HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

TRẦN VĂN TOẢN

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG KẾT HỢP KỸ THUẬT FSO VÀ WDM TRONG HẠ TẦNG TRÊN CAO (HAP)

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI - 2019

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

TRẦN VĂN TOẢN

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG KẾT HỢP KỸ THUẬT FSO VÀ WDM TRONG HẠ TẦNG TRÊN CAO (HAP)

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 8.52.02.08

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: TS. LÊ HẢI CHÂU

HÀ NỘI - 2019

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận văn

Trần Văn Toản

LỜI CẢM ƠN

Trong thời gian học tập, nghiên cứu và hoàn thiện luận văn đề tài **"Đánh giá hiệu năng hệ thống kết hợp kỹ thuật FSO và WDM trong hạ tầng trên cao (HAP)"** tác giả đã nhận được sự quan tâm, giúp đỡ tận tình của quý các thầy cô, các anh chị và các bạn.

Em xin chân thành cảm ơn TS. Lê Hải Châu đã trực tiếp hướng dẫn, giúp đỡ, dạy bảo, động viên và tạo mọi điều kiện thuận lợi cho em trong quá trình học tập và hoàn thành luận văn.

Và để có được những kiến thức như ngày hôm nay, cho phép em gửi lời cảm ơn sâu sắc đến quý thầy cô Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông trong thời gian qua đã truyền đạt cho em những kiến thức quý báu.

Xin trân trọng cảm ơn!

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN ..... **i**

LỜI CẢM ƠN ..... **ii**

MỤC LỤC ..... **iii**

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT ..... **v**

DANH MỤC BẢNG BIỂU ..... **viii**

DANH MỤC HÌNH VẼ ..... **ix**

MỞ ĐẦU **1**

CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ FSO, WDM VÀ KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG TRONG HẠ TẦNG TRÊN CAO HAP ***4***

1.1. Giới thiệu về truyền thông quang không dây FSO **4**

1.1.1. Lịch sử phát triển FSO 4

1.1.2. Cấu trúc hệ thống truyền thông quang không dây 7

1.1.3. Đặc điểm của FSO 12

1.1.4. Ứng dụng của công nghệ FSO 13

1.2. Kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM **14**

1.2.1. Tổng quan về WDM 14

1.2.2. Sơ đồ khối tổng quát hệ thống WDM 16

1.2.3. Phân loại hệ thống WDM 17

1.2.4. Các phần tử cơ bản trong WDM 18

1.3. Hạ tầng truyền thông trên cao (HAP) và khả năng ứng dụng công nghệ FSO và WDM **24**

1.4. Kết luận **29**

CHƯƠNG II: GIẢI PHÁP KẾT HỢP KỸ THUẬT FSO VÀ WDM TRONG HAP ***30***

2.1. Giới thiệu chung **30**

2.2. Hệ thống WDM – FSO trong hạ tầng trên cao HAP **32**

2.2.1. Mô hình hệ thống WDM – FSO cơ bản 32

2.2.2. Giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP.....33
2.3. Các đặc tính kênh truyền của hệ thống FSO và WDM 35
2.3.1. Yếu tố ảnh hưởng đến đường truyền FSO.....35
2.3.2. Yếu tố ảnh hưởng đến hệ thống WDM 43
2.4. Hiệu năng hệ thống truyền dẫn WDM – FSO trong HAP 45
2.4.1. Phân tích đường truyền FSO từ trạm mặt đất tới HAP (GS_A-HAP) 47
2.4.2. Phân tích đường truyền giữa các trạm phát đáp đặt trên tầng bình lưu (HAP-HAP)…… 48
2.4.3. Phân tích đường truyền FSO từ HAP đến trạm mặt đất (HAP-GS_B).....49
2.5. Kết luận chương 51
CHƯƠNG III: ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG KẾT HỢP WDM – FSO TRONG HAP*.....*52
3.1. Hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP 52
3.1.1. Kiến trúc hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP được mô phỏng......52
3.1.2. Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống.....53
3.2. Đánh giá hiệu năng của hệ thống WDM –FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP.....58
3.2.1. Hiệu năng chung của hệ thống 58
3.2.2. Ảnh hưởng của công suất phát P_0.....66
3.2.3. Ảnh hưởng của tốc độ kênh truyền 68
3.2.4. Khảo sát ảnh hưởng của cự ly truyền dẫn:.....69
3.2.5. Khảo sát ảnh hưởng của photodiode 70
3.3. Kết luận chương 71
KẾT LUẬN 72
DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO 73

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT

Thuật ngữ viết tắt	Nghĩa Tiếng Anh	Nghĩa Tiếng Việt
AM	Amplitude Modulation	Điều chế biên độ
APD	Avalanche Photodiode	Đi-ốt quang thác
APS	Automatic Protection Switching	Chuyển mạch bảo vệ tự động
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Nhiễu Gauss trắng cộng
B		
BER	Bit Error Rate	Tỉ lệ lỗi bit
BSC	Binary Symmetric Channel	Kênh nhị phân đối xứng
C		
CO	Central Office	Trạm trung tâm
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
D		
DEMUX	Demultiplexer	Bộ tách kênh
DPSK	Differential Phase Shift Keying	Khóa dịch pha vi sai
DWDM	Dense Wavelength Devision Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao
E		
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Khuếch đại quang sợi quang trộn Erbium
F		
FM	Frequency Modulation	Điều tần
FOV	Field of view	Góc mở

FSO	Free-Space Optics	Truyền thông quang qua không gian
G		
GEO	Geostationary Earth Orbit	Quỹ đạo địa tĩnh
GI	Graded Index	Chiết suất biến đổi
GS	Ground Station	Trạm mặt đất
H		
HAP	High Altitude Platform	Hạ tầng trên cao
I		
IM	Intensity Modulation	Điều chế cường độ
L		
LAP	Low-Altitude Platform	Hạ tầng trên không tầm thấp
LD	Laser diode	Đi-ốt Laser
LED	Light Emitting Diode	Đi-ốt phát quang
LEO	Low Earth Orbit	Quỹ đạo thấp
LOS	Light Of Sight	Tầm nhìn thẳng
M		
M- PPM	Multi-pulse Pulse Position Modulation	Điều chế vị trí xung đa xung
MUX	Multiplexer	Bộ ghép kênh
MZI	Mach–Zehnder Interferometer	Giao thoa kế Mach–Zehnder
N		
NRZ	Non Return to Zero	Phương thức mã hóa
O		
OA	Optical Amplifier	Bộ khuếch đại quang
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer	Bộ xen / rẽ bước sóng

OHL	Optical Hard Limitter	Bộ hạn biên quang
OOK	On-Off Keying	Điều chế khóa đóng-mở
OXC	Optical cross connector	Bộ kết nối chéo quang
P		
PDF	Probability Density Function	Hàm mật độ xác suất
PM	Phase Modulation	Điều pha
PPM	Pulse-Position Modulation	Điều chế vị trí xung
U		
UAC	Urban Area Coverage	Vùng phủ khu vực đô thị
UAV	Unmanned Aerial Vehicles	Thiết bị tàu bay không người lái
UE	User Equipment	Thiết bị người dùng

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Một số loại nguồn quang sử dụng phổ biến trong các hệ thống FSO 8
Bảng 1.2: Các bộ tách quang trong FSO [4] 11
Bảng 1.3: Đặc tính bán kính vùng phủ của hệ thống HAP 28
Bảng 2.1: Bán kính và các loại tán xạ của các hạt điển hình có trong không khí.....37
tại λ = 850 nm [2]. 37
Bảng 2.2: Dưới đây đưa ra giá trị của dải tầm nhìn dưới các điều kiện thời tiết khác
nhau. 38
Bảng 3.1: Thiết lập các tham số và các hằng số của hệ thống. 54
Bảng 3.2: So sánh ảnh hưởng của công suất phát đến hệ thống 66
Bảng 3.3: So sánh ảnh hưởng của tốc độ bít đến hệ thống kênh thứ nhất 68
Bảng 3.4: So sánh ảnh hưởng của cự ly truyền dẫn đến hệ thống 69
Bảng 3.5: So sánh ảnh hưởng của photodiode đến hệ thống 71

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Hệ thống truyền thông quang không dây mặt đất [2]. 6
Hình 1.2: Hệ thống truyền thông quang trong không gian[2].....6
Hình 1.3. Sơ đồ khối của hệ thống truyền thông quang không dây [2]. 7
Hình 1.4: Điều chế OOK nhị phân.....9
Hình 1.5: Sơ đồ chức năng hệ thống WDM [3].....16
Hình 1.6: Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng [3].....17
Hình 1.7: Sơ đồ khối bên thu [3].....20
Hình 1.8 : Cấu trúc tổng quát sợi quang [3].....21
Hình 1.9: Mặt cắt ngang và mặt cắt chiết suất của sợi chiết suất bậc và chiết suất biến đổi [3]. 21
Hình 1.10: Sợi đơn mode, sợi đa mode chiết suất bậc, sợi đa mode chiết suất biến đổi [3]. 22
Hình 1.11: a) sơ đồ khối bộ ghép kênh, b) Sơ đồ khối bộ tách kênh, c) Các thông số đặc trưng của bộ MUX/DEMUX [3]. 23
Hình 1.12: Khuếch đại quang OLA[3].....24
Hình 1.13: Hệ thống HAP được triển khai ở độ cao 17 – 22 km[1].....25
Hình 1.14: Các kiến trúc hệ thống HAP [4].....26
Hình 1.15: Giải pháp sử dụng hệ thống HAP cung cấp dịch vụ băng rộng trong dự án CAPANINA [4].....27
Hình 1.16: Bán kính vùng phủ của hệ thống HAP [4].....28
Hình 2.1: Các ảnh hưởng bên ngoài tới hệ thống FSO [1]. 31
Hình 2.2: Hệ thống WDM – FSO cơ bản.....32
Hình 2.3: Giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP. 34
Hình 2.4: Kênh khí quyển với các xoáy lốc hỗn loạn. 40
Hình 2.5: Hai trường hợp xảy ra khi phát 2 bit từ 2 GS_A và GS_ B. 46
Hình 2.6: Đường truyền FSO từ trạm mặt đất lên tới trạm HAP.....47
Hình 2.7: Đường truyền FSO từ bộ phát đáp 1 đến bộ phát đáp 2. 48

Hình 2.8: Đường truyền FSO xuống từ HAP đến trạm thu. 49
Hình 3.1: Kiến trúc hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP 52
Hình 3.2: Sơ đồ thiết kế mạng mô phỏng hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP. 55
Hình 3.3: Khối phát tín hiệu.....56
Hình 3.4: Khối thu tín hiệu và hiển thị. 56
Hình 3.5: Tuyến đường truyền trong hệ thống. 57
Hình 3.6: Bộ tách và ghép bước sóng. 57
Hình 3.7: Các thiết bị đo và hiển thị tín hiệu. 58
Hình 3.8: Phổ tín hiệu đầu vào và đầu ra của hệ thống.....58
Hình 3.9: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ nhất. 59
Hình 3.10: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ hai. 59
Hình 3.11: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ ba. 60
Hình 3.12: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ tư. 60
Hình 3.13: Kết quả BER tại 4 kênh đầu thu.....61
Hình 3.14: Đồ thị Q – Factor tại đầu thu tuyến truyền dẫn của 4 kênh 62
Hình 3.15: Đồ thị Min BER tại đầu thu của hệ thống truyền dẫn 4 kênh.....63
Hình 3.16: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ nhất. 64
Hình 3.17: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ hai. 64
Hình 3.18: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ ba. 65
Hình 3.19: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ tư. 65
Hình 3.20: Khảo sát ảnh hưởng của công suất phát. 67
Hình 3.21: Khảo sát ảnh hưởng của tốc độ bít kênh thứ nhất. 68
Hình 3.22: Khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách đường truyền. 70
Hình 3.23: Khảo sát ảnh hưởng của Photodiode đến hệ thống. 71

MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, truyền thông quang tốc độ cao đã và đang đóng vai trò hết sức quan trọng trong mạng truyền thông. Truyền thông quang được chia thành 2 loại bao gồm truyền thông quang qua sợi quang và truyền thông quang không dây. Trong khi truyền thông quang sợi đã được triển khai rộng khắp trên thế giới ở cả mạng đường trục và mạng truy nhập, công nghệ truyền thông quang không dây mới đang dần thu hút lại sự quan tâm nghiên cứu và phát triển cho các ứng dụng vô tuyến băng rộng trong nhà và ngoài trời trong mạng truyền thông di động thế hệ kế tiếp [1, 2, 4]. Việc triển khai công nghệ truyền thông quang học không gian tự do (FSO) hứa hẹn giải quyết tốt vấn đề khan hiếm về phổ tần của hệ thống RF truyền thống hiện đang ngày càng trở nên nghiêm trọng do sự phát triển và triển khai nhanh chóng của các mạng không dây [6, 7, 8]. Hệ thống FSO cũng phù hợp với các trường hợp không thể đặt cáp quang như ở các vùng xa xôi hẻo lánh hoặc những nơi bị cách biệt do xảy ra thiên tai, động đất lũ lụt với thời gian triển khai nhanh.

Trong lĩnh vực thông tin vô tuyến hiện nay, ngoài hai đại diện cơ bản và đã có những ưu thế nhất định là thông tin vô tuyến mặt đất và thông tin vệ tinh, thì trong những năm gần đây một giải pháp thông tin vô tuyến mới đã thu hút sự quan tâm của nhiều nước, nhiều tổ chức trên thế giới trong việc thiết kế, phát triển và triển khai thử nghiệm giải pháp thông tin sử dụng thiết bị bay. Thiết bị bay này có thể là máy bay không người lái (UAV), máy bay nhỏ hoặc tàu bay. Trong giải pháp thông tin, chúng được sử dụng cho nhiều mục đích ứng dụng khác nhau bao gồm quân sự, theo dõi và giám sát, viễn thông, cung cấp vật tư y tế và các hoạt động cứu hộ. Do vậy, tùy thuộc vào yêu cầu ứng dụng, môi trường và các quy định mà mỗi thiết bị bay thích hợp sẽ được sử dụng. Trong thực tế, để sử dụng đúng thiết bị bay cho từng ứng dụng cụ thể, một số yếu tố như khả năng và độ cao cần phải được tính đến. Nói chung, dựa trên độ cao hoạt động của thiết bị bay mà chúng có thể được phân loại thành hạ tầng trên không tầm cao (HAP) và hạ tầng trên không tầm thấp (LAP). Các HAP thường hoạt động trên không ở độ cao trên 17 km (độ cao của

tầng bình lưu từ 17 – 25 km) và gần như cố định. Còn các LAP thường hoạt động trên không ở độ cao vài km, di chuyển nhanh và triển khai linh hoạt. So với HAP, việc triển khai LAP được thực hiện nhanh hơn, do đó LAP thích hợp hơn cho các ứng dụng yêu cầu thời gian triển khai nhanh (như trong các tình huống khẩn cấp). Tuy nhiên, HAP lại có tuổi thọ lâu hơn và do đó, thích hợp hơn cho các hoạt động dài hạn (ví dụ: từ vài tháng đến vài năm).

Từ góc độ mạng, khi được triển khai và vận hành đúng cách, HAP sẽ là một giải pháp thông tin vô tuyến hiệu quả và đáng tin cậy cho nhiều ứng dụng thực tế. Cụ thể, HAP có thể được sử dụng để thay thế một trạm gốc ở trên không cung cấp thông tin liên lạc vô tuyến đáng tin cậy, hiệu quả và theo yêu cầu cho các khu vực mong muốn. Mặt khác, HAP có thể hoạt động như thiết bị người dùng ở trên không (UE), được gọi là HAP di động, cùng tồn tại với thiết bị thu phát mặt đất. Hơn nữa, với độ cao có thể điều chỉnh, HAP cho phép thiết lập hiệu quả các đường truyền tín hiệu trực tiếp (LOS), do đó giảm thiểu suy hao và che khuất tín hiệu. Với những lợi thế như vậy, HAP cho thấy nhiều tiềm năng ứng dụng trong các mạng viễn thông. Một ứng dụng quan trọng khác của HAP là trong Internet vạn vật (IoT), khi các thiết bị có công suất phát nhỏ, khó có thể giao tiếp trực tiếp được với nhau ở khoảng cách xa. Trong tình huống như vậy, HAP có thể hỗ trợ việc thu thập dữ liệu IoT từ thiết bị này và phân phối dữ liệu thu thập được đến các thiết bị khác. Đặc biệt, HAP cũng có thể sử dụng cho các hoạt động giám sát, một ứng dụng quan trọng trong IoT [7,8].

Bên cạnh đó việc truyền từ trạm mặt đất lên HAP gặp nhiều khó khăn về tốc độ đường truyền thì việc sử dụng công nghệ ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM cho phép tận dụng được hạ tầng truyền dẫn quang hiệu quả và cải thiện hiệu quả về tốc độ đường truyền, công nghệ WDM cung cấp hệ thống truyền tải tốc độ cao và siêu cao đáp ứng linh hoạt nhu cầu của các nhà cung cấp dịch vụ viễn thông. Ngoài ra, với khả năng truyền thông sử dụng bước sóng ánh sáng qua không gian tự do cung cấp đường truyền tốc độ cao, triển khai linh hoạt với chi phí thấp các hệ thống FSO được kỳ vọng đáp ứng tốt các yêu cầu đề cập trên. Chính vì vậy, đề tài

“ Đánh giá hiệu năng hệ thống kết hợp kỹ thuật FSO và WDM trong hạ tầng trên cao HAP” là một trong những hướng nghiên cứu có tính thời sự và có ý nghĩa khoa học sâu sắc trong bối cảnh hệ thống HAP đang được xem là giải pháp tiềm năng của mạng thông tin di động thế hệ kế tiếp.

Nội dung luận văn được trình bày thành 3 chương sau:

- Chương 1: Tổng quan về FSO, WDM và khả năng ứng dụng trong hạ tầng trên cao (HAP): Truyền thông quang không dây FSO nói về lịch sử phát triển của FSO cũng như cấu trúc hệ thống, đặc điểm và khả năng ứng dụng của công nghệ truyền thông quang không dây FSO. Ngoài ra, nội dung chương 1 còn phân tích về kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng WDM, sơ đồ khối tổng quát của hệ thống cũng như phân loại hệ thống và các phần tử cơ bản trong WDM. Bên cạnh đó, nội dung chương 1 tập chung giới thiệu về hạ tầng truyền thông trên cao HAP và khả năng ứng dụng công nghệ FSO và WDM trong hạ tầng truyền thông trên cao HAP.

- Chương 2: Giải pháp kết hợp kỹ thuật FSO và WDM trong hạ tầng trên cao HAP: Giới thiệu hệ thống WDM – FSO cơ bản và giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP. Bên cạnh đó, nội dung chương 2 còn đề cập đến các tham số và yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống FSO cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hệ thống WDM. Ngoài ra, nội dung chương 2 còn phân tích hiệu năng hệ thống FSO trong HAP (như đường truyền FSO từ HAP đến mặt đất cũng như đường truyền từ HAP xuống mặt đất và đường truyền trong tầng bình lưu).

- Chương 3: Đánh giá hiệu năng hệ thống kết hợp WDM – FSO trong HAP: Nội dung chương 3 đưa ra được hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP từ đó đánh giá hiệu năng của hệ thống như các ảnh hưởng về công suất phát, khoảng cách truyền, tốc độ bit, kỹ thuật điều chế…Từ các phương pháp phân tích được ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống ta đánh giá kết quả đã đạt được và đưa ra ý kiến nhận xét.

CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ FSO, WDM VÀ KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG TRONG HẠ TẦNG TRÊN CAO HAP

Tóm tắt: *Chương 1 tìm hiểu chung về truyền thông quang không dây FSO nói về lịch sử phát triển của FSO cũng như cấu trúc hệ thống, đặc điểm và khả năng ứng dụng của công nghệ truyền thông quang không dây FSO. Ngoài ra, nội dung chương 1 còn phân tích về kỹ thuật ghép kênh theo bước sóng WDM như giới thiệu về WDM, sơ đồ khối tổng quát của hệ thống cũng như phân loạ hệ thống và các phần tử cơ bản trong WDM. Bên cạnh đó, nội dung chương 1 tập chung giới thiệu về hạ tầng truyền thông trên cao HAP và khả năng ứng dụng công nghệ FSO và WDM trong hạ tầng truyền thông trên cao HAP.*

1.1. Giới thiệu về truyền thông quang không dây FSO

1.1.1. Lịch sử phát triển FSO

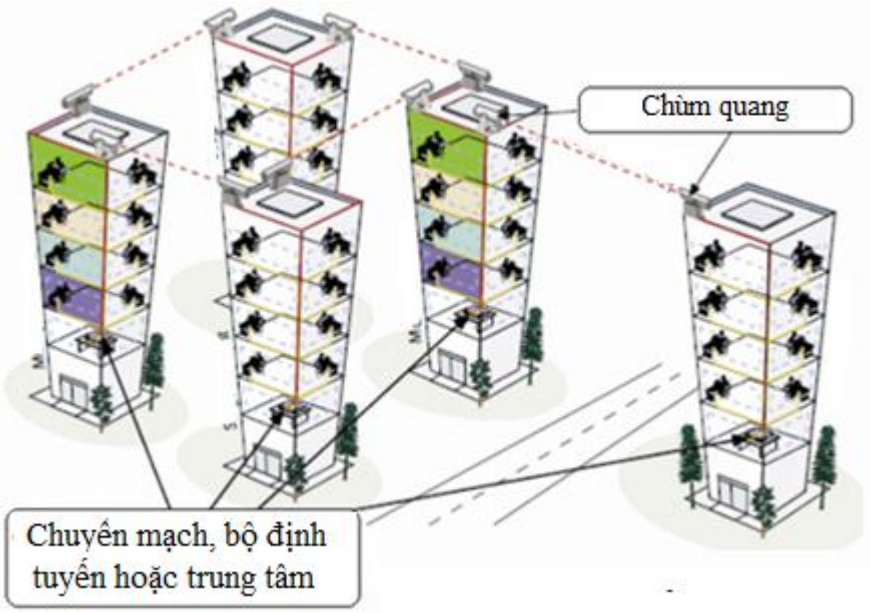
Truyền quang qua không gian tự do FSO hay giao tiếp quang không dây được giới thiệu lần đầu bởi Alexander Graham Bell ở cuối thế kỷ 19. Thí nghiệm FSO của Bell đó chính là ông đã chuyển đổi tín hiệu âm thanh (giọng nói) thành tín hiệu điện thoại và phát chúng giữa các bộ thu phát qua không gian tự do dọc theo một luồng sáng trong khoảng cách khoảng 183m. Thiết bị thí nghiệm của ông được gọi là "photophone", Bell coi trọng công nghệ quang này hơn là điện thoại – phát minh vĩ đại của ông vì công nghệ này không cần đến dây dẫn cho việc truyền tín hiệu.

Mặc dù photophone của Bell không bao giờ được đưa vào thương mại hóa nhưng nó đã giải thích các đặc tính cơ bản của truyền thông quang không dây. Sau này, vào thời gian đầu các công nghệ FSO xuất hiện lần đầu tiên vào những năm 1960 trong các dự án liên quan đến quân sự và không gian (NASA). Đến cuối những năm 1980 những sản phẩm thương mại đã xuất hiện nhưng không thành công vì những rào cản công nghệ như cự li ngắn, dung lượng thấp, vấn đề về giữ thẳng hàng giữa bộ phát và bộ thu cũng như những thách thức về thời tiết, môi trường truyền dẫn là những hạn chế chính của hệ thống FSO vào thời điểm đó.

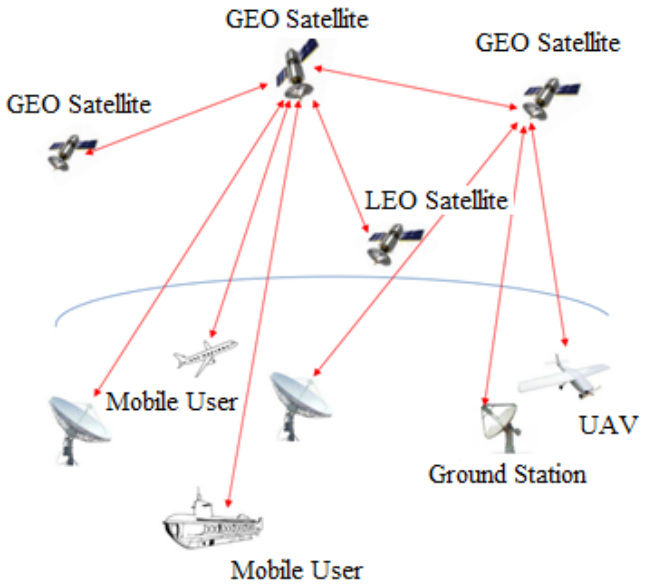
Trong những năm gần đây, truyền thông quang tốc độ cao đã và đang đóng vai trò hết sức quan trọng trong mạng viễn thông. Truyền thông quang được chia thành 2 loại: Truyền thông quang qua sợi quang và truyền thông quang không dây. Trong đó, truyền thông quang không dây đang nổi lên như là một công nghệ có thể phát triển cho các ứng dụng vô tuyến băng rộng trong nhà và ngoài trời thế hệ kế tiếp. Phạm vi các ứng dụng là từ các kết nối truyền thông không dây cự ly ngắn cung cấp truy nhập mạng cho các máy tính xách tay, cho đến các đường kết nối dặm cuối giữa các người dùng đầu cuối và hệ thống truyền thông sợi quang đường trục hiện thời, và thậm chí cả các liên kết truyền thông quang trong không gian vũ trụ [1,2]. Truyền thông quang không dây trong nhà thường dùng là truyền thông không dây hồng ngoại, còn truyền thông quang không dây ngoài trời được biết phổ biến dưới tên gọi truyền thông quang qua không gian (FSO). Trong ứng dụng truyền thông không dây hồng ngoại, các kết nối không trực tiếp, không yêu cầu sự thẳng hàng một cách chính xác giữa máy phát và máy thu. Chúng có thể được phân loại thành các kết nối tầm nhìn thẳng (LOS) và các kết nối khuếch tán. Kết nối LOS yêu cầu một tuyến đường thông suốt, không bị tắc nghẽn cho việc truyền thông tin cậy, trong khi các kết nối khuếch tán dựa vào các tuyến đường quang khác nhau từ các phản xạ bề mặt. Tuy nhiên, FSO chỉ sử dụng các kết nối LOS trực tiếp và các kết nối quang điểm tới điểm qua bầu khí quyển từ máy phát tới máy thu. Truyền thông FSO qua khoảng cách một vài kilomet có thể đạt tới tốc độ dữ liệu hàng Gbps.

Tóm lại, FSO (hay truyền thông quang không dây) có thể được định nghĩa là công nghệ viễn thông sử dụng sự truyền lan ánh sáng trong không khí để truyền tín hiệu giữa hai điểm. Đây là công nghệ truyền thông băng rộng tầm nhìn thẳng, trong đó tín hiệu quang thay vì truyền trong sợi quang, được phát đi trong một búp sóng quang qua không gian. Một mạng truyền thông quang không dây bao gồm các bộ thu – phát quang (gồm một khối thu và một khối phát) cung cấp khả năng thông tin hai chiều. Mỗi khối phát quang sử dụng một nguồn quang và một thấu kính để phát tín hiệu quang qua không gian tới khối thu. Tại phía thu, một thấu kính khác được sử dụng để thu tín hiệu, thấu kính này được nối với khối thu có độ nhạy cao qua một

sợi quang. Một tuyến FSO bao gồm hai bộ thu – phát được đặt trong tầm nhìn thẳng. Thông thường, các bộ thu phát được gắn trên nóc các tòa nhà hoặc sau các cửa sổ như hình 1.1.



Hình 1.1: Hệ thống truyền thông quang không dây mặt đất [2].

