HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



BÙI VĂN NHUNG

HỆ THỐNG FSO TRONG ĐIỀU KIỆN THỜI TIẾT CỦA MIỀN TRUNG DU BẮC BỘ

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI – 2025

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



BÙI VĂN NHUNG

HỆ THỐNG FSO TRONG ĐIỀU KIỆN THỜI TIẾT CỦA MIỀN TRUNG DU BẮC BỘ

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

MÃ SỐ: 8.52.02.08

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

TS. Phạm Anh Thư

TS. Nguyễn Đức Bình

HÀ NỘI - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu được trình bày trong đề án là trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Hà Nội, ngày....tháng ..... năm 2025

Học viên

Bùi Văn Nhung

LỜI CẢM ƠN

Để có thể hoàn thành đề tài luận văn thạc sĩ một cách hoàn chỉnh, bên cạnh sự nỗ lực cố gắng của bản thân còn có sự hướng dẫn nhiệt tình của các Thầy, Cô, sự giúp đỡ của bạn bè trong suốt thời gian học tập nghiên cứu và thực hiện luận văn thạc sĩ. Đặc biệt, em xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến TS. PHẠM ANH THƯ, TS. NGUYỄN ĐỨC BÌNH; Thầy, cô đã trực tiếp hướng dẫn, chỉ bảo tận tình, chu đáo và có những nhận xét, góp ý quý báu giúp em trong suốt quá trình thực hiện luận văn cho đến khi luận văn được hoàn thành. Em xin gửi làm cảm ơn đến tất cả Thầy, Cô giáo Học viện Công nghệ Bơu chính Viễn thông đã tận tình chỉ bảo và tạo mọi điều kiện thuận lợi để em đơợc nghiên cứu và học tập trong thời gian qua.

Hà Nội, ngày ... tháng ... năm 2025

Học viên

Bùi Văn Nhung

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN ..... **iii**
LỜI CẢM ƠN ..... **iv**
MỤC LỤC ..... **v**
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT ..... **vii**
DANH MỤC BẢNG BIỂU ..... **viii**
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ ..... **ix**
MỞ ĐẦU **1**
CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG FSO **3**
1.1 Giới thiệu chung về hệ thống FSO **3**
1.2 Kiến trúc hệ thống FSO **4**
1.3 Nguyên lý hoạt động của hệ thống FSO **12**
1.4 Ưu nhược điểm của hệ thống FSO **15**
1.5 Ứng dụng của hệ thống FSO **18**
1.6 Kết luận chương 1 ..... **22**
CHƯƠNG II: MÔ HÌNH KÊNH CỦA HỆ THỐNG FSO TRONG ĐIỀU KIỆN THỜI TIẾT MIỀN TRUNG DU BẮC BỘ **24**
2.1 Giới thiệu chung **24**
2.2 Suy hao đường truyền **25**
2.3 Một số mô hình kênh điển hình **27**
2.3.1. Nhiễu loạn trong hệ thống FSO ***28***
2.3.2. Mô hình nhiễu loạn Log-Normal ***30***
2.3.3. Mô hình Gamma-Gamma ***34***
2.4 Điều kiện thời tiết của miền Trung du Bắc bộ **37**
2.5 Mô hình kênh cho hệ thống FSO trong điều kiện thời tiết của miền Trung du Bắc bộ **38**
2.6 Kết luận chương 2 ..... **39**
CHƯƠNG III: MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG **40**
3.1. Mô hình hệ thống **40**
3.2. Kết quả mô phỏng **44**
3.2.1. Đánh giá ảnh hưởng của tham số tuyến FSO đến chất lượng truyền dẫn tín hiệu QPSK và 16-QAM ***44***

3.2.2. Khảo sát tác động của tham số chỉ số chiết suất môi trường đến chất lượng hệ thống *50*

3.2.3. Khảo sát ứng dụng FSO kết hợp với tuyến truyền dẫn sợi quang *53*

3.3. Kết luận chương 3 ..... **56**

KẾT LUẬN CHUNG VÀ KIẾN NGHỊ **57**

TÀI LIỆU THAM KHẢO **58**

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
APD	Avalanche Photodiode	Photodiode quang thác
AF	Amplify and Forward	Khuếch đại và chuyển tiếp
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ bit lỗi
BEP	Bit Error Probability	Xác suất bit lỗi
BPSK	Binary Phase-Shift Keying	Khóa dịch pha nhị phân
CDF	Cumulative Distribution Frame	Hàm phân phối tích lũy
CDMA	Code Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo mã
DSL	Digital Subscriber Line	Đường dây thuê bao số
FSO	Free Space Optics	Truyền quang qua không gian tự do
LAN	Local Area Network	Mạng cục bộ
Laser	Light amplification by Stimulated Emission of Radiation	Khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ kích thích
LED	Light Emitting Diode	Diode phát quang
LOS	Line of Sight	Tầm nhìn thẳng
MAN	Metropolitan Area Network	Mạng đô thị
PDF	Probability Density Function	Hàm mật độ xác suất
PSK	Phase Shift Keying	Khóa dịch pha
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Điều chế pha trực giao
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo bước sóng

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Các loại nguồn quang 7
Bảng 1.2. Các bộ tách sóng quang phổ biến sử dụng trong FSO 8
Bảng 1. 3. Phân bố các loại khí tiêu biểu kênh truyền khí quyển 10
Bảng 2.1. Bán kính và các loại tán xạ của các hạt điển hình tại λ = 850nm 27
Bảng 2.2: Các phần tử khí có trong kênh truyền 28

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Mô hình hệ thống FSO.....4
Hình 1.2. Sơ đồ hệ thống FSO với sự nhiễu loạn không khí.....6
Hình 1.3. Sơ đồ khối điều chế QAM.....15
Hình 2.1. Hàm mật độ xác suất của phân bố L-N với các tham số chỉ số nhấp nháy khác nhau.....34
Hình 2.2. Hàm mật độ xác suất của phân bố G-G với các tham số chỉ số nhâp nháy khác nhau.....36
Hình 2.3. Hàm mật độ xác suất của phân bố G-G và L-N với các tham số chỉ số nhấp nháy khác nhau.....36
Hình 3.1 Mô hình truyền dẫn FSO 4 kênh.....41
a) Không kết hợp tuyến cáp sợi quang..... **Error! Bookmark not defined.**
b) Có kết hợp tuyến cáp sợi quang.....41
Hình 3.2 Sơ đồ mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Optisystem.....43
a) Sử dụng điều chế QPSK..... **Error! Bookmark not defined.**
b) Sử dụng điều chế 16-QAM..... **Error! Bookmark not defined.**
c) Kết hợp tuyến cáp sợi quang..... **Error! Bookmark not defined.**
Hình 3.3 Tham số Q biến thiên theo công suất phát quang đối với tín hiệu QPSK.....45
Hình 3.4. Tham số Q biến thiên theo độ rộng chùm tia ánh sáng phát đối với tín hiệu QPSK.....46
Hình 3.5. Tham số Q biến thiên theo đường kính thấu kính thu đối với tín hiệu QPSK.....47
Hình 3.6. Tham số Q biến thiên theo cự ly tuyến FSO đối với tín hiệu QPSK.....47
Hình 3.7. Tham số Q biến thiên theo công suất phát quang đối với tín hiệu 16-QAM.....48
Hình 3.8. Tham số Q biến thiên theo độ rộng chùm tia ánh sáng phát đối với tín hiệu 16-QAM.....48
Hình 3.9. Tham số Q biến thiên theo đường kính thấu kính thu đối với tín hiệu 16-QAM 49
Hình 3.10. Tham số Q biến thiên theo cự ly tuyến FSO đối với tín hiệu 16-QAM.....49
Hình 3.11. Chất lượng hệ thống theo giá trị chỉ số chiết suất trong điều kiện thời tiết bình thường.....51
Hình 3.12. Chất lượng hệ thống theo giá trị chỉ số chiết suất trong điều kiện thời tiết xấu 52
Hình 3.13. Tham số Q biến thiên theo công suất ghép vào hệ thống.....54
Hình 3.14. Tham số Q biến thiên theo số node add/drop. 55

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh công nghệ thông tin và truyền thông phát triển mạnh mẽ hiện nay, nhu cầu về băng thông cao và kết nối ổn định ngày càng tăng cao. Công nghệ truyền thông quang không gian tự do (Free Space Optics - FSO) đã nổi lên như một giải pháp truyền thông tiên tiến, có khả năng cung cấp băng thông lớn, độ bảo mật cao và chi phí triển khai hợp lý so với cáp quang truyền thống. Công nghệ này sử dụng tia laser để truyền dữ liệu qua không khí, mang lại tốc độ truyền tải cực cao và khả năng linh hoạt trong triển khai mà các phương thức truyền thông khác khó có thể đạt được.

Tuy nhiên, hiệu năng của hệ thống FSO bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi các điều kiện thời tiết như sương mù, mưa, bụi và sự biến động nhiệt độ. Những yếu tố này có thể gây ra hiện tượng tán xạ, hấp thụ và nhiễu loạn khí quyển, dẫn đến suy giảm chất lượng tín hiệu hoặc thậm chí làm gián đoạn hoàn toàn quá trình truyền thông. Chính vì vậy, việc hiểu rõ tác động củpa các điều kiện môi trường cụ thể đối với hệ thống FSO là yếu tố then chốt để đảm bảo độ tin cậy và hiệu quả của công nghệ này.

Miền Trung du Bắc bộ ở Việt Nam có đặc điểm khí hậu nhiệt đới gió mùa với những nét đặc trưng riêng biệt. Khu vực này thường xuyên có độ ẩm cao, sương mù dày đặc vào mùa đông, mưa phùn kéo dài và biến động nhiệt độ đáng kể giữa các mùa trong năm. Sương mù có thể xuất hiện với tần suất cao, đặc biệt vào các tháng từ tháng 12 đến tháng 3, tạo ra môi trường có độ ẩm cực cao và tầm nhìn hạn chế. Mưa phùn thường kéo dài trong nhiều ngày, tạo ra các hạt nước nhỏ lơ lửng trong không khí. Những đặc thù khí hậu này tạo ra những thách thức riêng biệt và phức tạp đối với việc triển khai và vận hành hệ thống FSO tại khu vực này, đòi hỏi cần có những nghiên cứu chuyên sâu và cụ thể.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về hệ thống FSO ở Việt Nam và trên thế giới, nhưng các nghiên cứu chuyên sâu về ảnh hưởng của điều kiện thời tiết cụ thể như miền Trung du Bắc bộ tại Việt Nam vẫn còn rất hạn chế. Hầu hết các nghiên cứu hiện tại tập trung vào các điều kiện khí hậu ôn đới hoặc sa mạc, trong khi đặc tính khí hậu nhiệt đới gió mùa của Việt Nam có những điểm khác biệt đáng kể.

Xuất phát từ những phân tích và đánh giá trên, việc lựa chọn đề tài "Hệ thống FSO trong điều kiện thời tiết của miền Trung du Bắc bộ" là hoàn toàn phù hợp và cần thiết. Tên đề tài đã thể hiện rõ ràng ba yếu tố cốt lõi: đối tượng nghiên cứu là hệ thống FSO - một công nghệ tiên tiến và có tiềm năng ứng dụng cao; yếu tố tác động chính là điều kiện thời tiết - vấn đề then chốt quyết định hiệu năng của hệ thống; và phạm vi nghiên cứu cụ thể là miền Trung du Bắc bộ - khu vực có đặc điểm khí hậu đặc thù và nhu cầu phát triển hạ tầng thông tin cao. Sự kết hợp này không chỉ đảm bảo tính khoa học và thực tiễn của nghiên cứu mà còn tạo ra giá trị ứng dụng trực tiếp cho việc phát triển công nghệ viễn thông tại Việt Nam, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới có ý nghĩa quan trọng đối với cộng đồng khoa học trong nước và quốc tế.

Đề án được trình bày trong 3 chương với các nội dung chính như sau:

Chương 1: Tổng quan về hệ thống FSO.

Chương 2: Mô hình kênh của hệ thống FSO trong điều kiện thời tiết miền trung du bắc bộ.

Chương 3: Mô phỏng và đánh giá hiệu năng hệ thống.

Kết quả của đề án có một phần được trình bày trong bài báo khoa học đang chờ phản biện "A *survey of free-space optical communications performance under real atmospheric conditions in urban areas of Vietnam*".

Do thời gian và kiến thức còn hạn chế nên đề án không tránh khỏi vẫn còn nhiều thiếu xót. Học viên rất mong nhận được những ý kiến đóng góp để nội dung đề án được hoàn thiện hơn.

CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG FSO

1.1 Giới thiệu chung về hệ thống FSO

Hiện nay, nhu cầu sử dụng dịch vụ băng thông rộng tăng mạnh không chỉ ở các đô thị lớn mà còn tại khu vực trung du, miền núi và vùng sâu vùng xa. Tuy nhiên, đặc điểm địa lý đa dạng tại từng khu vực tạo ra nhiều thách thức trong việc triển khai hạ tầng viễn thông truyền thống. Các nhà cung cấp dịch vụ cần lựa chọn những giải pháp phù hợp để đảm bảo hiệu quả khai thác, tối ưu chi phí và đáp ứng yêu cầu về chất lượng dịch vụ. Trong bối cảnh đó, công nghệ FSO (Free Space Optics) nổi lên như một lựa chọn tiềm năng, nhờ thừa hưởng nhiều ưu điểm của truyền dẫn quang như băng thông rộng, tốc độ triển khai nhanh, độ linh hoạt cao và chi phí đầu tư thấp.

FSO là công nghệ truyền thông quang không dây sử dụng ánh sáng, thường là laser, để truyền dữ liệu qua không gian tự do. Do không dùng phổ vô tuyến, các liên kết FSO không cần xin cấp phép tần số và gần như không bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ. Chùm laser có tính định hướng cao, khó bị thu nhận trái phép, từ đó đảm bảo tính bảo mật vượt trội so với nhiều công nghệ truyền dẫn khác. Độ rộng phổ hẹp của tia laser cũng cho phép triển khai mật độ cao nhiều bộ thu–phát trong cùng khu vực mà không gây nhiễu lẫn nhau.

Về môi trường truyền dẫn, hệ thống FSO được chia thành hai loại: FSO trong nhà (Indoor FSO) và FSO ngoài trời (Outdoor FSO). Với FSO ngoài trời, tín hiệu truyền qua bầu khí quyển nên chịu ảnh hưởng bởi các hiện tượng thời tiết như mưa, sương mù, bụi, mây hoặc ánh sáng môi trường. Ngược lại, FSO trong nhà sử dụng không gian bên trong toà nhà làm môi trường truyền, nơi điều kiện ổn định hơn và ít bị tác động của khí hậu.

Khi so sánh với cáp quang, FSO có ưu điểm nổi bật về tốc độ triển khai, khả năng lắp đặt linh hoạt tại các vị trí cao hoặc địa hình phức tạp, đồng thời chi phí đầu tư và bảo trì thấp hơn trong nhiều trường hợp. Một số ứng dụng còn có thể triển khai dạng di động hoặc tạm thời, nơi việc kéo cáp quang là khó khả thi hoặc không kinh tế.

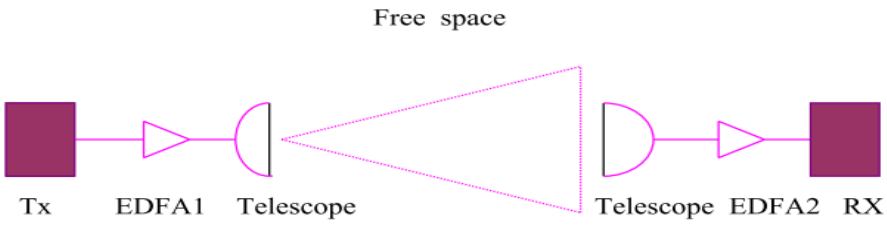
So với các công nghệ vô tuyến, FSO không cần cấp phép phổ, miễn nhiễu điện từ (EMI), khó bị gây nhiễu bởi bức xạ quang ngoài, và có mức độ bảo mật rất cao nhờ chùm tia hẹp, truyền theo đường nhìn thẳng (LOS) và gần như không thể bị phát hiện bởi các thiết bị phân tích phổ hoặc đo RF. Điều này giúp FSO trở thành lựa chọn phù hợp cho các kết nối yêu cầu an toàn thông tin cao.

Cấu trúc của một hệ thống FSO được mô tả như trong hình 1.1, gồm các thành phần sau:

+ Bộ phát thường sử dụng LED hoặc laser diode (LD). LD cho công suất lớn và độ định hướng cao, nhưng yêu cầu độ chính xác bám chùm tia lớn. LED có công suất thấp hơn và góc mở rộng hơn, giúp giảm yêu cầu về căn chỉnh.

+ Bộ thu sử dụng photodiode (PD) tương ứng, có thể kết hợp khuếch đại tín hiệu để tăng khoảng cách truyền. Các thấu kính hội tụ được sử dụng nhằm tập trung chùm sáng, nâng cao hiệu quả thu và tăng tầm truyền.

+ Môi trường truyền là không gian tự do, có hệ số chiết suất gần như không ảnh hưởng đáng kể, ngoại trừ các suy hao do khí quyển.



Hình 1.1. Mô hình hệ thống FSO

1.2 Kiến trúc hệ thống FSO

Giống như các hệ thống truyền dẫn quang khác, mạng FSO có khả năng triển khai theo nhiều kiến trúc tùy theo yêu cầu dịch vụ và mô hình ứng dụng. Tuy nhiên, trong thực tế hiện nay, cấu hình điểm–điểm vẫn được nghiên cứu và ứng dụng phổ biến nhất. Nguyên nhân chính nằm ở những hạn chế của FSO như:

+ Cự ly truyền dẫn của FSO thường không quá dài (chỉ từ vài km đến dưới 20 km), phụ thuộc mạnh vào điều kiện thời tiết và suy hao khí quyển.

