lý cơ bản của DWDM, khảo sát chi tiết các hiện tượng phi tuyến ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM, và các linh kiện được sử dụng cho hệ thống WDM.
- Chương II: Khuếch đại quang. Chương này tìm hiểu nguyên lý hoạt động của các loại khuếch đại quang, tính năng và các ứng dụng của chúng trong mạng truyền dẫn quang
- Chương III: Truyền tải IP/WDM. Chương này nghiên cứu về xu hướng tích hợp IP trên WDM, đặc biệt quan tâm đến vấn đề định tuyến và gán bước sóng trong mạng WDM.
- Chương IV: Hệ thống thông tin quang Coherent. Chương này tìm hiểu các nguyên lý cơ bản của hệ thống coherent, những ưu điểm của nó so với hệ thống IM/DD và triển vọng của công nghệ này trong tương lai.

Bài giảng được biên soạn nhằm phục vụ cho các lớp thuộc hệ Đại học từ xa của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Ngoài ra Bài giảng cũng có thể sử dụng để làm tài liệu tham khảo cho các sinh viên và kỹ sư chuyên ngành viễn thông.

Do khuôn khổ giới hạn cũng như tính ứng dụng thực tế của tài liệu, các mô hình toán học được trình bày trong Bài giảng này đôi khi chỉ là các kết quả cuối cùng và được giải thích, minh họa bằng các ý nghĩa vật lý cụ thể. Để hiểu thêm về việc dẫn xuất và chứng minh các kết quả này, bạn đọc có thể đọc thêm các tài liệu tham khảo.

Do tính chất phức tạp cũng như sự phát triển nhanh chóng của công nghệ, Bài giảng “Hệ thống thông tin quang II” không thể tránh khỏi những thiếu sót. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn tất cả các ý kiến đóng góp của các bạn đọc để hoàn thiện hơn Bài giảng này.

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

## CHƯƠNG 1

# HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG WDM

## GIỚI THIỆU

Bước vào thiên niên kỷ mới, chúng ta chứng kiến nhiều sự thay đổi quan trọng trong nền công nghiệp viễn thông có ảnh hưởng to lớn đến cuộc sống của chúng ta. Có nhiều nguyên nhân gây ra sự thay đổi này:

- Trước hết đó là sự gia tăng liên tục về dung lượng mạng. Nhân tố chính cho sự gia tăng này là sự phát triển nhanh chóng của Internet và World Wide Web. Bên cạnh đó là việc các nhà kinh doanh ngày nay dựa vào các mạng tốc độ cao để thực hiện việc kinh doanh của mình. Những mạng này được dùng để kết nối các văn phòng trong một công ty cũng như giữa các công ty cho việc giao dịch thương mại. Ngoài ra còn có một sự tương quan lớn giữa việc gia tăng nhu cầu và giá thành băng thông của mạng. Các công nghệ tiên tiến đã thành công trong việc giảm liên tục giá thành của băng thông. Việc giảm giá thành của băng thông này lại làm thúc đẩy sự phát triển của nhiều ứng dụng mới sử dụng nhiều băng thông và mô hình sử dụng hiệu quả hơn. Chu kỳ hồi tiếp dương này cho thấy không có dấu hiệu giảm bớt trong một tương lai gần.
- Bãi bỏ và phá vỡ sự độc quyền trong lĩnh vực viễn thông. Sự bãi bỏ sự độc quyền này đã kích thích sự cạnh tranh trong thị trường, điều này dẫn đến kết quả là giảm giá thành cho những người sử dụng và triển khai nhanh hơn những kỹ thuật và dịch vụ mới
- Sự thay đổi quan trọng trong thể loại lưu lượng chiếm ưu thế trong mạng. Ngược lại với lưu lượng thoại truyền thống, nhiều nhu cầu mới dựa trên dữ liệu ngày càng phát triển. Tuy nhiên nhiều mạng hiện nay đã được xây dựng chỉ để hỗ trợ hiệu quả cho lưu lượng thoại, không phải là dữ liệu. Việc thay đổi này là nguyên nhân thúc đẩy những nhà cung cấp dịch vụ kiểm tra lại cách thức mà họ xây dựng nên mạng, kiểu dịch vụ phân phối và trong nhiều trường hợp ngay cả mô hình kinh doanh toàn thể của họ.