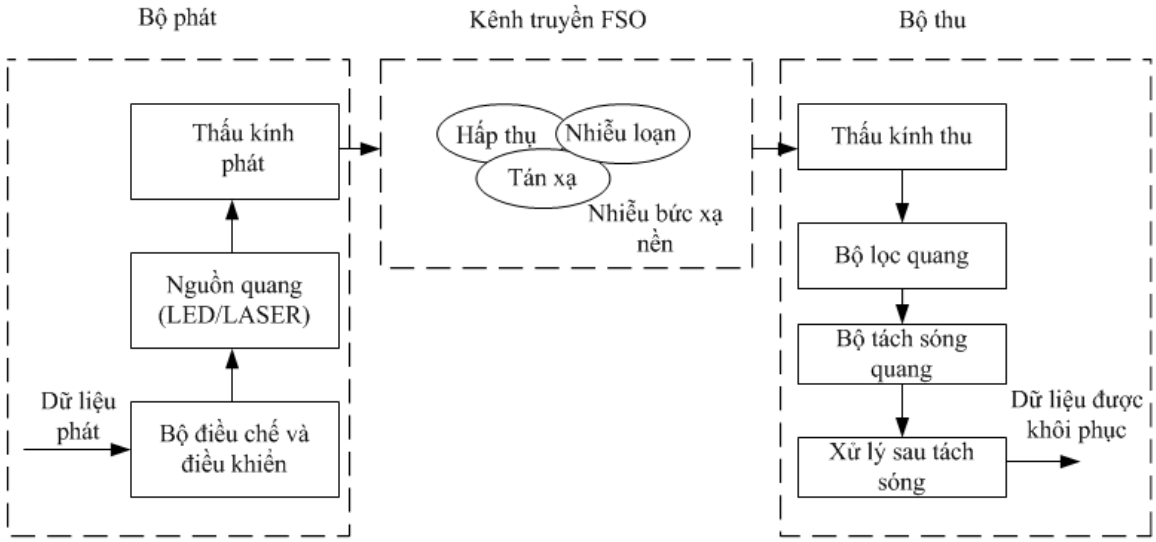


Hình 1.2: Hệ thống truyền thông quang trong không gian[2].

Với các hệ thống FSO mặt đất cự ly hoạt động của một tuyến FSO từ vài trăm km đến vài km. Với các hệ thống FSO trong không gian hình 1.2, cự ly kết nối có thể vài chục km (từ mặt đất tới hạ tầng trên cao HAP và ngược lại); vài trăm tới vài nghìn km (từ mặt đất tới vệ tinh quỹ đạo thấp LEO và ngược lại); cự ly thậm chí còn xa hơn đối tới các vệ tinh địa tĩnh GEO hoặc tàu thăm dò các vì sao.

1.1.2. Cấu trúc hệ thống truyền thông quang không dây

Các thành phần chính trong hệ thống truyền thông không dây gồm bộ phát kênh truyền FSO và bộ thu. Sơ đồ khối của một tuyến FSO điển hình được thể hiện trên hình 1.3.



Hình 1.3. Sơ đồ khối của hệ thống truyền thông quang không dây [2].

a) Bộ phát

Dữ liệu đầu vào phía nguồn được truyền tới một đích ở xa. Phía nguồn có cơ chế điều chế sóng mang quang riêng, điển hình như laser được truyền đi như một trường quang qua kênh khí quyển. Các mặt quan trọng của hệ thống phát quang là kích cỡ, công suất và chất lượng búp sóng, các đặc điểm này xác định cường độ laser và góc phân kỳ nhỏ nhất có thể đạt được từ hệ thống. Phương thức điều chế được sử dụng rộng rãi tại bộ phát là điều chế cường độ (IM), trong đó cường độ phát xạ của nguồn quang sẽ được điều chế bởi số liệu cần truyền đi. Việc điều chế được thực hiện thông qua việc thay đổi trực tiếp cường độ của nguồn quang tại bộ

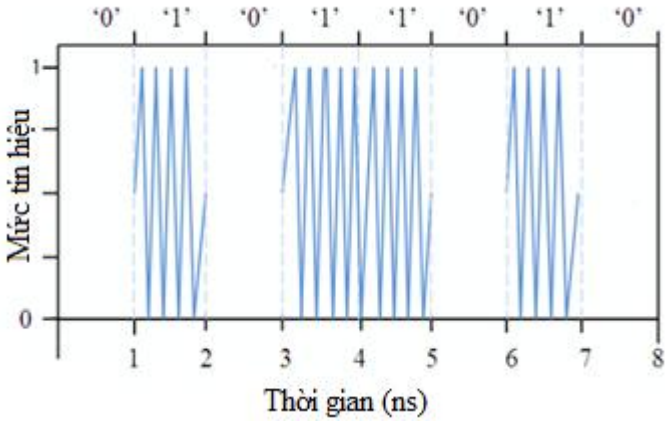
phát hoặc thông qua bộ điều chế ngoài như bộ giao thoa MZI. Việc sử dụng một bộ điều chế ngoài nhằm đảm bảo tốc độ dữ liệu đạt được cao hơn so với bộ điều chế trực tiếp. Các thuộc tính khác của trường bức xạ quang như pha, tần số và trạng thái phân cực cũng có thể được sử dụng để điều chế với cùng dữ liệu thông tin thông qua việc sử dụng bộ điều chế ngoài. Tín hiệu sau điều chế từ nguồn quang (LED hoặc LASER) được tập hợp bởi một thấu kính và phát qua môi trường khí quyển tới phía thu. Một số loại nguồn quang sử dụng phổ biến trong các hệ thống FSO được liệt kê trong Bảng 1.1 [4].

Bảng 1.1: Một số loại nguồn quang sử dụng phổ biến trong các hệ thống FSO [4]

Loại nguồn quang		**Bước sóng (nm)**	**Đặc điểm**
LD	Phát xạ mặt khoảng cộng hưởng dọc	~ 850	Rẻ và có tính khả dụng; không có hoạt động làm mát; mật độ công suất thấp; tốc độ lên tới ~ 10 Gbit/s.
	Fabry – Perot	~ 1300/~ 1550	Thời gian sống lâu; tiêu chuẩn an toàn cho mắt thấp hơn; mật độ công suất cao hơn 50 lần (100 nW/ cm^2); tương thích với bộ khếch đại EDFA, tốc độ cao lên tới 40 Gbit/s; độ dốc hiệu quả 0,03 – 0,2 W/A.
	Thác lượng tử	~ 10000	Đắt tiền và tương đối mới; truyền rất nhanh với độ nhạy cao; truyền dẫn trong sương mù tốt hơn; thành phần chế tạo không có sẵn; không thâm nhập qua thủy tinh.
LED		Hồng ngoại gần	Rẻ hơn; mạch điều khiển đơn giản; công suất và tốc độ dữ liệu thấp hơn.

Hiện nay, hầu hết các hệ thống FSO đều sử dụng phương pháp điều chế khóa

đóng mở (OOK) vì tính đơn giản của nó. Sự đơn giản của OOK được thể hiện ở sự có hay không có sóng mang truyền đi, tương ứng với bit dữ liệu đầu vào là "1" hay "0". Một ví dụ về kỹ thuật điều chế này được thể hiện trong hình 1.4. Trong đó, bit 0 được biểu diễn bằng sóng mang "off " (biên độ sóng mang giảm về gần bằng 0), bit 1 được biểu diễn bằng sóng mang "on" (biên độ xác định khác không).



Hình 1.4: Điều chế OOK nhị phân.

b) Kênh truyền dẫn khí quyển

Kênh truyền dẫn quang của hệ thống FSO khác so với kênh nhiễu Gauss thông thường, vì trong truyền dẫn quang, tín hiệu đầu vào kênh *x(t)* thể hiện công suất chứ không phải biên độ. Điều này dẫn đến hai đặc trưng của tín hiệu phát:

i) Tín hiệu *x(t)* không âm.

ii) Giá trị trung bình của *x(t)* không vượt quá công suất tối đa quy định P_{max}

$$\lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t)dt \leq P_{max} \tag{1.1}$$

Kênh truyền FSO chứa các phân tử khí, các hạt bụi, khói và có những hình thái thời tiết khác nhau như mưa, sương mù,... Lượng mưa trong khí quyển phụ thuộc vào vị trí địa lý của từng vùng và theo từng mùa. Mật độ của các hạt cao nhất khi ở gần bề mặt trái đất và giảm khi tăng độ cao lên đến tầng điện ly. Do đó, bầu khí quyển là một môi trường không đồng nhất, trường quang khi truyền qua bầu khí quyển sẽ bị tán xạ hoặc bị hấp thụ dẫn đến suy giảm công suất.

Một điểm quan trọng khác của kênh truyền FSO là tính nhiễu loạn. Khi ánh sáng từ mặt trời chiếu xuống trái đất, các tia bức xạ bị hấp thụ và làm nóng bề mặt trái đất. Sự nóng bề mặt này tạo nên sự không đồng nhất trong không khí khi mà các vùng nóng, lạnh gặp nhau gây ra sự thay đổi về chiết suất, mật độ theo không gian và thời gian. Nhiễu loạn khí quyển phụ thuộc vào áp suất khí quyển, độ cao, tốc độ gió và sự biến thiên của chỉ số khúc xạ do nhiệt độ không đồng nhất. Các ảnh hưởng của nhiễu loạn khí quyển bao gồm:

✓ *Lệch chùm tia:* độ lệch của chùm tia (búp sóng quang) so với đường truyền thẳng (LOS) gây ra mất tín hiệu tại máy thu.

✓ *Hình ảnh "nhảy múa":* cường độ đỉnh của tín hiệu quang thu được di chuyển trong mặt phang thu do sự thay đổi góc đến của các chùm tia.

✓ *Trải rộng chùm tia:* độ phân kỳ của chùm tia tăng do tán xạ dẫn đến giảm mật độ công suất thu.

✓ *Nhấp nháy:* sự thay đổi mật độ công suất ở các vị trí khác nhau tại mặt phang thu gây ra bởi giao thoa trong các chùm quang.

✓ *Giảm sự kết hợp không gian:* nhiễu loạn khí quyển cũng gây ra suy giảm sự kết họp pha dọc theo mặt phang pha của chùm tia. Điều này đặc biệt ảnh hưởng tới máy thu coherent.

✓ *Thay đổi phân cực:* đây là kết quả từ những thay đổi trạng thái phân cực của trường quang thu được sau khi truyền qua môi trường nhiễu loạn. Tuy nhiên, với trường quang truyền theo phương ngang, sự thay đổi phân cực là không đáng kể.

Với những phân tích trên ta có thể thấy rằng kênh truyền khí quyển gây ra những tác động như suy hao tín hiệu phát (tổn hao công suất), tác động đến tính ổn định của tín hiệu thu (hiệu ứng nhiễu loạn). Rõ ràng, sự biến đổi của môi trường truyền là một thách thức không nhỏ cho việc tính toán và mô phỏng kênh truyền.

c) Bộ thu

Tại phía thu, trường quang được tập trung lại và được tách, cùng với sự xuất hiện của xuyên nhiễu, méo tín hiệu, và bức xạ nền. Bên phía thu, các đặc tính quan trọng là kích cỡ độ mở và số lượng photon, những đặc tính này xác định lượng ánh sáng được tập trung và phạm vi tách trường quang của bộ tách quang. Trong các hệ

thống quang, công suất tín hiệu điện thu được tỉ lệ thuận với A^2 trong khi đó phương sai của nhiễu lượng tử lại tỉ lệ thuận với *A, (A* là diện tích mặt thu của bộ thu). Do đó, đối với hệ thống quang giới hạn nhiễu lượng tử, SNR tỉ lệ thuận với *A*. Điều này cho thấy rằng với một mức công suất phát, nếu sử dụng bộ thu có kích thước lớn thì SNR của bộ thu sẽ tăng. Tuy nhiên, khi tăng *A* thì điện dung của bộ thu cũng tăng, làm giới hạn băng thông của máy thu. Bộ thu hỗ trợ việc khôi phục các dữ liệu đã được phát đi từ phía phát. Bộ thu bao gồm các thành phần sau:

✓ *Phần tử thu tín hiệu quang*: Có chức năng tập hợp và tập trung các phát xạ quang tới bộ tách sóng quang. Khẩu độ (độ mở) của bộ thu lớn sẽ giúp tập hợp được nhiều phát xạ quang vào bộ tách sóng quang.

✓ *Bộ lọc thông dải quang:* Được sử dụng với mục đích làm giảm lượng bức xạ nền.

✓ *Bộ tách sóng quang* PIN hoặc APD chuyển đổi trường quang đến thành tín hiệu điện. Các bộ tách sóng quang thường được dùng trong các hệ thống truyền thông quang hiện nay được tóm tắt trong bảng 1.2.

✓ *Mạch xử lý tín hiệu*: Có chức năng khuếch đại, lọc và xử lý tín hiệu để đảm bảo tính chính xác cao của dữ liệu được khôi phục.

Bảng 1.2: Các bộ tách quang trong FSO [4]

Loại cấu trúc	Vật liệu	Bước sóng (nm)	Đáp ứng (W/A)	Độ nhạy	Độ lợi
PIN	Silic	300 ÷ 1100	0,5	- 34 dBm tại tốc độ 155 Mb/s	1
	Silic (với bộ khuếch đại phối hợp trở kháng)	300 ÷ 1100	0,5	- 26 dBm tại tốc độ 1,25 Gb/s	1
	InGaAs	1000 ÷ 1700	0,9	- 46 dBm tại tốc độ 155 Mb/s	1
APD	Silicon	400 ÷ 1000	77	- 52 dBm tại tốc độ 155 Mb/s	150
	InGaAs	1000 ÷ 1700	9	- 33 dBm tại tốc độ 1,25 Gb/s	10

Do ảnh hưởng của điện dung bộ tách sóng, các bộ tách sóng tốc độ cao thường có kích thước nhỏ hơn 70 µm và 30 µm tương ứng với tốc độ bit 2.5 Gbps và 10 Gbps, cùng với việc hạn chế về góc mở, đòi hỏi sự kết nối chính xác. Góc mở (FOV) của bộ thu là tỷ số của kích thước bộ tách sóng và chiều dài tiêu cự [2].

FOV = $d/f = dF\#/D;$ trong đó d là đường kính bộ tách sóng, f là độ dài hiệu dụng của tiêu cự, và D là độ mở của bộ thu. $F\#$ là chỉ số của f.

Đối với bộ thu kích thước 75 µm, $F\#=1$ và $D=150$ nm, FOV = ~0.5 mrad.

Có hai loại bộ thu quang cơ bản: bộ thu không kết hợp và bộ thu kết hợp. Bộ thu không kết hợp tách trực tiếp công suất tức thời của trường quang tập trung khi chúng tới bộ thu, do đó thường được gọi là bộ thu tách trực tiếp hoặc tách công suất. Loại bộ thu này là loại đơn giản nhất trong việc thực hiện và có thể được sử dụng bất cứ khi nào thông tin truyền đi xuất hiện trong sự biến đổi công suất (ví dụ IM) của trường quang. Đối với bộ thu kết hợp, hay còn gọi là bộ thu heterodyne, trộn lẫn trường sóng ánh sáng cục bộ phát ra với trường ánh sáng thu được, và sóng kết hợp này sẽ được tách photon. Loại bộ thu này thường được sử dụng khi thông tin được điều chế dựa trên sóng mang quang sử dụng AM, FM hoặc PM, và là cần thiết cho tách sóng FM hoặc PM.

1.1.3. Đặc điểm của FSO

Hệ thống thông tin quang vô tuyến truyền thông quang không dây FSO gồm những đặc điểm nổi bật sau:

✓ Hệ thống truyền thông quang không dây ra đời là sự thay thế sóng điện từ bằng sóng ánh sáng. Với bước sóng trong khoảng từ 780 -1580 nm tương ứng với tần số trong khoảng từ 200 – 300 THz.

✓ Băng thông cực rộng có khả năng mang một lượng tin lớn là một ưu điểm nổi trội của hệ thống truyền thông quang không dây FSO .

✓ Làm việc ở tần số ánh sáng nên vượt ra ngoài phạm vi của quản lý tần số chính vì vậy không cần đăng ký và phân chia vùng tần số.

✓ Đặc điểm không mong muốn của truyền thông quang không dây là bị suy hao nhiều trong môi trường truyền đặc biệt là trong môi trường có mưa, sương mù , khói bụi…

1.1.4. Ứng dụng của công nghệ FSO

✓ *Kết nối tốc độ cao giữa các tòa nhà với FSO*

Hiện nay, các doanh nghiệp đang gặp phải vấn đề quá tải lưu lượng mạng tại các kết nối giữa các tòa nhà. Với các doanh nghiệp sử dụng các mạng nội bộ dựa trên tiêu chuẩn Gigabit Ethernet, các kết nối 2,048 (hoặc 1,544) Mbit/s giữa các tòa nhà sẽ làm hạn chế lưu lượng kết nối. Trong khi đó, các doanh nghiệp với yêu cầu số lượng lớn mong muốn truyền dẫn dung lượng cao giữa các trụ sở doanh nghiệp mà không sử dụng các kết nối sợi quang chi phí cao. Việc lặp đặt sợi quang cũng phức tạp và tốn thời gian hơn. Ngoài ra, việc xin cấp phép, vấn đề an ninh, đào rãnh, đặt cáp và yêu cầu về môi trường cũng là các vấn đề trở ngại. Để loại bỏ các vấn đề trở ngại trên và tăng lưu lượng kết nối, các doanh nghiệp có các tòa nhà nằm trong tầm nhìn thẳng chuyển sang sử dụng các giải pháp FSO. Tóm lại, các giải pháp FSO cho phép loại bỏ: Tắc nghẽn về lưu lượng, yêu cầu xin phép và cấp giấy phép, việc đào rãnh, cống và lắp đặt cáp, vấn đề liên quan tới hợp đồng thuê (cho thuê) tòa nhà, tốn thời gian lắp đặt và chi phí cao. Một vài ứng dụng được phổ biến trong hệ thống FSO như là:

✓ *Mở rộng mạng đô thị:* Hệ thống FSO có thể được triển khai để mở rộng mạng vòng đô thị đã có sẵn hay kết nối tới các mạng khác.

✓ *Khả năng kết nối doanh nghiệp:* Các kết nối LAN – LAN, mạng lưu trữ SAN

✓ *Kết nối dặm cuối:* Đây là các đường truyền mà có thể tiếp cận người sử dụng đầu cuối. Chúng có thể được triển khai điểm – điểm, điểm – đa điểm hay các kết nối hình lưới.

✓ *Bổ xung cho cáp sợi quang:* FSO cũng có thể được triển khai như đường truyền dư để khôi phục cáp sợi.

✓ *Truy nhập:* FSO có thể được triển khai trong các ứng dụng truy nhập như truy nhập mạng Ethernet tốc độ cao. Các nhà cung cấp dịch vụ có thể sử dụng FSO để

xác định các hệ thống vòng lặp cục bộ và để cung cấp các đường truyền dựa trên FSO tới các doanh nghiệp.

✓ *Các công nghệ DWDM:* Với sự kết hợp với WDM và các hệ thống FSO, những người sử dụng độc lập hướng tới xây dựng các vòng cáp sợi cho riêng họ, nhưng có thể sở hữu một phần của mạng vòng.

✓ *Truyền thông mạng tế bào:* Có thể được sử dụng để vận tải lưu lượng giữa các trạm gốc và các trung tâm chuyển mạch trong các mạng 3G/4G, cũng như việc vận chuyển tín hiệu đa truy nhập phân chia theo mã (CDMA) từ các ô macro tới ô micro và tới các trạm gốc.

✓ *Hệ thống FSO và vấn đề an ninh mạng*

Mặc dù FSO là công nghệ không dây nhưng nó không phát quảng bá tới bất kỳ người nào và tất cả mọi người. FSO phát búp sóng ánh sáng hẹp, tần số rất cao tới một nơi xác định. Do đó, rất khó cho một cá nhân nào đó có thể thu trộm thông tin mà không bị phát hiện. Các hệ thống FSO thường được lắp đặt càng cao càng tốt để các phương tiện giao thông qua lại không làm ảnh hưởng tới búp sóng quang. Trong khi đó, việc thu trộm thông tin đòi hỏi phải đặt thiết bị trên đường đi của búp sóng trong khoảng thời gian dài.

Việc đặt thiết bị thu trộm thông tin giữa hai khối FSO là rất khó khăn do kích thước búp sóng quang rất hẹp, khó xác định được vị trí búp, búp lại thường được đặt ở rất cao và không gần bất cứ thứ gì. Việc phát hiện thiết bị thu trộm là hoàn toàn có khả năng thực hiện được do búp sóng quang nằm trong tầm nhìn thẳng, có thể sử dụng các máy quay phim để giám sát việc lắp đặt thiết bị thu trộm và đường truyền của búp sóng quang để phát hiện bất cứ hoạt động khả nghi nào.

1.2. Kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM

1.2.1. Tổng quan về WDM

Công nghệ mạng quang đã trở thành nhân tố quan trọng trong sự phát triển của mạng viễn thông. Yêu cầu băng tần sử dụng lớn là hệ quả tất yếu của nhu cầu truyền thông dữ liệu ngày nay. Trong hai thập kỷ qua, công nghệ truyền tải quang

WDM đã có sự phát triển vượt bậc. Sự phát triển này có được là nhờ công nghệ chế tạo linh kiện quang. Những thành tựu của công nghệ này đã góp phần tạo nên hệ thống WDM dung lượng lớn như ngày nay. Theo thời gian, xuất phát từ những nhu cầu thực tế, các hệ thống WDM ngày càng trở nên phức tạp. Ở một góc độ nào, sự phức tạp trong hệ thống WDM là trong những chức năng của thiết bị. Nhờ có chức năng này mà cấu hình hệ thống WDM chuyển từ đơn giản như cấu hình điểm - điểm sang cấu hình phức tạp như Ring và Mesh [3,7,8].

Các hệ thống WDM đầu tiên xuất hiện từ cuối những năm 1980 sử dụng hai kênh bước sóng trong các vùng 1310nm và 1550nm và thường được gọi là hệ thống WDM băng rộng. Đầu những năm 1990 xuất hiện các hệ thống WDM thế hệ hai sử dụng các phần tử WDM thụ động, được gọi là hệ thống WDM băng hẹp từ 2 đến 8 kênh. Các kênh này nằm trong cửa sổ 1550nm và với khoảng cách kênh 400GHz. Đến giữa những năm 1990 đã có hệ thống WDM mật độ cao (DWDM) sử dụng từ 16 đến 40 kênh với khoảng cách kênh từ 100 đến 200 GHz. Các hệ thống này đã tích hợp các chức năng xen rẽ và quản lý mạng. Các hệ thống WDM ban đầu sử dụng với khoảng cách kênh lớn. Việc lắp đặt hệ thống WDM chi phối bởi những lý do kinh tế. Việc nâng cấp thiết bị đầu cuối để khai thác các năng lực của WDM có chi phí thấp hơn việc lắp đặt cáp sợi quang mới. Sự xuất hiện bộ khuếch đại quang EDFA đã chuyển hầu hết các hệ thống WDM sang cửa sổ 1530 nm đến 1565nm. Các hệ thống WDM mới lắp đặt gần đây đã sử dụng các kênh quang có khoảng cách giữa các kênh hẹp từ 25 GHz đến 50 GHz. Nhu cầu về băng tần mạng đang tăng gần 100%/một năm sẽ tiếp tục gia tăng ít nhất là trong vài chục năm tiếp theo. Việc giảm giá thành của các nhà cung cấp và trên hết là ứng dụng phổ cập của Internet đòi hỏi băng tần lớn sẽ được tiếp tục đẩy mạnh.

Ưu điểm của công nghệ WDM:

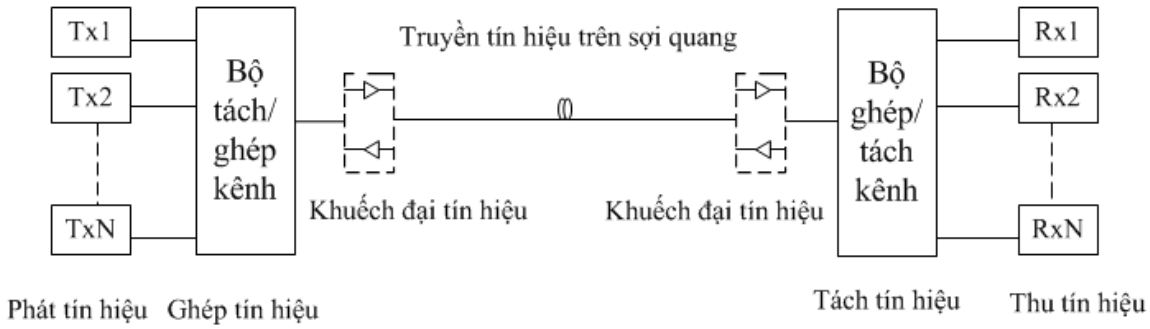
✓ *Tăng băng thông truyền trên sợi quang* : Số lần tương ứng số bước sóng được ghép vào để truyền trên một sợi quang.

✓ *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.

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 DCF theo chuẩn G.653 thì rất khó triển khai WDM vì xuất hiện hiện tượng trộn bốn bước sóng khá gay gắt.

1.2.2. Sơ đồ khối tổng quát hệ thống WDM



Hình 1.5: Sơ đồ chức năng hệ thống WDM [3].

✓ *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, Laser đa bước sóng ... 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 tần phải nằm trong giới hạn cho phép.

✓ *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.

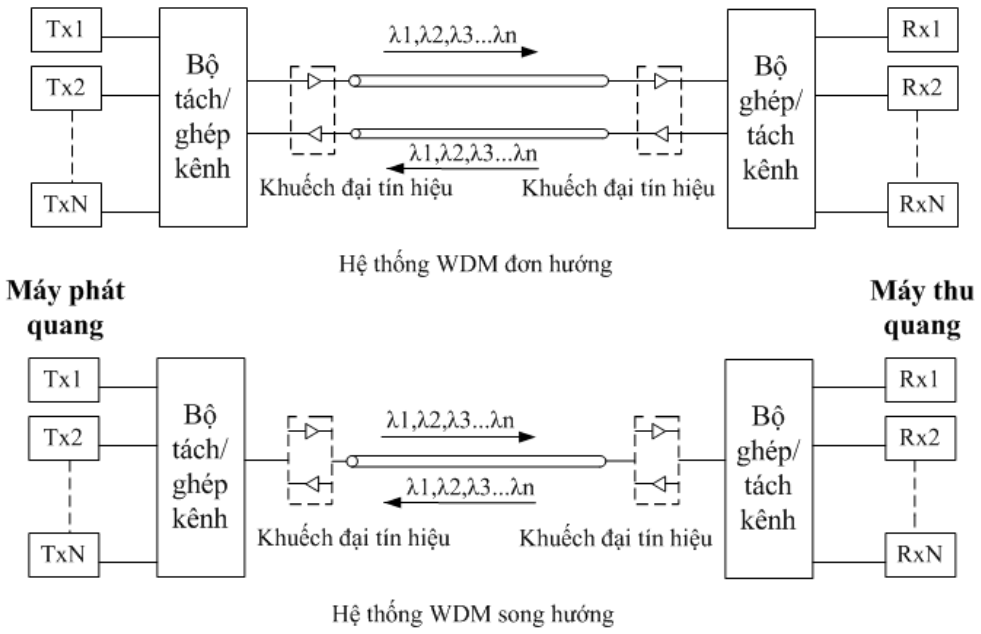
✓ *Truyền dẫn tín hiệu:* Quá trình truyền dẫn tín hiệu trong sợi quang chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố: suy hao sợi quang, tán sắc, các hiệu ứng phi tuyến, vấn đề liên quan đến khuếch đại tín hiệu ... Mỗi vấn đề kể trên đều phụ thuộc rất nhiều vào yếu tố sợi quang (loại sợi quang, chất lượng sợi...).

✓ *Khuếch đại tín hiệu:* Hệ thống WDM hiện tại chủ yếu sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA. 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.

1.2.3. Phân loại hệ thống WDM



Hình 1.6: Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng [3].

Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng như minh hoạ trên hình 1.6. 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 một sợi quang để có thể trao đổi thông tin giữa hai 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 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 ½ theo mỗi chiều nên ở hệ thống song hướng, các bộ khuyếch đại sẽ cho công suất quang ngõ ra lớn hơn so với ở hệ thống đơn hướng.