+ Tốc độ truyền dẫn trên nhiều hệ thống thương mại vẫn ở mức vừa và nhỏ (từ vài Mb/s đến vài trăm Mb/s).

+ Yêu cầu bám chùm cao, do góc mở của chùm sáng phát rất nhỏ (chỉ vài đến vài chục mrad), khiến việc duy trì liên kết ổn định trở nên khó khăn hơn khi triển khai trên các tuyến dài hoặc nhiều nút.

Với những đặc điểm trên, FSO hiện được sử dụng chủ yếu trong các mạng truy nhập cuối – last mile, trong hệ thống di động, hoặc thay thế các tuyến vi ba cự ly ngắn với dung lượng vừa và nhỏ.

Các hệ thống FSO có thể được thiết kế theo nhiều cấu hình mạng như điểm–điểm, lưới, điểm–đa điểm và vòng. Sự linh hoạt này giúp nhà cung cấp dịch vụ dễ dàng xây dựng, mở rộng và nâng cấp hệ thống.

Kiến trúc mạng điểm–điểm

Kiến trúc điểm–điểm là dạng đơn giản và phổ biến nhất, phù hợp cho việc thiết lập các tuyến kết nối riêng lẻ hoặc mở rộng mạng trong phạm vi cự ly hạn chế. Mô hình này thường được dùng khi cần rút ngắn chiều dài tuyến do ảnh hưởng thời tiết hoặc khi muốn tạo một liên kết băng rộng mà không cần kéo cáp quang.

Kiến trúc mạng lưới

Mạng lưới bao gồm nhiều nút được kết nối với nhau tạo thành các đường dự phòng. Mỗi nút có thể liên lạc trực tiếp hoặc thông qua một số chặng trung gian. Mức độ dự phòng càng cao thì độ tin cậy của mạng càng lớn. Kiến trúc này cho phép thêm nút dễ dàng, tuy nhiên vẫn bị giới hạn về khoảng cách giữa các liên kết FSO.

Kiến trúc mạng điểm–đa điểm

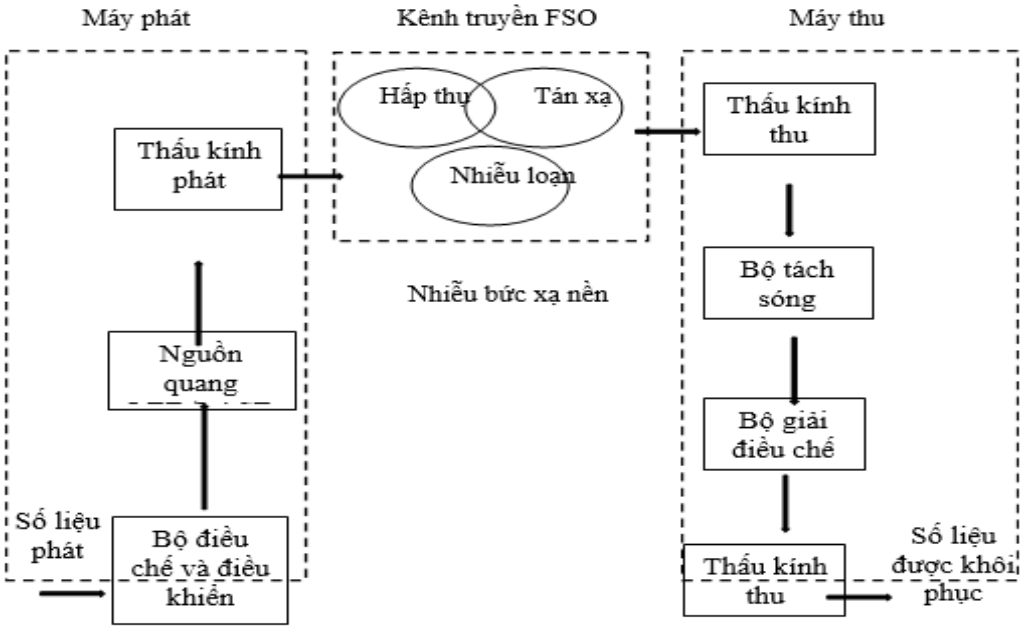
Trong cấu hình điểm–đa điểm, một nút trung tâm phân phối tín hiệu đến nhiều nút khác thông qua các liên kết FSO. Cách triển khai tối ưu là kết nối mỗi tuyến FSO

tới thiết bị lớp 2/3 đặt trong tòa nhà, sau đó dùng cáp quang nội bộ nối về bộ chuyển mạch/định tuyến tại vị trí bất kỳ. Kiến trúc này có chi phí thấp hơn và linh hoạt hơn so với mô hình điểm–điểm khi cần mở rộng số lượng nút.

Kiến trúc mạng vòng

Kiến trúc vòng gồm các nút được liên kết với nhau tạo thành một vòng khép kín, có thể phân nhánh thành các tuyến điểm–điểm. Mạng vòng có độ tin cậy cao hơn mạng điểm–điểm hoặc điểm–đa điểm nhờ khả năng duy trì kết nối khi một nhánh gặp sự cố, đồng thời không phức tạp như mạng lưới.

Về cấu trúc hệ thống, một hệ thống FSO cơ bản bao gồm ba phần chính: máy phát, kênh truyền, và máy thu. Sơ đồ tổng quát của hệ thống được minh họa trong Hình 1.2.



Hình 1.2. Sơ đồ hệ thống FSO với sự nhiễu loạn không khí

Máy phát:

Chức năng chính của máy phát là điều chế dữ liệu băng gốc thành tín hiệu quang. Tín hiệu sau khi điều chế từ nguồn quang (LED hoặc LASER) được tập hợp bởi một thấu kính và phát qua môi trường khí quyển tới máy thu. Các loại nguồn quang được chỉ ra trong bảng 1.1.

Trong dải bước sóng từ 700 ÷10000 nm có rất nhiều cửa sổ truyền dẫn hầu như suốt với mức suy hao < 0,2 dB/km với nguồn quang được sử dụng có thể là LED hoặc LASER tùy thuộc vào yêu cầu cụ thể của từng hệ thống. Tuy nhiên, hầu hết các hệ thống FSO đều được đều được thiết kế để hoạt động trong các cửa sổ tuyền dẫn có bước sóng trong dải 780-850 nm và 1520-1600 nm. Cửa sổ truyền dẫn trong dải từ 780-850 nm được sử dụng rộng rãi nhất vì thiết bị và thành phần của hệ thống có thể được sản xuất và triển khai với chi phí thấp khi hoạt động ở những bước sóng trong cửa sổ truyền dẫn này.

Mặc dù vậy, dải tần 1550 nm đang được quan tâm, đã và đang đưa vào sử dụng nhiều với một số lí do sau. Đầu tiên là, hệ thống sử dụng bước sóng 1550 nm có khả năng tương thích với các mạng ghép kênh phân chia theo bước sóng ở cửa sổ thứ 3. Thứ hai là, bước sóng λ = 1550 nm bảo vệ mắt hơn so với các bước sóng khác (công suất phát tại bước sóng 1550 nm có thể gấp 50 lần so với tại 850 nm). Ba là, giảm được năng lượng mặt trời và tán xạ ánh sáng trong mây mù/sương mù. Vì vậy, tại bước sóng 1550 nm có thể truyền được công suất đáng kể vượt qua việc suy hao bởi sương mù. Tuy nhiên, độ nhạy máy thu giảm, giá thành linh kiện cao và yêu cầu liên kết chặt chẽ là hạn chế gặp phải ở λ = 1550 nm.

Bảng 1.1 Các loại nguồn quang

Bước sóng (nm)	Loại	Ghi chú
~ 850	Phát xạ mặt khoang cộng hưởng dọc	Rẻ và có tính khả dụng
		Không có hoạt động làm mát, mật độ công suất thấp, tốc độ lên tới ~ 10Gb/s
~ 1300/~ 1550	Fabry – Perot Phân phối – phát tán xạ	Thời gian sống lâu
		Tiêu chuẩn an toàn cho mắt thấp hơn
		Mật độ công suất cao hơn 50 lần ($100nW/cm^2$).
		Tương thích với EDFA
		Tốc độ cao, lên tới 40Gb/s
		Độ dốc hiệu quả 0,03-0,2W/A

Bước sóng (nm)	Loại	Ghi chú
~ 10000	Thác lượng tử	Chi phí cao và tương đối mới
		Rất nhanh và độ nhạy cao
		Truyền dẫn trong sương mù tốt hơn
		Thành phần chế tạo không có sẵn
		Không thâm nhập qua thủy tinh
Gần hồng ngoại	LED	Rẻ hơn
		Mạch điều khiển đơn giản
		Công suất và tốc độ dữ liệu thấp hơn

Máy thu:

Máy thu có chức năng hỗ trợ việc khôi phục các dữ liệu đã được phát đi sau khi đã chịu ảnh hưởng của môi trường trong quá trình truyền sóng.

Các thành phần máy thu trong hệ thống FSO bao gồm:

+ Phần tử thu tín hiệu quang: có chức năng thu thập và tập trung các phát xạ quang tới bộ tách sóng quang. Khẩu độ thấu kính thu càng lớn thì khả năng tập hợp được nhiều phát xạ quang vào bộ tách sóng quang.

+ Bộ lọc thông dải quang: có nhiệm vụ làm giảm bức xạ nền và lọc.

+ Bộ tách sóng quang PIN hoặc APD (Advance Photodiode): có nhiệm vụ chuyển trường quang đến thành tín hiệu điện. Các bộ tách sóng quang thường được sử dụng trong các hệ thống truyền thông quang hiện nay được liệt kê trong bảng 1.2.

+ Mạch xử lý tín hiệu: mạch này có nhiệm vụ khuếch đại, lọc và xử lý tín hiệu điện bảo đảm tính chính xác để có thể phục hồi được dữ liệu đã được truyền đi.

Bảng 1.2. Các bộ tách sóng quang phổ biến sử dụng trong FSO

Loại cấu trúc	Vật liệu	Dải 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	-26dBm tại tốc độ,2Gb/s	1
	InGaAs	1000-1700	0,9	-46 dBm tại tốc độ 155Mb/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 1,25Gb/s	10

Quá trình tách tín hiệu phía máy thu cơ bản được chia làm hai loại, gồm tách sóng trực tiếp và tách sóng coherent. Tách sóng trực tiếp là phương thức sử dụng công suất hoặc cường độ của bức xạ quang đến máy thu để tách tín hiệu. Chính vì vậy, cường độ dòng điện tín hiệu ra của bộ tách sóng quang (PD-Photodiode) sẽ tỉ lệ với công suất quang đến. Phương pháp xử lý tín hiệu này vừa đơn giản mà lại phù hợp với hầu hết hệ thống quang sử dụng phương thức điều chế cường độ.

Tách sóng coherent là loại tách sóng hoạt động dựa trên hiện tượng trộn lẫn của các bức xạ quang, trường bức xạ quang đến bộ tách sóng quang sẽ được trộn lẫn với môi trường bức xạ quang khác được tạo ra ngay tại bề mặt của bộ tách sóng quang. Máy thu chuyển đổi tổng hợp có thể được chia làm hai loại: máy thu đồng tần (homodyne) và máy thu khác tần (heterodyne). Đối với máy thu đồng tần thì tần số của bộ dao động nội trùng với tần số của ánh sáng tới một cách chính xác; trong khi đối với máy thu khác tần thì ngược lại, bức xạ quang tạo ra bề mặt của bộ tách sóng quang khác với bức xạ quang tới. Khác với máy thu vô tuyến tổng hợp, máy thu quang tổng hợp thì bức xạ quang tạo ra do bộ dao động trên bề mặt của bộ tách sóng quang không cần phải có cùng pha với bức xạ tới. Điểm nổi trội của máy thu quang tổng hợp là dễ dàng khuếch đại tại tần số trung tâm và tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) có thể tăng khi mà công suất của bộ dao động nội tăng lên.

Có nhiều loại nguồn nhiễu khác nhau xuất hiện tại máy thu tác động lên quá trình tách các trường quang. Ba loại nguông nhiễu chủ yếu trong truyền thông FSO là: nhiễu do ánh sáng nền, nhiễu do bộ tách tách sóng quang gây ra và nhiễu nhiệt

trong mạch điện tử. Mặc dù bức xạ nền có thể được hạn chế bằng cách sử dụng bộ lọc quang, song nó vẫn gây ra nhiễu đáng kể trong quá trình tách tín hiệu ở máy thu. Nhiễu lượng tử của bộ tách sóng quang bắt nguồn từ sự ngẫu nhiên của quá trình chuyển đổi quang điện. Nhiễu nhiệt có thể được mô hình hóa dưới dạng nhiễu GAUSS trắng cộng (AWGN: Additive White Gaussian Noise) có mật độ phổ tỉ lệ thuận với nhiệt độ bội thu.

Kênh truyền dẫn khí quyển:

Khác so với kênh nhiễu GAUSS thông thường, kênh truyền dẫn quang trong hệ thống FSO 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}.

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

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

Tính nhiễu loạn là một đặc điểm quan trọng khác của kênh truyền FSO. Khi ánh sáng truyền xuống trái đất, các tia bức xạ bị hấp thụ và làm nóng bề mặt trái đất tạo nên sự không đồng nhất trong không khí khi các vùng nóng, lạnh gặp nhau tạo nên sự thay đổi về chiết xuất, mật độ theo không gian và thời gian. Sự phụ thuộc của nhiễu loạn khí quyển 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. Sự phân bố các loại khí tiêu biểu được liệt kê trong bảng 1.3 dưới đây.

Bảng 1. 3. Phân bố các loại khí tiêu biểu kênh truyền khí quyển

Thành phần khí	Ký hiệu hóa chất	Khối lượng phân tử trung bình	Tỷ lệ trong khí quyển (phần triệu)
Nitrogen	N2	28,013	780,840
Oxygen	O2	31,999	209,460
Argon	Ar	39,948	9,340
Carbonic	CO2	44,010	384
Neon	Ne	20,180	18,18
Helium	He	4,003	5,24
Methane	CH4	16,043	1,774
Krypton	Kr	83,798	1,14
Hydrogen	H2	2,016	0,56
Nitrous Oxide	N2O	44,012	0,320
Ozone	O3	47,998	0,01-0,10
Xenon	Xe	131,293	0,09

Những ảnh hưởng của sự nhiễu loạn của khí quyển ảnh hưởng đến hệ thống FSO bao gồm:

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

+ Trải rộng chùm tia: hiện tượng tán xạ dẫn đến giảm mật độ công suất thu; đây là nguyên nhân độ phân kỳ của chùm tia bức xạ bị tăng lên.

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

+ Nhấp nháy: sự biến đổi về không gian của cường độ ánh sáng gây ra bởi nhiễu 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. Đây chính là nguyên nhân của việc gây ra sự nhiễu loạn. Vai trò của các túi khí này như những thấu kính có đặc tính thay đổi theo thời gian và làm ảnh hưởng đến hiệu năng của các hệ thống FSO tăng mạnh, nhất là khí có ánh sáng mặt trời.

+ Giảm sự kết hợp không gian: điều đặc biệt ảnh hưởng đến máy thu đó là nhiễu loạn khí quyển gây ra suy giảm sự kết hợp pha dọc theo mặt phẳng pha của chùm tia.

+ Thay đổi phân cực: những thay đổi trạng thái phận cực khi tia bức xạ đi qua môi trường nhiễu loạn thì trạng thái phân cực của tia bức xạ sẽ thay đổi. Tuy nhiên, đối với trường quang truyền theo phương ngang thì sự thay đổi phân cực là không đáng kể và có thể bỏ qua.

Từ những phân tích ở trên, chúng ta có thể thấy rằng những tác động gây ra từ kênh truyền khí quyển như suy hao tín hiệu phát (tổn hao công suất), tác động đến tính ổn định của tín hiệu thu (hiệu ứng nhiễu loạn). Hiển nhiên là, những thách thức không nhỏ cho việc tính toán và mô phỏng kênh truyền từ sự biến đổi của môi trường truyền mà chúng ta cần tính tới khi triển khai.

1.3 Nguyên lý hoạt động của hệ thống FSO

Hệ thống FSO hoạt động dựa trên nguyên lý biến đổi tín hiệu điện thành tín hiệu ánh sáng, truyền tín hiệu quang này qua môi trường không gian tự do và khôi phục lại dữ liệu tại đầu thu. Ở phía phát, dữ liệu từ nguồn được mã hóa và chuyển đổi thành tín hiệu quang thông qua laser diode hoặc LED công suất cao. Trong phần lớn các hệ thống FSO hiện nay, điều chế cường độ (IM – Intensity Modulation) được sử dụng rộng rãi, trong đó cường độ bức xạ quang được điều chỉnh trực tiếp bởi dữ liệu truyền đi. Ngoài điều chế trực tiếp lên nguồn sáng, các hệ thống tốc độ cao còn có thể sử dụng điều chế ngoài, chẳng hạn như bộ giao thoa Mach–Zehnder, để đạt băng thông lớn hơn và cho phép điều chế theo các thuộc tính khác của trường bức xạ quang như pha, phân cực hoặc tần số. Sau khi điều chế, tín hiệu ánh sáng được phóng qua không gian tự do và hướng tới đầu thu theo nguyên lý đường truyền thẳng; dữ liệu đầu vào từ phía nguồn được truyền tới một điểm thu cách xa mà không cần bất kỳ môi trường dẫn nào.