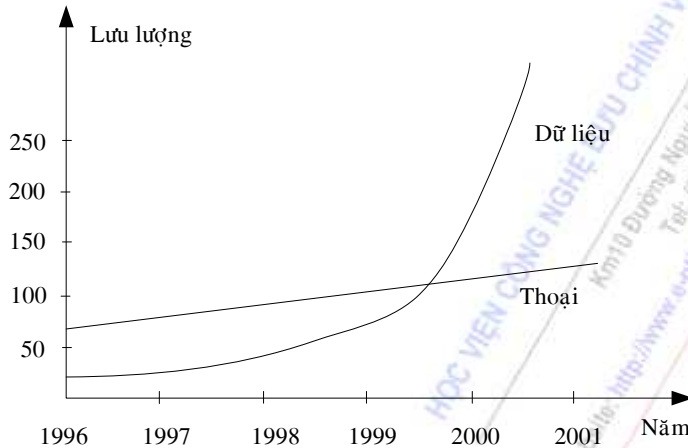
Những nhân tố này đã dẫn đến sự phát triển của mạng quang dung lượng cao. Công nghệ để đáp ứng việc xây dựng các mạng quang dung lượng cao này là công nghệ ghép kênh theo bước sóng DWDM. Trong chương này chúng ta sẽ tìm hiểu về hệ thống thông tin quang WDM, cụ thể sẽ nghiên cứu:

- Nguyên lý ghép kênh phân chia theo bước sóng quang (WDM).
- Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM do sự lan truyền của tín hiệu WDM trong sợi quang, trong đó tập trung vào việc tìm hiểu các hiện ứng phi tuyến.
- Các linh kiện, phần tử trong mạng WDM.
- Mô hình mạng WDM bao gồm các phần tử mạng, tậpô vật lý, tậpô logic, và các kỹ thuật chuyển mạch bảo vệ

## 1.1 NGUYÊN LÝ GHÉP KÊNH THEO BƯỚC SÓNG QUANG (WDM)

### 1.1.1 Giới thiệu chung

Sự phát triển nhanh chóng của các mô hình truyền số liệu, đặc biệt là Internet đã làm bùng nổ nhu cầu tăng băng thông (xem hình 1.1). Trong bối cảnh IP (Internet Protocol) đang nổi lên như là nền tảng chung của mọi loại hình dịch vụ trong tương lai, các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt buộc phải xem xét lại phương thức truyền dẫn TDM truyền thống, vốn tối ưu cho truyền thoại nhưng lại kém hiệu quả trong việc tận dụng băng thông.



Hình 1.1 Tương quan giữa nhu cầu truyền thoại và truyền số liệu

Tóm lại, ta phải giải quyết bài toán tăng băng thông cho viễn thông tương lai. Các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt đầu xét đến ba phương thức truyền dẫn sau:

- **Truyền dẫn ghép phân không gian SDM (Space Division Multiplexing):** đơn giản và không cần sự phát triển công nghệ, chỉ đơn thuần là tăng số lượng sợi quang, tốc độ truyền dẫn vẫn giữ nguyên. Ta có thể chọn SDM nếu trên tuyến truyền dẫn cần tăng băng thông đã có sẵn số lượng sợi quang chưa dùng và khoảng cách tuyến truyền dẫn là đủ ngắn để không cần dùng các bộ lặp, bộ khuếch đại. Nếu khoảng cách là xa, khi đó chi phí sẽ vụt tăng do mỗi hệ thống lắp thêm đều cần một số lượng bộ lặp, bộ khuếch đại... như hệ thống cũ.
- **Truyền dẫn ghép phân thời gian TDM (Time Division Multiplexing):** tăng tốc độ truyền dẫn lên trên sợi quang. Khi tiếp tục dùng phương thức truyền thống này, ta phải xem xét đến hai vấn đề: trước và khi truyền trên sợi quang. Trước khi chuyển thành tín hiệu quang để truyền đi, các linh kiện điện tử có khả năng xử lý với tốc độ bit tối đa là bao nhiêu? Thực tế hiện nay cho thấy, ở đa số các mạng truyền dẫn, linh kiện điện tử có khả năng đáp ứng tốt đối với các dòng tín hiệu ở tốc độ 2.5 Gbps hoặc 10 Gbps. Như vậy thì chưa giải quyết trọn vẹn bài toán tăng băng thông. Trong phòng thí nghiệm đã cho các linh kiện hoạt động ở tốc độ 40 Gbps hoặc 80 Gbps. Để TDM có thể đạt được những tốc độ cao hơn, các phương pháp thực hiện tách/ghép kênh trong miền quang, được gọi là **phân kênh thời gian trong miền quang (Optical time Division Multiplexing - OTDM)** đang được tích cực triển khai. Các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm cho thấy

OTDM có thể ghép được các luồng 10Gbit/s thành luồng 250Gbit/s. Nhưng khi đó, truyền trên sợi quang sẽ vấp phải các vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn: tán sắc sắc thể, tán sắc phân cực, phi tuyến tính.

- **Truyền dẫn ghép phân bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing):** ghép thêm nhiều bước sóng để có thể truyền trên một sợi quang, không cần tăng tốc độ truyền dẫn trên một bước sóng. Công nghệ WDM có thể mang đến giải pháp hoàn thiện nhất trong điều kiện công nghệ hiện tại. Thứ nhất nó vẫn giữ tốc độ xử lý của các linh kiện điện tử ở mức 10 Gbps, bảo đảm thích hợp với sợi quang hiện tại. Thay vào đó, công nghệ WDM tăng băng thông bằng cách tận dụng cửa sổ làm việc của sợi quang trong khoảng bước sóng 1260 nm đến 1675 nm. Khoảng bước sóng này được chia làm nhiều băng sóng hoạt động như minh họa trên bảng 1.1. Thoạt tiên, hệ thống WDM hoạt động ở băng C (do EDFA hoạt động trong khoảng băng sóng này). Về sau, EDFA có khả năng hoạt động ở cả băng C và băng L nên hệ thống WDM hiện tại dùng EDFA có thể hoạt động ở cả băng C và băng L. Nếu theo chuẩn ITU-T, xét khoảng cách giữa các kênh bước sóng là 100 GHz (đảm bảo khả năng chống xuyên nhiễu kênh trong điều kiện công nghệ hiện tại), sẽ có 32 kênh bước sóng hoạt động trên mỗi băng. Như vậy, nếu vẫn giữ nguyên tốc độ bit trên mỗi kênh truyền, dùng công nghệ WDM cũng đủ làm tăng băng thông truyền trên một sợi quang lên 64 lần !

**Bảng 1.1** Sự phân chia các băng sóng

Băng sóng	Mô tả	Phạm vi bước sóng (nm)
Băng O	Original	1260 đến 1360
Băng E	Extended	1360 đến 1460
Băng S	Short	1460 đến 1530
Băng C	Conventional	1530 đến 1565
Băng L	Long	1565 đến 1625
Băng U	Ultra-long	1625 đến 1675

### 1.1.2 Sơ đồ khối tổng quát

#### a) Định nghĩa

Ghép kênh theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing) là công nghệ “trong một sợi quang đồng thời truyền dẫn nhiều bước sóng tín hiệu quang”. Ở đầu phát, nhiều tín hiệu quang có bước sóng khác nhau được tổ hợp lại (ghép kênh) để truyền đi trên một sợi quang. Ở đầu thu, tín hiệu tổ hợp đó được phân giải ra (tách kênh), khôi phục lại tín hiệu gốc rồi đưa vào các đầu cuối khác nhau.