1.2.4. Các phần tử cơ bản trong WDM

a) Bộ phát quang

Các nguồn quang cơ bản sử dụng trong hệ thống thông tin cáp sợi quang có thể là Diode Laser (LD) hoặc Diode phát quang (LED)[3,10]. Trong đó laser khuếch đại ánh sáng nhờ bức xạ kích thích và hoạt động của laser dựa trên hai hiện

tượng chính đó là hiện tượng bức xạ kích thích và hiện tượng cộng hưởng của sóng ánh sáng khi lan truyền trong laser.

Tín hiệu quang phát ra từ LD hoặc LED có các tham số biến đổi tương ứng với biến đổi của tín hiệu điện vào. Tín hiệu điện vào có thể phát ở dạng số hoặc tương tự. Thiết bị phát quang sẽ thực hiện biến đổi tín hiệu điện vào thành tín hiệu quang tương ứng bằng cách biến đổi dòng vào qua các nguồn phát quang. Bước sóng ánh sáng của nguồn phát quang phụ thuộc chủ yếu vào vật liệu chế tạo phần tử phát. Ví dụ, GaalAs phát ra bức xạ vùng bước sóng 800 nm đến 900 nm, InGaAsP phát ra bức xạ ở vùng 1100 nm đến 1600 nm.

Sử dụng bộ điều biến ngoài để giảm chirp tần, tốc độ điều biến cao và tạo các định dạng tín hiệu quang khác nhau (NRZ, RZ, CS-RZ, DPSK …) và đảm bảo tín hiệu quang có độ rộng phổ hẹp tại bước sóng chính xác theo tiêu chuẩn. Một số yêu cầu đối với nguồn quang trong hệ thống ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM đó là:

✓ *Độ chính xác của bước sóng phát:* Đây là yêu cầu kiên quyết cho một hệ thống WDM hoạt động tốt. Nói chung, bước sóng đầu ra luôn bị dao động do các yếu tố khác nhau như nhiệt độ, dòng định thiên, độ già hoá linh kiện... Ngoài ra, để tránh xuyên nhiễu cũng như tạo điều kiện cho phía thu dễ dàng tách đúng bước sóng thì nhất thiết độ ổn định tần số phía phát phải thật cao.

✓ *Độ rộng đường phổ hẹp:* Độ rộng đường phổ được định nghĩa là độ rộng phổ của nguồn quang tính cho bước cắt 3 dB. Để có thể tăng nhiều kênh trên một dải tần cho trước, cộng với yêu cầu khoảng cách các kênh nhỏ cho nên độ rộng đường phổ càng hẹp càng tốt, nếu không xuyên nhiễu kênh lân cận xảy ra khiến lỗi bít tăng cao, hệ thống không đảm bảo chất lượng. Muốn đạt được điều này thì nguồn phát laser phải là nguồn đơn mode (như các loại laser hồi tiếp phân bố, laser hai khoang cộng hưởng, laser phản hồi phân bố).

✓ *Dòng ngưỡng thấp:* Điều này làm giảm bớt vấn đề lãng phí công suất trong việc kích thích laser cũng như giảm bớt được công suất nền không mang tin và tránh cho máy thu chịu ảnh hưởng của nhiễu nền (phát sinh do có công suất nền lớn).

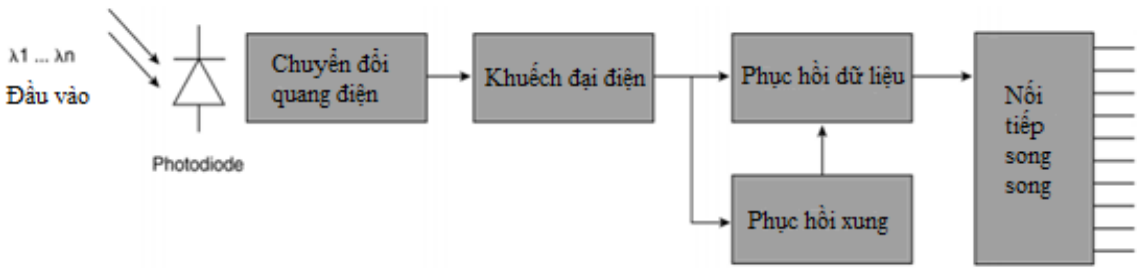
✓ *Khả năng điều chỉnh được bước sóng:* Để tận dụng toàn bộ băng tần sợi quang, nguồn quang phải có thể phát trên cả dải 100 nm. Hơn nữa, với hệ thống lựa kênh tự động càng cần khả năng có thể điều chỉnh được bước sóng.

✓ *Tính tuyến tính:* Đối với truyền thông quang, sự không tuyến tính của nguồn quang sẽ dẫn việc phát sinh các sóng hài cao hơn, tạo ra các xuyên nhiễu giữa các kênh.

✓ *Nhiễu thấp:* Có rất nhiều loại nhiễu laser bao gồm: nhiễu cạnh tranh mode, nhiễu pha,... Nhiễu thấp rất quan trọng để đạt được mức BER thấp trong truyền thông số, đảm bảo chất lượng dịch vụ tốt.

b) Bộ thu quang

Phần thu quang gồm các bộ tách sóng quang, kênh tuyến tính và kênh phục hồi. Nó tiếp nhận tín hiệu quang, tách lấy tín hiệu thu được từ phía phát, biến đổi thành tín hiệu điện theo yêu cầu cụ thể. Trong phần này thường sử dụng các photodiode PIN hoặc APD. Yêu cầu quan trọng nhất đối với bộ thu quang là công suất quang phải nhỏ nhất (độ nhạy quang) có thể thu được ở một tốc độ truyền dẫn số nào đó ứng với tỷ lệ lỗi bít (BER) cho phép. Hình 1.7 là sơ đồ khối của bộ thu quang trong hệ thống WDM.

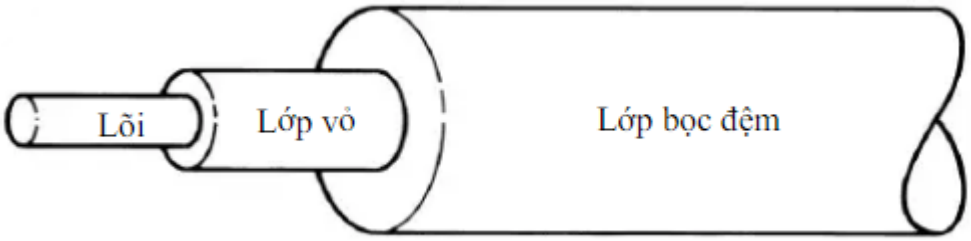


Hình 1.7: Sơ đồ khối bên thu [3].

c) Sợi quang

Cấu tạo sợi quang: Sợi quang là một ống dẫn sóng điện môi hoạt động tại tần số quang được ứng dụng hiện tượng phản xạ toàn phần, sợi quang được chế tạo cơ bản gồm có hai lớp, lớp thứ nhất trong cùng có dạng hình trụ tròn, có đường kính d = 2a, làm bằng thủy tinh có chiết suất n_1, được gọi là lớp lõi (core) sợi và lớp thứ

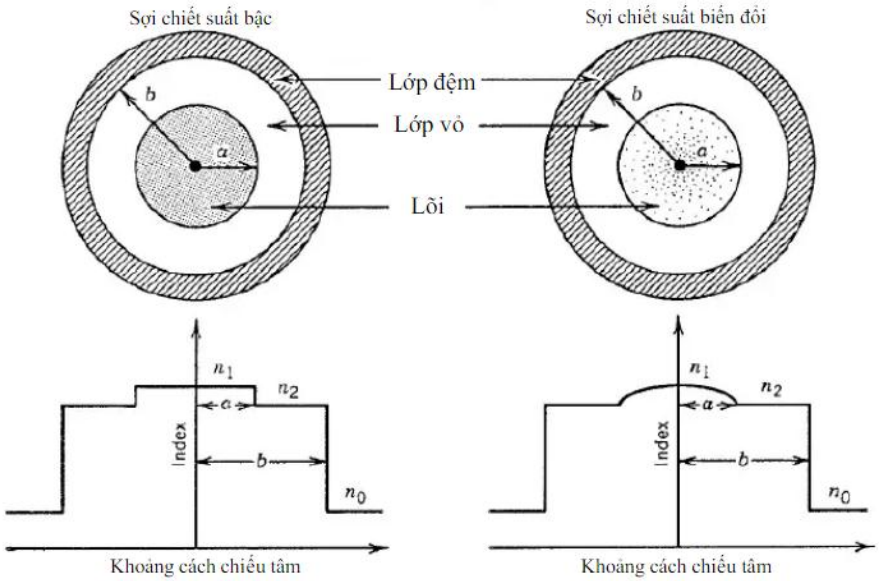
hai cũng có dạng hình trụ bao quanh lõi nên được gọi là lớp vỏ sợi bao bọc quanh lõi, có đường kính D = 2b, làm bằng thủy tinh hoặc plastic, có chiết suất n_2 ($n_2 < n_1$).



Hình 1.8 : Cấu trúc tổng quát sợi quang [3].

Trong hệ thống WDM truyền tín hiệu qua sợi quang có nhiều kiểu sợi quang khác nhau và có nhiều cách phân loại sợi quang. Nhìn chung các sợi quang có thể được phân loại dựa trên các yếu tố cơ bản như là:

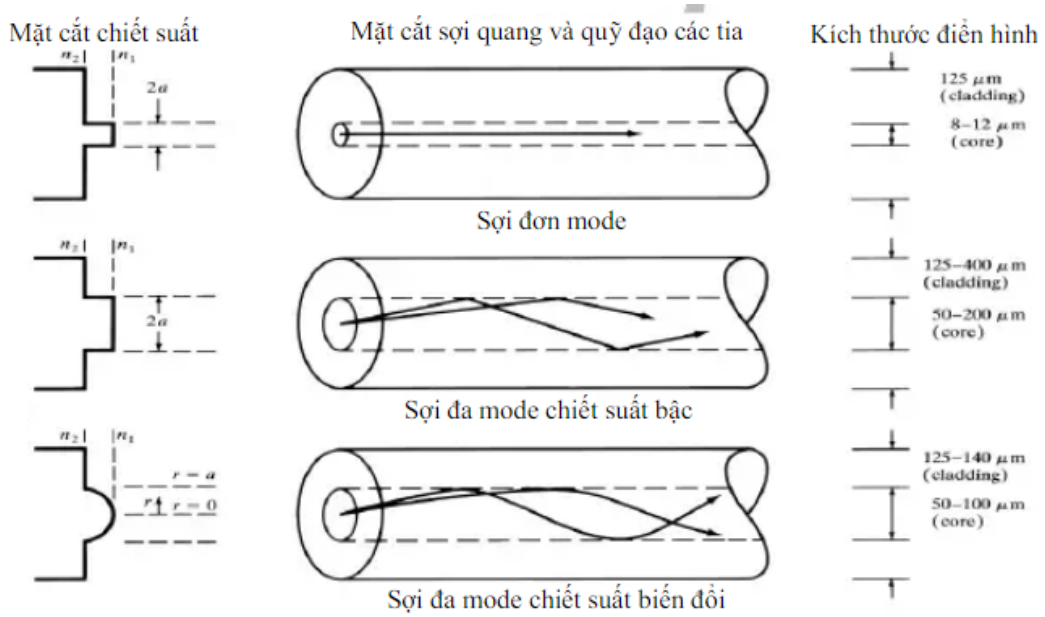
✓ Dựa vào sự biến đổi chiết suất trong lõi hay dạng mặt cắt chiết suất, sợi quang có thể được chia thành hai loại chính: sợi quang chiết suất bậc và sợi quang chiết suất biến đổi như mô tả trong hình 1.9.



Hình 1.9: Mặt cắt ngang và mặt cắt chiết suất của sợi chiết suất bậc và chiết suất biến đổi [3].

✓ Dựa vào số lượng mode truyền, các sợi quang có hai loại cơ bản đó là: sợi đa mode hỗ trợ nhiều mode truyền trong sợi và sợi đơn mode chỉ hỗ trợ duy nhất một

mode truyền cơ bản. Do sợi quang sử dụng trong viễn thông đều là các sợi thủy tinh nên dựa trên hai yếu tố mặt cắt chiết suất và số lượng mode, các sợi quang được phân thành ba loại sợi chính: sợi đa mode chiết suất bậc, sợi đa mode chiết suất biến đổi và sợi đơn mode được chỉ ra như trong hình 1.10.



Hình 1.10: Sợi đơn mode, sợi đa mode chiết suất bậc, sợi đa mode chiết suất biến đổi [3].

d) Bộ tách/ghép bước sóng (MUX/DEMUX)

Bộ ghép/ tách kênh bước sóng thường được mô tả theo những thông số sau:

✓ *Suy hao xen.*

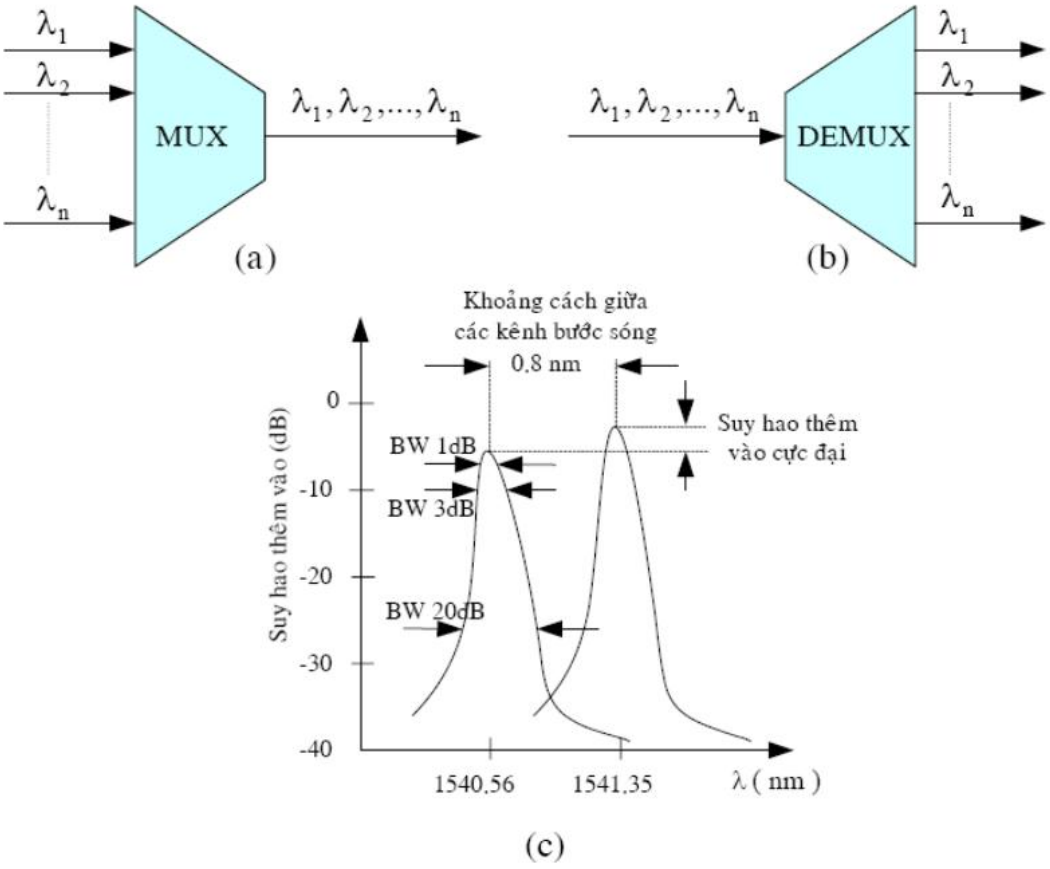
✓ *Số lượng kênh xử lý:* Là số lượng kênh bước sóng ở đầu vào và đầu ra của bộ ghép/tách kênh. Thông số này đặc trưng cho dung lượng của thiết bị.

✓ *Bước sóng trung tâm:* Các bước sóng trung tâm phải tuân theo chuẩn của ITU – T để đảm bảo vấn đề tương thích.

✓ *Băng thông:* Là độ rộng phổ của kênh bước sóng trên thực tế. Băng thông thường được tính là độ rộng của hàm truyền đạt công suất ở các mức đỉnh 1dB, 3 dB, 20dB.

✓ *Giá trị lớn nhất của suy hao xen:* Được tính là khoảng cách nhỏ nhất giữa đỉnh của hàm truyền đạt công suất của một kênh bước sóng nào đó so với mức IL =0 (dB).

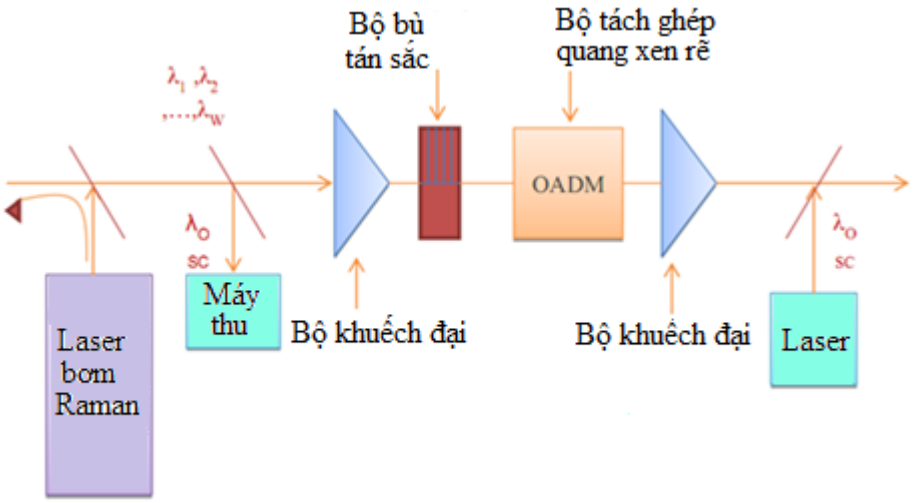
✓ *Độ suy hao chen giữa các kênh:* Được tính là hiệu của giá trị lớn nhất và nhỏ nhất suy hao xen vào giữa các kênh bước sóng.



Hình 1.11: a) sơ đồ khối bộ ghép kênh, b) Sơ đồ khối bộ tách kênh, c) Các thông số đặc trưng của bộ MUX/DEMUX [3].

e) Bộ khuếch đại quang

Trên thực tế hiện nay các tuyến thông tin tốc độ cao người ta sử dụng bộ khuếch đại quang làm các trạm lặp, chủ yếu là các bộ khuếch đại đường dây pha tạp Eribum (EDFA). Các bộ khuếch đại này có ưu điểm là không cần quá trình chuyển đổi O/E và E/O mà thực hiện khuếch đại trực tiếp tín hiệu quang.



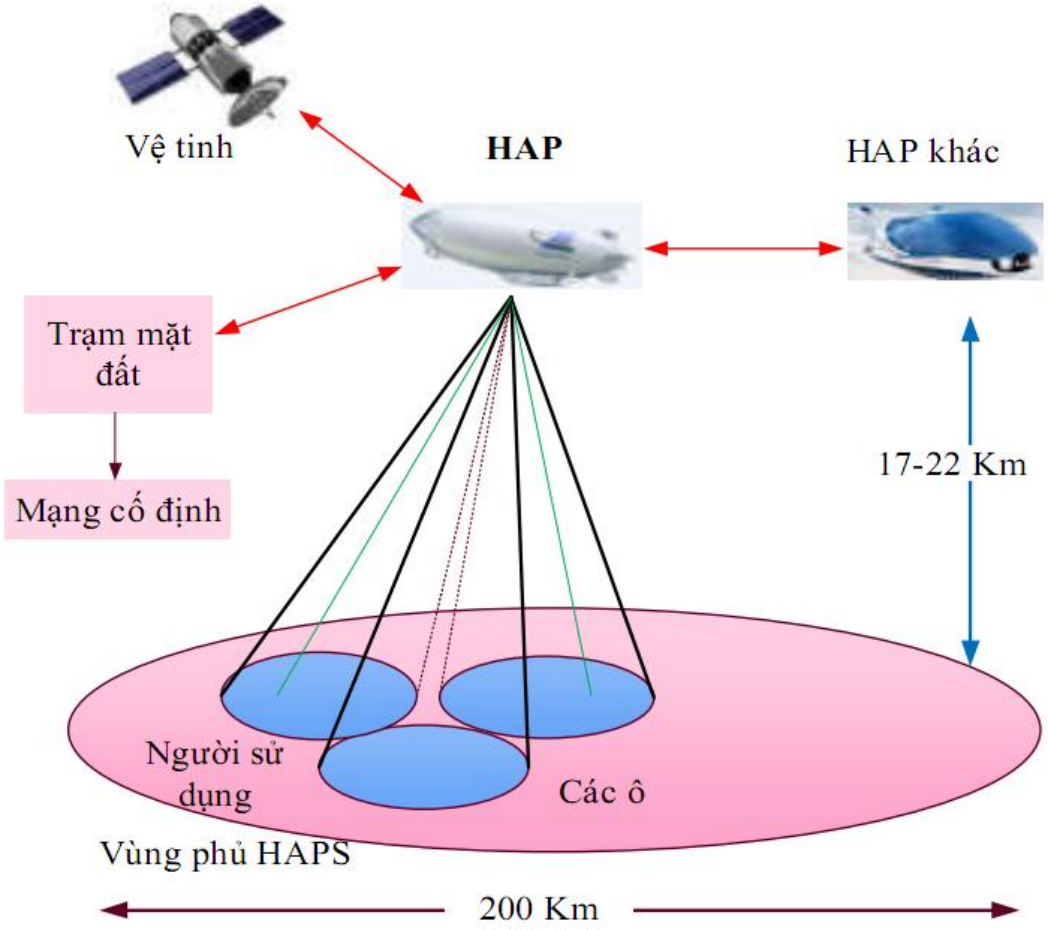
Hình 1.12: Khuếch đại quang OLA[3].

Lợi ích của việc sử dụng bộ khuếch đại quang làm tăng độ nhạy của bộ thu, nâng cao mức công suất phát, nâng cấp đơn giản bên cạnh đó bộ khuếch đại quang EDFA còn thay thế các bộ lặp đất tiền trong hệ thống bị giới hạn bởi suy hao cũng như độc lập về tốc độ và định dạng tín hiệu, khuếch đại tín hiệu đa kênh WDM đồng thời.

Đặc tính của một số bộ khuếch đại quang lý tưởng đó là: Nhiễu thấp, không nhạy cảm với phân cực, không gây xuyên kênh giữa các tín hiệu WDM cũng như suy hao ghép nối với sợi quang thấp. Ngoài ra, đặc tính của bộ khuếch đại quang lý tưởng làm cho độ rộng băng tần khuếch đại lớn với hệ số khuếch đại không đổi.

1.3. Hạ tầng truyền thông trên cao (HAP) và khả năng ứng dụng công nghệ FSO và WDM

Hạ tầng trên cao HAP là máy bay, phi thuyền hoặc khinh khí cầu nằm ở trên các tầng mây ở độ cao điển hình từ 17 đến 25 km, nơi các chùm tia laser ít chịu tác động của khí quyển hơn trên mặt đất. Như được mô tả trong hình 1.13 các liên kết quang giữa HAP, vệ tinh, và trạm mặt đất được sử dụng như các đường truyền backhaul băng rộng để truyền dữ liệu từ các cảm biến đặt trên HAP hoặc khi HAP làm việc như là một trạm chuyển tiếp dữ liệu [1].



Hình 1.13: Hệ thống HAP được triển khai ở độ cao 17 – 22 km[1].

HAP có những đặc điểm khác biệt so với các hệ thống mặt đất và vệ tinh chẳng hạn như khu vực phủ sóng lớn (3 -7 km), triển khai nhanh, tăng công suất linh hoạt thông qua việc xác định lại kích thước búp sóng, chi phí bảo trì thấp và có khả năng cung cấp đường truyền băng rộng. Do HAP được đặt cách xa vùng khí quyển, chúng cung cấp điều kiện kênh tốt hơn so với vệ tinh. Hơn nữa, HAP cung cấp tình trạng LOS tốt hơn ở hầu hết các vùng phủ sóng, do đó ít bị ảnh hưởng của che khuất hơn so với các hệ thống trên mặt đất. HAP có thể hoạt động như một trạm chuyển tiếp để chuyển tiếp dữ liệu quang dung lượng cao thông qua bầu khí quyển xuống mặt đất. Các liên kết backhaul quang qua HAP có khả năng kết nối với mạng lõi thông qua các trạm phát mặt đất. Trong trường hợp mạng HAP lớn hơn chiều dài tương quang vùng phủ sóng mây, có thể sử dụng phân tập trạm mặt

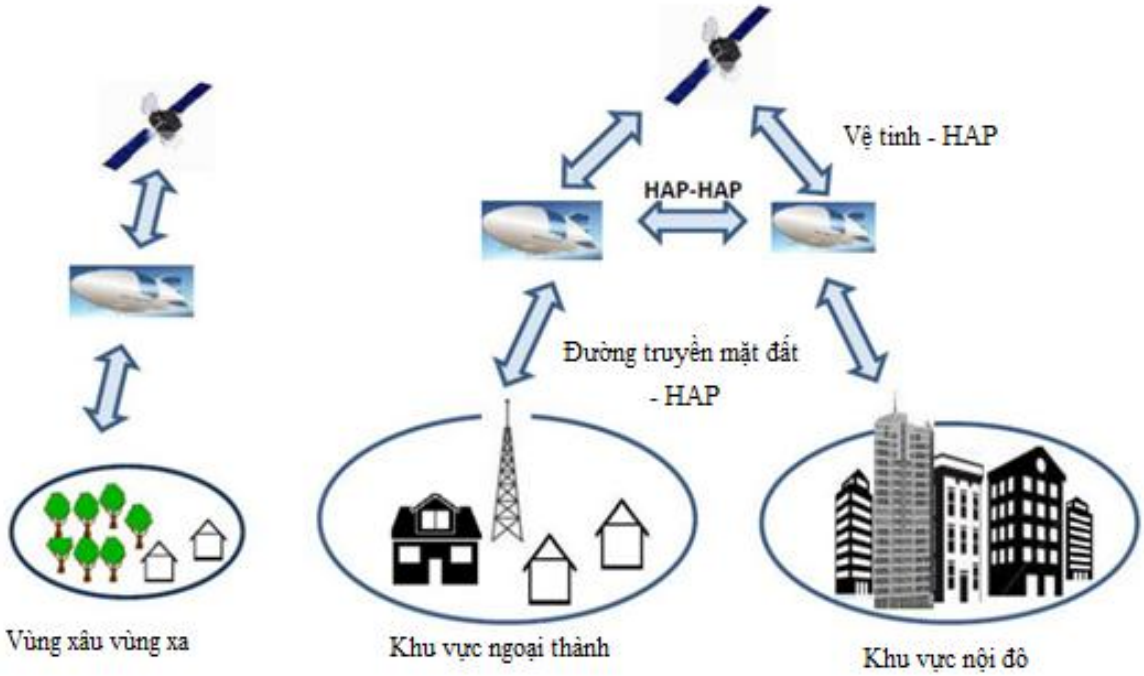
đất để nâng cao độ tin cậy của hệ thống. Một HAP với ăngten đa búp sóng có thể sử dụng thiết lập vùng phủ lớn các trạm mặt đất với hiệu quả tái sử dụng tần số cao.

Hơn nữa, sử dụng bộ tái tạo trên HAP có thể phân chia liên kết vệ tinh với mặt đất thành hai phần chính sau đó là:

- Liên kết vệ tinh - HAP có suy hao tương đương với suy hao không gian tự do.

- Liên kết HAP - mặt đất bị ảnh hưởng bởi suy hao khí quyển.