Tại đầu thu, tín hiệu ánh sáng sau khi lan truyền qua không khí sẽ được tập trung bởi hệ thấu kính thu và dẫn vào bộ tách sóng quang. Trong quá trình này, tín

hiệu quang thường kèm theo nhiễu nền, bức xạ ngẫu nhiên và méo tín hiệu do điều kiện khí quyển, khiến các tham số như kích thước thấu kính và công suất thu trở nên rất quan trọng vì chúng quyết định lượng ánh sáng được hội tụ vào bộ thu. Đối với hệ thống thông tin quang, công suất tín hiệu điện thu tỷ lệ thuận với bình phương diện tích khẩu độ thu A^2, trong khi phương sai của nhiễu lượng tử chỉ tỷ lệ thuận với A; do đó, trong trường hợp hệ thống bị giới hạn bởi nhiễu lượng tử, tỉ số tín hiệu–trên–nhiễu (SNR) sẽ tăng theo A. Tuy nhiên, việc tăng kích thước khẩu độ thu cũng làm tăng điện dung của bộ thu, dẫn đến giới hạn băng thông. Sau khi thu, tín hiệu ánh sáng được chuyển đổi thành tín hiệu điện nhờ bộ tách sóng PIN hoặc APD, sau đó được giải mã để khôi phục lại dữ liệu gốc.

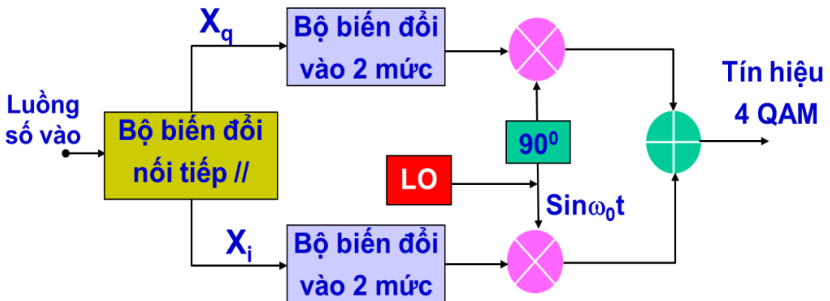
Trong hệ thống FSO, việc điều chế dữ liệu thành tín hiệu ánh sáng có thể được thực hiện bằng nhiều kỹ thuật khác nhau. Phương pháp phổ biến nhất là điều chế khóa đóng mở OOK (On–Off Keying), do tính đơn giản: sự có mặt hay vắng mặt của sóng mang lần lượt biểu diễn bit "1" và "0". Trong OOK, dạng xung hình chữ nhật thường được sử dụng để giảm độ phức tạp của bộ điều chế; tốc độ bit Rb = 1/Tb, trong đó Tb là thời gian tồn tại của một bit và liên quan trực tiếp đến tốc độ mà nguồn quang có thể bật/tắt. Ở bộ giải điều chế, xung thu được trong mỗi khoảng thời gian bit sẽ được lấy mẫu và so sánh với một ngưỡng quyết định để xác định giá trị bit; bộ thu này được xem như bộ thu khả giống nhất, giúp giảm tỉ lệ lỗi bit (BER). Tuy nhiên, do ảnh hưởng của nhiễu quang và bức xạ ngẫu nhiên – thường được mô hình bởi phân bố Gauss – lỗi giải điều chế vẫn có thể xảy ra.

Một kỹ thuật điều chế khác là PPM (Pulse Position Modulation), trong đó một bit đầu vào được mã hóa thành vị trí của một xung hình chữ nhật trong khung thời gian Tw chia thành M khe. Chỉ một khe chứa xung, nên sơ đồ này được ký hiệu là M-PPM, mỗi vị trí xung mã hóa $\log_2 M$ bit thông tin, tốc độ bit $Rb = \log_2 M/Tw$. Ở đầu thu, một bộ thu M-PPM tối ưu sẽ sử dụng các bộ lọc tương ứng với từng khe để phát hiện vị trí xung có dòng quang lớn nhất; nếu giải điều chế đúng vị trí khe chứa xung, toàn bộ $\log_2 M$ bit được khôi phục chính xác. PPM có ưu điểm lớn về hiệu suất công suất so với OOK và không cần ngưỡng quyết định thích ứng, nhưng lại đòi hỏi

hệ thống thu–phát phải đồng bộ chặt chẽ, yêu cầu băng thông rộng và thiết bị phức tạp hơn.

Ngoài ra, với các hệ thống yêu cầu tốc độ dữ liệu rất cao, kỹ thuật điều chế theo pha và biên độ như QPSK và 16-QAM cũng được ứng dụng trong FSO, đặc biệt ở các hệ thống tích hợp với OFDM hoặc mạng quang tiên tiến. Điều chế QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) là kỹ thuật dịch pha bốn mức, trong đó hai bit dữ liệu được mã hóa lên một ký tự bằng cách thay đổi pha của sóng mang. Tín hiệu được tách thành hai nhánh I và Q, lần lượt mang bởi cos(ωt) và sin(ωt). Khi bit dữ liệu là "1", tín hiệu BPSK cùng pha với sóng mang; khi là "0", tín hiệu ngược pha 180°. Ở bộ giải điều chế, tín hiệu thu được đưa qua sơ đồ tái lập sóng mang gồm hệ bình phương tín hiệu, vòng khóa pha PLL, bộ dịch pha và bộ chia tần số; sau đó nhân với sóng mang tái lập để giải mã dữ liệu. QPSK có ưu điểm về hiệu quả phổ gấp đôi BPSK, khả năng chống nhiễu tốt và dễ hiện thực bằng mạch I/Q, nhưng cũng phức tạp hơn BPSK và dễ lỗi hơn ở mức SNR thấp.

Điều chế 16-QAM (hình 1.3) kết hợp điều chế pha và điều chế biên độ, biểu diễn tín hiệu trên mặt phẳng I/Q với 16 điểm chòm sao, mỗi điểm mang 4 bit dữ liệu. Nhờ thay đổi biên độ, QAM giảm số trạng thái pha cần phân biệt nên giảm xác suất lỗi pha; tuy nhiên, tăng số mức điều chế cũng làm hệ thống khó thiết kế hơn và yêu cầu bộ thu có độ tuyến tính cao. Tại bộ giải điều chế QAM, tín hiệu thu được tách thành hai đường, nhân với hai dao động nội lệch pha 90°, lọc thông thấp và chuyển đổi A/D để tạo thành hai dãy bit, sau đó ghép nối lại để thu được chuỗi dữ liệu hoàn chỉnh. QAM có hiệu quả phổ cao và tốc độ dữ liệu lớn, nhưng các điểm chòm sao gần nhau khiến nó nhạy nhiễu hơn QPSK và yêu cầu SNR cao hơn. Nhìn chung, QPSK phù hợp với truyền dẫn tầm xa do độ nhạy cao, còn 16-QAM phù hợp cho truyền dẫn tốc độ cao với yêu cầu băng thông điện tử thấp hơn. Khi áp dụng kỹ thuật bù phi tuyến NLC, cả hai đều cải thiện tầm với, nhưng QPSK vẫn duy trì ưu thế ở các tuyến rất dài do OSNR penalty thấp hơn.



Hình 1.3. Sơ đồ khối điều chế QAM

Sau khi tín hiệu quang được thu và chuyển đổi sang tín hiệu điện, dữ liệu sẽ được khuếch đại, giải mã và đưa qua modem đến các thiết bị mạng như switch, router hoặc trực tiếp đến máy tính. Hệ thống FSO có thể làm việc theo chế độ song công nếu sử dụng hai kênh quang tách biệt cho truyền và nhận. Toàn bộ quá trình hoạt động của FSO có thể tóm tắt như sau: dữ liệu số được điều chế thành ánh sáng tại máy phát; tín hiệu ánh sáng được truyền qua không khí; ống kính thu gom ánh sáng tại đầu thu; bộ tách sóng chuyển đổi ánh sáng thành tín hiệu điện; tín hiệu được giải điều chế và khôi phục thành dữ liệu gốc. Trong đa số hệ thống FSO hiện nay, các bước sóng thường gặp là 850 nm, 1310 nm và 1550 nm; kỹ thuật điều chế có thể là OOK, PPM, DPSK, FSK, QPSK hoặc QAM; khoảng cách truyền đạt từ 100 m đến vài kilomet và tốc độ truyền dữ liệu có thể đạt từ vài Mbps đến hàng chục Gbps tùy thiết kế và điều kiện môi trường.

1.4 Ưu nhược điểm của hệ thống FSO

Một trong những ưu điểm nổi bật nhất của FSO chính là băng thông rất cao. Do sử dụng ánh sáng làm môi trường mang tải, hệ thống FSO có khả năng cung cấp tốc độ truyền dữ liệu từ mức hàng trăm Mb/s đến hàng Gb/s, thậm chí trong điều kiện lý tưởng có thể đạt hàng chục Gb/s, tương đương hoặc tiệm cận hệ thống quang dùng cáp. Cùng với đó, FSO không yêu cầu phải đào đường, kéo cáp hay lắp đặt hạ tầng phức tạp, nhờ vậy thời gian triển khai nhanh, chi phí đầu tư ban đầu thấp và phù hợp cho những khu vực yêu cầu triển khai tạm thời hoặc nhanh chóng như kết nối sự kiện, hội nghị, vùng thảm họa, khu đô thị đông đúc hoặc nơi việc cấp phép đặt cáp khó khăn.

Một ưu điểm đáng kể khác của FSO là tính linh hoạt rất cao trong lắp đặt và cấu hình mạng. Do không phụ thuộc vào hạ tầng vật lý, các liên kết FSO có thể dễ dàng thay đổi góc hướng, mở rộng số lượng tuyến hoặc điều chỉnh vị trí lắp đặt theo yêu cầu mà không gây ảnh hưởng nhiều đến môi trường xung quanh. Công nghệ này cũng an toàn và bảo mật tự nhiên hơn so với truyền dẫn vô tuyến bởi tia sáng quang có độ phân kỳ rất nhỏ, chỉ truyền trong đường thẳng và khó bị nghe lén trừ khi có thiết bị đặt đúng trên đường truyền. Điều này mang lại mức độ an ninh đặc biệt cao cho các ứng dụng quân sự, truyền dẫn thông tin mật hoặc kết nối dữ liệu nhạy cảm. Bên cạnh đó, FSO hoàn toàn miễn nhiễm đối với các nhiễu điện từ và nhiễu tần số vô tuyến, vốn là vấn đề thường gặp trong các hệ thống RF truyền thống. Nhờ vậy, FSO có thể hoạt động ổn định tại môi trường đô thị dày đặc, nơi nhiều thiết bị vô tuyến hoạt động đồng thời, hoặc trong các ứng dụng yêu cầu độ sạch phổ tần.

Tuy sở hữu nhiều ưu điểm, hệ thống FSO cũng bộc lộ hàng loạt hạn chế mang tính đặc thù, trong đó nổi bật nhất là sự phụ thuộc rất lớn vào điều kiện khí quyển. Ánh sáng truyền qua không khí chịu ảnh hưởng mạnh của các yếu tố như mưa, sương mù, tuyết, khói bụi và các chất khí lơ lửng; đặc biệt, sương mù dày đặc có thể làm suy hao tín hiệu tới hàng trăm dB/km, khiến liên kết gần như bị gián đoạn hoàn toàn. Mưa lớn và tuyết dày cũng làm giảm công suất thu và ảnh hưởng đến chất lượng tín hiệu, buộc hệ thống phải giảm tốc độ truyền hoặc tăng công suất phát để duy trì kết nối. Nhiễu động không khí do sự thay đổi mật độ không khí, hiện tượng nhấp nháy (scintillation), dòng khí nóng và các chuyển động hỗn loạn trong bầu khí quyển gây dao động công suất thu, làm tăng BER và gây méo tín hiệu. Tất cả những yếu tố này làm cho FSO không thể đảm bảo độ ổn định như hệ thống cáp quang hoặc RF trong mọi điều kiện thời tiết.

Một nhược điểm quan trọng khác nằm ở yêu cầu đường truyền phải hoàn toàn theo đường thẳng Line-of-Sight (LoS). Bất kỳ vật cản nào xuất hiện giữa hai đầu thu – phát, dù là tòa nhà, cây cối hay công trình mới xây đều có thể làm mất hoàn toàn kết nối. Điều này khiến việc quy hoạch lắp đặt FSO trở nên khó khăn hơn, đặc biệt tại các khu đô thị có tốc độ phát triển hạ tầng cao. Cùng với đó, hệ thống FSO đòi hỏi

độ chính xác rất lớn trong việc căn chỉnh hướng phát và hướng thu do góc phân kỳ của chùm sáng rất nhỏ, thường chỉ vài đến vài chục milliradian. Nếu thiết bị bị rung lắc bởi gió mạnh, dao động cơ học trên các tòa nhà cao tầng hoặc do lún công trình, liên kết quang có thể bị lệch khỏi vị trí thu và làm giảm công suất nhận, gây mất tín hiệu. Đối với nhiều ứng dụng, việc yêu cầu bảo dưỡng định kỳ để đảm bảo căn chỉnh lại liên kết cũng làm tăng chi phí vận hành.

Phạm vi truyền của FSO cũng bị hạn chế. Trong thực tế, các liên kết FSO thường chỉ hoạt động ổn định ở cự ly từ vài trăm mét đến khoảng dưới 5 km; trong điều kiện tối ưu có thể đạt 10 – 20 km nhưng vẫn dễ bị ảnh hưởng bởi thời tiết. Do đó, FSO thích hợp nhất cho các mạng truy nhập cuối, liên kết giữa các tòa nhà, các khuôn viên cơ quan hoặc làm tuyến dự phòng cho mạng cáp quang, thay vì sử dụng như tuyến trục dài. Tuy có khả năng đạt tốc độ dữ liệu rất cao, nhưng khi khoảng cách tăng, chùm sáng bị phân kỳ lớn hơn và công suất thu giảm, làm giảm tốc độ truyền tối đa có thể đạt được. Điều này khiến việc mở rộng FSO lên quy mô diện rộng gặp nhiều rào cản kỹ thuật.

Về mặt thiết bị, hệ thống FSO đòi hỏi các thành phần quang chính xác cao như laser công suất ổn định, thấu kính chất lượng tốt, bộ thu APD hoặc PIN nhạy cao và cơ cấu giữ ổn định cơ học. Điều này làm tăng chi phí khi cần triển khai nhiều liên kết đồng thời. Ngoài ra, các hệ thống FSO hiện đại thường cần tích hợp thêm các bộ ổn định chùm tia, cơ chế hiệu chỉnh tự động hoặc các thuật toán bù dao động để duy trì liên kết khi có nhiễu động môi trường, từ đó làm tăng chi phí và độ phức tạp của thiết bị. Mặc dù chi phí hạ tầng thấp hơn nhiều so với cáp quang, chi phí thiết bị của FSO đôi khi lại không thấp hơn các giải pháp vô tuyến truyền thống.

Dù vậy, FSO vẫn có chỗ đứng riêng trong các ứng dụng mà ưu điểm của nó vượt trội hơn nhược điểm. Trong các môi trường yêu cầu tốc độ cao, yêu cầu an toàn thông tin nghiêm ngặt, hoặc trong những tình huống cần triển khai nhanh mà không thể thi công hạ tầng cáp vật lý, FSO gần như không có đối thủ. Tuy nhiên, khi yêu cầu độ ổn định lâu dài, phạm vi truyền lớn và khả năng hoạt động trong mọi điều kiện thời tiết, các

giải pháp như cáp quang hoặc liên kết vô tuyến mmWave với công nghệ bù suy hao lại tỏ ra phù hợp hơn. Có thể nói rằng FSO là một công nghệ mạnh nhưng phụ thuộc nhiều vào môi trường; hiệu quả nhất khi được sử dụng đúng bối cảnh, đúng mục tiêu.

Nhìn chung, hệ thống FSO mang lại sự kết hợp độc đáo giữa tốc độ cao, tính linh hoạt, chi phí triển khai thấp và mức độ bảo mật tự nhiên rất tốt, nhưng đồng thời chịu nhiều hạn chế do thời tiết, yêu cầu đường truyền thẳng và phạm vi hoạt động ngắn. Chính sự tương phản này tạo nên tính "ngách" của FSO trong lĩnh vực truyền dẫn: không phải là giải pháp thay thế hoàn toàn cho cáp quang hay RF, nhưng là lựa chọn lý tưởng trong những điều kiện phù hợp. Sự phát triển của công nghệ bù nhiễu khí quyển, các thuật toán điều khiển chùm tia và thiết bị thu phát tiên tiến trong tương lai được kỳ vọng sẽ giảm bớt những nhược điểm hiện tại của FSO, giúp công nghệ này mở rộng phạm vi ứng dụng và trở thành một phần quan trọng hơn trong hệ thống truyền thông băng rộng.

1.5 Ứng dụng của hệ thống FSO

Hệ thống thông tin quang không dây FSO ngày càng đóng vai trò quan trọng trong hạ tầng truyền thông hiện đại nhờ khả năng truyền dữ liệu tốc độ cao qua môi trường không gian tự do mà không cần cáp dẫn. Với sự phát triển mạnh của nhu cầu băng thông lớn, tính linh hoạt và khả năng triển khai nhanh, FSO đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, từ dân sự, công nghiệp, quân sự cho đến hàng không vũ trụ. Dưới đây là một số ứng dụng phổ biến của hệ thống FSO.