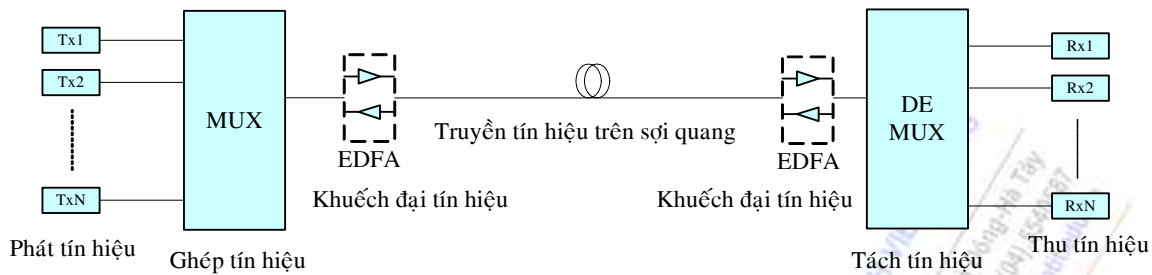
#### b) Sơ đồ chức năng

Như minh họa trên hình 1.2, để đảm bảo việc truyền nhận nhiều bước sóng trên một sợi quang, hệ thống WDM phải thực hiện các chức năng sau:

- Phát tín hiệu: Trong hệ thống WDM, nguồn phát quang được dùng là laser. Hiện tại đã có một số loại nguồn phát như: Laser điều chỉnh được bước sóng (Tunable Laser), Laser đa bước sóng (Multiwavelength Laser)... Yêu cầu đối với nguồn phát laser là phải có độ



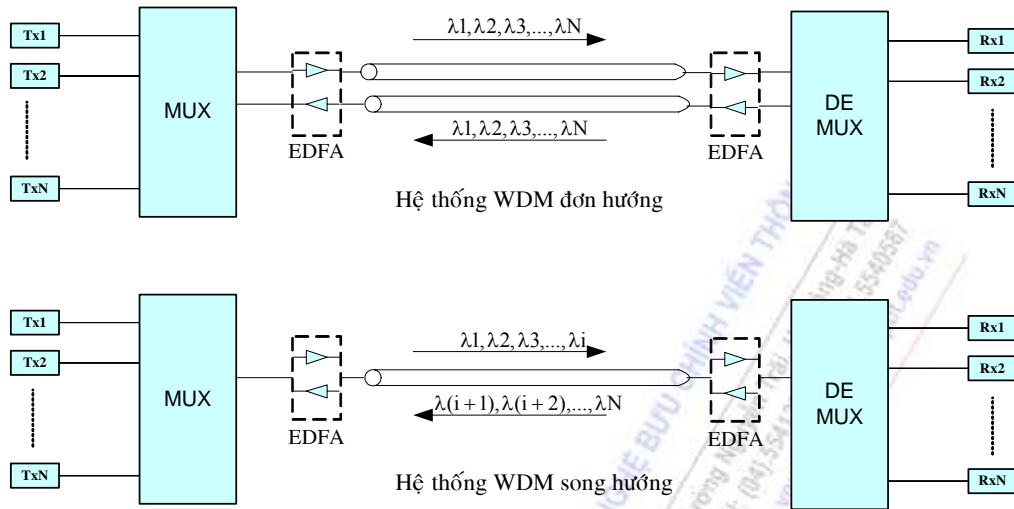
rộng phổ hẹp, bước sóng phát ra ổn định, mức công suất phát đỉnh, bước sóng trung tâm, độ rộng phổ, độ rộng chirp phải nằm trong giới hạn cho phép.