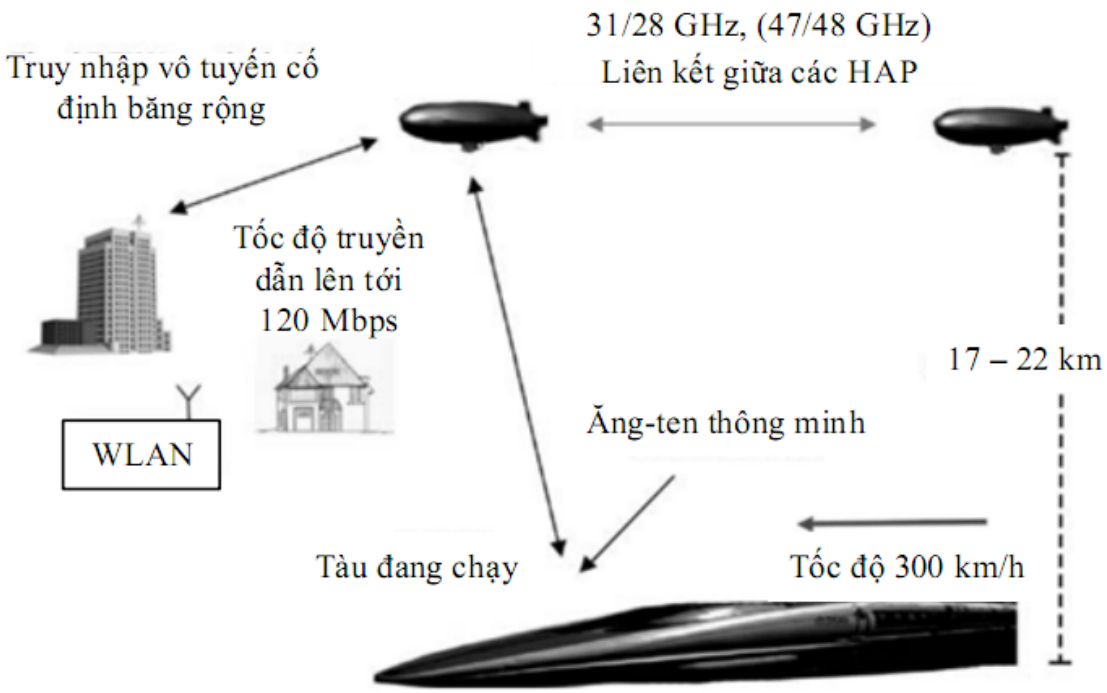
HAP có thể hoạt động như một hệ thống độc lập hoặc có thể được tích hợp với các hệ thống vệ tinh hoặc hệ mặt đất khác như minh họa trong hình 1.14 [2,4].



Hình 1.14: Các kiến trúc hệ thống HAP [4].

Hệ thống tích hợp vệ tinh – HAP - mặt đất cung cấp khả năng quảng bá và các dịch vụ băng thông rộng trên một diện tích bao phủ rộng hơn. Nó có thể được sử dụng để cung cấp các dịch vụ cho các khu vực ngoại ô với chi phí triển khai rất thấp. Nhiều tải trọng quang đặt trên mỗi HAP có thể tạo nên các bộ nhớ dung lượng lớp (kích thước lên tới Terabyte) lưu trữ dữ liệu thu thập được từ vệ tinh và chuyển nó tới trạm mặt đất bất kỳ lúc nào mà không bị hạn chế bởi thời gian nhìn thấy vệ tinh. HAP trong một hệ thống độc lập có thể được triển khai một cách kinh tế để

cung cấp dung lượng cao và phủ sóng rộng hơn tới các vùng nông thôn hoặc vùng sâu vùng xa. Đường truyền quang backhaul tốc độ cao sử dụng HAP đã được thực hiện như một phần của dự án "CAPANINA" do châu Âu tiến hành. Đây là tuyến truyền dẫn FSO đầu tiên từ tầng bình lưu. Trong thử nghiệm tải trọng tầng bình lưu này (STROPEX) thiết bị đầu cuối FSO được gắn ở độ cao khoảng 22 km và đường xuống với các tốc độ bit 270 Mbit/s, 622 Mbit/s và 1,25 Gbit/s đã được thực hiện (hình 1.15).

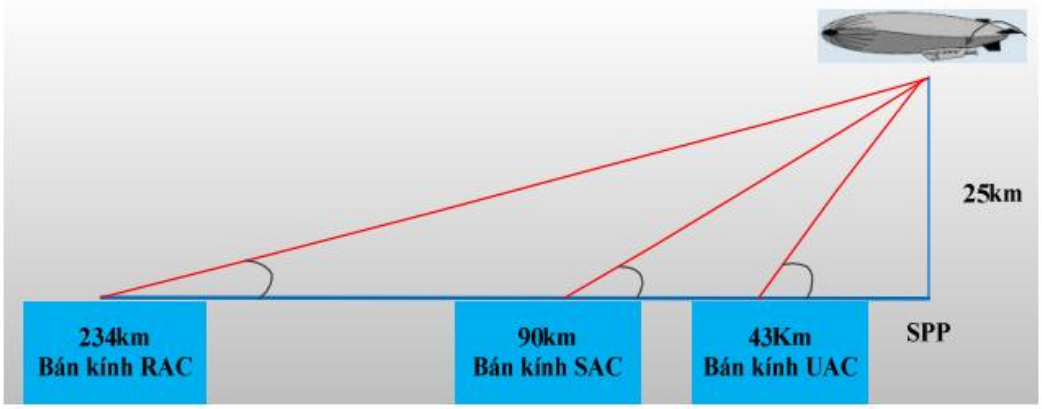


Hình 1.15: Giải pháp sử dụng hệ thống HAP cung cấp dịch vụ băng rộng trong dự án CAPANINA [4].

Với những lợi ích như tăng cường vùng phủ sóng, truyền tín hiệu trực tiếp (LOS), hỗ trợ Internet vạn vật, không yêu cầu cơ sở hạ tầng mặt đất …thì việc có thể ứng dụng và triển khai hệ thống HAP thành công trong thực tế cũng đặt ra những yêu cầu thách thức quan trọng đối với hệ thống HAP như vị trí thông tin tối ưu, thời gian bay, vấn đề bảo mật, can nhiễu, kết nối với hạ tầng viễn thông hiện có, năng lượng hoạt động...Trong đó, bất kỳ sự chuyển động và rung động nào của HAP đều có thể ảnh hưởng đến chất lượng đường truyền giữa HAP và thiết bị thu

phát trạm mặt đất.

Hơn nữa, do cự ly truyền dẫn tín hiệu giữa hệ thống HAP với thiết bị thu phát mặt đất ngắn hơn nhiều so với truyền thông vệ tinh nên mỗi vị trí của thiết bị thu phát mặt đất (thể hiện qua góc ngẩng: là góc được tạo bởi tia truyền trực tiếp giữa HAP và thiết bị thu phát mặt đất) cũng có những ảnh hưởng nhất định đến chất lượng kênh truyền. Do đó sẽ có những vị trí (góc ngẩng) mà quá trình thu phát tín hiệu được thực hiện trên các tia LOS hoặc tia truyền gián tiếp NLOS, làm cho đặc tính kênh truyền HAP cũng thay đổi và phụ thuộc vào góc ngẩng. Hơn nữa, theo góc ngẩng ITU – R cũng đã định nghĩa ba vùng phủ đối với hệ thống HAP là: vùng đô thị (UAC), vùng ngoại ô (SAC) và vùng nông thôn (RAC) (hình 1.16) và bảng 1.3, với h là độ cao của HAP so với mặt đất.



Hình 1.16: Bán kính vùng phủ của hệ thống HAP [4].

Bảng 1.3: Đặc tính bán kính vùng phủ của hệ thống HAP

Khu vực	**Góc ngẩng**	**Bán kính vùng phủ**	
		h = 21km	h = 25km
UAC	90 – 30	0 – 36	0 – 43
SAC	30 – 15	36 – 76,5	43 – 90,5
RAC	15 – 5	76,5 – 203	90,5 – 234

Do vậy khi thiết kế các hệ thống thông tin dựa trên HAP, điều cần thiết là phải đánh giá được những tác động của các tham số thiết kế như: Tỷ số tín hiệu trên tạp âm, phương thức điều chế, mức điều chế, tỷ lệ mã hóa, …đến chất lượng của hệ thống như tỷ số lỗi bít (BER), tỷ số lỗi khung (FER)...

1.4. Kết luận

Nội dung chương 1 đã giới thiệu khái quát về hệ thống truyền thông quang không dây FSO về lịch sử phát triển, cấu trúc hệ thống truyền thông quang không dây và cũng nêu lên tổng quát về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM , giới thiệu được sơ đồ khối hệ thống WDM và phân loại hệ thống WDM cũng như các phần từ cơ bản trong hệ thống WDM. Ngoài ra, nội dung chương 1 còn tập trung giới thiệu về hạ tầng truyền thông trên cao HAP và khả năng ứng dụng công nghệ FSO và WDM trong hạ tầng truyền thông trên cao.

CHƯƠNG II: GIẢI PHÁP KẾT HỢP KỸ THUẬT FSO VÀ WDM TRONG HAP

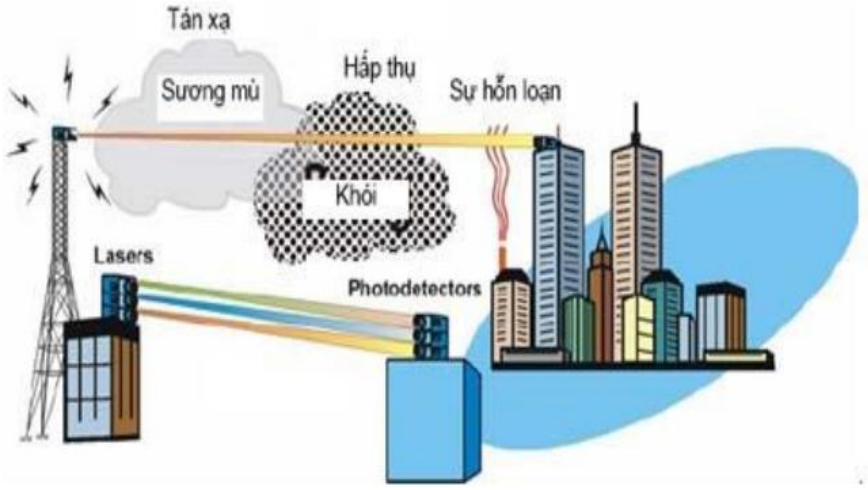
Tóm tắt: *Chương này tìm hiểu sâu thêm về hệ thống WDM – FSO cơ bản và giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP. Bên cạnh đó, nội dung chương 2 còn đề cập đến các tham số và yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống FSO cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hệ thống WDM. Ngoài ra, nội dung chương 2 còn phân tích hiệu năng hệ thống FSO trong HAP (như đường truyền FSO từ HAP đến mặt đất cũng như đường truyền từ HAP xuống mặt đất và đường truyền trong tầng bình lưu).*

2.1. Giới thiệu chung

Trong truyền dẫn FSO dẫn đến hiện tượng truyền dẫn ngắn do tổn đường truyền lớn do vậy việc sử dụng HAP như một phương thức hỗ trợ tăng khoảng cách truyền dẫn giữa hai trạm trong trường hợp truyền dẫn điểm điểm. Trong trường hợp WDM chỉ sử dụng đường truyền sợi quang thì tính linh hoạt của hệ thống bị giới hạn nhưng khi kết hợp hệ thống WDM và FSO thì khả năng tăng dung lượng và tăng băng thông của kênh truyền, mở rộng số lượng kênh truyền cũng như tăng tính linh hoạt của hệ thống. Mặt khác, hệ thống kết hợp WDM – FSO sử dụng HAP như một phương thức kết hợp mang tính hiệu quả với các ưu điểm nổi trội, hỗ trợ và tương thích lẫn nhau, tối ưu đường truyền.

Giới hạn cơ bản của FSO do môi trường truyền dẫn gây ra. Ngoài việc tuyết và mưa có thể làm cản trở đường truyền quang, FSO chịu ảnh hưởng mạnh bởi sương mù và sự nhiễu loạn của không khí. Những thách thức chính trong việc thiết kế các hệ thống FSO.

✓ *Sương mù:* là hơi nước được tập hợp từ những giọt nước nhỏ có đường kính vài trăm micro mét nhưng có thể làm thay đổi đặc tính truyền lan của ánh sáng hoặc ngăn cản hoàn toàn sự truyền lan của ánh sáng thông qua sự kết hợp của các hiện tượng hấp thụ, tán xạ và phản xạ. Điều này có thể dẫn đến sự suy giảm mật độ công suất của búp sóng phát, giảm cự ly hoạt động của tuyến FSO.



Hình 2.1: Các ảnh hưởng bên ngoài tới hệ thống FSO [1].

✓ *Sự nhấp nháy:* Là sự biến đổi về không gian của cường độ sáng gây ra bởi sự hỗn loạn không khí, gió và sự thay đổi nhiệt độ tạo ra những túi khí có mật độ thay đổi nhanh dẫn tới sự thay đổi nhanh chỉ số chiết xuất, đó chính là nguyên nhân gây ra sự hỗn loạn. Các túi khí này đóng vai trò như những thấu kính có đặc tính thay đổi theo thời gian và làm tỷ lệ lỗi bit của các hệ thống FSO tăng mạnh, đặc biệt là khi có ánh sáng mặt trời.

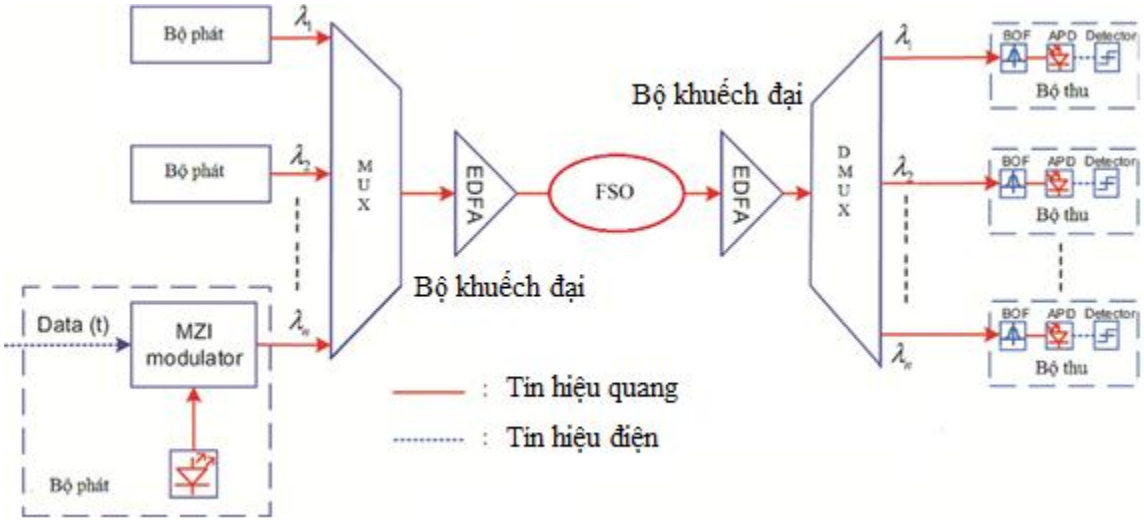
✓ *Sự trôi búp:* Xảy ra khi luồng gió hỗn loạn (gió xoáy) lớn hơn đường kính của búp sóng quang gây ra sự dịch chuyển chậm nhưng đáng kể của búp sóng quang. Sự trôi búp cũng có thể là kết quả của các hoạt động địa chấn gây ra sự dịch chuyển tương đối giữa vị trí của laser phát và bộ thu quang.

✓ *Giữ thẳng hướng phát - thu khi tòa nhà dao động*: Là rất quan trọng nhằm đảm bảo sự thành công của việc truyền tín hiệu. Đây thực sự là vấn đề phức tạp khi sử dụng búp sóng hẹp phân tán góc và tầm nhìn. Sự dẫn nhiệt của các phần khung tòa nhà hoặc những trận động đất yếu có thể gây ra sự lệch hướng. Trong khi sự dẫn nhiệt có đặc tính chu kỳ theo ngày hoặc mùa thì động đất lại không thể dự đoán được. Một nguyên nhân gây ra sự lệch hướng nữa là gió, đặc biệt khi các thiết bị thu phát được đặt trên các tòa nhà cao. Sự dao động của tòa nhà là một quá trình ngẫu nhiên làm ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống và gây ra lỗi.

✓ *Sự an toàn cho mắt:* Với sự gia tăng của các hệ thống truyền thông quang vô tuyến sử dụng các búp laser hướng về các vùng dân cư mật độ cao, sự an toàn cho mắt là vấn đề đáng được quan tâm. Những hệ thống FSO này phải an toàn đối với mắt, có nghĩa là chúng phải không gây nguy hiểm cho những người vô tình gặp phải các búp sóng quang.

2.2. Hệ thống WDM – FSO trong hạ tầng trên cao HAP

2.2.1. Mô hình hệ thống WDM – FSO cơ bản



Hình 2.2: Hệ thống WDM – FSO cơ bản.

Thành phần cơ bản của hệ thống WDM – FSO trong hình 2.2 gồm có các khối chức năng như:

✓ *Bộ phát quang:* Với một kênh đầu vào gồm có các dữ liệu vào, bộ điều biến MZI và nguồn quang phát. Trong đó, bộ điều biến MZI là bộ điều biến cường độ dựa trên nguyên lý giao thoa kế. Nó bao gồm hai bộ ghép 3dB được kết nối bởi hai ống dẫn sóng có chiều dài bằng nhau. Nguồn phát quang laser là tham số chỉ định, nhiễu pha laser được mô hình hóa bằng hàm mật độ.

✓ *Bộ thu quang:* Gồm Photodiode, chuyển tín hiệu quang thành tín hiệu điện và bộ lọc Besel thu tín hiệu có tần số thấp rồi qua bộ khôi phục tín hiệu 3R Regenerator và cuối cùng đưa vào bộ phân tích tỉ lệ lỗi bit BER.

✓ *Bộ tách/ ghép kênh quang:* Bốn tín hiệu đầu vào được lọc bởi một bộ lọc quang và được kết hợp trong một tín hiệu. Bộ lọc quang có thể là bộ lọc quang hình chữ nhật, Gaussian hoặc Bessel. Thực hiện để tách/ghép tín hiệu ở các bước sóng khác nhau (số lượng kênh xử lý, băng thông, độ suy hao xen giữa các kênh…).

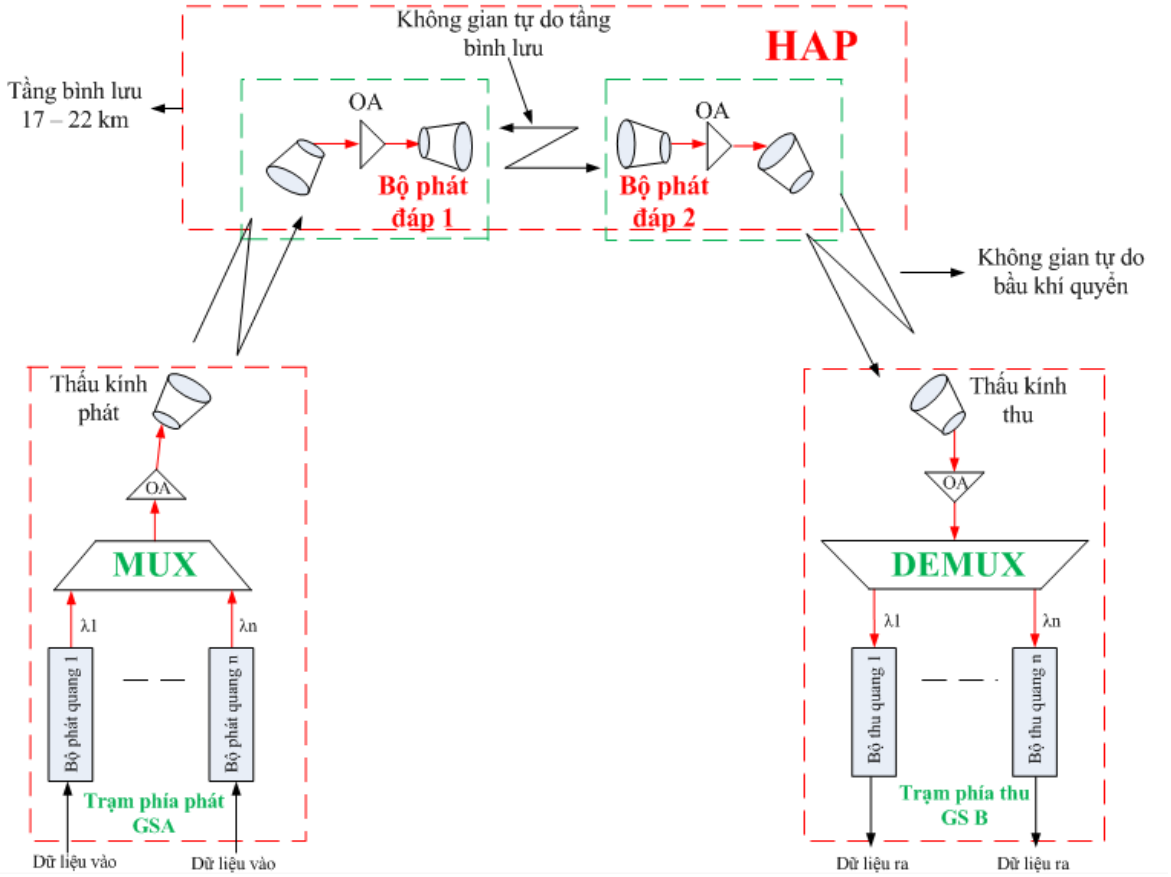
✓ *Bộ khuếch đại:* Thiết kế Bộ khuếch đại sợi quang trực tiếp lợi ích của việc sử dụng bộ khuếch đai quang làm tăng độ nhạy của bộ thu, nâng cao mức công suất phát, nâng cấp đơn giản bên cạnh đó bộ khuếch đại quang EDFA còn thay thế các bộ lặp đắt tiền trong hệ thống bị giới hạn bởi suy hao cũng như độc lập về tốc độ và định dạng tín hiệu.

✓ *Đường truyền trong không gian tự do FSO:* Thành phần FSO cho phép mô phỏng các liên kết quang trong không gian tự do. Thành phần này là một hệ thống con của thấu kính phát, không gian tự do và thấu kính thu. Xác định tham số khoảng cách lan truyền giữa thấu kính phát và thấu kính thu.

Tại phía phát tín hiệu điện đi qua bộ xử lý dữ liệu rồi được đưa tới nguồn quang. Phương thức điều chế được sử dụng phổ biến tại phía phát là điều chế cường độ (IM), trong đó dữ liệu nguồn sẽ được điều chế lên các bức xạ quang. Việc này được thực hiện thông qua việc thay đổi trực tiếp cường độ của nguồn quang tại phía phát hoặc thông qua bộ điều chế ngoài như bộ giao thoa kế Mach – Zehnder (MZI). Tại phía thu – đầu tiên, thấu kính thu thu thập và tập trung bức xạ quang đầu vào trên bộ tách sóng quang. Bộ lọc thông dải làm giảm lượng bức xạ nên các bộ tách sóng quang PIN hoặc APD chuyển đổi trường quang đến thành tín hiệu điện. Cuối cùng, mạch xử lý dữ liệu có chức năng khuếch đại, lọc và xử lý tín hiệu để đảm bảo tính chính xác cao của dữ liệu được khôi phục.

2.2.2. Giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP

Giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP như được mô tả như hình 2.3 trên gồm có các thành phần chính sau: Bộ phát quang, bộ tách/ghép kênh quang (MUX/DEMUX) ngoài ra, hệ thống còn có bộ khuếch đại quang trực tiếp và các thấu kính thu phát được truyền trong không gian tự do (FSO).



Hình 2.3: Giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP.

Từ trạm mặt đất phía phát gồm có N bộ phát kênh tương ứng có n bước sóng được đưa tới bộ ghép kênh quang(MUX) tới thấu kính phát để truyền lên trạm HAP. Tại trạm HAP có một thấu kính thu để thu tín hiệu từ trạm mặt đất lên HAP và được đưa qua bộ khuếch đại quang trực tiếp để khuếch đại tín hiệu (bộ khuếch đại công suất tại phía thu trên trạm HAP). Trên HAP là đường truyền FSO từ Bộ phát đáp 1 đến bộ phát đáp n trong tầng bình lưu (17 – 22km) ở môi trường chân không hệ thống lý tưởng và luôn ổn định nên hệ thống được coi như là tuyến đường truyền FSO với độ suy hao không đáng kể.

Đường truyền từ trạm HAP đến trạm mặt đất phía thu, tại HAP thấu kính thu trên HAP được coi là thấu kính phát của đường truyền từ HAP xuống mặt đất. Tín hiệu thu được được đi qua bộ khuếch đại quang trực tiếp (bộ tiền khuếch đại công suất) để khuếch đại tín hiệu trước khi truyền xuống mặt đất. Tại trạm mặt đất phía phát có thấu kính thu để thu tín hiệu được truyền từ HAP xuống trước khi cho đi

qua bộ khuếch đại quang tín hiệu (bộ khuếch đại công suất) để đưa vào bộ tách kênh quang tín hiệu (DEMUX).

2.3. Các đặc tính kênh truyền của hệ thống FSO và WDM

2.3.1. Yếu tố ảnh hưởng đến đường truyền FSO

Bầu khí quyển của trái đất trải dài khoảng 700 km phía trên bề mặt trái đất và bao gồm nhiều lớp khác biệt. Mật độ khí quyển được tìm thấy trong vòng 20 km thấp nhất vẫn ảnh hưởng đến liên kết truyền thông của HAP. Khi một búp laser lan truyền qua môi trường nhiễu loạn, giống như khí quyển, người ta quan sát thấy sự hấp thụ, tán xạ, mở rộng chùm búp và trôi búp, sự nhấp nháy, và méo pha. Những hiện tượng này dẫn đến tổn thất công suất, ba hiện tượng sau xảy sự thăng giáng cường độ, tức là fading ở máy thu. Fading có thể dẫn đến mất kết nối trong một khoảng thời gian nhất định.

a) Hấp thụ và tán xạ

Sự hấp thụ thể hiện sự phụ thuộc mạnh vào bước sóng [3], Trong thực tế, chỉ có các cửa sổ khí quyển, nơi sự suy hao là tối thiểu, thích hợp cho FSO. Các bước truyền thông laser điển hình là 1,064 μm và 1,55 μm, cũng như khoảng cách giữa 10 μm và 12 μm rơi vào các cửa sổ truyền dẫn tốt. Tán xạ không khí do các hạt có kích thước phân tử được gọi là tán xạ Rayleigh. Nó chiếm ưu thế trong điều kiện bầu trời trong và tỷ lệ thuận với λ^{-4}. Đối với các hạt lớn hơn so với bước sóng, tán xạ Mie xảy ra mà không có sự phụ thuộc mạnh vào λ.

Khi truyền tín hiệu quang dọc theo đường thẳng đứng từ mặt đất qua bầu khí quyển, tổn hao khí quyển a_A khoảng 1 - 2 dB sẽ xảy ra với bầu trời trong, ở điểm cao nhất tại λ = 1550 nm do sự hấp thụ và tán xạ. Nếu máy phát ở vị trí HAP ở chiều cao 20 km, giá trị này sẽ giảm xuống còn 0,2 dB [4], Sự biến thiên của suy hao khí quyển với góc zenit ζ tức là góc giữa đường thẳng đứng (hình chiếu của điểm cao nhất trên mặt đất) và đường tầm nhìn thẳng (LOS) giữa thấu kính phát và thấu kính thu, có thể được xấp xỉ như sau [2, 8]:

$$aA(\zeta) = a_A(0)\sec(\zeta) \quad \forall\, 0 \le \zeta < 70^0 \tag{2.1}$$

Giá trị tổn hao từ 0,2 đến 0,8 dB cho các tuyến vệ tinh - HAP không chiếm tỉ trọng đáng kể trong quỹ đường truyền. Trong các tuyến truyền dẫn khí quyển cự ly dài, ảnh hưởng chủ yếu bởi hoạt động của các núi lửa, tuy nhiên sự kiện này hiếm xảy ra và không làm giới hạn khả năng của các tuyến truyền dẫn quang HAP - HAP.