Ứng dụng FSO trong kết nối dặm cuối – Last Mile Access

Một trong những ứng dụng quan trọng và phổ biến nhất của hệ thống FSO là phục vụ cho việc kết nối dặm cuối (last mile), nơi các nhà cung cấp dịch vụ cần triển khai nhanh các tuyến truyền dẫn từ mạng xương sống đến người dùng hoặc tòa nhà khách hàng. Do chi phí triển khai cáp quang đến từng địa điểm thường rất cao, đặc biệt tại các khu vực đô thị đông đúc hoặc những nơi khó kéo cáp như các tuyến đường giao thông, khu bảo tồn, công trình cổ…, FSO trở thành lựa chọn thay thế hiệu quả với tốc độ truyền dẫn cao và độ linh hoạt lớn. Chỉ cần hai thiết bị đặt tại hai điểm

nhìn thẳng đường ngắm là có thể đưa dịch vụ internet băng rộng, truyền hình, thoại IP đến người dùng. Ngoài ra, FSO còn cho phép các doanh nghiệp tạm thời mở rộng năng lực kết nối trong thời gian ngắn khi cần, chẳng hạn trong giai đoạn nâng cấp hoặc bảo trì mạng hữu tuyến. Với ưu điểm triển khai nhanh, chi phí đầu tư thấp hơn cáp quang và không ảnh hưởng tới hạ tầng công cộng, FSO hiện được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truy nhập đô thị, campus, khu công nghệ cao và khu dân cư cao tầng.

Ứng dụng FSO làm đường truyền dự phòng cho mạng quang và mạng vô tuyến

Trong nhiều hệ thống viễn thông quan trọng, khả năng chống lỗi và đảm bảo độ tin cậy là yêu cầu cốt lõi. FSO được sử dụng như một tuyến truyền dự phòng (backup link) cho các hệ thống cáp quang hoặc vi ba. Khi tuyến hữu tuyến bị đứt do thi công, thiên tai hoặc sự cố phần cứng, tuyến FSO sẽ tự động đảm nhiệm việc truyền dẫn, bảo đảm dịch vụ không bị gián đoạn. Với ưu điểm không chịu ảnh hưởng của nhiễu điện từ, không phụ thuộc vào tần số vô tuyến, và có độ bảo mật tự nhiên cao, FSO trở thành giải pháp dự phòng lý tưởng cho các mạng tài chính, các trung tâm dữ liệu, sân bay, bệnh viện, ngân hàng và các cơ sở hạ tầng trọng yếu. Trong nhiều tình huống khẩn cấp, FSO có thể được triển khai tạm thời trong vài giờ để phục hồi kết nối mà không cần đào đường hoặc xin giấy phép tần số. Tính linh hoạt và khả năng tích hợp dễ dàng với các công nghệ hiện hữu giúp FSO ngày càng được ưa chuộng như một lựa chọn dự phòng chiến lược cho hệ thống thông tin trọng yếu quốc gia.

Ứng dụng FSO trong kết nối giữa các tòa nhà

FSO đặc biệt phù hợp cho việc kết nối giữa các tòa nhà trong khu đô thị, trường đại học, khu công nghiệp hoặc khuôn viên doanh nghiệp. Các tuyến này giúp truyền dữ liệu ở tốc độ cao mà không cần đến cáp ngầm hoặc cột anten. Do yêu cầu duy nhất của hệ thống FSO là hai điểm phải nhìn thấy nhau, các tòa nhà chọc trời hoặc khu campus rộng lớn chính là môi trường lý tưởng để áp dụng giải pháp này. Việc triển khai thiết bị lên mái nhà hoặc ban công giúp nhanh chóng thiết lập liên kết gigabit để phục vụ mạng LAN mở rộng, camera giám sát HD/4K, hệ thống điều khiển tòa nhà

hay kết nối hệ thống IoT. Những tuyến truyền này thường ổn định trong nhiều năm, chi phí thấp hơn so với thuê kênh viễn thông, đồng thời chủ động hoàn toàn về năng lực băng thông. Do đó, FSO ngày càng trở thành một trong các giải pháp hàng đầu để xây dựng mạng nội bộ đa tòa nhà mà không cần phụ thuộc vào hạ tầng của nhà mạng.

Ứng dụng FSO trong các hệ thống quân sự, quốc phòng và an ninh

FSO cung cấp mức độ bảo mật tự nhiên rất cao nhờ đặc tính chùm sáng hẹp, khó bị dò hoặc đánh cắp thông tin từ bên ngoài. Điều này đặc biệt quan trọng trong quân sự, nơi yêu cầu giữ bí mật thông tin là tuyệt đối. FSO được dùng để thiết lập liên lạc giữa các căn cứ, đài quan sát, trạm radar, hệ thống giám sát biên giới hoặc giữa các phương tiện di động trên không – trên biển – mặt đất. Vì không phát sóng vô tuyến nên hệ thống FSO hầu như không thể bị gây nhiễu điện tử như các hệ thống RF truyền thống. Ngoài ra, tốc độ truyền dữ liệu cao cho phép FSO hỗ trợ việc truyền video thời gian thực, bản đồ chiến thuật, dữ liệu cảm biến lớn và tín hiệu điều khiển. Trong nhiều môi trường chiến đấu, việc tránh phát xạ điện từ là vô cùng quan trọng nhằm không bị đối phương phát hiện, và FSO đáp ứng hoàn hảo yêu cầu đó. Khả năng triển khai nhanh chóng, dễ ngụy trang và hoạt động tốt trong các điều kiện khắc nghiệt khiến FSO trở thành thành phần không thể thiếu của mạng thông tin quân sự hiện đại.

Ứng dụng FSO trong các hệ thống điều khiển giao thông thông minh

Cùng với sự phát triển của đô thị thông minh, FSO được ứng dụng rộng rãi trong hệ thống điều khiển và giám sát giao thông. Tại các nút giao thông lớn, việc kéo cáp đến từng vị trí để kết nối camera, cảm biến tốc độ, trạm thu phí hoặc hệ thống quản lý tín hiệu thường tốn kém và khó thi công. FSO cung cấp giải pháp truyền dẫn dữ liệu không dây tốc độ cao, giúp kết nối các bảng thông tin điện tử, hệ thống giám sát an ninh giao thông và đèn tín hiệu. Nhờ khả năng truyền video độ phân giải cao theo thời gian thực, FSO hỗ trợ tích cực cho các trung tâm điều khiển trong việc phân tích và điều tiết giao thông. Bên cạnh đó, hệ thống có thể triển khai tạm thời trong các sự kiện lớn hoặc trong thời gian nâng cấp hạ tầng mà không ảnh hưởng đến lưu thông.

Ứng dụng FSO trong mạng di động 5G/6G và kết nối trạm gốc

Sự phát triển của mạng 5G và tương lai là 6G đòi hỏi mật độ trạm gốc rất cao, kéo theo nhu cầu cực lớn về kết nối backhaul và fronthaul. Nhiều trạm gốc nhỏ (small cell) được lắp đặt trên cột đèn, tòa nhà hoặc công trình công cộng – những vị trí mà việc kéo cáp quang rất khó hoặc tốn kém. FSO trở thành giải pháp lý tưởng nhờ tốc độ truyền dẫn cao đến hàng chục Gb/s, độ trễ thấp và dễ lắp đặt. Nó có thể đóng vai trò như tuyến truyền dẫn chính hoặc dự phòng cho mạng trạm gốc, đảm bảo duy trì chất lượng dịch vụ ngay cả khi hạ tầng cáp quang gặp sự cố. Trong tương lai, FSO kết hợp với công nghệ quang học thích ứng và beamforming có thể trở thành xương sống của mạng truy nhập vô tuyến siêu tốc.

Ứng dụng FSO trong kết nối không gian – vũ trụ và vệ tinh

Một trong những lĩnh vực phát triển mạnh mẽ nhất của FSO là truyền thông không gian, bao gồm liên lạc giữa vệ tinh – vệ tinh, vệ tinh – mặt đất, máy bay – vệ tinh và thiết bị không người lái (UAV). So với hệ thống RF truyền thống, liên lạc quang mang lại băng thông lớn hơn nhiều lần, mức độ bảo mật cao hơn và không cần giấy phép tần số. Hiện nay, các chùm vệ tinh quỹ đạo thấp (LEO) như Starlink, OneWeb hay hệ thống quan sát Trái Đất đã tích hợp FSO để tăng tốc độ truyền và giảm độ trễ giữa các vệ tinh. Ở khoảng không vũ trụ, nơi không tồn tại hiện tượng tán xạ và hấp thụ như trong khí quyển, FSO đạt hiệu suất cực cao và trở thành công nghệ chủ đạo của truyền thông không gian thế hệ mới. Nếu được triển khai đồng bộ, FSO có thể tạo nên mạng internet toàn cầu tốc độ siêu cao, không phụ thuộc hạ tầng mặt đất.

Ứng dụng FSO trong cứu hộ, cứu nạn và khắc phục thảm họa

Trong các tình huống thiên tai như động đất, lũ lụt, cháy rừng hay bão lớn, hệ thống cáp quang hoặc trạm vi ba thường bị phá hủy, làm gián đoạn liên lạc. FSO, với khả năng triển khai di động nhanh chóng, trở thành giải pháp cực kỳ hữu hiệu để khôi phục kết nối cho lực lượng cứu hộ. Các thiết bị FSO cỡ nhỏ có thể vận chuyển bằng xe, tàu, máy bay hoặc UAV, sau đó lắp đặt nhanh giữa các điểm chỉ huy, bệnh viện dã chiến, trung tâm hậu cần. Tốc độ truyền lớn giúp truyền video trực tiếp từ khu vực nguy hiểm, hỗ trợ phân tích hiện trường và đưa ra quyết định kịp thời. Nhờ tính năng

không cần cấp phép tần số, không yêu cầu kéo cáp và ít phụ thuộc hạ tầng, FSO trở thành một trong những giải pháp quan trọng nhất trong viễn thông khẩn cấp.

Ứng dụng FSO trong hệ thống IoT, cảm biến thông minh và tự động hóa

FSO còn được ứng dụng trong các mạng cảm biến diện rộng cần truyền dữ liệu tốc độ cao và bảo mật, điển hình trong công nghiệp, nông nghiệp thông minh, hàng không và hàng hải. Các cảm biến đặt ở vị trí xa hoặc nguy hiểm có thể truyền dữ liệu trở lại trung tâm mà không cần hạ tầng dây dẫn. Trong nhà máy, FSO có thể kết nối các robot tự động, hệ thống điều khiển sản xuất và camera giám sát an ninh công nghiệp. Ở những môi trường nhiều nhiễu RF như nhà máy điện, trạm biến áp, xưởng sản xuất kim loại, FSO là lựa chọn tối ưu vì không bị ảnh hưởng bởi trường điện từ mạnh. Khả năng truyền dữ liệu tốc độ cao, ổn định và an toàn khiến FSO trở thành thành phần quan trọng trong hạ tầng IoT công nghiệp hiện đại.

1.6 Kết luận chương 1

Chương 1 Chương 1 đã trình bày một cách tổng quan và hệ thống về công nghệ thông tin quang trong không gian tự do (FSO), từ cơ sở lý thuyết, kiến trúc mạng, nguyên lý hoạt động cho đến các ưu – nhược điểm và những ứng dụng thực tiễn. Qua việc phân tích cấu trúc hệ thống FSO và các kỹ thuật điều chế thường được sử dụng, có thể thấy rằng FSO là một công nghệ truyền dẫn có tốc độ cao, độ bảo mật tự nhiên lớn, chi phí triển khai thấp và rất linh hoạt. Các mô hình kiến trúc như điểm – điểm, điểm – đa điểm, mạng vòng và mạng lưới giúp FSO dễ dàng tích hợp vào nhiều loại hạ tầng, phục vụ tốt cho các nhu cầu truyền dẫn trong cả môi trường dân sự, công nghiệp lẫn quân sự.

Tuy nhiên, chương 1 cũng chỉ ra những hạn chế cốt lõi của hệ thống FSO như sự phụ thuộc mạnh vào điều kiện thời tiết, hiện tượng suy hao do sương mù – mưa – nhiễu loạn khí quyển, yêu cầu đường ngắm trực tiếp (LoS) và khoảng cách hoạt động còn giới hạn. Dù vậy, các ứng dụng của FSO vẫn hết sức đa dạng, từ kết nối last-mile, truyền dẫn dự phòng, kết nối liên tòa nhà cho đến liên lạc vệ tinh và mạng 5G/6G. Những nền tảng lý thuyết thu được từ chương 1 là tiền đề quan trọng để bước sang

chương tiếp theo, nơi hệ thống FSO sẽ được phân tích sâu hơn dưới khía cạnh mô hình kênh truyền, đặc biệt trong điều kiện thời tiết đặc trưng của khu vực miền Trung du Bắc Bộ.

CHƯƠNG II: MÔ HÌNH KÊNH CỦA HỆ THỐNG FSO TRONG ĐIỀU KIỆN THỜI TIẾT MIỀN TRUNG DU BẮC BỘ

2.1 Giới thiệu chung

Mô hình kênh truyền thông quang không dây ngoài trời là môi trường động và rất phức tạp. Việc các búp sóng quang bị ảnh hưởng bởi yếu tố môi trường sẽ gây ra tổn hao công suất, sự thăng giáng về biên độ và pha của tín hiệu do nhiễu loạn khí quyển. Ảnh hưởng của lệch hướng tác động lên tổn hao hình học cũng làm cho công suất tín hiệu quang thu thay đổi. Ngoài ra, nhiễu loạn khí quyển cũng gây ra hiện tượng giãn xung. Đặc tính của kênh truyền khí quyển mang bản chất ngẫu nhiên, do đó các ảnh hưởng của nó có thể đặc tính hóa bởi các mô hình thống kê. Một số mô hình thống kê đã được đề xuất để mô hình hóa đặc tính của kênh truyền khí quyển, những mô hình này sẽ được trình bày ở các mục trong chương 2. Phụ thuộc vào kiểu mô hình và mức độ chính xác của nó, chúng ta có thể ước tính được công suất tín hiệu quang tại phía thu.

Giới hạn cơ bản của FSO do môi trường truyền dẫn gây ra, với FSO truyền trong môi trường khí quyển thì sự hoạt động của hệ thống FSO phụ thuộc rất nhiều vào thời tiết và điều kiện khí quyển. Sự không cố định về tính chất của kênh truyền FSO là trở ngại lớn nhất trong việc triển khai một hệ thống FSO, tuy nhiên điều này không xảy ra chỉ với FSO, các đường truyền vô tuyến hay thông tin vệ tinh cũng bị ảnh hưởng bởi thời tiết và có thể bị mất liên kết trong điều kiện mưa lớn, tuyết, sương mù và sự nhiễu loạn của không khí. Những thách thức chính trong việc thiết kế các hệ thống FSO như sau:

- Sương mù: 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 dẫn đến giảm cự ly hoạt động của tuyến FSO, đây là một thách thức chính đối với hệ thống FSO.

- Sự nhấp nháy: Sự nhấp nháy là sự biến đổi về không gian của cường độ sáng gây ra bởi sự nhiễu 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 suất, đó chính là nguyên nhân gây ra sự nhiễu 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: Sự trôi búp xảy ra khi luồng gió nhiễu 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.

- Sự lệch tia: Giữ thẳng hướng giữa khối phát và khối thu 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 dãn nhiệt của các phần khung tòa nhà hoặc những trận động đất yếu có thể gây ra sự lệch hướng, trong khi sự dãn 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 lệch tia.

- Nhiễu trong hệ thống FSO: Khả năng tách sóng một tín hiệu tới của một bộ tách sóng quang bị hạn chế bởi sự thăng giáng của tín hiệu và nhiễu. Hai loại nguồn nhiễu quan trọng nhất trong bộ thu quang là nhiễu lượng tử do tính chất ngẫu nhiên của quá trình chuyển đổi photon thành điện tử và nhiễu nhiệt, một loại nhiễu khác liên quan tới sự tách sóng của quá trình bức xạ quang là nhiễu dòng tối và nhiễu nền, có thể gây ra những tác động có hại trong các hệ thống FSO.

2.2 Suy hao đường truyền

Trong bầu khí quyển, khi một bức xạ quang đi qua thì một số photon bị hấp thụ do các thành phần như hơi nước, khí CO_2, sương mù, tầng Ozon…, và năng lượng chuyển thành nhiệt năng. Trong khi đó, các photon khác đi qua bầu khí quyển không bị mất mát năng lượng nhưng hướng truyền lan ban đầu của chúng bị thay đổi (hay

còn gọi là tán xạ). Định luật Beer-Lambert đã mô tả mô hình truyền lan của một trường quang qua bầu khí quyển 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 điều kiện thời tiết từng vùng là yếu tố quan trọng mà nó phụ thuộc vào. Khi triển khai trên mặt đất đối với một tuyến FSO, 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:

$$h_l^a = \frac{p_R}{p_T} = exp[-\gamma(\lambda)L] \quad (2.1)$$

Trong đó, $\gamma(\lambda)$ (tính theo đơn vị m^{-1}) là hệ số suy hao và h_l^a là suy hao tổng tại bước sóng λ. Suy hao của tín hiệu quang trong khí quyển là so 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 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 xác định bởi công thức sau:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + +\beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (2.2)$$

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**

Khi có sự tương tác giữa các photon và các phần tử trong không khí trong quá trình truyền lan thì xảy ra hiện tượng hấp thụ. 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 và mật độ của chúng. Sự hấp thụ phụ thuộc vào bước sóng nên có tính chọn lọc. Do đó dẫn đến trong bầu khí quyển có cá vùng trong suốt – dải bước sóng có độ hấp thụ tối thiểu. Điều này được xem như là cửa sổ truyền. Trong hệ thống FSO, các bước sóng sử dụng về cơ bản được chọn để trùng với cửa sổ truyền lan trong không khí, kết quả là hệ số suy hao bị chi phối chủ yếu bởi tán xạ do hơi nước, do đó có thể coi $\gamma(\lambda) \cong \beta_a(\lambda)$

*** Tán xạ**

Tán xạ là kết quả của việc phân bố lại góc của trường quang khi có và không có sự thay đổi của bước sóng. Ảnh hưởng của tán xạ phụ thuộc vào bán kính r_m của các hạt như sương mù, hơi nước gặp phải trong quá trình truyền lan. Các loại tán xạ đối với các hạt khác nhau có mặt trong bầu khí quyển được tóm tắt trong bảng dưới đây.