Hình 1.2 Sơ đồ chức năng hệ thống WDM

- Ghép/tách tín hiệu: Ghép tín hiệu WDM là sự kết hợp một số nguồn sáng khác nhau thành một luồng tín hiệu ánh sáng tổng hợp để truyền dẫn qua sợi quang. Tách tín hiệu WDM là sự phân chia luồng ánh sáng tổng hợp đó thành các tín hiệu ánh sáng riêng rẽ tại mỗi cổng đầu ra bộ tách. Hiện tại đã có các bộ tách/ghép tín hiệu WDM như: bộ lọc màng mỏng điện môi, cách tử Bragg sợi, cách tử nhiễu xạ, linh kiện quang tổ hợp AWG, bộ lọc Fabry-Perot... Khi xét đến các bộ tách/ghép WDM, ta phải xét các tham số như: khoảng cách giữa các kênh, độ rộng băng tần của các kênh bước sóng, bước sóng trung tâm của kênh, mức xuyên âm giữa các kênh, tính đồng đều của kênh, suy hao xen, suy hao phản xạ Bragg, xuyên âm đầu gần đầu xa...
- Truyền dẫn tín hiệu: Quá trình truyền dẫn tín hiệu trong sợi quang chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố: suy hao sợi quang, tán sắc, các hiệu ứng phi tuyến, vấn đề liên quan đến khuếch đại tín hiệu ... Mỗi vấn đề kể trên đều phụ thuộc rất nhiều vào yếu tố sợi quang (loại sợi quang, chất lượng sợi...) mà ta sẽ xét cụ thể trong phần 1.2.
- Khuếch đại tín hiệu: Hệ thống WDM hiện tại chủ yếu sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Tuy nhiên bộ khuếch đại Raman hiện nay cũng đã được sử dụng trên thực tế. Có ba chế độ khuếch đại: khuếch đại công suất, khuếch đại đường và tiền khuếch đại. Khi dùng bộ khuếch đại EDFA cho hệ thống WDM phải đảm bảo các yêu cầu sau:
  - Độ lợi khuếch đại đồng đều đối với tất cả các kênh bước sóng (mức chênh lệch không quá 1 dB).
  - Sự thay đổi số lượng kênh bước sóng làm việc không được gây ảnh hưởng đến mức công suất đầu ra của các kênh.
  - Có khả năng phát hiện sự chênh lệch mức công suất đầu vào để điều chỉnh lại các hệ số khuếch đại nhằm đảm bảo đặc tuyến khuếch đại là bằng phẳng đối với tất cả các kênh.
- Thu tín hiệu: Thu tín hiệu trong các hệ thống WDM cũng sử dụng các bộ tách sóng quang như trong hệ thống thông tin quang thông thường: PIN, APD.

c) Phân loại hệ thống WDM



Hình 1.3 Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng

Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng như minh họa trên hình 1.3. Hệ thống đơn hướng chỉ truyền theo một chiều trên sợi quang. Do vậy, để truyền thông tin giữa hai điểm cần hai sợi quang. Hệ thống WDM song hướng, ngược lại, truyền hai chiều trên một sợi quang nên chỉ cần 1 sợi quang để có thể trao đổi thông tin giữa 2 điểm.

Cả hai hệ thống đều có những ưu nhược điểm riêng. Giả sử rằng công nghệ hiện tại chỉ cho phép truyền N bước sóng trên một sợi quang, so sánh hai hệ thống ta thấy:

- Xét về dung lượng, hệ thống đơn hướng có khả năng cung cấp dung lượng cao gấp đôi so với hệ thống song hướng. Ngược lại, số sợi quang cần dùng gấp đôi so với hệ thống song hướng.
- Khi sự cố đứt cáp xảy ra, hệ thống song hướng không cần đến cơ chế chuyển mạch bảo vệ tự động APS (Automatic Protection-Switching) vì cả hai đầu của liên kết đều có khả năng nhận biết sự cố một cách tức thời.
- Đứng về khía cạnh thiết kế mạng, hệ thống song hướng khó thiết kế hơn vì còn phải xét thêm các yếu tố như: vấn đề xuyên nhiễu do có nhiều bước sóng hơn trên một sợi quang, đảm bảo định tuyến và phân bố bước sóng sao cho hai chiều trên sợi quang không dùng chung một bước sóng.
- Các bộ khuếch đại trong hệ thống song hướng thường có cấu trúc phức tạp hơn trong hệ thống đơn hướng. Tuy nhiên, do số bước sóng khuếch đại trong hệ thống song hướng giảm  $\frac{1}{2}$  theo mỗi chiều nên ở hệ thống song hướng, các bộ khuếch đại sẽ cho công suất quang ngõ ra lớn hơn so với ở hệ thống đơn hướng.

### 1.1.3 Đặc điểm của hệ thống WDM

Thực tế nghiên cứu và triển khai WDM đã rút ra được những ưu nhược điểm của công nghệ WDM như sau:



- **Ưu điểm của công nghệ WDM:**
  - Tăng băng thông truyền trên sợi quang số lần tương ứng số bước sóng được ghép vào để truyền trên một sợi quang.
  - Tính trong suốt: Do công nghệ WDM thuộc kiến trúc lớp mạng vật lý nên nó có thể hỗ trợ các định dạng số liệu và thoại như: ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, chuyển mạch kênh, IP ...
  - Khả năng mở rộng: Những tiến bộ trong công nghệ WDM hứa hẹn tăng băng thông truyền trên sợi quang lên đến hàng Tbps, đáp ứng nhu cầu mở rộng mạng ở nhiều cấp độ khác nhau.
  - Hiện tại, chỉ có duy nhất công nghệ WDM là cho phép xây dựng mô hình mạng truyền tải quang OTN (Optical Transport Network) giúp truyền tải trong suốt nhiều loại hình dịch vụ, quản lý mạng hiệu quả, định tuyến linh động ...
- **Nhược điểm của công nghệ WDM:**
  - Vẫn chưa khai thác hết băng tần hoạt động có thể của sợi quang (chỉ mới tận dụng được băng C và băng L).
  - Quá trình khai thác, bảo dưỡng phức tạp hơn gấp nhiều lần.
  - Nếu hệ thống sợi quang đang sử dụng là sợi DSF theo chuẩn G.653 thì rất khó triển khai WDM vì xuất hiện hiện tượng trộn bốn bước sóng khá gay gắt.

#### 1.1.4 Lưới ITU

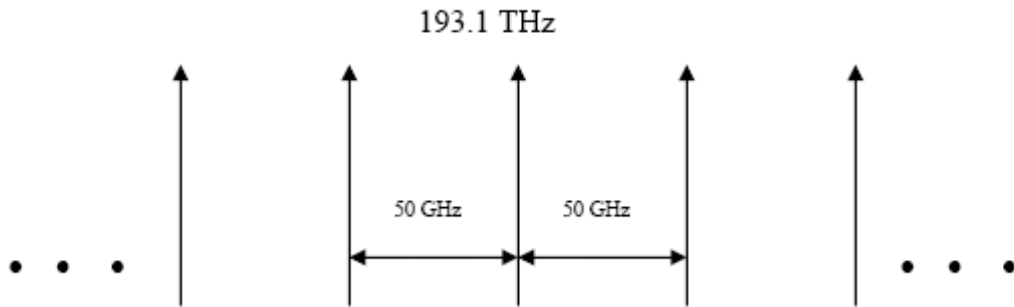
Việc chuẩn hoá các bộ bước sóng dùng cho các mạng WDM là hết sức cần thiết vì nó bảo đảm cho các thiết bị của các nhà cung cấp khác nhau đều được sản xuất theo cùng một tiêu chuẩn, và đều làm việc tương thích với nhau.