Khi một bức xạ quang đi qua bầu khí quyển, một số photon bị hấp thụ do các thành phần như hơi nước, khí CO2, sương mù, tầng Ozon ..., và năng lượng chuyển thành nhiệt năng. Trong khi đó, các photon khác đi qua bầu khí quyển không mất mát năng lượng nhưng hướng truyền lan ban đầu của chúng bị thay đổi (tán xạ). Mô hình lan truyền của một trường quang qua bầu khí quyển được mô tả bởi định luật Beer - Lambert và là mô hình được sử dụng rất phổ biến.

Sự suy hao của tín hiệu trong bầu khí quyển là hệ quả của quá trình hấp thụ và tán xạ. Nồng độ của vật chất trong khí quyển gây ra suy hao tín hiệu khác nhau theo không gian và thời gian, và sẽ phụ thuộc vào điều kiện thời tiết của từng vùng. Với một tuyến FSO trên mặt đất, cường độ tín hiệu thu được tại khoảng cách *L* từ bộ phát có quan hệ với cường độ tín hiệu phát theo quy luật Beer - Lambert như sau:

$$h_a^l = \frac{P_R}{P_T} = exp[-\gamma(\lambda).L] \tag{2.2}$$

Trong đó $\gamma(\lambda)$ (tính theo đơn vị m^{-1}) là hệ số suy hao và h_a^l là suy hao tổng tại bước sóng λ. Suy hao của tín hiệu quang trong khí quyển là do sự hiện diện của các phần tử khí có trong khí quyển và hơi nước. Hệ số suy hao là tổng của các hệ số hấp thụ và tán xạ từ hơi nước và các phần tử khí trong khí quyển, được tính như sau:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \tag{2.3}$$

Với: $\alpha_m(\lambda)$: Hệ số hấp thụ do hơi nước trong khí quyển.

$\alpha_a(\lambda)$: hệ số hấp thụ do các phần tử khí trong khí quyển.

$\beta_m(\lambda)$: hệ số tán xạ do hơi nước.

$\beta_a(\lambda)$: hệ số tán xạ do các phần tử khí.

Hấp thụ: Xảy ra khi có sự tương tác giữa các photon và các phần tử trong không

khí trong quá trình truyền lan. Một số photon bị hấp thụ và năng lượng của chúng biến thành nhiệt. Hệ số hấp thụ phụ thuộc rất nhiều vào các loại khí quyển và mật độ của chúng. Sự hấp thụ phụ thuộc bước sóng và do đó có tính chọn lọc. Điều này dẫn tới bầu khí quyển có các vùng trong suốt dải bước sóng có độ hấp thụ tối thiểu được xem như là cửa sổ truyền. Các bước sóng sử dụng trong FSO về cơ bản được chọn để trùng với các cửa sổ truyền lan trong không khí, kết quả là hệ số suy hao bị chi phối chủ yếu bởi sự tán xạ do hơi nước, do đó có thể coi $\gamma(\lambda) \cong \beta_a(\lambda)$.

Tán xạ: Là kết quả của việc phân bố lại góc của trường quang khi có và không có sự thay đổi bước sóng. Ảnh hưởng của tán xạ phụ thuộc vào bán kính r_m của các hạt (sương mù, hơi nước) gặp phải trong quá trình truyền lan. Một cách mô tả hiện tượng này là xét tham số kích cỡ $x_0 = 2\pi r_m/\lambda$. Nếu $x_0 << 1$ thì tán xạ là tán xạ Rayleigh, nếu $x_0 \cong 1$ là tán xạ Mie và nếu $x_0 >> 1$ thì tán xạ có thể thuộc loại khác (quang hình học). Các loại tán xạ đối với các hạt khác nhau có mặt trong bầu khí quyển được tóm tắt trong bảng sau:

Bảng 2.1: Bán kính và các loại tán xạ của các hạt điển hình có trong không khí tại λ = 850 nm [2].

Kiểu	Bán kính (μm)	Kích cỡ tham số x_o	Quá trình tán xạ
Phần tử khí	0,0001	0,00074	Rayleigh
Hạt bụi	0,01 - 1	0,074 - 7,4	Rayleigh - Mie
Hạt sương	1 - 20	7,4 - 147,8	Mie - hình học
Mưa	100 - 10000	740 - 74.000	Hình học
Tuyết	1000 - 5000	7400 - 37.000	Hình học
Mưa đá	5000 - 50000	37.000 - 370.000	Hình học

Kích thước hạt sương tương đối lớn so với dải bước sóng sử dụng trong FSO. Do đó, có thể coi sương mù là nguyên nhân chính gây tán xạ photon và nó góp phần vào sự suy giảm công suất quang. Tán xạ Mie sẽ được mô tả dựa trên các công thức thực nghiệm theo dải tầm nhìn *V* (tính theo đơn vị mét). Dải tầm nhìn là khoảng cách mà một chùm sáng song song đi qua trong bầu khí quyển cho đến khi

cường độ của nó giảm 2% so với giá trị ban đầu. Tầm nhìn được đo bằng một dụng cụ gọi là thiết bị đo truyền dẫn. Mô hình thực nghiệm phổ biến cho tán xạ Mie được cho bởi công thức (2.4):

$$\beta_a(\lambda) = \frac{3{,}91}{V}\left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-\delta} \tag{2.4}$$

Trong đó V *là* dải tầm nhìn (tính theo mét) và δ được biểu diễn như sau:

Mô hình Kim

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V < 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases}$$

Mô hình Kruse

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.585V^{1/3} & V < 6 \end{cases} \tag{2.5}$$

Bảng 2.2: Dưới đây đưa ra giá trị của dải tầm nhìn dưới các điều kiện thời tiết khác nhau.

Điều kiện thời tiết	Dải tầm nhìn (m)
Sương mù dày đặc	200
Sương mù trung bình	500
Sương mù nhẹ	770 - 1.000
Mưa lớn (25mm/h)	1.900 - 2.000
Mưa trung bình (12,5mm/h)	2.800 - 40.000
Khô ráo/Mưa bụi (0,25mm/h)	18.000 - 20.000
Rất khô ráo	23.000 - 50.000

Gần đây, trong nghiên cứu của Al Naboulsi đã đưa ra công thức tính suy hao tầng bình lưu và suy hao bức xạ sương mù trong dải bước sóng 690 - 1550 nm và dải tầm nhìn trong dải 50 - 1000 m như sau:

$$\alpha_{\text{Advection}}(\lambda) = \frac{0{,}11478\lambda + 3{,}8367}{V} \tag{2.6}$$

$$\alpha_{\text{Radation}}(\lambda) = \frac{0{,}18126\lambda^2 + 3{,}7502}{V} \tag{2.7}$$

Trong đó λ là bước sóng tính theo nm và tầm nhìn V tính theo mét. Tổn hao công suất do mưa và tuyết là thấp so với do tán xạ Mie.

Suy hao kênh truyền không khí của hệ thống FSO chủ yếu gây ra bởi khói bụi, sương mù và cũng phụ thuộc vào mưa. Suy hao tổng sẽ là sự kết hợp của suy hao môi trường không khí và suy hao hình học. Suy hao tổng của hệ thống FSO được cho bởi công thức:

$$\frac{P_r}{T_t} = \frac{d_2^2}{(d_1 + (\theta L))^2} \text{x } \exp(-\beta L) \quad (2.8)$$

Trong đó: P_t là công suất phát (mW), P_r là công suất thu (mW), θ là góc phân kỳ búp sóng (mrad), β là hệ số suy hao (1/km), L là khoảng cách quãng đường truyền dẫn.

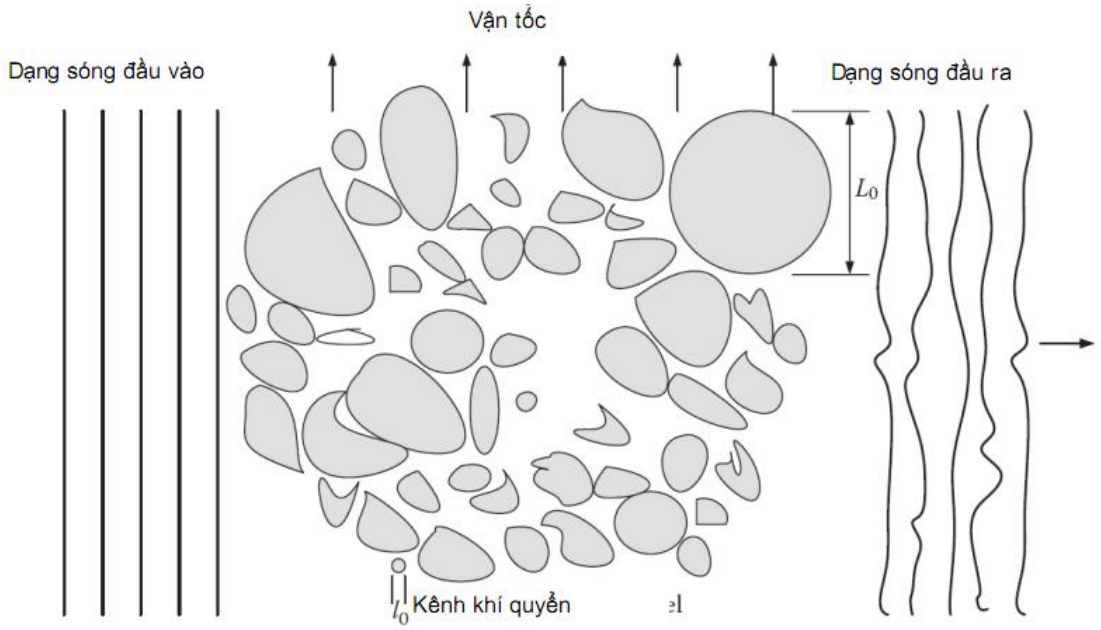
b) Sự mở rộng búp

Nhiễu loạn khí quyển gây ra sự mở rộng búp lớn hơn sự phân kỳ giới hạn bởi tán xạ θ_{DL}, do đó dẫn đến góc phân kỳ hiệu dụng θ_{eff} và làm giảm công suất thu trung bình theo hệ số $(\theta_{DL}/\theta_{eff})^2$. Nếu nhiễu loạn yếu và tương đối xa nguồn phát, v.d. trong đường xuống vệ tinh - tới HAP, kích thước búp hiệu dụng tại máy thu gần như bằng kích thước vùng tán xạ hiệu dụng. Do đó, tổn hao do mở rộng búp có thể bỏ qua. Với đường lên, kích thước của các phân tử nhiễu loạn, xuất hiện ngay trước máy phát, tương đối lớn so với đường kính búp, tổn hao mở rộng búp trung bình trong dải, ví dụ với 3 dB trong kịch bản mặt đất - tới vệ tinh cho tới 0,03 dB với tuyến đường lên từ HAP - tới vệ tinh.

c) Fadinh do nhiễu loạn

Bức xạ mặt trời bị hấp thụ bởi bề mặt Trái đất làm cho không khí xung quanh bề mặt trái đất nóng hơn so với không khí tại những điểm cao hơn (so với mực nước biển). Lớp khí nóng này trở nên mỏng đi và bốc lên cao để hòa trộn một cách hỗn loạn với các vùng không khí lạnh hơn ở xung quanh, làm cho nhiệt độ không khí thay đổi một cách ngẫu nhiên. Sự không đồng nhất (gây ra nhiễu loạn không khí) là do các ô nhỏ rời rạc, hoặc các xoáy lốc với nhiệt độ khác nhau, hoạt

động như những lăng kính khúc xạ có các kích cỡ và chỉ số khúc xạ khác nhau. Sự tương tác giữa búp sóng quang và môi trường nhiễu loạn dẫn tới kết quả là pha và biên độ của trường quang mang thông tin thay đổi một cách ngẫu nhiên, làm cho hiệu năng của liên kết FSO bị suy giảm. Nhiễu loạn khí quyển được phân loại theo các mô hình phụ thuộc vào độ lớn của sự thay đổi chỉ số khúc xạ và sự không đồng nhất. Các mô hình này là một hàm của khoảng cách truyền dẫn của bức xạ quang qua môi trường khí quyển và được phân loại theo các mức độ yếu, trung bình và mạnh.



Hình 2.4: Kênh khí quyển với các xoáy lốc hỗn loạn.

Nhiễu loạn không khí dẫn tới sự biến đổi ngẫu nhiên của chỉ số khúc xạ khí quyển, *n*, dọc theo tuyến đường truyền dẫn của bức xạ quang qua môi trường khí quyển. Sự biến đổi chỉ số khúc xạ có nguyên nhân trực tiếp là sự biến đổi ngẫu nhiên của nhiệt độ khí quyển.

Những sự thay đổi ngẫu nhiên về nhiệt độ là một hàm của áp suất khí quyển, độ cao so với mặt nước biển, và tốc độ gió. Mức độ nhỏ nhất và lớn nhất của các xoáy lốc trong khí quyển, tương ứng được gọi là kích thước cỡ nhỏ *lo* và kích thước cỡ lớn *Lo* của sự nhiễu loạn, *lo* thường nằm trong khoảng một vài milimet trong khi *Lo* có thể lên tới vài mét, Các xoáy lốc yếu dạng thấu kính được mô tả như trong hình 2.4, gây ra tác động xuyên nhiễu ngẫu nhiên giữa các vùng khác

nhau của búp sóng truyền dẫn làm cho dạng sóng bị biến dạng.

Trong những nỗ lực để mô hình hóa kênh khí quyển nhiễu loạn, "giả thuyết Taylor" đã được chấp nhận rộng rãi. Giả thuyết này cho rằng các xoáy lốc hỗn loạn bị cố định (hay đóng băng) và chỉ có thể di chuyển trong dạng đóng băng với các thành phần ngang theo chiều gió. Điều này có nghĩa là các thay đổi theo thời gian trong mô hình búp sóng quang hay các đặc tính thông số của nó được gây ra bởi thành phần của gió, và thành phần này trực giao với hướng lan truyền của búp sóng quang. Ngoài ra, thời gian cố kết, τ_0 của khí quyển nhiễu loạn được đo đạc nằm trong khoảng vài miligiây. Giá trị này rất lớn nếu so sánh với khoảng thời gian của một ký hiệu dữ liệu điển hình, do đó kênh khí quyển nhiễu loạn có thể được mô tả như một *'kênh pha-đinh chậm'* bởi vì sự nhiễu loạn của kênh không thay đổi trong khoảng thời gian của một ký hiệu dữ liệu.

Mối quan hệ giữa nhiệt độ không khí và chỉ số khúc xạ được xác định bởi (2.9) trong khi đối với hầu hết các ứng dụng kỹ thuật, tốc độ thay đổi của chỉ số khúc xạ theo nhiệt độ được xác định bởi công thức (2.10).

$$n=1+77,6\left(1+7,52.10^{-3}\lambda^{-2}\right).\frac{P}{T_e}.\ 10^{-6} \tag{2.9}$$

$$-\frac{d_n}{dT_e}=7,8.10^{-5}.\frac{P}{T_e^2} \tag{2.10}$$

Với P (mbar) là áp suất khí quyển, T_e nhiệt độ (độ Kenvin), λ bước sóng (μm). Ở độ cao gần mực nước biển, $-\frac{d_n}{dT_e}\cong 10^{-6}.K^{-1}$. Trong công thức (2.8) không tính tác động của độ ẩm không khí đến sự thay đổi của chiết suất vì ảnh hưởng này rất nhỏ ở các bước sóng của ánh sáng.

Sự phụ thuộc của chỉ số khúc xạ vào vị trí và thời gian $n(r,t)$ được xác định là tổng của giá trị chỉ số khúc xạ không gian tự do n_0(không có nhiễu loạn) và thành phần biến đổi ngẫu nhiên do nhiễu loạn $m(r,t)$:

$$n(r,t) = n_0+n_1(r,t) \tag{2.11}$$

Theo giả thuyết Taylor, sự thay đổi theo thời gian của chỉ số khúc xạ chủ

yếu là do thành phần ngang của gió, nên thành phần biến đổi ngẫu nhiên trong công thức (2.11) được xác định theo (2.12):

$$n_1(r,t)= n_1(r-vt) \tag{2.12}$$

Với V là vận tốc gió vuông góc với hướng truyền lan.

Trong khí quyển nhiễu loạn, một thông số quan trọng để đặc tính hóa lượng thay đổi của chỉ số khúc xạ là tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ, C^2_n được giới thiệu bởi Kolmogorov, Giá trị của C^2_n thay đổi theo độ cao so với mặt nước biển, và có một mô hình thông dụng dùng để mô tả giá trị này, đó là mô hình Hufnagel-Valley (H-V) được cho theo công thức (2.13):

$$C_n^2(h')=0,00549\left(\frac{V}{27}\right)^2 (10^{-5}.h')^{10} exp\left(-\frac{h'}{1000}\right) + \\ +2,7.10^{-6} exp\left(-\frac{h'}{1500}\right)+\hat{A} exp\left(-\frac{h'}{100}\right) \tag{2.13}$$

Trong đó $\hat{A}$ là giá trị danh định của $C^2_n(0)$ tại mặt đất (tính theo đơn vị $m^{-2/3}$), h là độ cao so với mặt nước biển (tính theo đơn vị mét) và V là vận tốc gió (tính theo đơn vị m/s). Giá trị của tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ thay đổi theo độ cao so với mặt nước biển, nhưng đối với trường quang lan truyền theo chiều ngang tham số này thường được giả định là hằng số. Giá trị điển hình của c nằm trong khoảng từ 10^{-12} $m^{-2/3}$ đối với nhiễu loạn mạnh cho tới 10^{-17} $m^{-2/3}$ đối với nhiễu loạn yếu, và giá trị trung bình vào khoảng 10^{-15} $m^{-2/3}$.

Một tham số tương tự đặc trưng cho sự thay đổi nhiệt độ là tham số cấu trúc nhiệt độ (C^2_n), nó được xác định thông qua C^2_n bởi công thức (2.14):

$$C_n^2=(\frac{d_n}{dT_e})^2 C_T^2 \tag{2.14}$$

Trong miền tần số, mật độ phổ công suất của sự thay đổi chỉ số khúc xạ được xác định như sau:

$$\Phi_n(k_s)=0,033C_n^2 k_s^{-\frac{11}{3}};\ \frac{2\pi}{L_0} \ll k_s \ll \frac{2\pi}{l_0} \tag{2.15}$$

Với k_s là hệ số sóng. Tuy nhiên, với một giá trị lớn của k_s công thức này sẽ bị thay đổi.

Để xác định công thức cho các thuộc tính thống kê, cụ thể là hàm mật độ xác suất (*pdf)* và phương sai của búp sóng quang truyền qua khí quyển nhiễu loạn, ta giả thiết như sau:

- Khí quyển là kênh không tiêu hao năng lượng đối với các sóng lan truyền. Giả thiết này là do hấp thụ sóng bởi bầu khí quyển và bức xạ nhiệt là không đáng kể.

- Quá trình tán xạ bởi các xoáy nhiễu loạn không gây ra suy hao năng lượng búp sóng quang. Do đó, năng lượng trung bình có sự hiện diện của nhiễu loạn được giả sử là bằng năng lượng trung bình khi không có nhiễu loạn khí quyển.

2.3.2. Yếu tố ảnh hưởng đến hệ thống WDM

a) Suy hao xen: Được xác định là lượng công suất tổn hao trong tuyến truyền dẫn quang do các điểm ghép nối các thiết bị WDM với sợi và suy hao do bản thân các thiết bị ghép gây ra. Vì vậy, trong thực tế thiết kế phải tính cho vài dB ở mỗi đầu. Suy hao xen được biểu diễn tương tự như suy hao đối với các bộ tách/ghép hỗn hợp (MUX/DMUX) nhưng cần lưu ý trong WDM là xét cho một bước sóng đặc trưng. Suy hao xen được xác định qua công thức sau:

Đối với MUX $$L_i = -10\log\frac{O(\lambda_i)}{I_i(\lambda_i)}[dB] \quad (2.16)$$

Đối với DEMUX $$L_i = -10\log\frac{O_i(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}[dB] \quad (2.17)$$

Trong đó: L_i là suy hao tại bước sóng λ_i khi thiết bị được ghép xen vào tuyến truyền dẫn.

$I(\lambda_i)$, $O(\lambda_i)$ tương ứng là công suất các tín hiệu quang tại đầu vào và đầ ra bộ DEMUX và MUX.

$I_i(\lambda_i)$ là công suất tín hiệu đầu vào thứ i của bộ ghép.

$O_i(\lambda_i)$ là công suất tín hiệu đầu vào thứ i của bộ tách .

b) Xuyên kênh: Là sự có mặt của một kênh này trong kênh kế cận làm tăng nền nhiễu và giảm tỷ số tín hiệu nhiễu của kênh đang xét. Trong hệ thống ghép kênh quang, xuyên kênh xuất hiện do:

✓ Các viền phổ của một kênh đi vào băng thông của bộ tách kênh và bộ lọc của kênh khác. Khi sóng mang quang được điều chế bởi một tín hiệu, sự điều chế công suất trong các viền phổ của nó như là điều chế công suất trong băng bởi kênh kế cận.

✓ Xuất phát từ những giá trị hữu hạn thực tế về độ chọn lọc và độ cách ly của các bộ lọc.

✓ Tính phi tuyến trong sợi quang ở mức công suất cao trong các hệ thống đơn mode. Cơ chế của nó là tán xạ Raman, là hiệu ứng tán xạ kích thích phi tuyến làm cho công suất quang ở một bước sóng tác động đến tán xạ và công suất quang, trong các bước sóng khác cũng như vậy.

Trong một bộ tách kênh sẽ không có sự dò công suất tín hiệu từ kênh thứ i có bước sóng λ_i sang kênh khác có bước sóng khác với bước sóng λ_i. Nhưng trong thực tế luôn tồn tại một mức xuyên kênh nào đó, làm giảm chất lượng truyền dẫn của một thiết bị. Khả năng để tách các kênh khác nhau được diễn giải bằng suy hao xuyên kênh và được tính bằng dB như sau:

$$D_i(\lambda_i) = -10\log\left[\frac{U_i(\lambda_k)}{I_i(\lambda_k)}\right][dB] \qquad (2.18)$$

Trong bộ giải ghép thì $U_i(\lambda_k)$ là lượng tín hiệu không mong muốn ở bước sóng λ_k bị dò ở cửa ra thứ i mà đúng ra chỉ có tín hiệu ở bước sóng λ_i.

c) Suy hao quỹ công suất của hệ thống WDM: Trong bất kỳ hệ thống số nào thì vấn đề quan trọng là phải đảm bảo được tỷ số tín hiệu trên tạp âm (S/N) sao cho đầu thu có thể thu được tín hiệu với một mức BER cho phép. Giả sử máy phát phát tín hiệu đi tới phía thu với một mức công suất P_{ph} nhất định, công suất của tín hiệu sẽ bị suy giảm dần trên đường truyền dẫn do rất nhiều nguyên nhân như: suy hao do bản thân sợi quang gây ra, suy hao do các thành phần quang thụ động...cự ly truyền dẫn càng dài thì công suất tín hiệu bị suy hao càng nhiều, nếu suy hao quá lớn làm cho công suất tín hiệu đến được máy thu nhỏ hơn công suất ngưỡng thu nhỏ nhất ($P_{th\ min}$) cho phép thì thông tin truyền đi sẽ bị mất.

Để máy thu thu được thông tin thì công suất tín hiệu đến máy thu phải nằm trong dải công suất của máy thu như trong công thức sau:

$$P_{máy\ phát} = P_{phát} + P_{dự\ trữ}$$
$$P_{thu\ min} < P_{phát} - P_{tổng\ suy\ hao} < P_{thu\ max} \quad (2.19)$$

Như vậy để đảm bảo được thông tin thì công suất phát phải càng lớn khi cự ly truyền dẫn càng lớn. Để khắc phục điều này người ta sử dụng bộ lặp tín hiệu trên đường truyền. Trước đây khi chưa có bộ khuếch đại quang, suy hao tín hiệu trên đường truyền sẽ được bù lại thông qua việc sử dụng các trạm lặp điện 3R, quá trình này được thực hiện tương đối phức tạp. Đầu tiên, phải tách tất cả các kênh (nhờ thiết bị DEMUX), biến đổi các kênh tín hiệu quang này thành các kênh tín hiệu điện, thực hiện khuếch đại từng kênh, biến đổi từng kênh trở lại tín hiệu quang, sau đó mới thực hiện ghép các kênh tín hiệu quang này lại với nhau (nhờ thiết bị MUX), điều này làm cho việc tính toán, thiết kế tuyến thông tin quang gặp nhiều khó khăn.

d) Độ rộng kênh: Hiện nay trong hệ thống viễn thông dùng sợi quang thường sử dụng bước sóng 1550 nm và các bộ khuếch đại quang trực tiếp. Nếu ta muốn xếp khoảng 16 kênh trong dải bước sóng này thì độ rộng giữa các kênh là 30 nm/16 kênh hay 1,875 nm. Độ rộng kênh là tiêu chuẩn trong miền tần số hơn là bước sóng. Mối quan hệ giữa tần số và bước sóng được xác định theo công thức sau:

$$\lambda f = c$$
$$f = \frac{c}{\lambda}$$
$$\Rightarrow \frac{df}{d\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} \Rightarrow \frac{\Delta f}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} \quad (2.20)$$

Trong đó: c là vận tốc ánh sáng 3.10^8 m/s.

λ là bước sóng hoạt động.

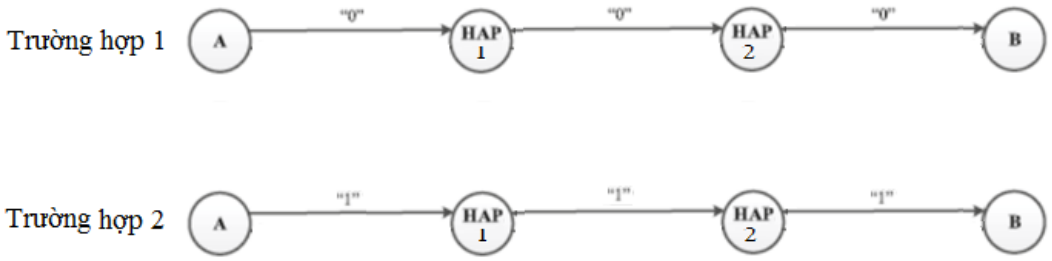
Vì vậy 1,875 nm là tương đương với độ rộng của các kênh có tần số xấp xỉ 250GHz. Vậy độ rộng kênh là dải bước sóng mà nó định ra cho từng nguồn phát quang. Dải bước sóng C của các bộ khuếch đại EDFA là 1530-1550 nm.

2.4. Hiệu năng hệ thống truyền dẫn WDM – FSO trong HAP

Hệ thống FSO trong HAP được chia làm ba đoạn đường truyền FSO đó là: Đường truyền FSO lên từ trạm mặt đất (trạm phát) đến trạm HAP, đường truyền FSO trong tầng bình lưu và đường truyền FSO xuống từ trạm HAP đến trạm mặt

đất (trạm thu). Để đơn giản, phần này chỉ xét hiệu năng cho một kênh bước sóng riêng lẻ mà không xét đến ảnh hưởng giữa các bước sóng của các kênh với nhau. Trên thực tế, do số lượng kênh ghép trong hệ thống WDM – FSO là nhỏ, khoảng cách giữa các kênh này lớn nên các ảnh hưởng (nếu có) cũng là không đáng kể.

Trong tuyến FSO đường lên, OHL tại HAP có thể quyết định sai giữa bit "1" và bit "0" do ảnh hưởng của nhiễu nền, và do đó xảy ra lỗi. Tương tự, tại các GS (nút A và nút B), ảnh hưởng của nhiễu nổ APD và nhiễu nhiệt lên tín hiệu thu có thể gây ra lỗi khi tín hiệu đi qua mạch quyết định để xác định bit " 1" hoặc bit "0" được phát.