Bảng 2.1. Bán kính và các loại tán xạ của các hạt điển hình tại λ = 850nm

Kiểu	Bán kính (μm)	X_o	Loại 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 - 10.000	740 - 74.000	Hình học
Tuyết	1.000 - 5.000	7.400 - 37.000	Hình học
Mưa đá	5.000 - 50.000	37.000 – 370.000	Hình học

Hạt sương có kích thước tương đối lớn so với dải bước sóng sử dụng trong FSO. Do đó, nguyên nhân chính gây ra tán xạ photon là sương mù và nó góp phần vào sự suy giảm công suất quang.

2.3 Một số mô hình kênh điển hình

Mô hình kênh truyền hệ thống thống tin FSO là môi trường biến động và phức tạp. Ảnh hưởng của môi trường lên bức xạ quang sẽ gây ra tổn hao công suất, thăng giáng về biên độ và pha do nhiễu loạn khí quyển. Ngoài ra, ảnh hưởng của lệch tia làm cho công suất thu của tín hiệu quang thay đổi. Kênh truyền khí quyển mang bản chất ngẫu nhiên, do đó các ảnh hưởng của nó có thể đặc tính hóa bởi các mô hình thống kê. Trong các nghiên cứu về hệ thống FSO, một số mô hình thống kê đã được đề xuất để mô hình hóa đặc tính của kênh truyền khí quyển. Các kiểu mô hình này phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, mức độ nhiễu loạn của kênh truyền hệ thống.

2.3.1. Nhiễu loạn trong hệ thống FSO

Môi trường truyền:

Khác so với kênh nhiễu Gauss thông thường, kênh truyền dẫn quang với tín hiệu đầu vào của kênh x(t), thể hiện công suất phát chứ không phải là biên độ. Điều này dẫn tới hai điều kiện rằng buộc trên tín hiệu được truyền: x(t) phải không âm và giá trị trung bình của x(t) không được vượt quá giá trị quy định.

$$P_{max} \geq \lim_{n\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t)dt \qquad (2.3)$$

Trái ngược với kênh thông thường, nơi mà SNR tỉ lệ với công suất, trong các hệ thống quang công suất điện thu được và phương sai của nhiễu nổ tỷ lệ tương ứng với A^2_d và A_d ; trong đó A_d là kích thước vùng tách sóng quang. Do đó trong hệ thống truyền dẫn quang bị hạn chế bởi nhiễu nổ, SNR tỉ lệ với A_d. Điều này có nghĩa là với công suất phát đã cho, có thể đạt được SNR cao hơn bằng việc sử dụng bộ tách sóng có vùng tách sóng lớn. Tuy nhiên, điện dung của bộ tách sóng cũng tăng theo A_d dẫn đến hạn chế về băng thông.

Bảng 2.2 dưới đây sẽ mô tả các loại khí trong kênh truyền quang không dây. Bên cạnh đó, trong kênh truyền còn bao gồm mưa, sương mù và các loại khác của hơi nước. lượng hơi nước có trong kênh truyền phụ thuộc vào vị trí (kinh độ, vĩ độ) và theo từng mùa. Hơi nước tập trung lớn nhất ở gần bề mặt trái đất nằm trong tầng đối lưu.

Với sự phân bổ về kích thước của các dải thành phần khí quyển từ micromet tới centimet, một trường quang đi qua khí quyển sẽ bị tán xạ hoặc hấp thụ và gây ra suy hao.

Bảng 2.2: Các phần tử khí có trong kênh truyền

Thành phần	Tỉ lệ thể tích (%)	Phần triệu (ppm)
Nitrogen (N2)	78,09	
Oxygen (O_2)	20,95	
Argon (Ar)	0,93	
Carbon dioxide (CO_2)	0,03	
Hơi nước (H_2O)		40-40,000
Neon (Ne)		20

Helium (He)		5,2
Methane (CH_4)		1,5
Krypton (Kr)		1,1
Hydrogen (H_2)		1
Nitrous oxide (N_2O)		0,6
Carbon monoxide (CO)		0,2
Ozone (O_3)		0,05
Xenon (Xe)		0,009

Nhiễu loạn khí quyển

Vấn đề ảnh hưởng lớn nhất đối với hoạt động của một tuyến thông tin quang trong không gian tự do là nhiễu loạn không khí. Khi bức xạ từ mặt trời đến đến trái đất, một phần sẽ bị hấp thụ bởi bề mặt trái đất, lớp không khí gần mặt đất hơn có mật độ lớn hơn nên sẽ hấp thụ nhiều nhiệt tỏa ra từ trái đất và bức xạ mặt trời hơn nên sẽ có nhiệt độ cao hơn lớp không khí ở trên. Không khí có nhiệt độ cao hơn sẽ nhẹ hơn và bay lên. Khi bay lên sẽ gặp lớp không khí có nhiệt độ thấp hơn và hòa trộn một cách nhiễu loạn với nhau. Điều này sẽ gây ra nên sự sự dao động về nhiệt độ của các lớp không khí khác nhau. Chính sự thay đổi về nhiệt độ này là nguyên nhân dẫn đến sự thay đổi về chiết suất của các lớp không khí trong khí quyển, vì vậy kênh truyền nhiễu loạn không khí rất dễ thay đổi, khó dự đoán, chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của các điều kiện thời tiết gây nên sự dao động cả về pha lẫn cường độ của bức xạ quang trong quá trình truyền lan trên kênh truyền. Kết quả là sự nhiễu loạn không khí có thể gây nên tỷ lệ lỗi rất lớn do sự dao động của tín hiệu thu được.

Chùm tia quang truyền qua khí quyển chịu tác động của nhiễu loạn khí quyển với pha và biên độ biến thiên ngẫu nhiên. Nhiễu loạn là một trạng thái rối loạn của dòng khí quyển gây ra bởi sự thay đổi nhiệt độ trong khí quyển. Nhiễu loạn khí quyển bao gồm nhiều khu vực dòng xoáy hình cầu với đường kính và chỉ số khúc xạ khác nhau. Các chùm tia quang truyền qua khí quyển ở không gian và thời gian khác nhau với chiết suất khác nhau, các chỉ số này không đồng nhất ở các quy mô khác nhau. Sự không đồng nhất với quy mô lớn sẽ tạo ra hiện tượng khúc xạ khiến chùm tia phát

đi lệch so với hoớng truyền ban đầu. Do đó, ở quy mô lớn thì hiệu ứng chủ yếu là làm sai lệch pha của sóng truyền đi. Sự không đồng nhất với quy mô nhỏ tạo ra hiệu ứng nhiễu xạ và làm sai lệch biên độ của sóng gây ra sự biến thiên của biên độ.

Nhiễu loạn khí quyển được phân loại theo các mô hình phân bố phụ thuộc vào giá trị của tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ và được phân loại theo các mức độ yếu, trung bình và mạnh. Các mô hình được mô tả bởi hàm mật độ xác suất của sự biến động trường bức xạ. Tuy nhiên, do sự phức tạp trong các mô hình toán học nhiễu loạn khí quyển nên không có mô hình chung điển hình. Trong Luận án này, sẽ trình bày hai mô hình được sử dụng phổ biến nhất, đó là mô hình Log-Normal và Gamma-Gamma.

2.3.2. Mô hình nhiễu loạn Log-Normal

Trong môi trường nhiễu loạn không khí, khi mô tả hàm mật độ xác suất của sự thay đổi của bức xạ quang, tia bức xạ được biểu thị bởi thành phần điện trường cấu thành lên nó, bằng cách sử dụng các công thức điện từ trường của Maxwell cho tia bức xạ trong trường hợp môi trường là khí quyển, công thức thành phần điện trường như sau:

$$\nabla^2\vec{E} + k^2n^2\vec{E} + 2\nabla(\overrightarrow{E\vec{\nabla}}\,(\ln n)=0 \qquad (2.4)$$

Trong đó, k = 2π/λ là số sóng, toán tử véc tơ gradient $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\vec{\imath} + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\vec{\jmath} + \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)\vec{k}$

Với i,j, k là các véc tơ đơn vị theo các trục x,y,z. Thành phần $2\nabla(\overrightarrow{E\vec{\nabla}}\,(\ln n)$ trong vế trái đặc trưng cho nhiễu loạn gây ra sự suy giảm phân cực của sóng. Đây là 30hanh phần thay đổi phân cực gây ra bởi nhiễu loạn không khí đối với bức xạ quang, với trường hợp nhiễu loạn yếu 30hanh phần này có thể bỏ qua. Kết quả đã được chứng minh trong thực tế rằng, sự suy giảm phân cực của sóng là không đáng kể ngay cả trong điều kiện nhiễu loạn khí quyển mạnh. Do vậy, công thức được viết gọn lại như sau:

$$\nabla^2\vec{E} + k^2n^2\vec{E} = 0 \qquad (2.5)$$

Để thuận tiện cho việc sử dụng, véc tơ vị trí sẽ được ký hiệu là r, véc tơ điệ trường $\vec{E}$ sẽ được ký hiệu là E®; chia chiết suất n thành hai thành phần, n_0 là thành phần trong không gian tự do, n_1 là thành phần trong môi trường nhiễu loạn không khí.

Bằng cách đưa vào biểu thức Gauss $\psi(r) = \ln(E(r))$ được định nghĩa là logarit tự nhiên trong môi trường lan truyền E(r) và gọi nó là biến đổi Rytov.

Phương pháp Rytov cũng dựa trên cũng dựa trên giả thiết cơ bản là nhiễu loạn khí quyển yếu và nó được đặc trưng bởi quá trình tán xạ đơn, dung biến đổi Rytov và cân bằng chỉ số khúc xạ trung bình của kênh, $n_0 = 1$, phương trình rút gọn trên chuyển thành phương trình Riccati như sau:

$$\nabla^2\psi + (\nabla\psi)^2 + k_s^2(1+n_1)^2 = 0 \quad (2.6)$$

Thực hiện chia tách $\psi(r)$ ra làm hai thành phần trong không gian tự do không có mặt của nhiễu loạn của khí quyển $\psi_0(r)$ và thành phần trong môi trường nhiễu loạn của khí quyển $\psi_1(r)$. Ta có $\psi(r) = \psi_0(r) + \psi_1(r)$. Kết hợp với phép biến đổi Rytov, $\psi(r) = \ln(E(r))$, thành phần $\psi_1(r)$ được xác định bởi các công thức:

$$\psi_1(r) = \psi(r) - \psi_0(r) \quad (2.7)$$

$$\psi_1(r) = \ln(E(r)) - \ln(E_0(r)) = \ln\left[\frac{E(r)}{E_0(r)}\right] \quad (2.8)$$

Trong đó $E(r) = A(r)\exp(i\phi(r))$ (2.9)

$$E_0(r) = A_0(r)\exp(i\phi_0(r)) \quad (2.10)$$

Với A(r) và $\varphi(r)$ là biên độ và pha của trường khi có nhiễu loạn khí quyển; $A_0(r)$ và $\phi_0(r)$ là biên độ và pha của trường khi không có nhiễu loạn khí quyển. Những sự biến đổi này có thể được sử dụng để tìm nghiệm của biểu thức (2.6) (mô tả đặc tính của trường trong bầu khí quyển có nhiễu loạn yếu. Để xác định phân bố thống kê của sự biến động cường độ bức xạ quang, trước hết ta kết hợp các phương trình (2.8) và (2.9) để nhận được sự thay đổi biên độ trường do nhiễu loạn theo (2.11):

$$\psi_1(r) = \ln\left[\frac{A(r)}{A_0(r)}\right] + i[\varphi(r) - \varphi_0(r)] = X + i\delta_1 \quad (2.11)$$

Vì $\psi_1(r)$ có phân bố Gauss, do đó X (sự biến đổi log-biên độ của trường quang) có phân bố Gauss và δ_1 (sự biến đổi về pha của trường quang) cũng có phân bố Gauss. Do vậy, ta chỉ đề cập đến biên độ trường quang nên *pdf* của X có dạng:

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} exp\left\{-\frac{(X-E(X))^2}{2\sigma_x^2}\right\} \quad (2.12)$$

Trong đó, E(X) là kỳ vọng của X và σ_x^2 là phương sai log-biên độ, thường được gọi lầ tham số Rytov. σ_x^2 đặc trưng cho mức độ biến động biên độ trường trong khí quyển nhiễu loạn, được xác định thông qua tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ, và cự ly truyền dẫn *L*, được xác định bởi công thức (2.13) đối với sóng phẳng và (2.14) đối với sóng cầu:

$$\sigma_x^2 = 0.56 k_s^{7/6} \int_0^L C_n^2(x)(L-x)^{5/6} dx \quad (2.13)$$

$$\sigma_x^2 = 0{,}563 k_s^{7/6} \int_0^L C_n^2(x)(x/L)^{5/6}(L-x)^{5/6} dx \quad (2.14)$$

Đối với trường phân cực ngang truyền qua môi trường nhiễu loạn, tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ C_n^2 la hằng số, và phương sai log-cường độ trường (với giả thiết truyền lan sóng cầu) được xác định như sau:

$$\sigma_l^2 = 1{,}23 C_n^2 k_s^{7/6} L^{11/6} \quad (2.15)$$

Cường độ trường trong môi trường nhiễu loạn là $I = (A(r))^2$ trong khi đó, thành phần cường độ bức xạ trong môi trường tự do không có nhiễu loạn là $I_0 = (A_0(r))^2$, log-cường độ được xác định theo:

$$l = \log_e\left(\frac{A(r)}{A_0(r)}\right)^2 = 2X \quad (2.16)$$

$$Do\ đó \quad I = I_0 \exp(l) \quad (2.17)$$

Để có được hàm mật độ xác suất cường độ bức xạ quang, bằng cách đặt:

$$p(I) = p(X)\left(\frac{dX}{dI}\right) \quad (2.18)$$

Kết hợp công thức (2.18) và (2.12), hàm mật độ xác suất của cường độ bức xạ quang *I* được xác định bởi công thức (2.19):

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi\sigma_x^2}} \frac{1}{I} \exp\left\{\frac{\left(\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) - E(l)\right)^2}{2\sigma_1^2}\right\} \quad I \geq 0 \quad (2.19)$$

Trong điều kiện nhiễu loạn yếu, phân bố chuẩn mô hình Log-Normal là mô hình phù hợp. Theo phương trình (1.16) phương sai log-cường độ $\sigma_l^2 = 4\sigma_x^2 = 0{,}492 C_n^2 k_s^{7/6} L^{11/6}$

Và giá trị trung bình $E(1) = 2E(X)$. Dựa trên giả thiết quá trình tán xạ bởi các xoáy nhiễu không gây ra suy hao năng lượng búp sóng quang nên 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, ta có $E\{exp(l)\} = 2E\{I/I_0\} = 1$. Vì không có năng lượng bị tiêu hao trong suốt quá trình tán xạ bao gồm cả nhiễu loạn nên $E(I) = I_0$. Kỳ vọng E(l) nhận được bằng cách đặt mối quan hệ chuẩn hóa (2.20):

$$E\{exp(az)\} = exp\{aE(z) + 0{,}5a^2\sigma_z^2\} \quad (2.20)$$

Từ công thức (2.20) kết hợp với giả thiết $E(exp(1)) = E(I/I_0) = 1$, giá trị kỳ vọng E(l) được xác định:

$$E(l) = -0{,}5\sigma_l^2 \quad (2.21)$$

Sau khi có được hàm mật độ xác suất của sự thay đổi cường độ bức xạ, phương sai σ_l^2 của sự biến đổi cường độ bức xạ quang được xác định theo:

$$= E(I^2) - (E(I))^2 = I_0^2\{E(exp(2l)) - E(exp(l))^2\} \quad (2.22)$$

Từ công thức (2.22) kết hợp với công thức (2.20), (2.21), phương sai của sự biến đổi cường độ bức xạ quang nhận được là:

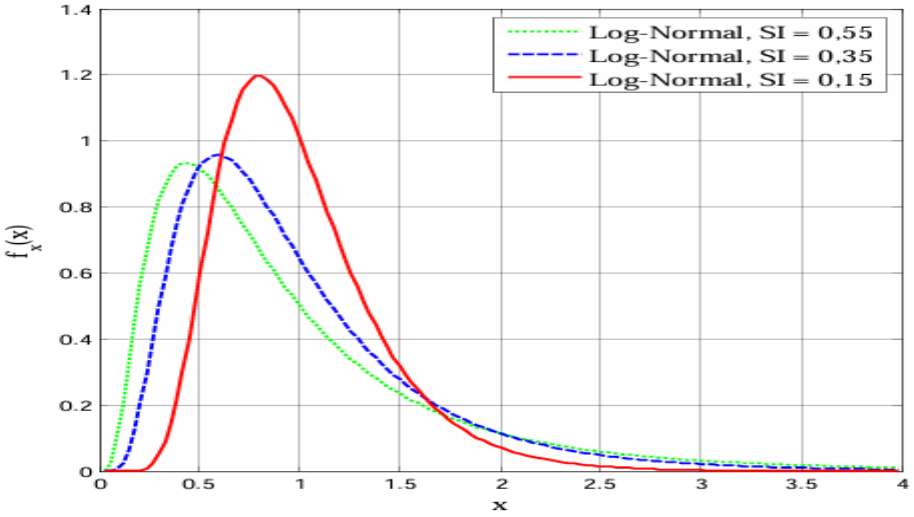
$$\sigma_l^2 = I_0^2(\exp(\sigma_l^2) - 1) \quad (2.23)$$

Phương sai chuẩn hóa σ_l^2/I_0^2 của cường độ bức xạ quang thường được gọi là chỉ số nhấp nháy và được xác định theo công thức (2.24):

$$SI = \sigma_N^2 = \frac{\sigma_I^2}{I_0^2} = \exp(\sigma_l^2) - 1 \quad (2.24)$$

Giả thiết Rytov được sử dụng để mô tả sự nhiễu loạn khí quyển và đã xét cho mô hình nhiễu loạn chuẩn Log-Normal. Giả thiết này dự đoán rằng các tham số Rytov tăng không giới hạn theo tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ hoặc độ dài đường truyền. Tuy nhiên, dựa trên các kết quả đã được đề cập ở trên, dự đoán này đúng với trường hợp nhiễu loạn yếu khi $\sigma_x^2 \leq 0{,}3$. Khi cường độ nhiễu loạn tăng, do sự kết hợp của độ dài đường truyền và hoặc C_n^2 tăng, các xoáy nhiễu loạn tạo ra đa tán xạ không được tính đến trong mô hình Rytov.