Khi chuẩn hoá bước sóng, vấn đề cần phải xem xét đầu tiên là khoảng cách giữa các kênh phải dựa theo tần số hay bước sóng. Khoảng cách tần số bằng nhau sẽ làm cho khoảng cách bước sóng hơi khác nhau. Không có một tiêu chuẩn kỹ thuật nào được ưu tiên để lựa chọn trong trường hợp này. Trong khuyến cáo ITU-G.692 các kênh cách nhau một khoảng 50 GHz (tương đương với khoảng cách bước sóng là 0.4nm) với tần số trung tâm danh định là 193.1THz (1552.52 nm). Tần số này ở giữa dải thông của sợi quang 1.55 $\mu$ m và bộ khuếch đại quang sợi EDFA (xem hình 1.4). Khoảng cách này phù hợp với khả năng phân giải của các bộ MUX/DEMUX hiện nay, độ ổn định tần số của các bộ laser, MUX/DEMUX,... Khi công nghệ hoàn thiện hơn khoảng cách này sẽ phải giảm đi.

Một vấn đề khác, khó khăn hơn là chọn lựa một bộ bước sóng tiêu chuẩn bảo đảm cho các hệ thống cho 4, 8, 16, và 32 bước sóng hoạt động tương thích với nhau bởi vì các nhà sản xuất đều có các cấu hình kênh tối ưu riêng và các kế hoạch nâng cấp hệ thống từ ít kênh lên nhiều kênh khác nhau. ITU đã chuẩn hoá (ITU G.959) bộ 16 bước sóng bắt đầu từ tần số 192.1 THz, rộng 200GHz mỗi bên cho giao diện đa kênh giữa các thiết bị WDM.

Cuối cùng là phải lưu ý không chỉ bảo đảm các tần số trung tâm mà còn phải bảo đảm độ lệch tần số tối đa cho phép. Đối với  $\Delta f \geq 200$  GHz, ITU quy định độ lệch tần số là không vượt

quá  $\pm\Delta f/5$  GHz. Với  $\Delta f=50$  GHz và  $\Delta f=100$  GHz thì đến thời điểm này ITU vẫn chưa chuẩn hoá.



Hình 1.4 Lưới bước sóng theo ITU

## 1.2 CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN CHẤT LƯỢNG CỦA HỆ THỐNG WDM

Có 3 yếu tố cơ bản của sợi quang ảnh hưởng đến khả năng của các hệ thống thông tin quang, bao gồm:

- Suy hao
- Tán sắc
- Hiện tượng phi tuyến xảy ra trong sợi quang.

Tuy nhiên, đối với các hệ thống khác nhau thì mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này cũng khác nhau. Ví dụ:

- Đối với các hệ thống cự ly ngắn, dung lượng thấp thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao.
- Đối với các hệ thống tốc độ cao, cự ly tương đối lớn thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao và tán sắc.
- Đối với các hệ thống cự ly dài và dung lượng rất lớn thì ngoài 2 yếu tố trên cần phải xem xét đến cả các hiệu ứng phi tuyến.

Hiện tượng suy hao và tán sắc đã được trình bày chi tiết trong bài giảng “ Hệ thống thông tin quang 1”. Trong phần này sẽ tập trung trình bày về các hiện tượng phi tuyến.

### 1.2.1 Tổng quan về các hiệu ứng phi tuyến

#### a) Định nghĩa

Hiệu ứng quang được gọi là phi tuyến nếu các tham số của nó phụ thuộc vào cường độ ánh sáng (công suất). Các hiện tượng phi tuyến có thể bỏ qua đối với các hệ thống thông tin quang hoạt động ở mức công suất vừa phải (vài mW) với tốc độ bit lên đến 2.5 Gbps. Tuy nhiên, ở tốc độ bit cao hơn như 10 Gbps và cao hơn và/hay ở mức công suất truyền dẫn lớn, việc xét các