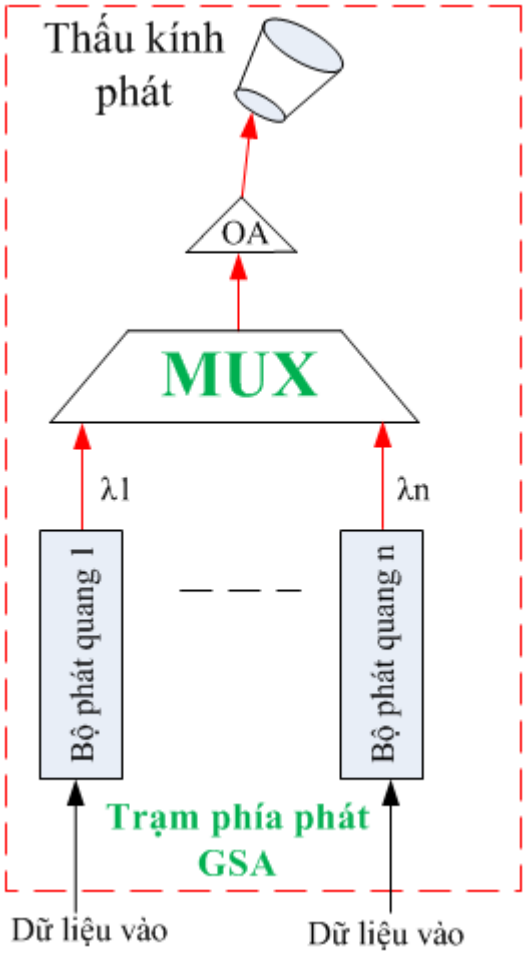
Hình 2.5: Hai trường hợp xảy ra khi phát 2 bit từ 2 GS_A và GS_ B.

Tất cả các trường hợp có thể xảy ra khi trao đổi dữ liệu nhị phân giữa nút A và nút B được chỉ ra trong hình 2.5 và được giải thích như sau:

- Trường hợp 1: Bit "0" được phát tới HAP bởi cả hai GS (nút A và nút B).
- Trường hợp 2: Cả nút A và nút B cùng phát bit "1" tới HAP.

Để làm rõ ảnh hưởng của mỗi đường truyền FSO một cách rõ ràng, ta phân tích riêng biệt xác suất lỗi cho tuyến liên lạc FSO từ mặt đất tới HAP và từ HAP tới mặt đất.

2.4.1. Phân tích đường truyền FSO từ trạm mặt đất tới HAP (GS_A-HAP)



Hình 2.6: Đường truyền FSO từ trạm mặt đất lên tới trạm HAP.

Truyền thông FSO được sử dụng trong đường lên để truyền dữ liệu từ trạm mặt đất GS_A tới HAP (hoặc từ HAP đến GS_B).

$$P_R = P_T . \frac{d_R^2}{(d_T + \theta L)^2} . 10^{\frac{-\alpha L}{10}} \qquad (2.21)$$

Trong đó: d_T là đường kính thấu kính phát (m), d_R là đường kính thấu kính nhận, θ là chùm tia phân kỳ (mrad), L là khoảng cách đường truyền giữa HAP và GS_A (km), α là hệ số suy hao (dB/km), P_T là công suất phát sau bộ MUX, P_R là công suất thu được tai HAP (bộ phát đáp 1).

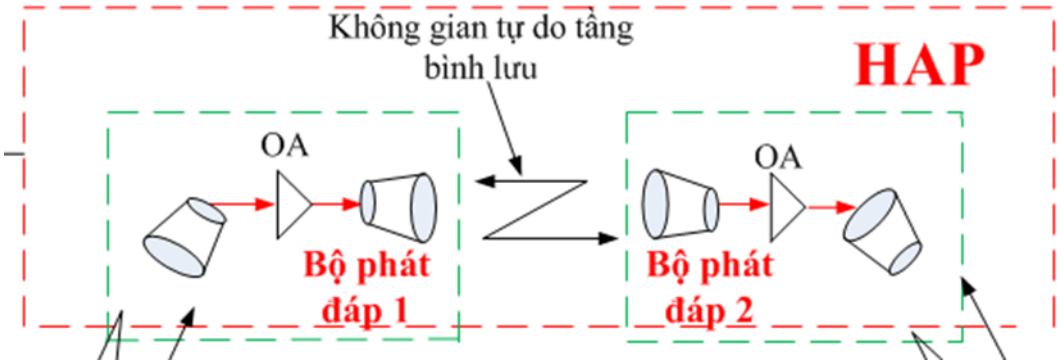
Với đặc tính kênh *h* (cho đường truyền FSO từ GS_A đến HAP hoặc HAP đến GS_B) cho bởi công thức:

$$h = \frac{d_R^2}{(d_T+\theta L)^2}.10^{\frac{-\alpha L}{10}} \quad (2.22)$$

Trong đó: θ: Chùm tia phân kỳ (mrad), α: Hệ số suy hao (dB/km), L: Khoảng cách từ GS_A tới HAP hoặc từ HAP tới GS_B (km).

2.4.2. Phân tích đường truyền giữa các trạm phát đáp đặt trên tầng bình lưu (HAP-HAP)

Đường truyền FSO trong tầng bình lưu (17 – 22km) ở môi trường chân không hệ thống lý tưởng và luôn ổn định nên hệ thống được coi như là tuyến đường truyền FSO trực tiếp không xét ngưỡng với độ suy hao nhỏ, được miêu tả như hình 2.7.



Hình 2.7: Đường truyền FSO từ bộ phát đáp 1 đến bộ phát đáp 2.

Với h_{HAP} là đặc tính kênh truyền FSO giữa bộ phát đáp 1 và bộ phát đáp 2 được xác định theo công thức sau:

$$h_{HAP} = \frac{d_{R1}^2}{(d_{T1}+\theta.L_{HAP})^2}.10^{\frac{-\alpha_{HAP}.L_{HAP}}{10}} \quad (2.23)$$

Trong đó: θ là chùm tia phân kỳ (mrad), α_{HAP} là hệ số suy hao trên HAP (dB/km), L_{HAP} là khoảng cách từ phát đáp 1 đến phát đáp 2(km).

Do đó công suất thu (P_{R_HAP}) được trên tuyến đường truyền từ phát đáp 1 đến phát đáp 2 được xác định theo công thức sau:

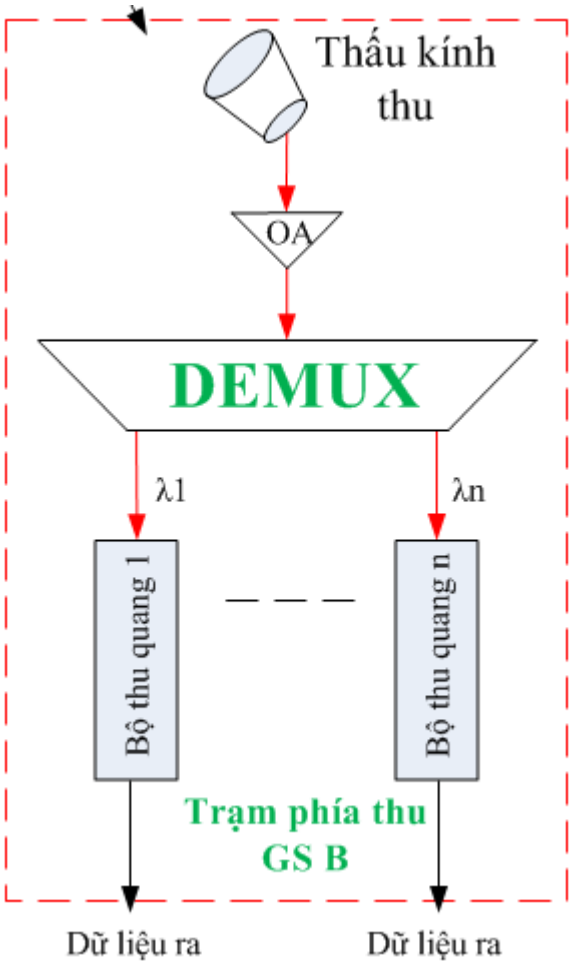
$$\begin{aligned} P_{R_{HAP}} &= P_{T(HAP)}.h_{HAP} \\ &= h_{HAP}.h\,.G_{HAP}.G_{HAP}.P_T \\ &= G_{HAP}^2.\,h_{HAP}.h.P_T \end{aligned} \quad (2.24)$$

Trong đó G_{HAP} là hệ số khuếch đại tại các HAP.

2.4.3. Phân tích đường truyền FSO từ HAP đến trạm mặt đất (HAP-GS_B)

Giả sử đặc tính kênh giữa GS_A với phát đáp 1 và phát đáp 2 với GS_B là giống nhau. Công suất thu tại GS_B được xác định như sau:

$$P_{R_GSB} = G_{HAP}^2 . h_{HAP} . h^2 . G . P_T \quad (2.25)$$



Hình 2.8: Đường truyền FSO xuống từ HAP đến trạm thu.

Hơn nữa, mức ngưỡng của mạch quyết định cũng ảnh hưởng đến quyết định bit "1" và bit "0" trong miền điện. Dòng điện đầu ra của APD được tính theo công thức sau:

$$I_1 = M\mathcal{R} G_{HAP}^2 . h_{HAP} . h^2 . G . P_T + n_1 \quad (2.26)$$

$$I_0 = n_0 \quad (2.27)$$

Trong đó I_1 và I_0 là các dòng photon tương ứng với bit "1" và bit "0". Các thành phần nhiễu cộng đối với bit "1" và bit "0" được ký hiệu tương ứng là $n_1$và n_0.

P_T là công suất phát từ HAP tới các GS. Các thành phần nhiễu máy thu được mô hình hóa là nhiễu Gaussian với trung bình không bao gồm nhiễu nổ và nhiễu nhiệt. Tuy nhiên, nhiễu nổ gây ra bởi cả tín hiệu mong muốn và bức xạ nền ảnh hưởng nhiều hơn nhiễu nhiệt vì vượt quá nhiễu tạo ra trong APD. Phương sai nhiễu σ_n^2 (của n_1) và σ_0^2 (của n_0) được tính theo công thức sau:

$$\sigma_1^2 = 2qM^{2+x}R\mathcal{R}(G_{HAP}^2\, h_{HAP}h^2GP_T)\Delta f + \frac{4k_BT}{R_L}\Delta f \quad (2.28)$$

$$\sigma_0^2 = 2qM^{2+x}\mathcal{R}G_{HAP}^2\, h_{HAP}h^2GP_T\Delta f + \frac{4k_BT}{R_L}\Delta f \quad (2.29)$$

Trong đó q là điện tích, M là hệ số nhân của APD, $\mathcal{R}$ là đáp ứng của APD, k_B là hằng số Boltzmann, T là nhiệt độ tuyệt đối và R_L là điển trở tải. Δf băng thông. Bằng cách đặt mức ngưỡng tối ưu của bộ quyết định $I_D = \frac{\sigma_1\mu_1 + \sigma_0\mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$ với $\mu_1 = M\mathcal{R}G_{HAP}^2.G.P_T + n_1$ và $\mu_0 = 0$ tương ứng là trị trung bình của I_1 và I_0, xác suất lỗi có điều kiện của đường xuống FSO.

Tỉ lệ lỗi bit BER: thông số được xác định tại bộ thu, là tỉ số giữa số bit thu bị lỗi trên tổng số bit được phát đi trong một khoảng thời gian xác định.

Thuật toán xác định tham số để sử dụng cách tính BER. Với Gaussian có độ lệch chuẩn σ_0 và σ_1 tính BER được xác định cho bởi công thức:

$$P_e = \frac{M}{N+M}P_{e^0} + \frac{M}{N+M}P_{e^1} \quad (2.30)$$

Ở đây, ký hiệu P_0 và P_1 là xác suất, M là số lượng mẫu cho bít 0, N là số lượng lấy mẫu cho bít 1.

Ngoài ra, P_{e^0} và P_{e^1} được xác định theo công thức sau:

$$P_{e^0} = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{I_d - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right) \quad (2.31)$$

$$P_{e^1} = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{\mu_1 - I_d}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) \quad (2.32)$$

Trong đó: $\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1$ là các giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của giá trị

được lấy mẫu tương ứng và I_d là giá trị ngưỡng.

Gause trung bình: Có thể được lấy bằng cách lấy mẫu khác nhau của từng BER. Đối với các giá trị được lấy mẫu M cho giá trị logic 0 và N được lấy mẫu cho logic 1, tỷ lễ lỗi tương ứng đó là:

$$P_{e^0} = \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^{M} \left(\frac{I_d - \mu_{0i}}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \tag{2.33}$$

$$P_{e^1} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\mu_{1i} - I_d}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \tag{2.34}$$

2.5. Kết luận chương

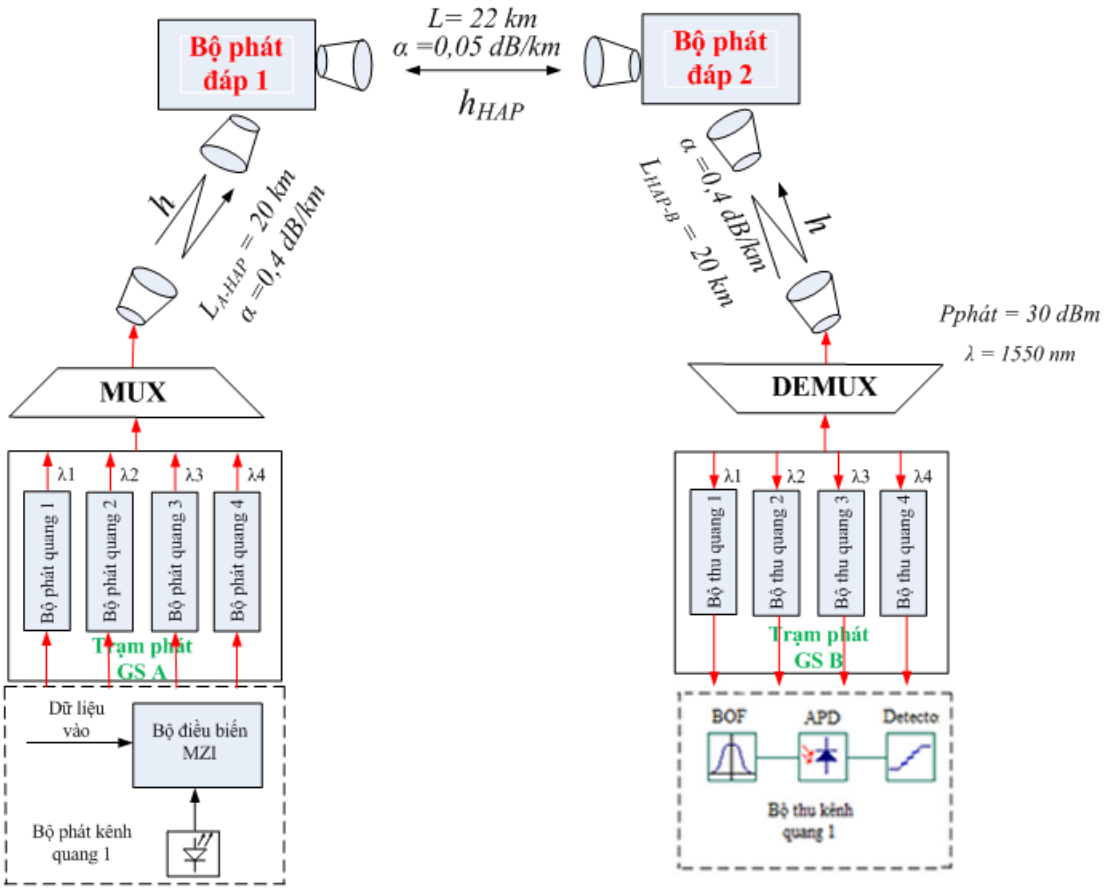
Nội dung chương 2 giới thiệu hệ thống WDM – FSO cơ bản và giải pháp WDM – FSO ứng dụng trong hạ tầng trên cao HAP. Bên cạnh đó, nội dung chương 2 còn đề cập đến các tham số và yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống FSO cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hệ thống WDM. Ngoài ra, nội dung chương 2 còn phân tích hiệu năng hệ thống FSO trong HAP (như đường truyền FSO từ mặt đất đến HAP cũng như đường truyền từ HAP xuống mặt đất và đường truyền trong tầng bình lưu).

CHƯƠNG III: ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG KẾT HỢP WDM – FSO TRONG HAP

Tóm tắt: *Nội dung chương 3 đưa ra hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP trong đó có kiến trúc hệ thống WDM – FSO trong HAP, mô hình hóa và mô phỏng hệ thống. Ngoài ra, nội dung chương 3 tập trung vào đánh giá hiệu năng của hệ thống WDM –FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao, trong đó xét đến ảnh hưởng của tốc độ bít, ảnh hưởng của công xuất phát, ảnh hưởng của khoảng cách đường truyền, kỹ thuật điều chế,…*

3.1. Hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP

3.1.1. Kiến trúc hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP được mô phỏng.



Hình 3.1: Kiến trúc hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP .

Kiến trúc hệ thống WDM – FSO trong HAP. Từ trạm mặt đất phía phát gồm có 4 bộ phát kênh tương ứng có 4 bước sóng (với một kênh đầu vào gồm có các dữ liệu vào, bộ điều biến MZI và nguồn quang phát. Trong đó, bộ điều biến MZI là bộ điều biến cường độ dựa trên nguyên lý giao thoa kế) được đưa tới bộ ghép kênh quang(MUX) tới thấu kính phát để truyền lên trạm HAP. Tại trạm HAP có một thấu kính thu để thu tín hiệu từ trạm mặt đất lên HAP và được đưa qua bộ khuếch đại quang trực tiếp để khuếch đại tín hiệu (bộ khuếch đại công suất tại phía thu trên trạm HAP). Trên HAP là đường truyền FSO từ Bộ phát đáp 1 đến bộ phát đáp n trong tầng bình lưu (17 – 22km) ở môi trường chân không hệ thống lý tưởng và luôn ổn định nên hệ thống được coi như là tuyến đường truyền FSO với độ suy hao không đáng kể.

Đường truyền từ trạm HAP đến trạm mặt đất phía thu, tại HAP thấu kính thu trên HAP được coi là thấu kính phát của đường truyền từ HAP xuống mặt đất. Tín hiệu thu được được đi qua bộ khuếch đại quang trực tiếp (bộ tiền khuếch đại công suất) để khuếch đại tín hiệu trước khi truyền xuống mặt đất. Tại trạm mặt đất phía phát có thấu kính thu để thu tín hiệu được truyền từ HAP xuống trước khi cho đi qua bộ khuếch đại quang tín hiệu (bộ khuếch đại công suất) để đưa vào bộ tách kênh quang tín hiệu (DEMUX).

3.1.2. Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống

a) Giới thiệu về công cụ mô phỏng Optisystem:

OptiSystem là phần mềm mô phỏng hệ thống thông tin quang. Phần mềm này có khả năng thiết kế, đo kiểm tra và thực hiện tối ưu hóa rất nhiều loại tuyến thông tin quang, dựa trên khả năng mô hình hóa các hệ thống thông tin quang trong thực tế. Bên cạnh đó, phần mềm này cũng có thể dễ dàng mở rộng do người sử dụng có thể đưa thêm các phần tử mới thiết kế bổ xung vào thư viện ứng dụng như:

✓ *Khả năng kết hợp với các công cụ phần mềm khác của Optiwave:* Optisystem cho phép người dùng sử dụng kết hợp với các công cụ phần mềm khác của Optiwave như OptiAmplifier, OptiBPM, OptiGrating, WDM_Phasar và OptiFiber để thiết kế ở mức phần tử.

✓ *Mô phỏng phân cấp với các hệ thống con:* Để việc mô phỏng được thực hiện một cách linh hoạt và hiệu quả, Optisystem cung cấp mô hình mô phỏng tại các mức khác nhau bao gồm mức hệ thống, mức hệ thống con và mức phần tử.

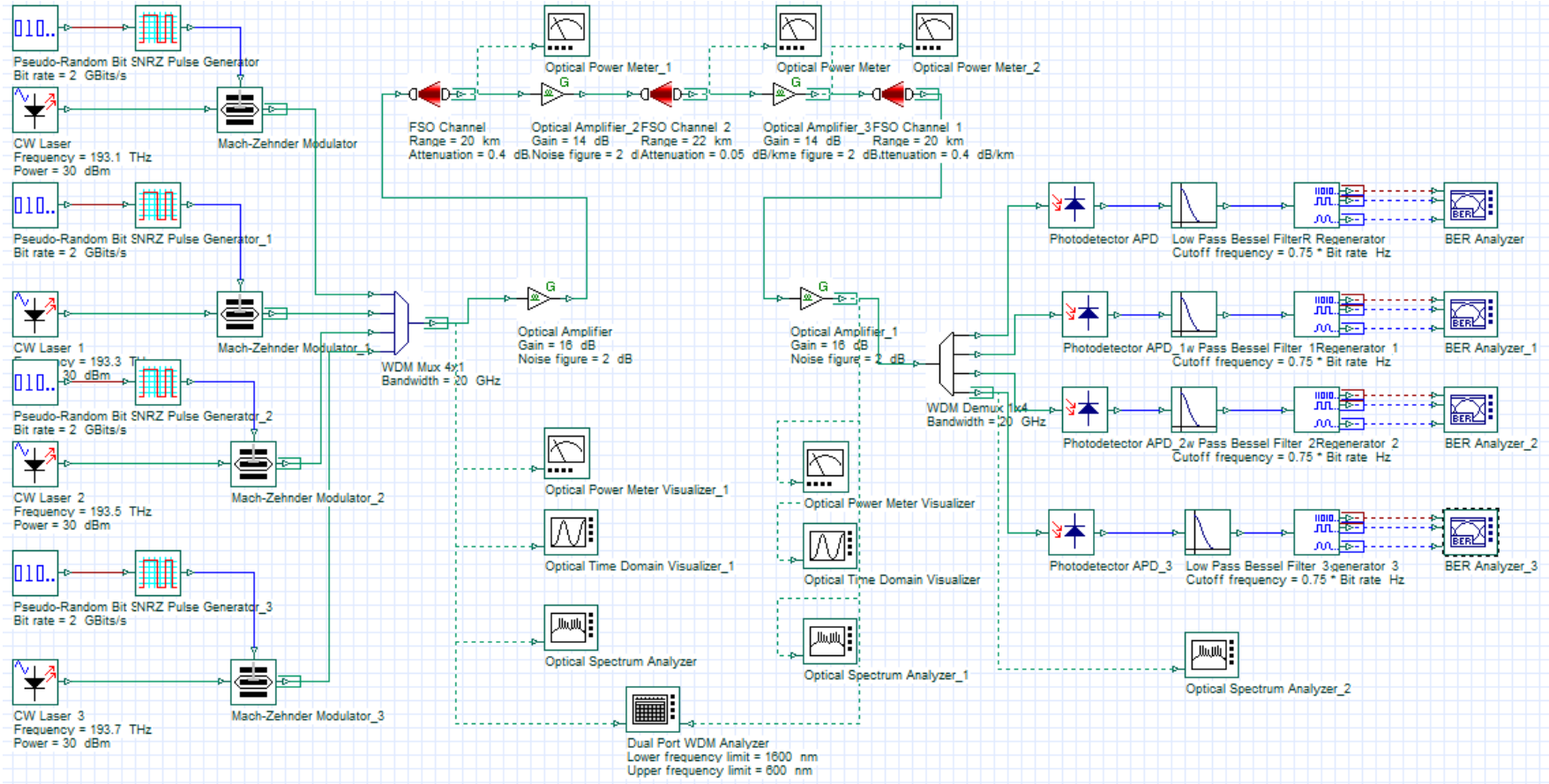
✓ *Ngôn ngữ Scipt mạnh:* Người sử dụng có thể nhập các biểu diễn số học của tham số và tạo ra các tham số toàn cục. Các tham số toàn cục này sẽ được dùng chung cho tất cả các phần tử và hệ thống con của hệ thống nhờ sử dụng chung ngôn ngữ VB Scipt.

b) Các thông số thiết lập mạng truyền dẫn WDM – FSO 4 kênh trong HAP

Bảng 3.1: Thiết lập các tham số và các hằng số của hệ thống.

Tên	**Ký hiệu**	**Giá trị**
Hằng số Boltzmann	k_B	1.38×10^{-23} W/K/Hz
Điện tích electron	E	1.6×10^{-19} C
Điện trở tải	R_L	50 Ω
Nhiệt độ máy thu	T	300 K
Đáp ứng của đi-ốt tách quang	$\Re$	1 A/W
Hệ số ion hóa	ζ	0.028
Tỷ lệ ngoài của sự nhiễu loạn	L_0	20 m
Công suất nhiễu nền	P_b	-40 dBm
Bước sóng	λ	1550 nm
Hệ số cấu trúc chỉ số khúc xạ	C_n^2	$3x10^{-14}$ $m^{-2/3}$
Góc phân kỳ búp sóng	θ	1mrad
Diện tích bộ thu	A	0.07 cm^2
Tốc độ bit	R_b	2 Gbps
Hệ số suy hao từ GS_A – HAP – GS_B Hệ số suy hao trong HAP	α α_{HAP}	0.4 dB/km 0,05 dB/km
Khoảng cách truyền trạm mặt đất (trạm phát) đến HAP và từ HAP đến trạm thu (mặt đất)	$L_{GS_A\text{-}HAP}$ $(L_{HAP\text{-}GS_B})$	20 km
Khoảng cách truyền trong HAP	L_{HAP}	22 km

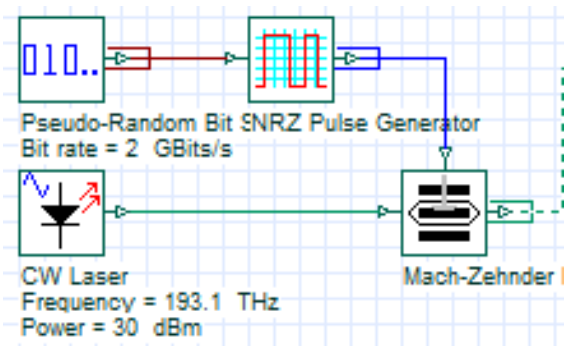
c) Mô hình Hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAPsử dụng công cụ Optisystem



Hình 3.2: Sơ đồ thiết kế mạng mô phỏng hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP.

Trong sơ đồ thiết kế mạng mô phỏng hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP gồm có các thành phần chính đó là:

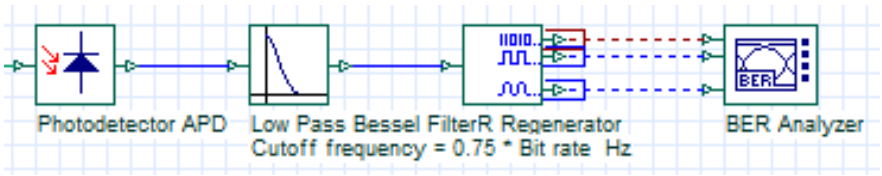
✓ *Bộ phát quang:* Sử dụng kỹ thuật điều chế NRZ với công suất phát 30 dBm như được thể hiện trong hình 3.3.



Hình 3.3: Khối phát tín hiệu.

Khối phát gồm có bộ tạo tốc độ bít, bộ tạo xung RZ hoặc NRZ, bộ phát laser và bộ ghép tín hiệu Mach-Zehnder. Bộ tạo tốc độ bít sẽ tạo tốc độ truyền mong muốn trên đường truyền và đưa vào bộ tạo xung để điều chế tín hiệu. Tín hiệu sau điều chế được đưa tới bộ Mach-Zehnder cùng được kết hợp với bộ phát laser, chính là sóng mang sẽ đưa tín hiệu điều chế đi cùng với tốc độ bit mong muốn.