Hình 2.1 biểu diễn sự phụ thuộc của hàm mật độ xác suất $f_x(x)$ của phân bố L-N vào biến x với các giá trị khác nhau của chỉ số nhấp nháy SI. Ta thấy rằng, khi giá trị của SI càng tăng thì phân bố càng trở nên sai lệch và trải rộng hơn.



Hình 2.1. Hàm mật độ xác suất của phân bố L-N với các tham số chỉ số nhấp nháy khác nhau

2.3.3. Mô hình Gamma-Gamma

Mô hình nhiễu loạn Gamma-Gamma được đề xuất bởi Andrews, được xây dựng trên quá trình truyền bức xạ quang qua khí quyển chịu sự ảnh hưởng của tán xạ và khúc xạ. Ở các phạm vi lớn các thăng giáng của bức xạ quang được tạo ta bởi các xoáy nhiễu loạn lớn hơn vùng Fresnel thứ nhất hoặc vùng tán xạ. Các xoáy nhiễu loạn kích thước nhỏ được giả định được điều chế bởi các xoáy nhiễu loạn khích thước lớn. Như vậy, ta có thể coi như cường độ trường quang thu chuẩn hóa I được xác định là tích của hai quá trình ngẫu nhiên độc lập thống kê I_x, I_y.

$$I = I_x \times I_y \qquad (2.25)$$

Trong đó I_x *và* I_y tương ứng là các thành phần của cường độ bức xạ chịu ảnh hưởng bởi các hiệu ứng tán xạ và hiệu ứng khúc xạ khi bức xạ quang truyền qua môi trường, được đề xuất tuân theo phân bố Gamma-Gamma. Do đó, xác định hàm mật độ xác suất của thành phần I_x, I_y bởi các công thức:

$$p(I_x) = \frac{\alpha(\alpha I_x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} exp(-\alpha I_x); \quad I_x > 0;\ \alpha > 0. \qquad (2.26)$$

$$p(I_y) = \frac{\beta(\beta I_y)^{\beta-1}}{\Gamma\beta} \exp(-\beta I_y)\ ;\ I_y > 0;\ \beta > 0. \qquad (2.27)$$

Ta cố định I_x và thay biến $I_y = I/I_x$; ta nhận được hàm mật độ xác suất (*pdf*) có điều kiện của cường độ bức xạ I được xác định:

$$p(I/I_x) = \frac{\beta(\beta I/I_x)^{\beta-1}}{Ix\Gamma\beta} \exp(-\beta I/Ix)\ ;\ I > 0. \quad (2.28)$$

Trong đó, I_x là giá trị trung bình của I.

Để nhận được hàm mật độ xác suất vô điều kiện $p(I)$, ta lấy trung bình hàm xác suất có điều kiện $p(I/I_x)$ trên hàm phân bố xác suất của I_x được tính theo công thức (2.26). Từ đó, ta có được hàm phân bố cường độ bức xạ quang theo phân bố Gamma-Gamma như sau:

$$p(I) = \int_0^\infty P(I\ /\ I_x)P(I_x)\, dI_x \quad (2.29)$$

$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} k_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta I}\right); I > 0. \quad (2.30)$$

trong đó, α, β lần lượt là số lượng hiệu dụng của các xoáy kích thước lớn và xoáy kích thước nhỏ của quá trình tán xạ. $K_n(.)$ là hàm Bessel sửa đổi loại 2 bậc n, và $\Gamma(.)$ là hàm Gamma. Nếu bức xạ quang tại máy thu được giả định là sóng phẳng, thì hai tham số α, β đặc trưng cho mật độ xác suất *(pdf)* của biến động cường độ theo các điều kiện khí quyển và được xác định như sau:

$$\alpha = \left[exp\left[\left[\frac{0{,}49\sigma_l^2}{\left(1+1{,}11\sigma_1^{12/5}\right)^{7/6}}\right] - 1\right]\right]^{-1} \quad (2.31)$$

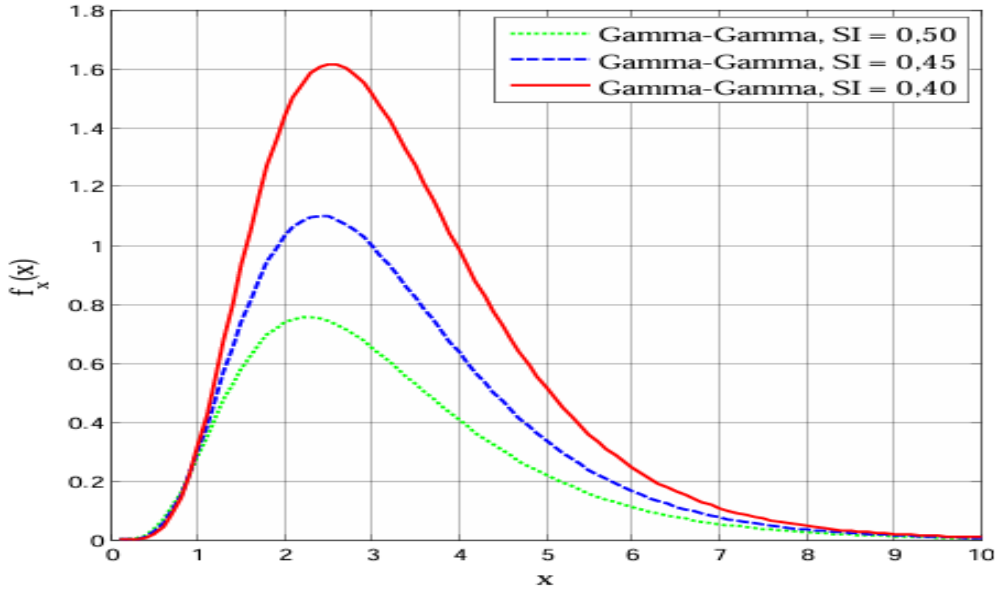
$$\beta = \left[exp\left[\left[\frac{0{,}51\sigma_l^2}{\left(1+0{,}69\sigma_1^{12/5}\right)^{7/6}}\right] - 1\right]\right]^{-1} \quad (2.32)$$

Chỉ số nhấp nháy được tính như sau:

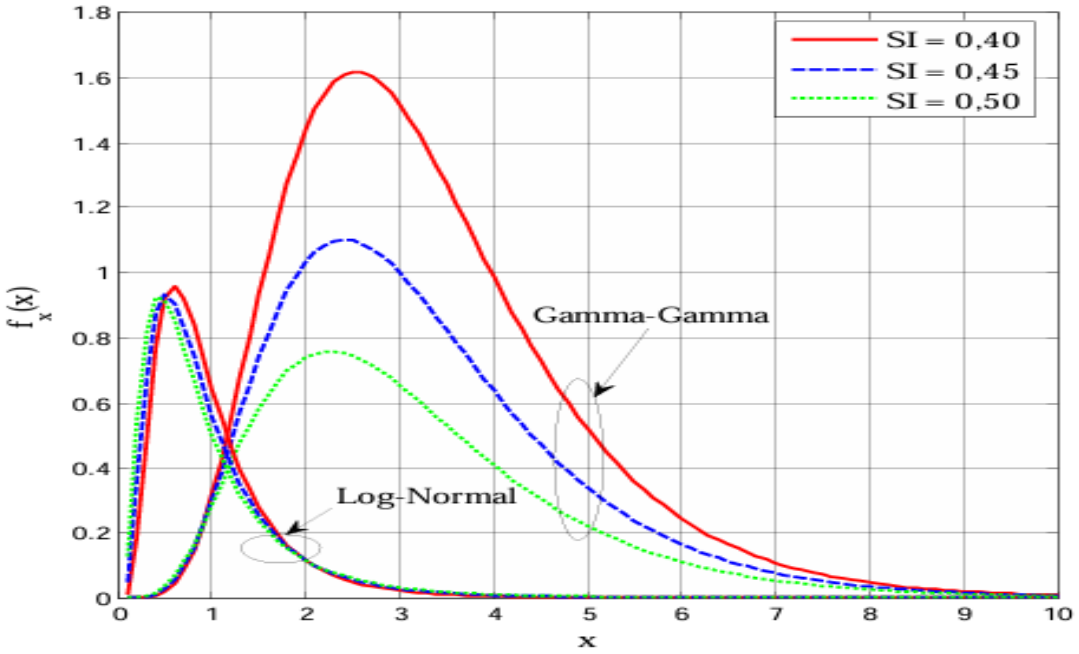
$$SI = \sigma_N^2 = exp\left[\frac{0{,}49\sigma_l^2}{\left(1+1{,}11\sigma_1^{12/5}\right)^{7/6}} + \frac{0{,}51\sigma_l^2}{\left(1+0{,}69\sigma_1^{12/5}\right)^{7/6}}\right] \text{-1} \quad (2.33)$$

Hình 2.2 dưới đây mô tả phân bố Gamma-Gamma với các giá trị khác nhau của chỉ số nhấp nháy *SI*. Với giá trị *SI* càng tăng thì mức nhiễu loạn càng mạnh, phân bố càng trải rộng và sai lệch. Hàm mật độ xác suất L-N và G-G được thể hiện như trong hình 2.3 với các giá trị khác nhau của chỉ số nhấp nháy *SI*. Từ đó ta có thể thấy được rằng, phân bố L-N hẹp hơn và ít bị sai lệch hơn so với phân bố G-G khi cùng với một giá trị *SI*. Dựa trên kết quả lý thuyết cũng như thực nghiệm, mô hình L-N chỉ

sử dụng tốt cho điều kiện nhiễu loạn yếu, khi mà mức độ nhiễu loạn khí quyển tăng lên thì hiện tượng đa tán xạ sẽ sảy ra. Do vậy, điều này không được xét đến trong quá trình xây dựng nên mô hình L-N, trong trường hợp này mô hình G-G được sử dụng.



Hình 2.2. Hàm mật độ xác suất của phân bố G-G với các tham số chỉ số nhập nháy khác nhau



Hình 2.3. Hàm mật độ xác suất của phân bố G-G và L-N với các tham số chỉ số nhấp nháy khác nhau

2.4 Điều kiện thời tiết của miền Trung du Bắc bộ

Vị trí và đặc điểm chung

+ Vùng Trung du và miền núi Bắc Bộ nằm ở phía bắc Việt Nam, tiếp giáp với Trung Quốc phía Bắc, với vùng đồng bằng sông Hồng phía Đông và Bắc Trung Bộ về phía Nam
+ Địa hình rất đa dạng: núi cao, sườn dốc, đồi núi trung bình, trung du có vùng đồi thấp hơn. Do vậy khí hậu cũng có độ phân hóa theo độ cao, hướng sườn.
+ Khí hậu vùng này: thuộc kiểu nhiệt đới ẩm gió mùa, có mùa đông lạnh.

Nhiệt độ, ánh sáng và độ ẩm

+ Nhiệt độ trung bình năm ở miền Bắc (bao gồm trung du và miền núi) phổ biến dưới ~ 24°C.
+ Vào mùa đông, ở vùng đồng bằng phía Bắc có thể trung bình tháng lạnh đạt khoảng 10-15°C.
+ Vùng núi cao sẽ có nhiệt độ thấp hơn, có thể xuất hiện sương muối.
+ Số giờ nắng ở miền Bắc < 2000 giờ/năm.
+ Độ ẩm tương đối quanh năm cao, thường trong khoảng 77-87% ở nhiều nơi.

Lượng mưa, mùa và phân hóa theo mùa

+ Vùng này chịu ảnh hưởng bởi gió mùa Đông Bắc vào mùa đông và gió mùa Tây Nam vào mùa hạ, nên có 4 mùa rõ rệt.
+ Vào mùa đông thường có hiện tượng mưa phùn, ẩm ướt đặc biệt ở vùng Đông Bắc, miền Bắc.
+ Lượng mưa lớn, tập trung chủ yếu vào mùa mưa (thường từ khoảng tháng 5 đến tháng 10 ở Bắc Bộ). Ví dụ, có đợt mưa lớn từ ngày 9-11/6/2024 tại miền núi và trung du Bắc Bộ với tổng lượng mưa phổ biến 100-150 mm trong vài ngày.
+ Mùa đông khô hơn nhưng vẫn ẩm do mưa phùn; mùa hè có mưa nhiều hơn và có thể kèm sét, dông.

+ Do địa hình đồi núi nên lượng mưa có thể rất phân hóa theo độ cao và hướng sườn.

Đặc trưng thời tiết & thiên tai đáng lưu ý

+ Do mùa đông lạnh, ở vùng núi cao có thể xuất hiện sương muối vào tháng 12, tháng 1.

+ Thường có mưa phùn, ẩm ướt kéo dài vào cuối mùa đông, làm cho cảm giác lạnh và ẩm hơn.

+ Mưa lớn, lũ quét, sạt lở đất là thiên tai phổ biến vì địa hình dốc, đất bão hòa nước. Ví dụ: trong tháng 8/2023, khu vực miền núi và trung du Bắc Bộ có mưa to 100-200mm, có nơi gần 400mm, gây lũ, sạt lở.

+ Gió mùa Đông Bắc, gió Tây Nam (gió phơn) cũng ảnh hưởng lớn: ở một số nơi khi gió phơn xảy ra, nhiệt độ có thể tăng nhanh vào mùa khô/hạ.

Ảnh hưởng và lưu ý

+ Vì mùa đông lạnh và ẩm, vùng này có thể thích hợp trồng cây công nghiệp lâu năm, cây ăn quả cận nhiệt hoặc ôn đới (ví dụ: chè, hồi, quế…) do có khả năng chịu rét.

+ Tuy nhiên, thời tiết diễn biến thất thường (mưa lớn, lũ, sương muối) là một rủi ro lớn cho sản xuất nông – lâm nghiệp và giao thông.

+ Việc quy hoạch, đầu tư cần lưu ý đến khả năng chống chịu thiên tai (lũ quét, sạt lở) và biến đổi khí hậu.

+ Với các dự án nông nghiệp, chăn nuôi, nên chọn loại cây/trồng phù hợp với khí hậu lạnh hơn so với đồng bằng, và có kế hoạch phòng chống mưa lớn / đất bão hòa.

2.5 Mô hình kênh cho hệ thống FSO trong điều kiện thời tiết của miền Trung du Bắc bộ

Với các đặc điểm đặc trưng về điều kiện địa hình, thời tiết, khí hậu như đồi núi, mưa nhiều, sương mù dày đặc theo từng mùa khác nhau. Do vậy, mô hình kênh Gamma-Gamma là phù hợp nhất cho khu vực Trung du Bắc bộ khi nhiễu loạn khí quyển ở mức trung bình cho đến mạnh (gió mùa, chênh lệch nhiệt độ giữa ngày và đêm, …). Từ đó, trong chương 3, tôi tập trung vào xây dựng mô phỏng và phân tích

kết quả trên mô hình kênh Gamma-Gamma để phù hợp với thực tế địa hình và thời tiết trong khu vực.

2.6 Kết luận chương 2

Trong chương 2, đề án đã trình bày chi tiết các mô hình kênh truyền trong hệ thống FSO, giúp làm rõ những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng truyền dẫn của tín hiệu quang trong môi trường không gian tự do. Thông qua các mô hình điển hình như Log-Normal, Gamma-Gamma và mô hình nhiễu loạn tổng quát, chương này đã chỉ ra vai trò quan trọng của hiện tượng nhiễu loạn khí quyển, tán xạ và hấp thụ trong việc gây suy hao, làm thay đổi cường độ tín hiệu thu và ảnh hưởng đến tỷ lệ lỗi bit (BER). Việc mô tả đặc tính suy hao, phân bố cường độ và các thông số nhiễu loạn đã đặt nền tảng toán học cần thiết để đánh giá hiệu năng thực tế của hệ thống FSO trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau.