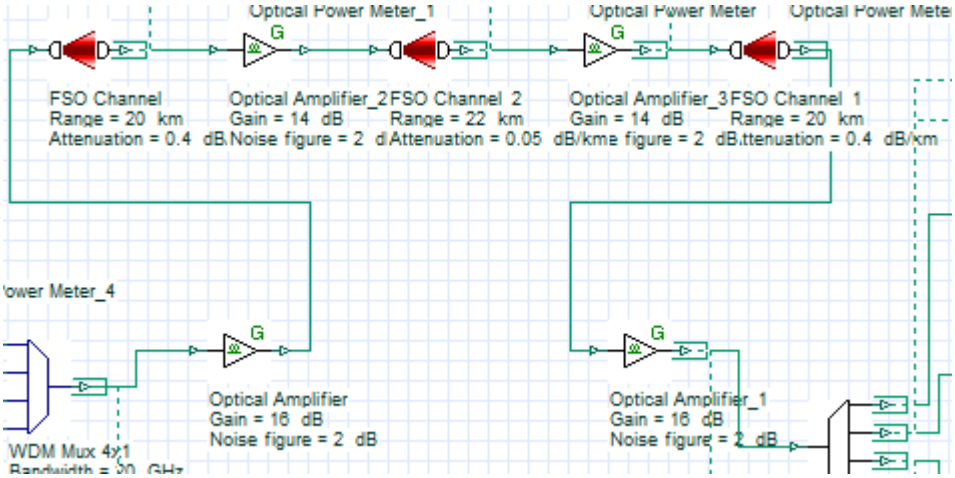
✓ *Bộ thu quang:* Gồm các thành phần chính như hình 3.4 dưới đây



Hình 3.4: Khối thu tín hiệu và hiển thị.

Bộ thu quang trong hình 3.4 gồm có photodector APD, bộ lọc thông thấp, máy tạo tín hiệu 3R và máy phân tích tín hiệu. Tín hiệu quang được đưa tới photodector APD để chuyển đổi tín hiệu quang thành tín hiệu điện với tốc độ cao, tần số cao. Sẽ được đưa tới bộ lọc thông thấp để lọc lấy tín hiệu. Tín hiệu thu được lại được chuyển qua máy phát 3R để xử lý rồi chuyển qua máy phân tích tín hiệu để xem dạng tín hiệu, BER của hệ thống.

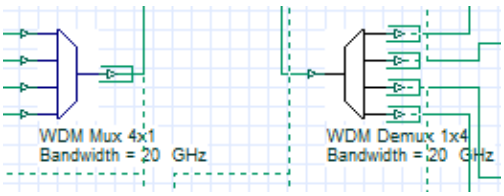
✓ *Tuyến truyền:* Gồm các thành phần chính như hình 3.5 dưới đây



Hình 3.5: Tuyến đường truyền trong hệ thống.

Tuyến truyền quang gồm ba tuyến đường truyền FSO từ trạm GS_A đến HAP và từ HAP đến trạm GS_B là 20 km với độ suy hao cả hai đường truyền trên là 0,4 dB/km, và tuyến đường truyền FSO trong HAP với khoảng cách truyền là 22km, độ suy hao 0,05 dB/km cùng với 2 bộ khuếch đại quang có độ lợi 16 dB được đặt trước và sau bộ tách ghép kênh (MUX/DEMUX), và 2 bộ khuếch đại quang có độ lợi 14 dB được thiết kế trước và sau đường truyền FSO trong hạ tầng trên cao HAP.

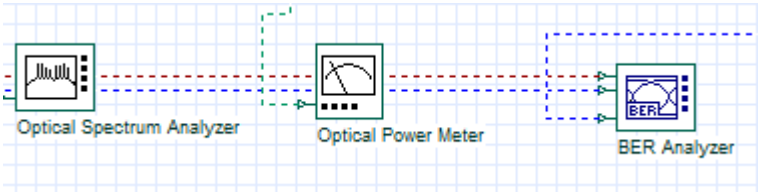
✓ *Tách và ghép bước sóng:* Gồm hai thành phần chính được thiết kế như trong hình vẽ 3.6 bên dưới.



Hình 3.6: Bộ tách và ghép bước sóng.

Bộ tách ghép quang sử dụng là MUX và DEMUX, hệ thống dùng bốn kênh nên bộ tách và ghép quang sử dụng là bộ MUX 4x1 và bộ DEMUX 1x4. Bộ MUX giúp gộp bốn bước sóng ánh sáng thành một và truyền đi trên sợi quang. Bộ DEMUX thì tách tín hiệu quang thành bốn bước sóng khác nhau.

✓ *Thiết bị đo và hiển thị tín hiệu:* Gồm các thành phần chính được thể hiện như hình 3.7 dưới đây.



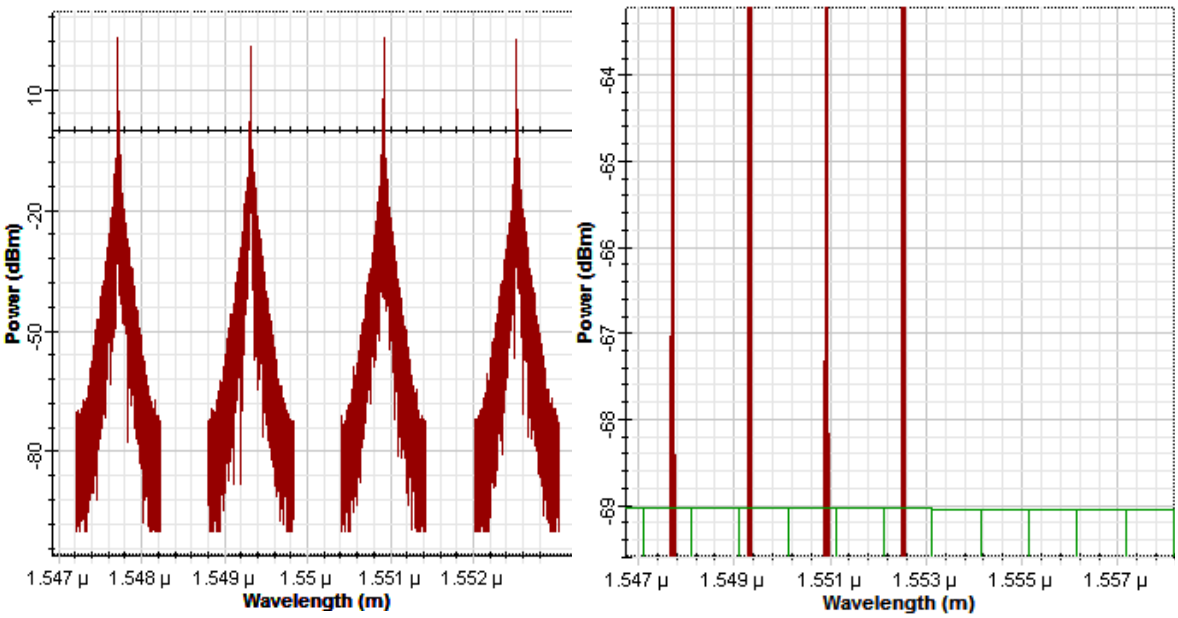
Hình 3.7: Các thiết bị đo và hiển thị tín hiệu.

Trong hình 3.7 có thiết bị đo phân tích phổ, đo công suất quang và máy phân tích BER. Những thiết bị này sẽ được sử dụng khi người thiết kế muốn đo kiểm, lấy kết quả để báo cáo, tính toán. Thiết bị đo rất có ích khi có lỗi xảy ra để người thiết kế dễ dàng điều chỉnh hệ thống.

3.2. Đánh giá hiệu năng của hệ thống WDM –FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP

3.2.1. Hiệu năng chung của hệ thống

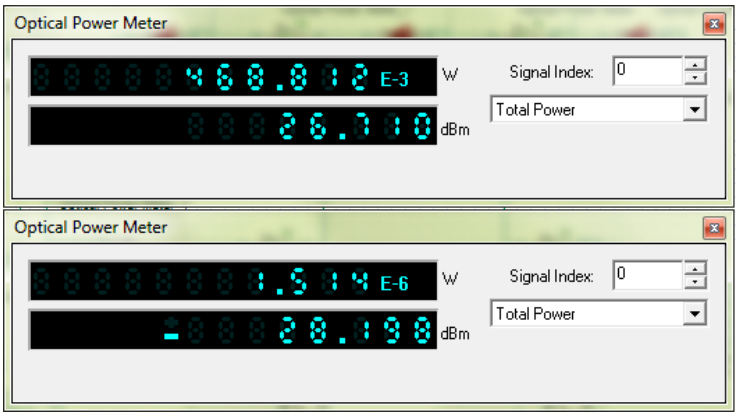
✓ ***Phổ tín hiệu:*** Sử dụng thiết bị máy phân tích quang phổ để đo phổ tín hiệu đầu vào và đầu ra của hệ thống được mô tả như hình 3.8



Hình 3.8: Phổ tín hiệu đầu vào và đầu ra của hệ thống.

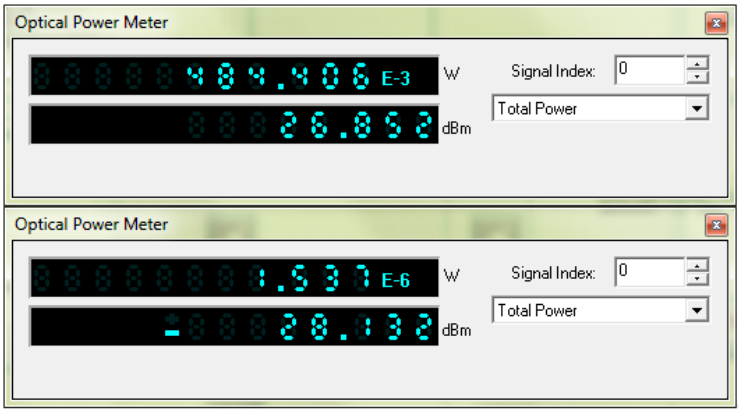
✓ ***Về công suất:*** Sử dụng thiết bị máy đo công suất quang để đo công suất tại các điểm cần đo. Công suất đầu vào và đầu ra của các kênh trong hệ thống được mô tả như sau:

Đặt máy đo công suất tại trước đầu vào bộ ghép kênh của kênh thứ nhất và đặt máy đo công suất sau bộ tách kênh của kênh thứ nhất theo thiết kế hệ thống ta thu được tại đầu thu của kênh thứ nhất giá trị công suất thu được nhỏ hơn ở đầu phát do bị suy hao trên đường truyền, kết quả đo được như hình 3.9.



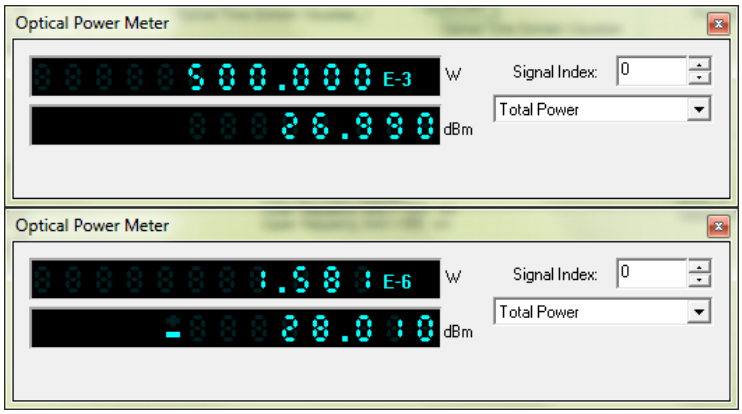
Hình 3.9: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ nhất.

Đặt máy đo công suất tại trước đầu vào bộ ghép kênh của kênh thứ hai và đặt máy đo công suất sau bộ tách kênh của kênh thứ hai theo thiết kế hệ thống ta thu được tại đầu thu của kênh thứ hai giá trị công suất thu được nhỏ hơn ở đầu phát do bị suy hao trên đường truyền, kết quả đo được như hình 3.10.



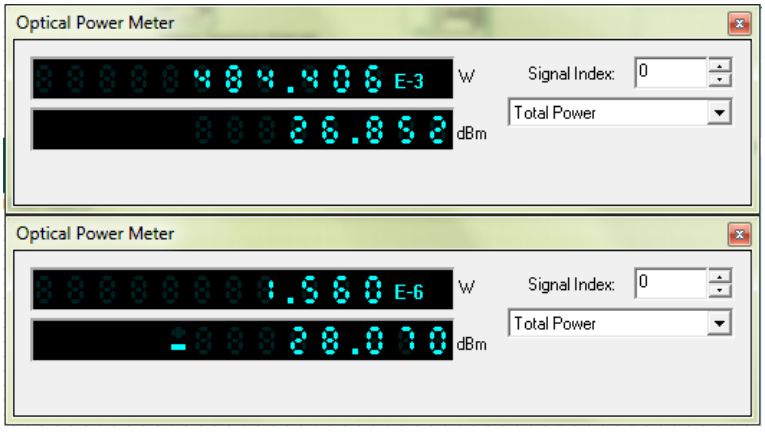
Hình 3.10: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ hai.

Đặt máy đo công suất tại trước đầu vào bộ ghép kênh của kênh thứ ba và đặt máy đo công suất sau bộ tách kênh của kênh thứ ba theo thiết kế hệ thống ta thu được tại đầu thu của kênh thứ ba giá trị công suất thu được nhỏ hơn ở đầu phát do bị suy hao trên đường truyền, kết quả đo được như hình 3.11.



Hình 3.11: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ ba.

Đặt máy đo công suất tại trước đầu vào bộ ghép kênh của kênh thứ tư và đặt máy đo công suất sau bộ tách kênh của kênh thứ tư theo thiết kế hệ thống ta thu được tại đầu thu của kênh thứ tư giá trị công suất thu được nhỏ hơn ở đầu phát do bị suy hao trên đường truyền, kết quả đo được như hình 3.12.



Hình 3.12: Công suất đầu vào và đầu ra kênh thứ tư.

✓ ***Về tỉ lệ lỗi bít của các kênh:*** Sử dụng thiết bị Ber Analyzer để đo BER, hệ số chất lượng Q và biểu đồ mắt tại đầu thu.

Theo thiết kế mô phỏng hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ trên cao HAP và các thông số để thiết lập, chạy chương trình mô phỏng ta thu được các kết quả đo như tỉ lệ lỗi bít BER, hệ số phẩm chất Q và biểu đồ mắt. Kết quả đo BER của hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao, được thể hiện trên hình 3.13.

Max. Q Factor	5.91635
Min. BER	1.61861e-009
Eye Height	4.25034e-006
Threshold	4.2597e-006
Decision Inst.	0.489556

BER Analyzer kênh 1

Max. Q Factor	5.77934
Min. BER	3.71129e-009
Eye Height	4.08397e-006
Threshold	4.35318e-006
Decision Inst.	0.506519

BER Analyzer kênh 2

Max. Q Factor	5.62806
Min. BER	9.08313e-009
Eye Height	3.98069e-006
Threshold	4.27735e-006
Decision Inst.	0.420469

BER Analyzer kênh 3

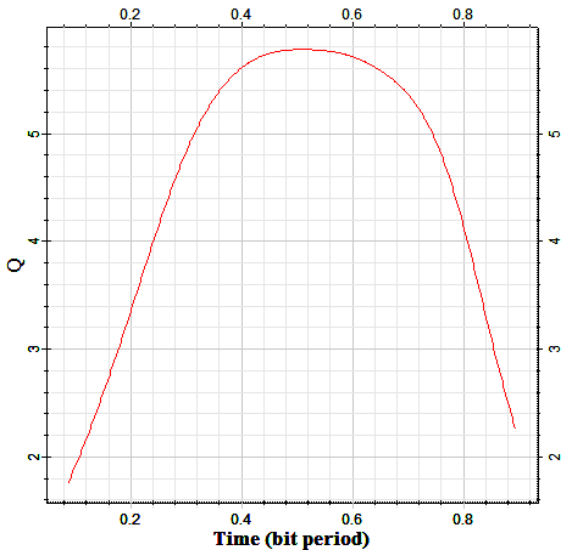
Max. Q Factor	5.59326
Min. BER	1.04913e-008
Eye Height	3.96179e-006
Threshold	3.48076e-006
Decision Inst.	0.701044

BER Analyzer kênh 4

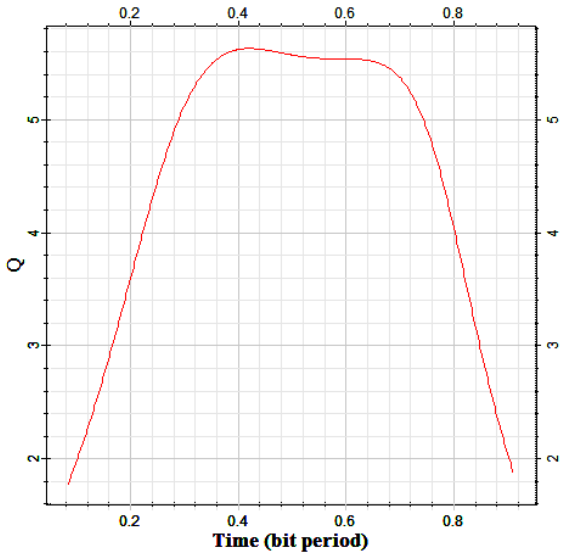
Hình 3.13: Kết quả BER tại 4 kênh đầu thu.

Kết quả đo hệ số phẩm chất Q của hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao, được thể hiện trong hình 3.14. Với hình a) Q Factor 1 trong hình 3.14 hệ số phẩm chất Q đạt ngưỡng đỉnh (5,91635) tại giữa khoảng của chu kỳ thời gian bít. Với hình b) Q Factor 2 trong hình 3.14 hệ số phẩm chất Q đạt ngưỡng đỉnh (5,77934) tại giữa khoảng của chu kỳ thời gian bít. Với hình c) Q Factor 3 trong hình 3.14 hệ số phẩm chất Q đạt ngưỡng đỉnh (5,62806) tại khoảng 0,4 của chu kỳ thời gian bít. Với hình d) Q Factor 4 trong hình 3.14 hệ số phẩm chất Q đạt ngưỡng đỉnh (5,59326) tại khoảng 0,7 của chu kỳ thời gian bít.

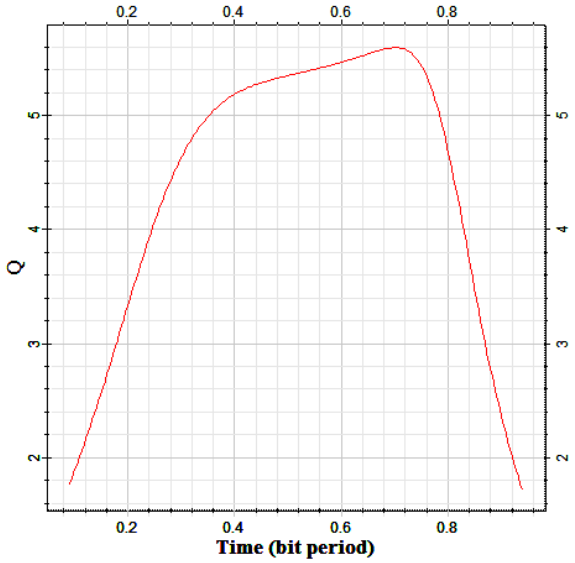
a) Q – Factor kênh 1



b) Q – Factor kênh 2



c) Q – Factor kênh 3

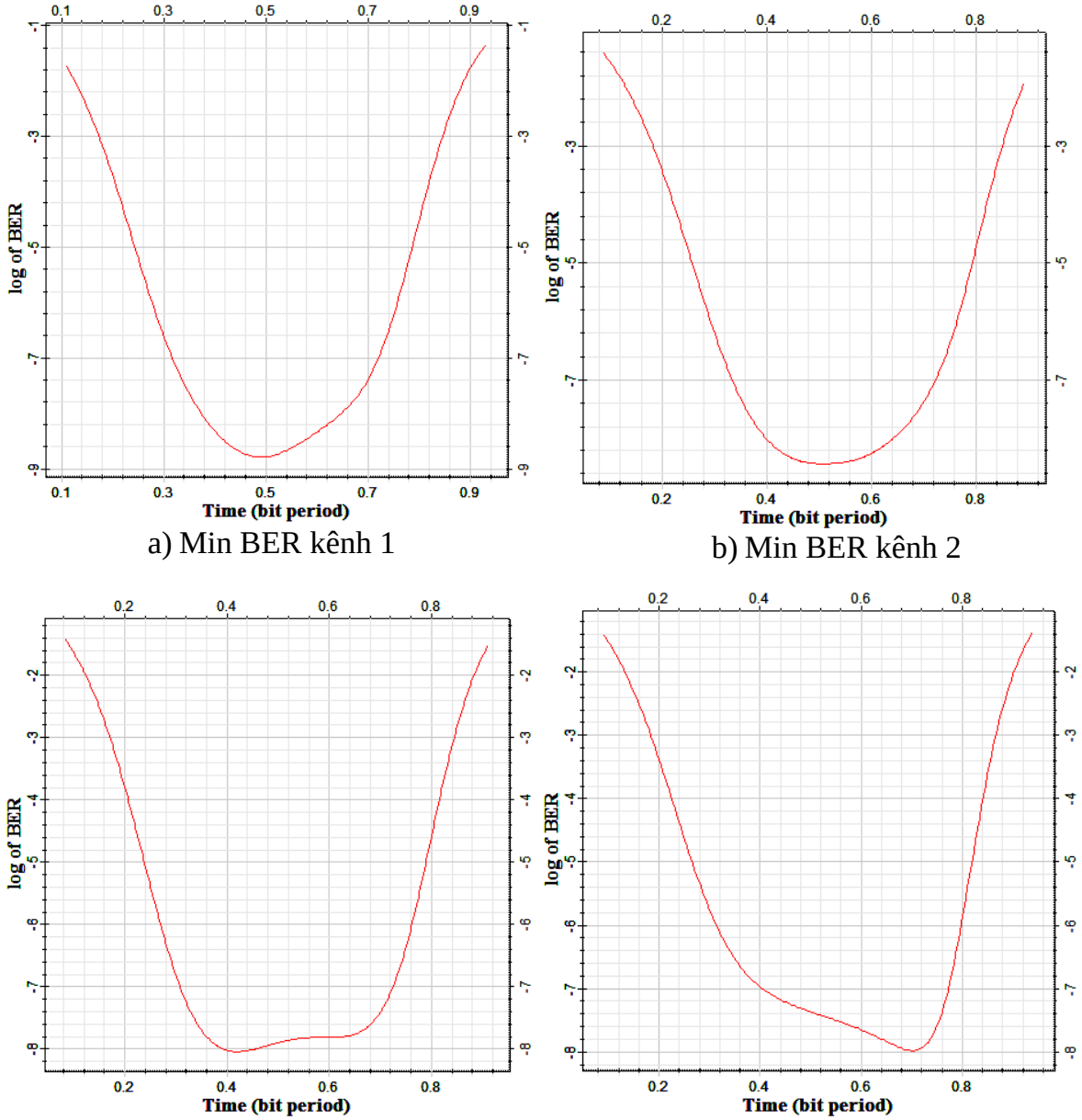


d) Q – Factor kênh 4

Hình 3.14: Đồ thị Q – Factor tại đầu thu tuyến truyền dẫn của 4 kênh

Kết quả đo hệ số Min BER của hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP tỷ lệ nghịch với hệ số phẩm chất Q, được thể hiện trên hình 3.15 dưới đây. Với hình a) Min BER 1 trong hình 3.15 tỷ lệ lỗi bit đạt $1{,}61861.10^{-9}$ tại giữa khoảng của chu kỳ thời gian bít. Với hình b) Min BER 2 trong hình 3.15 tỷ lệ lỗi bit đạt $3{,}71129.10^{-9}$ tại giữa khoảng của chu kỳ thời gian bít. Với hình c) Min BER 3 trong hình 3.15 tỷ lệ lỗi bit đạt $9{,}08313.10^{-9}$ tại khoảng 0,4 của chu kỳ thời gian bít.

Với hình d) Min BER 4 trong hình 3.15 tỷ lệ lỗi bit đạt $1{,}04913.10^{-8}$ tại khoảng 0,7 của chu kỳ thời gian bít.



a) Min BER kênh 1

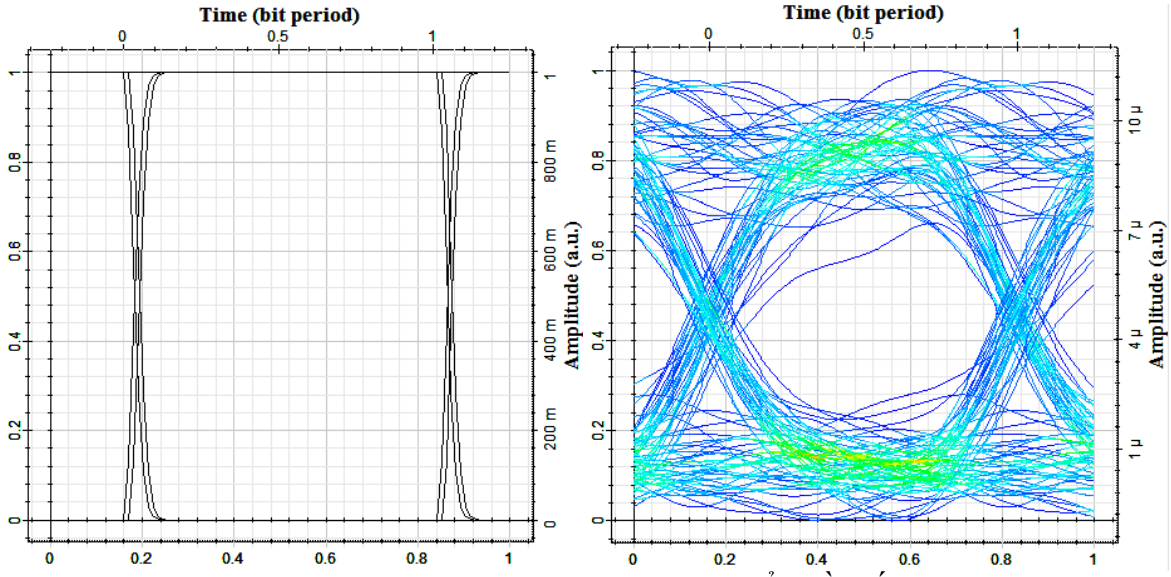
b) Min BER kênh 2

c) Min BER kênh 3

d) Min BER kênh 4

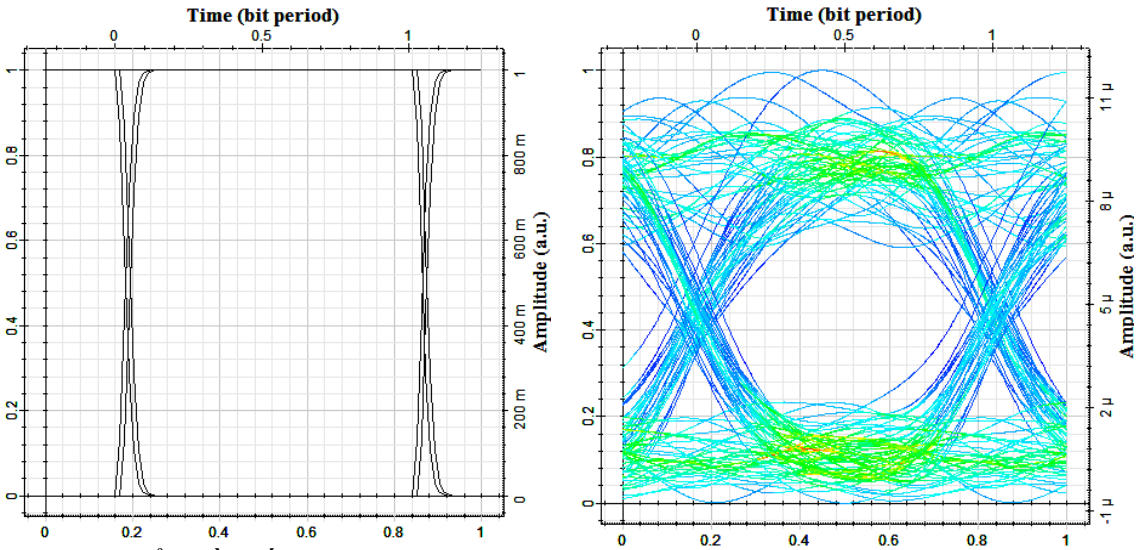
Hình 3.15: Đồ thị Min BER tại đầu thu của hệ thống truyền dẫn 4 kênh

Kết quả đo biểu đồ mắt của hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao, được thể hiện trong các hình dưới đây.