Bên cạnh đó, chương 2 cũng phân tích cụ thể các điều kiện thời tiết của khu vực miền Trung du Bắc Bộ – nơi chịu tác động mạnh của sương mù, mưa phùn và độ ẩm cao – nhằm xây dựng mô hình kênh phù hợp và sát thực tế. Kết quả của chương này cho thấy các yếu tố khí tượng tại khu vực có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất FSO, yêu cầu áp dụng các mô hình suy hao đặc thù để đánh giá chính xác chất lượng liên kết. Những phân tích này là cơ sở quan trọng để sang chương tiếp theo, nơi mô hình kênh sẽ được ứng dụng vào việc mô phỏng và đánh giá hiệu năng hệ thống FSO trong điều kiện khí hậu thực tế, từ đó đề xuất các giải pháp tối ưu hóa phù hợp.

CHƯƠNG III: MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

3.1. Mô hình hệ thống

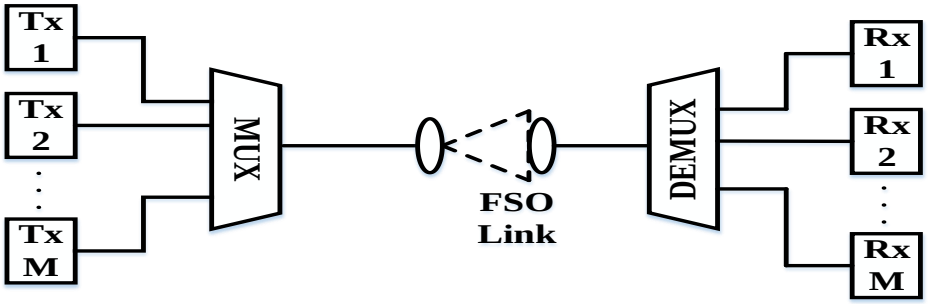
Dựa trên các phân tích về điều kiện thời tiết của khu vực trung du miền núi Bắc Bộ được trình bày trong Chương 2, có thể rút ra một số nhận xét quan trọng như sau. Thứ nhất, khí hậu trong vùng có sự phân hóa theo mùa rất rõ rệt. Vào mùa xuân – hè, lượng mưa lớn và hiện tượng sương mù xuất hiện với tần suất cao (đặc biệt trong mùa xuân), gây suy giảm đáng kể chất lượng truyền dẫn tín hiệu ánh sáng trong các hệ thống FSO. Ngược lại, trong mùa thu – đông, thời tiết khô ráo hơn, mưa ít và sương mù chủ yếu xuất hiện vào buổi sáng sớm rồi tan dần, do đó mức độ ảnh hưởng đến kênh truyền dẫn quang giảm đáng kể.

Thứ hai, hiện tượng sương mù tại khu vực này thường chỉ xuất hiện vào đầu buổi sáng và biến mất từ trưa đến tối, ngoại trừ một số thời điểm đặc biệt trong năm. Quy luật này cho phép chủ động hơn trong việc điều chỉnh cấu hình hệ thống truyền dẫn theo thời gian trong ngày nhằm tối ưu chất lượng dịch vụ. Thứ ba, khu vực trung du miền núi Bắc Bộ có mức độ ô nhiễm thấp, ít chịu tác động từ khói bụi công nghiệp và ánh sáng nền. Vì vậy, có thể loại bỏ ảnh hưởng của các yếu tố này khỏi quá trình tính toán và mô phỏng.

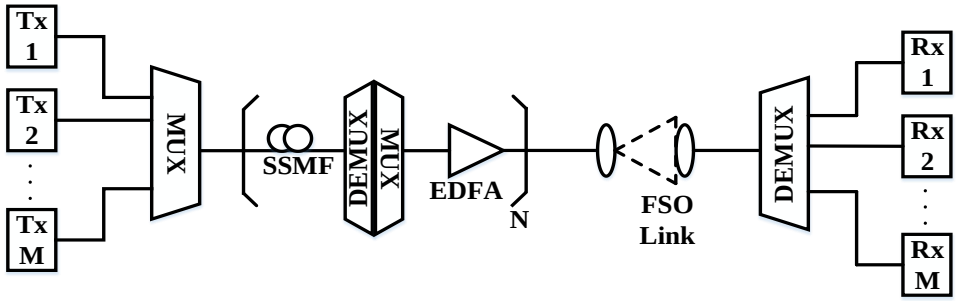
Tổng hợp các đặc điểm trên cho thấy mặc dù điều kiện thời tiết trong năm biến đổi tương đối phức tạp, nhưng các yếu tố gây suy hao đối với liên kết FSO chủ yếu là các nhiễu loạn chậm và có tính ổn định tương đối theo giờ hoặc theo ngày. Điều này giúp hệ thống có thể chủ động điều chỉnh tham số trong quá trình vận hành để đảm bảo chất lượng đường truyền ổn định.

Trên cơ sở đó, Chương 3 đề xuất mô hình hoạt động của hệ thống thông tin quang FSO phù hợp với điều kiện khí hậu và địa hình khu vực trung du miền núi Bắc Bộ, như minh họa trong Hình 3.1. Tiếp theo, học viên tiến hành mô phỏng và đánh giá hiệu năng hệ thống bằng phần mềm Optisystem dưới một số điều kiện thời tiết tiêu biểu có ảnh hưởng lớn đến chất lượng liên kết quang.

Trong mô hình đề xuất tại Hình 3.1a, hai kỹ thuật điều chế thông dụng là QPSK và 16-QAM được lựa chọn. Hệ thống sử dụng ghép kênh bước sóng DWDM với tốc độ truyền dẫn mỗi kênh đạt 50 Gbaud, tương ứng với 100 Gbps đối với QPSK và 200 Gbps đối với 16-QAM. Các phần tử Tx và Rx lần lượt đóng vai trò phát và thu tín hiệu quang, trong khi MUX và DEMUX đảm nhận chức năng ghép và tách kênh quang. Tuyến FSO được khảo sát với khoảng cách tối đa 5 km, đây là cự ly phù hợp với đặc thù thời tiết và địa hình của khu vực. Để bù suy hao kênh truyền, bộ khuếch đại quang EDFA có khả năng điều chỉnh công suất được bố trí ngay sau bộ MUX và trước bộ DEMUX, nhằm đảm bảo biên độ tín hiệu đủ lớn tại đầu thu. Ngoài ra, để kết quả khảo sát được đầy đủ, hệ thống khi có kết hợp FSO và tuyến cáp sợi quang như mô hình được mô tả trong Hình 3.1b được thực hiện mô phỏng đánh giá.



a) Không kết hợp tuyến cáp sợi quang



b) Có kết hợp tuyến cáp sợi quang

Hình 3.1 Mô hình truyền dẫn FSO 4 kênh

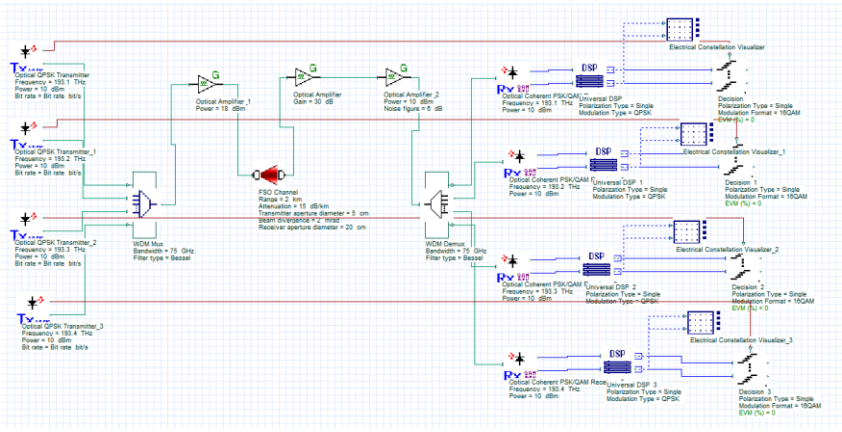
Chất lượng hệ thống đánh giá thông qua giá trị hệ số Q, được tính toán thông qua giá trị EVM (biên độ véc tơ lỗi) và BER (tỷ số lỗi bit). Các tham số hệ thống

được sử dụng để khảo sát đánh giá, bao gồm: công suất tín hiệu phát, độ rộng chùm tia sáng phát, đường kính thấu kính thu, cự ly tuyến FSO. Các điều kiện thời tiết được tiến hành khảo sát trong mô phỏng: Không khí sạch (clear air), sương mù nhẹ (haze), mưa vừa phải (medium rain), mưa dày (heavy rain) và cực kỳ xấu hay sương mù dày đặc (extremly bad).

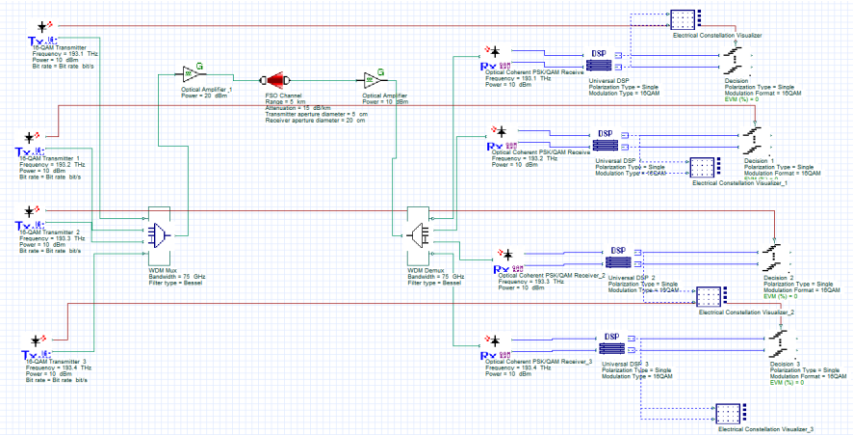
Phần mềm mô phỏng được sử dụng là phần mềm Optisystems v14, với sơ đồ mô phỏng thực hiện theo sơ đồ khối tại Hình 3.1. Các sơ đồ mô phỏng cụ thể được trình bày trong Hình 3.2, trong đó Hình 3.2a mô tả sơ đồ mô phỏng sử dụng điều chế QPSK, Hình 3.2c mô tả sơ đồ sử dụng điều chế 16-QAM, Hình 3.2c mô tả trường hợp có kết hợp tuyến cáp sợi quang.

Trong Hình 3.2, các bộ phát tín hiệu quang có điều chế được sử dụng, để tiện cho việc mô phỏng, em sử dụng các bộ tạo tín hiệu giả ngẫu nhiên và laser tích hợp sẵn trong bộ phát, tần số công tác lần lượt được cài đặt là 193.1, 193.2, 193.3 và 193.4 THz. Bộ ghép kênh và tách kênh (WDM Mux và WDM Demux) 4 kênh với khoảng cách kênh 100GHz (theo tiêu chuẩn của ITU-T), băng thông bộ lọc được cài đặt là 75GHz với bộ lọc Bessel được sử dụng. Kênh truyền FSO sử dụng mô hình Gamma-Gamma, các tham số như độ rộng chùm tia phát, cự ly liên lạc, đường kính thấu kính thu và chỉ số chiết suất sẽ được thay đổi lần lượt trong các bài mô phỏng. Ngoài ra, tại Hình 3.2c, một tuyến cáp sợi quang có cự ly Nx20km (N thay đổi) được sử dụng để đánh giá.

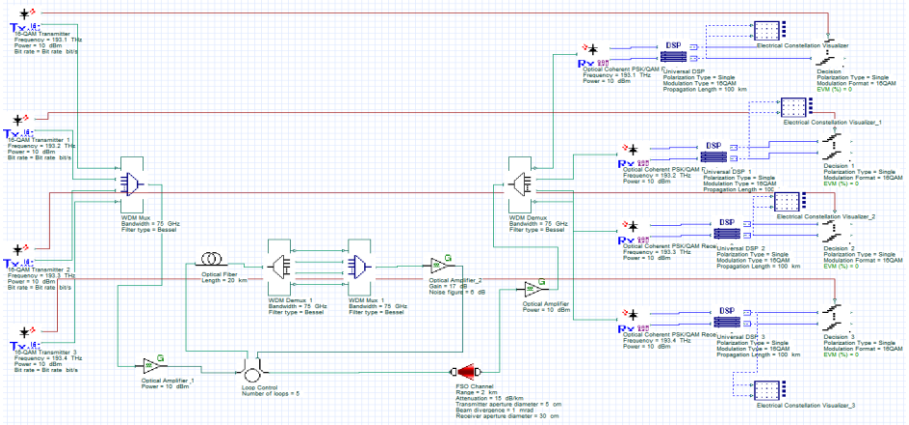
Tại phía thu, các bộ thu quang kết hợp được sử dụng tương ứng với từng kênh quang tại máy phát. Các bộ xử lý tín hiệu DSP và bộ so sánh Decision được sử dụng để tách tín hiệu. Kết quả là giá trị EVM (%) nhận được sau mỗi phép mô phỏng tại các bộ Decision tương ứng. Với DWDM, các kênh ở giữa băng thông sẽ chịu tác động mạnh hơn của các hiệu ứng phi tuyến nên trong chương này em sẽ sử dụng kết quả trung bình của kênh 2 và 3 để đánh giá hệ thống.



a) Sử dụng điều chế QPSK



b) Sử dụng điều chế 16-QAM



c) Kết hợp tuyến cáp sợi quang

Hình 3.2 Sơ đồ mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Optisystem

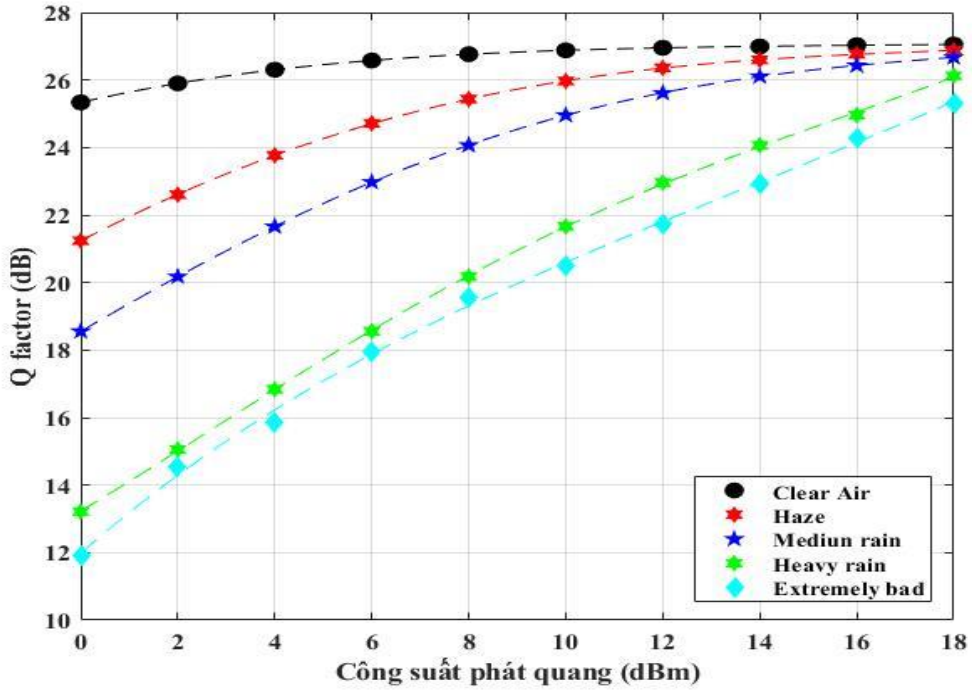
3.2. Kết quả mô phỏng

3.2.1. Đánh giá ảnh hưởng của tham số tuyến FSO đến chất lượng truyền dẫn tín hiệu QPSK và 16-QAM

Trước hết, việc mô phỏng đánh giá chất lượng của hệ thống DWDM 4 kênh truyền dữ liệu qua tuyến FSO được tiến hành, trong đó tham số Q được quan sát dưới nhiều điều kiện tuyến khác nhau. Kết quả mô phỏng được trình bày trong các Hình 3.3 đến Hình 3.10; cụ thể, Hình 3.3 đến Hình 3.6 thể hiện kết quả đối với tín hiệu QPSK, còn Hình 3.7 đến Hình 3.10 trình bày kết quả đối với tín hiệu 16-QAM.

Ở giai đoạn đầu, việc đánh giá sự biến thiên của tham số Q theo công suất quang ghép vào tuyến FSO được thực hiện cho cả hai loại tín hiệu QPSK và 16-QAM. Các kết quả tương ứng được thể hiện trong Hình 3.3 (QPSK) và Hình 3.7 (16-QAM). Có thể nhận thấy rằng trong mọi điều kiện môi trường, xu hướng thay đổi của tham số Q là tương tự nhau: điều kiện không khí sạch (Clear Air) luôn cho giá trị Q cao nhất, trong khi điều kiện không khí bất lợi nhất cho giá trị thấp nhất. Khi công suất quang được tăng lên, tham số Q cũng tăng theo; tuy nhiên mức tăng chỉ duy trì đến một ngưỡng nhất định (khoảng 25–27 dB tùy môi trường). Vượt quá ngưỡng này, việc tăng công suất hầu như không làm cải thiện thêm giá trị Q.

Kết quả thu được phù hợp với đặc trưng của hệ thống FSO, nơi tín hiệu ánh sáng truyền qua không gian tự do gần như không chịu ảnh hưởng của tán sắc hoặc phi tuyến Kerr do chiết suất không khí xấp xỉ bằng 1.