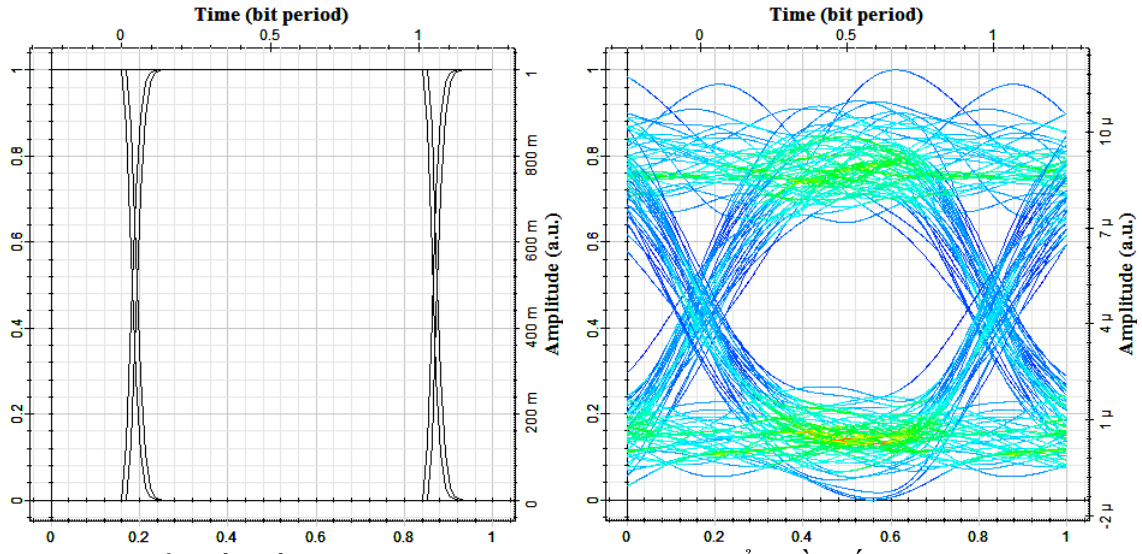
Biểu đồ mắt phía phát Biểu đồ mắt phía thu

Hình 3.16: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ nhất.



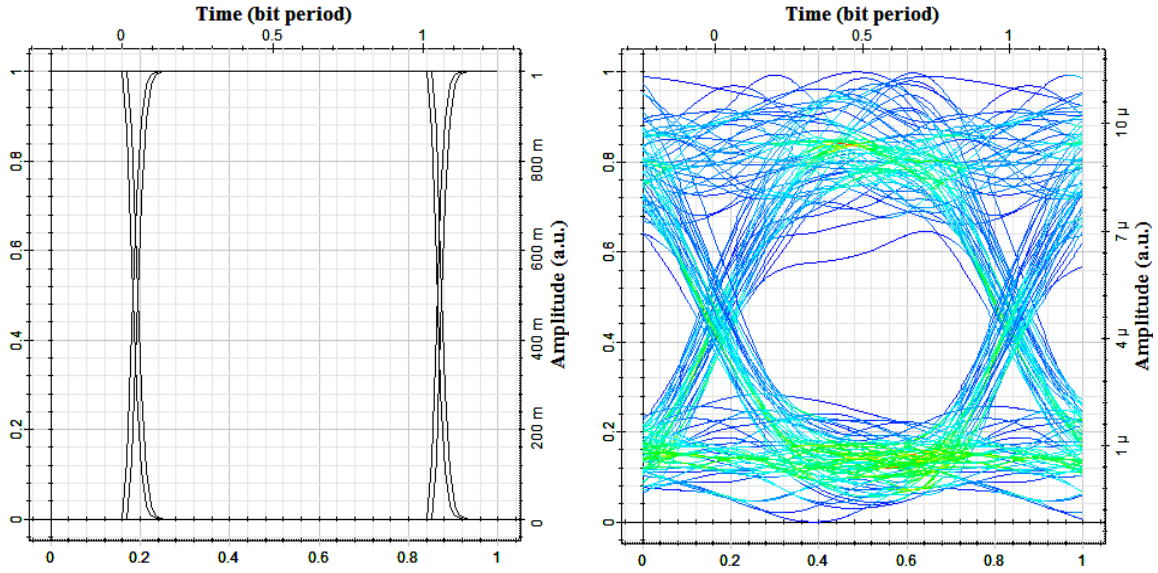
Biểu đồ mắt phía phát Biểu đồ mắt phía thu

Hình 3.17: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ hai.



Biểu đồ mắt phía phát Biểu đồ mắt phía thu

Hình 3.18: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ ba.



Biểu đồ mắt phía phát Biểu đồ mắt phía thu

Hình 3.19: Biểu đồ mắt phía phát/thu cho kênh thứ tư.

Sau khi mô phỏng, ta thấy cả 4 tín hiệu của hệ thống đưa vào thiết bị BER Analyzer đều đo và phân tích được các thông số. Các tham số đưa vào hệ thống, chạy chương trình mô phỏng các giá trị như hệ số phẩm chất Q, Min BER và độ mở mắt của biểu đồ mắt to, rõ ràng. Với những ảnh hưởng của môi trường truyền dẫn

như: suy hao, nhiễu,tán sắc..tín hiệu được truyền trong mạng vẫn đảm bảo kết quả cho tỉ lệ lỗi bít BER vào khoảng 10^{-9}.

3.2.2. Ảnh hưởng của công suất phát P_0

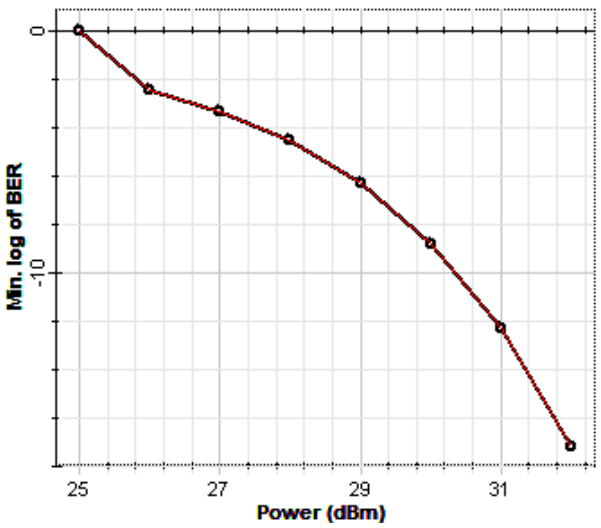
Các tham số hệ thống sử dụng trong cấu hình mô phỏng ảnh hưởng của công suất phát đó là: R_b = 2 Gb/s, cự ly truyền $L_{GSA-HAP;\ HAP-GSB}$ = 20 km, cự ly truyền L_{HAP} = 22km, hệ số suy hao $\sigma_{GSA-HAP;\ HAP-GSB}$ = 0,4 dB/km, hệ số suy hao σ_{HAP} = 0,05 dB/km, bước sóng λ = 1550 nm và hệ số khuếch đại G_{HAP} = 14 dB , $G_{HAP-GS_B;\ GS_A-HAP}$ = 16 dB.

Bảng 3.2: So sánh ảnh hưởng của công suất phát đến hệ thống

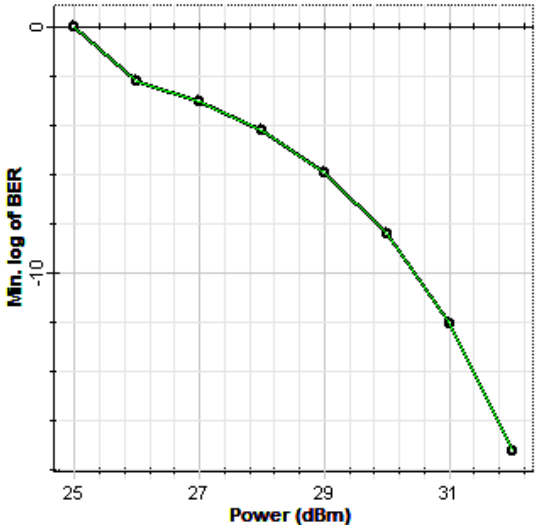
Kênh	STT	P_t (dBm)	Max Q	Min BER
Kênh 1	1	27	3,29563	0.0000489
	2	29	4,88886	$5,01578.10^{-7}$
	3	30	5,91635	$1,6186.10^{-9}$
	4	32	8,53395	$6,1433.10^{-18}$
Kênh 2	1	27	3,10516	0,000945
	2	29	4,71872	$1,1758.10^{-6}$
	3	30	5,77934	$3,7602.10^{-9}$
	4	32	8,55957	$5,5708.10^{-18}$
Kênh 3	1	27	3,07609	0,00105
	2	29	4,61531	$1,5389.10^{-6}$
	3	30	5,62806	$9,08313.10^{-9}$
	4	32	8,242	$8,3149.10^{-17}$
Kênh 4	1	27	3,17142	0,000734
	2	29	4,65547	$1,5389.10^{-6}$
	3	30	5,59326	$1,04913.10^{-8}$
	4	32	7,93099	$9,9474.10^{-16}$

Chạy kết quả mô phỏng mạng WDM – FSO trong HAP 4 kênh với sự khảo sát ảnh hưởng của công suất phát thay đổi trong khoảng từ (27 – 32 dBm) như trong

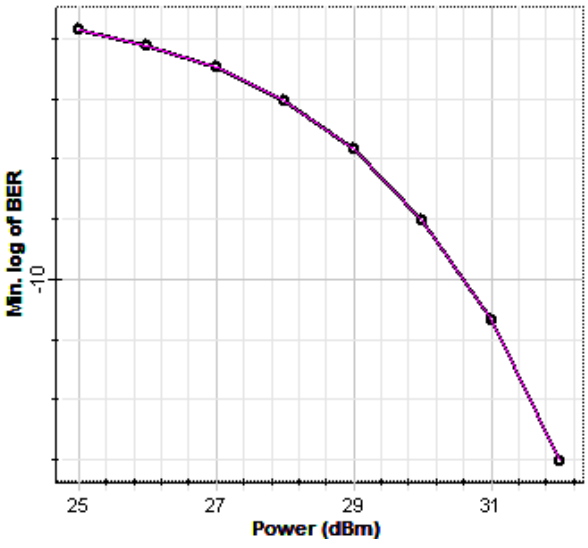
bảng 3.3 ta có kết quả đồ thị so sánh tỷ lệ lỗi bít (Min log of BER) với công suất phát được thể hiện như trong hình 3.21 dưới đây.



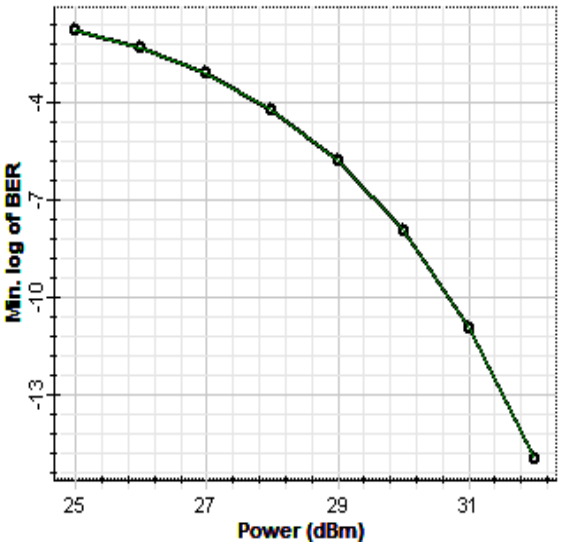
a) Kênh 1



b) Kênh 2



c) Kênh 3



d) Kênh 4

Hình 3.20: Khảo sát ảnh hưởng của công suất phát.

Hình 3.21 thể hiện kết quả đo được từ việc mô phỏng hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP. Ta nhận thấy với công suất phát của hệ thống dưới P_t = 25 dBm thì hệ thống bị lỗi không chạy. Chỉ sử dụng P_t = 25 dBm trở lên thì hệ thống mô phỏng hoạt động, giả sử với P_t = 27 dBm của kênh thứ nhất thì Min BER đạt 0,0000489; P_t = 29 dBm thì Min BER đạt $5{,}01578.10^{-7}$; P_t = 30 dBm thì Min BER

đạt 1,6186.10^{-9}; P_t = 32 dBm thì Min BER đạt 6,1433.10^{-18}. Do vậy, công suất càng tăng thì hệ số phẩm chất Q tăng, tỉ lệ lỗi bit BER càng giảm và khi công suất phát càng lớn thì công suất thu càng lớn.

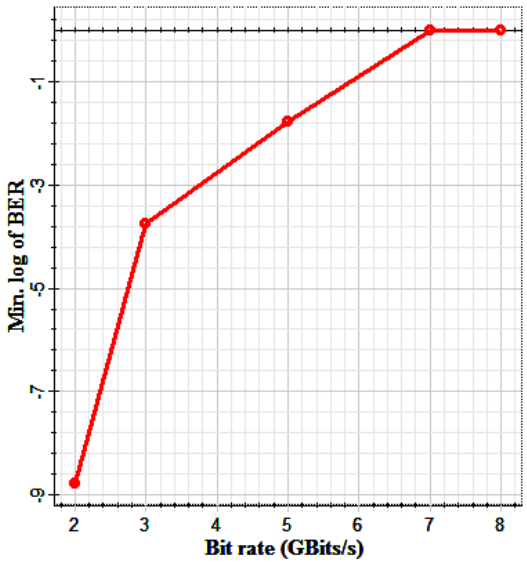
3.2.3. Ảnh hưởng của tốc độ kênh truyền

Các tham số hệ thống sử dụng trong cấu hình mô phỏng ảnh hưởng tốc độ bit đó là: P_t = 30 dBm, cự ly truyền $L_{GSA-HAP;\ HAP-GSB}$ = 20 km, cự ly truyền L_{HAP} = 22km, hệ số suy hao $\sigma_{GSA-HAP;\ HAP-GSB}$ = 0,4 dB/km, hệ số suy hao σ_{HAP} = 0,05 dB/km, bước sóng λ = 1550 nm và hệ số khuếch đại G_{HAP} = 14 dB , $G_{HAP-GS_B;\ GS_A-HAP}$ = 16 dB.

Bảng 3.3: So sánh ảnh hưởng của tốc độ bít đến hệ thống kênh thứ nhất

Kênh	STT	R_b(Gb/s)	Max Q	Min BER
Kênh 1	1	2	5,91635	1,618.10^{-9}
	2	2,5	3,59736	0,000150
	3	3	3,57009	0,00017
	4	5	2,11013	0,000068

Khảo sát ảnh hưởng của tốc độ bit đến hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP ta thu được kết quả như trong hình 3.20 dưới đây.



Hình 3.21: Khảo sát ảnh hưởng của tốc độ bít kênh thứ nhất.

Theo khảo sát có thể nhận thấy tốc độ truyền ảnh hưởng đến chất lượng của tín hiệu. Khi mô phỏng với tốc độ 7 (Gb/s) hệ thống bị lỗi không chạy. Tốc độ càng

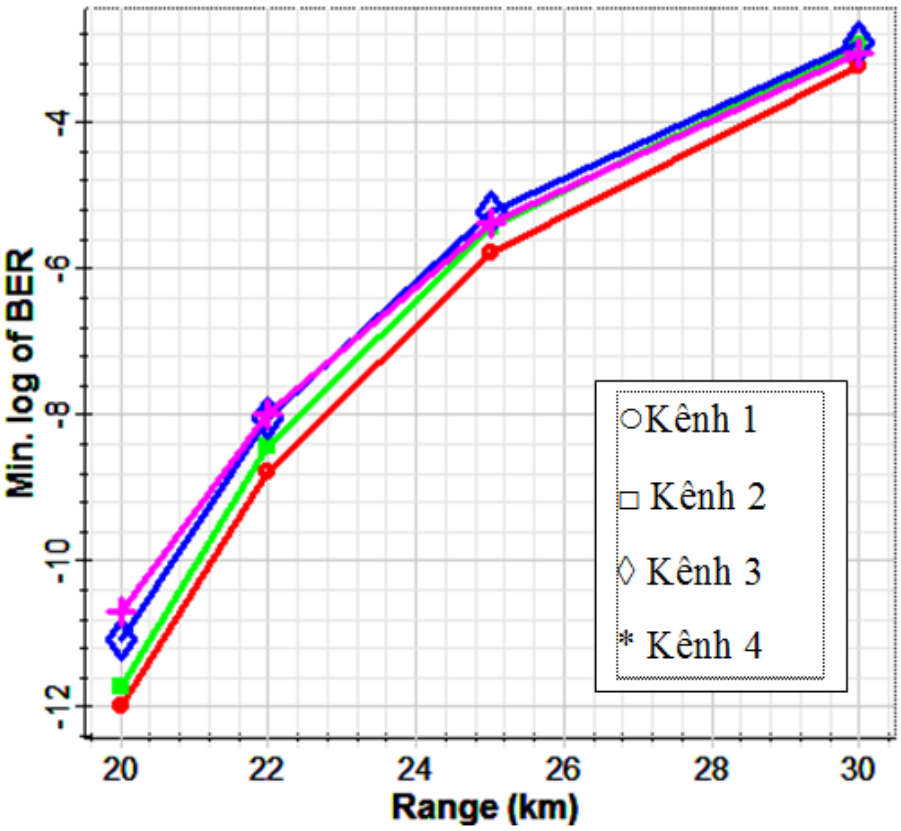
cao thì công suất máy thu thay đổi không đáng kể, làm giảm hệ số phẩm chất Q và làm tăng tỉ lệ lỗi bít BER. Do đó, hệ thống phải truyền tín hiệu ở một tốc độ thích hợp để đạt được những thông số theo mong muốn.

3.2.4. Khảo sát ảnh hưởng của cự ly truyền dẫn:

Các tham số hệ thống sử dụng trong cấu hình mô phỏng ảnh hưởng của cự ly truyền dẫn gồm có: P_t = 30 dBm, R_b =2 Gbps cự ly truyền $L_{GSA-HAP;\ HAP-GSB}$ = 20 km, hệ số suy hao $\sigma_{GSA-HAP;\ HAP-GSB}$ = 0,4 dB/km, hệ số suy hao σ_{HAP} = 0,05 dB/km, bước sóng λ = 1550 nm và hệ số khuếch đại G_{HAP} = 14 dB , $G_{HAP-GS_B;\ GS_A-HAP}$ = 16 dB. Do thay đổi cự ly truyền dẫn trên tầng bình lưu (L_{HAP}) nên bị ảnh hưởng của cả 4 kênh, kết quả đo đượckhi chạy mô phỏng như được thể hiện trong bảng sau:

Bảng 3.4: So sánh ảnh hưởng của cự ly truyền dẫn đến hệ thống

Kênh	STT	L_{HAP} (km)	Max Q	Min BER
Kênh 1	1	20	7,02706	$1{,}0300.10^{-12}$
	2	22	5,91635	$1{,}6186.10^{-9}$
	3	25	4,65185	$1{,}6288.10^{-6}$
	4	30	3,23947	0,000596
Kênh 2	1	20	6,94616	$1{,}853.10^{-12}$
	2	22	5,77934	$3{,}7602.10^{-9}$
	3	25	4,47654	$3{,}7602.10^{-6}$
	4	30	3,04871	0,00114
Kênh 3	1	20	6,73102	$8{,}3738.10^{-12}$
	2	22	5,62806	$9{,}08313.10^{-9}$
	3	25	4,38285	$5{,}8508.10^{-6}$
	4	30	3,02351	0,001249
Kênh 4	1	20	6,59268	$2{,}0089.10^{-11}$
	2	22	5,59326	$1{,}04913.10^{-8}$
	3	25	4,43719	$2{,}43502.10^{-6}$
	4	30	3,11843	0,00088



Hình 3.22: Khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách đường truyền.

Thông qua việc mô phỏng khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách đường truyền hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao HAP và bảng kết quả khảo sát 3.3, ta nhận thấy khi cự ly truyền dẫn càng tăng lên thì tỷ số lỗi bít Min BER càng lớn, chất lượng hệ số phẩm chất Q và công suất đầu thu càng giảm. Và khi tăng đến một khoảng cách nhất định thì tỷ số lỗi bít Min BER (=0), hệ thống không chạy được.

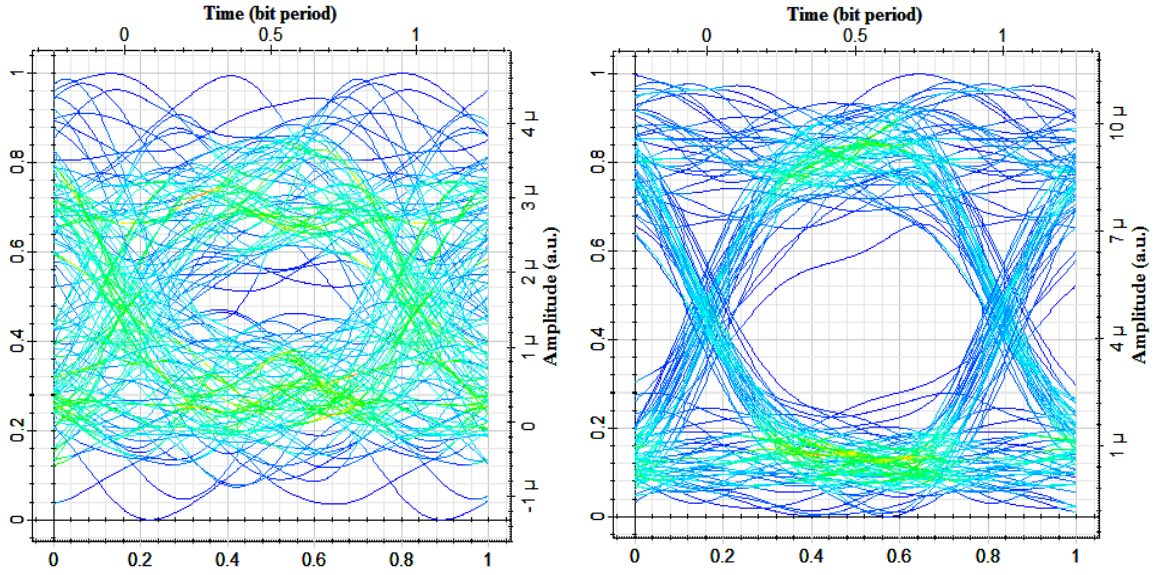
3.2.5. Khảo sát ảnh hưởng của photodiode

Các tham số hệ thống sử dụng trong cấu hình mô phỏng công suất phát P_T = 30dBm, tốc độ bit R_b = 2 Gbps, cự ly truyền $L_{GS_A\ -\ HAP;\ HAP\ -\ GS_B}$ = 20 km là không thay đổi, cự ly truyền L_{HAP} = 22 km, hệ số suy hao $\sigma_{GS_A\ -\ HAP;\ HAP\ -\ GS_B}$ = 0,4 dB/km, hệ số suy hao σ_{HAP} = 0,05 dB/km, bước sóng λ = 1550 nm và hệ số khuếch đại $G_{HAP\ ,\ HAP\ -GSB}$ = 20 dB.

Bảng 3.5: So sánh ảnh hưởng của photodiode đến hệ thống

✓ ***Kênh thứ nhất***

STT	Photodiode	Max Q	Min BER
1	APD	5,91635	$1{,}61861.10^{-9}$
2	PIN	2,43091	0,00753



BER PIN BER APD

Hình 3.23: Khảo sát ảnh hưởng của Photodiode đến hệ thống.

Theo khảo sát ảnh hưởng của photodiode đến hệ thống WDM –FSO trong HAP trong hình 3.23 nhận thấy photodiode APD nhận tín hiệu nhiễu ít hơn photodiode PIN.

3.3. Kết luận chương

Nội dung chương 3 đưa ra hệ thống WDM – FSO 4 kênh trong HAP trong đó có kiến trúc hệ thống WDM – FSO trong HAP, mô hình hóa và mô phỏng hệ thống. Ngoài ra, nội dung chương 3 tập trung vào đánh giá hiệu năng của hệ thống WDM –FSO 4 kênh trong hạ tầng trên cao, trong đó xét đến ảnh hưởng của tốc độ bít, ảnh hưởng của công xuất phát, ảnh hưởng của khoảng cách đường truyền, kỹ thuật điều chế,…

KẾT LUẬN

Nội dung luận văn đã trình bày một cách tổng quan nhất về hệ thống truyền thông quang không dây FSO kết hợp với ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM trong hạ tầng trên cao HAP. Các ưu điểm thách thức đối với cả hệ thống, trình bày các nguyên nhân chính làm suy giảm hiệu năng của hệ thống cũng như các giải pháp tối ưu của tuyến đường truyền trong không gian tự do FSO. Ngoài ra, luận văn còn giới thiệu FSO (hay truyền thông quang không dây) là công nghệ viễn thông sử dụng sự truyền lan ánh sáng trong không khí để truyền tín hiệu giữa hai điểm. Đây là công nghệ truyền thông băng rộng tầm nhìn thẳng, trong đó tín hiệu quang thay vì truyền trong sợi quang, được phát đi trong một búp sóng quang qua không gian. Một mạng truyền thông quang không dây bao gồm các bộ thu – phát quang (gồm một khối thu và một khối phát) cung cấp khả năng thông tin hai chiều. Mỗi khối phát quang sử dụng một nguồn quang và một thấu kính để phát tín hiệu quang qua không gian tới khối thu. Tại phía thu, một thấu kính khác được sử dụng để thu tín hiệu, thấu kính này được nối với khối thu có độ nhạy cao qua một sợi quang. Cự ly hoạt động của một tuyến FSO từ vài trăm km đến vài km. Với các hệ thống FSO trong không gian, cự ly kết nối có thế vài chục km (từ mặt đất tới hạ tầng trên cao HAP và ngược lại). Ngoài ra, luận văn đã phân tích các kết quả như đưa ra được phổ tín hiệu đầu vào so với phổ tín hiệu đầu ra, tỷ lệ lỗi bit, biểu đồ mắt BER với khoảng cách đường truyền, BER với công suất phát…

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận văn sẽ tập trung vào nghiên cứu mô hình toán học và các trương trình mô phỏng khác để đánh giá hiệu năng của hệ thống WDM – FSO trong HAP, mã hóa kênh trong hệ thống WDM – FSO trong HAP…

DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng Việt

[1] Nguyễn Thị Thu Hiên "*Nghiên cứu giải pháp thiết kế và đánh giá hiệu năng mã kênh cho hệ thống thông tin HAP*", HVBCVT, năm 2019.

[2] PGS.TS Đặng Thế Ngọc *"Phân tích hiệu năng tuyến truyền dẫn quang kết nối hạ tầng truyền thông trên cao"*, mã số 09 –HV -2017 – VT1, năm 2019.

[3] PGS. TS Vũ Văn San. "*Hệ thống thông tin quang"*, tập 2. Nhà xuất bản Bưu Điện, 2008.

[4] Phạm Thị Thúy Hiền *"Nghiên cứu giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống truyền thông quang không dây"*, HVBCVT, năm 2016.

Tài liệu tiếng Anh

[5] COST297 (2010, January) *HAPCOS - High altitude platforms for communications and other Services* [Online] Available: http://www.hapcos.org.

[6] G. Keiser, "*Optical Fiber Communications*". Third edition, McGraw-Hill, năm 2000.

[7] Linh D. Truong, Hien T. T. Pham, Ngoc T. Dang, and Toi V. Doan, "*Topology Design and Cross-Layer Optimization for FSO Mesh Networks Impaired by Atmospheric Turbulence and Misalignment Fading*," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 9, no. 12, pp. 1097-1107, Dec. 2017.

[8] Minh Q. Vu, Nga T. T. Nguyen, Hien T.T. Pham, and Ngoc T. Dang, "*All-Optical Two Way Relaying Free-Space Optical Communications for HAP-based Broadband Backhaul Networks*," Optics Communications 2017.

[9] Parkash, S., Sharma, A., Singh, H., & Singh, H. P. "*Performance investigation of 40 GB/s DWDM over free space optical communication system using RZ modulation format."* Advances in Optical Technologies, 2016.

[10] Rashidi, Florence, Jing He, and Lin Chen. "*Spectrum slicing WDM for FSO communication systems under the heavy rain weather*" Optics Communications 387 (2017): 296 -302.