Hình 3.3 Tham số Q biến thiên theo công suất phát quang đối với tín hiệu QPSK

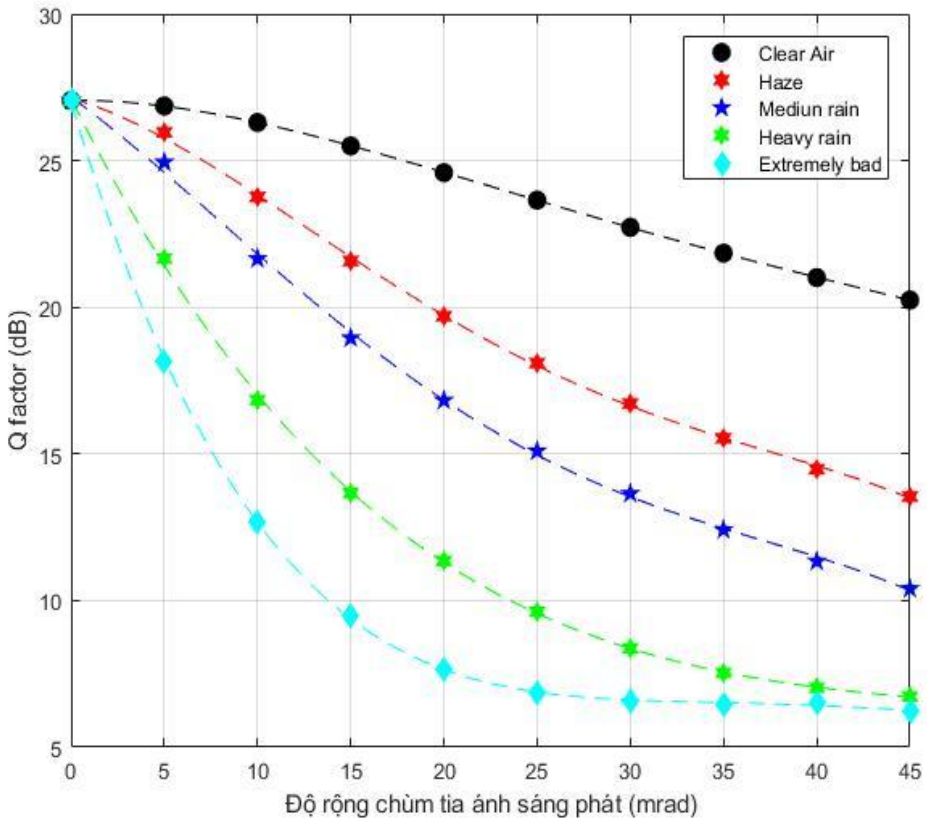
Tiếp theo, 2 tham số liên quan trực tiếp đến cấu trúc tuyến, thiết bị FSO, là độ rộng chùm tia sáng phát (mrad) và đường kính thấu kính thu (cm) được khảo sát.

Với Hình 3.4 và 3.8, ta nhận thấy khi tăng độ rộng chùm tia sáng phát thì giá trị Q sẽ giảm dần (với các điều kiện thời tiết khác nhau). Rõ ràng, với độ rộng lớn thì việc thiết kế máy phát sẽ dễ dàng hơn, tuy nhiên giá trị Q sẽ giảm xuống khá nhanh (do sự phân kỳ chùm tia dẫn đến mất mát công suất thu tại đầu thu). Do đó việc thiết kế máy phát FSO với độ rộng chùm tia phù hợp sẽ đặc biệt quan trọng khi chúng ta sử dụng FSO trong các điều kiện thời tiết.

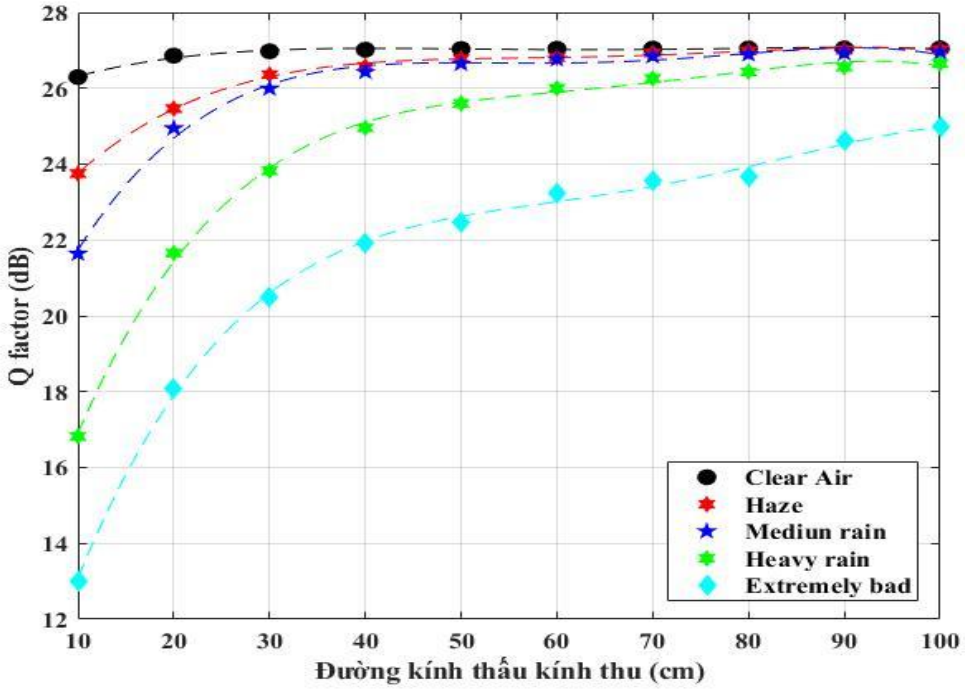
Trong Hình 3.5 và 3.9, dễ dàng nhận thấy việc tăng đường kính thấu kính thu sẽ cho phép tăng Q. Tuy vậy, dựa vào kết quả mô phỏng cho thấy, việc tăng đường kính này chỉ đến mức giới hạn, sau đó thì sẽ không mang lại hiệu quả đáng kể (khoảng 90 cm với điều kiện thời tiết rất xấu, khoảng 50-60 cm đối với

các điều kiện tốt hơn). Ngoài ra khi so sánh hình 3.5 và hình 3.9 ta nhận thấy, sự ảnh hưởng đến chất lượng tín hiệu (tham số Q) khi tăng đường kính thấu kính thu đối với tín hiệu 16-QAM là lớn hơn QPSK (độ dốc đồ thị trong hình sau lớn hơn hình trước). Ngoài ra, việc tăng đường kính dẫn đến kích thước trọng lượng thiết bị tăng, kéo theo việc thiết kế các cột anten sẽ là vấn đề phức tạp hơn, do đó chúng ta cần tính toán cẩn thận trong quá trình thiết kế.

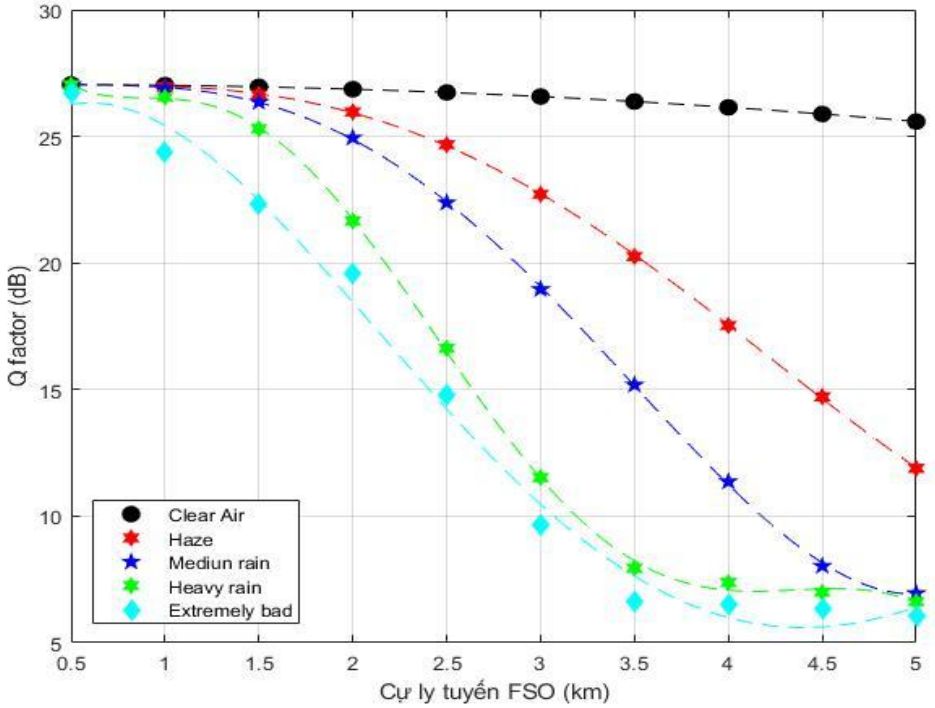
Từ hai khảo sát đối với độ rộng chùm tia sáng phát và đường kính thấu kính thu, ta có thể đưa ra kết luận sơ bộ là với các điều kiện thời tiết như tại khu vực trung du miền núi phía Bắc, đường kính thấu kính thu có thể ước tính trong khoảng 40-50cm, đây là giá trị khả dĩ thích hợp cho các thiết kế tuyến do sự hợp lý về kích thước, khối lượng, chất lượng hệ thống truyền dẫn ….



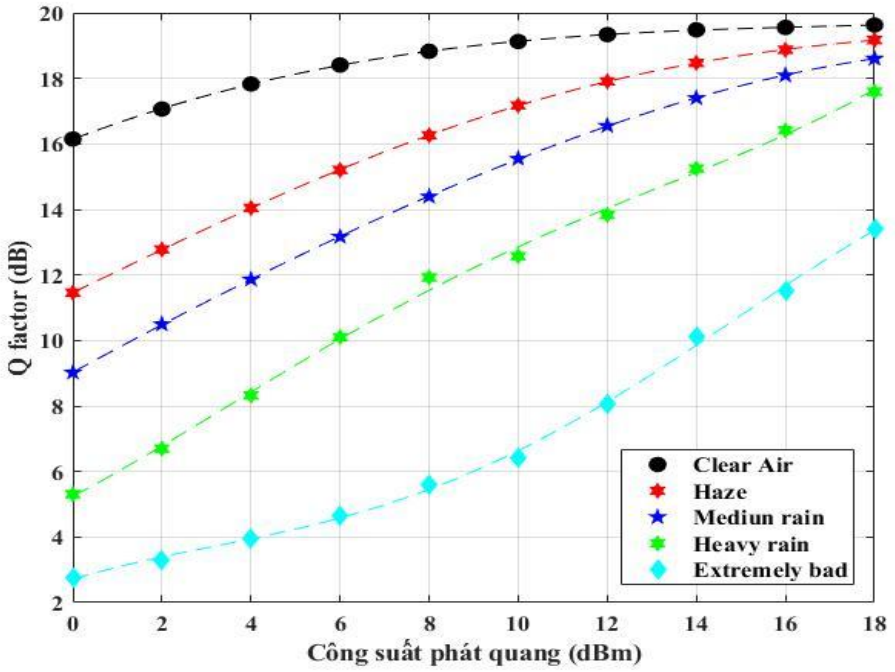
Hình 3.4. Tham số Q biến thiên theo độ rộng chùm tia ánh sáng phát đối với tín hiệu QPSK



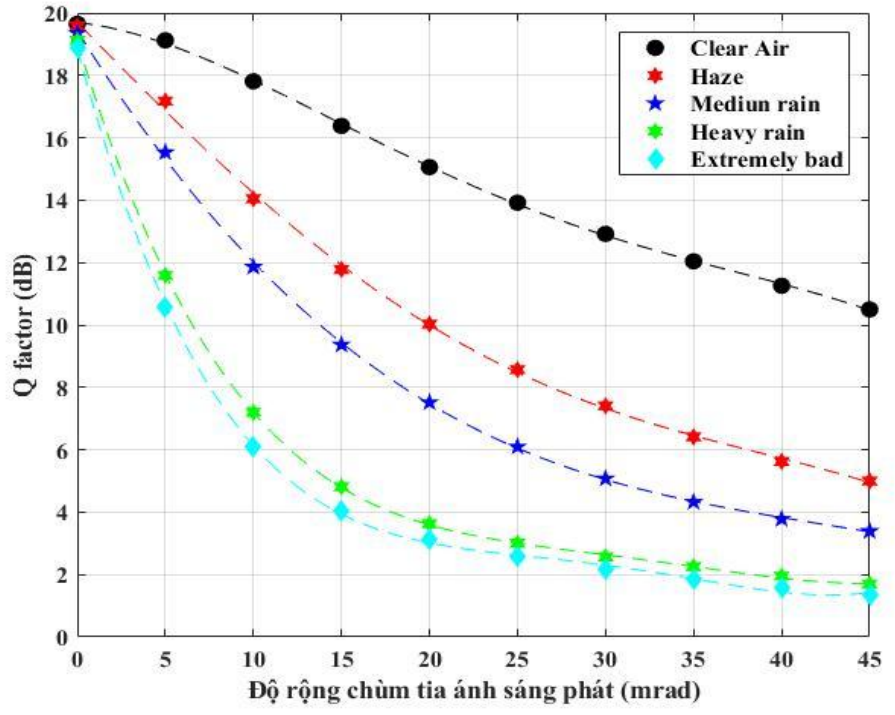
Hình 3.5. Tham số Q biến thiên theo đường kính thấu kính thu đối với tín hiệu QPSK



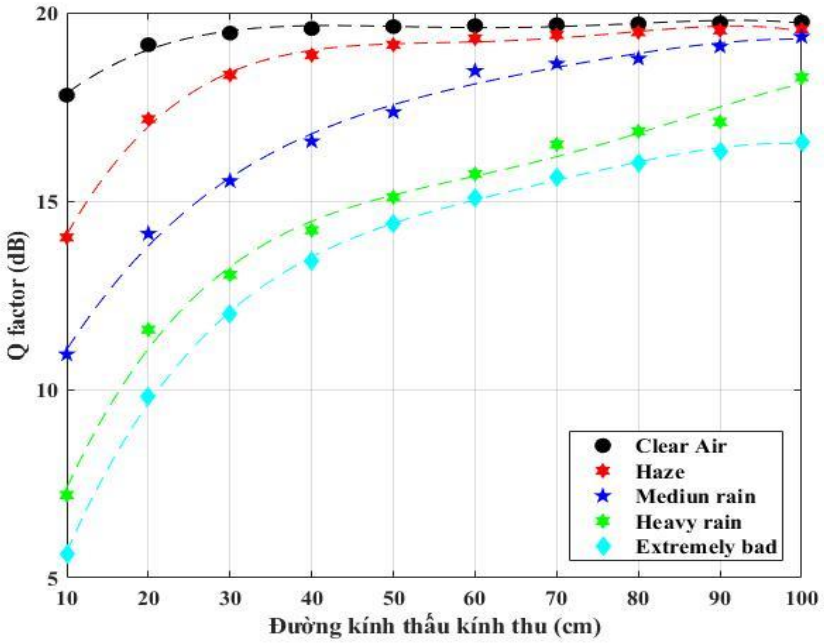
Hình 3.6. Tham số Q biến thiên theo cự ly tuyến FSO đối với tín hiệu QPSK



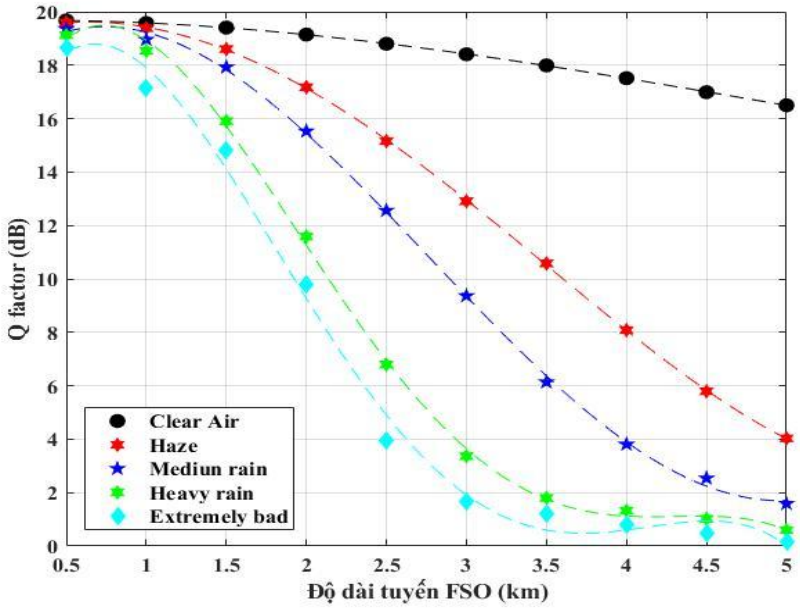
Hình 3.7. Tham số Q biến thiên theo công suất phát quang đối với tín hiệu 16-QAM



Hình 3.8. Tham số Q biến thiên theo độ rộng chùm tia ánh sáng phát đối với tín hiệu 16-QAM



Hình 3.9. Tham số Q biến thiên theo đường kính thấu kính thu đối với tín hiệu 16-QAM



Hình 3.10. Tham số Q biến thiên theo cự ly tuyến FSO đối với tín hiệu 16-QAM

Cuối cùng, việc đánh giá sự biến thiên của chất lượng tín hiệu (tham số Q) theo cự ly tuyến FSO được tiến hành nhằm cung cấp cái nhìn rõ ràng hơn về mức độ

ảnh hưởng của khoảng cách liên lạc đến hiệu năng hệ thống trong các điều kiện thời tiết khác nhau. Kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 3.6 đối với tín hiệu QPSK và Hình 3.10 đối với tín hiệu 16-QAM.

Dựa trên các kết quả thu được, có thể nhận thấy rằng khi chiều dài tuyến FSO tăng lên, giá trị Q suy giảm tương ứng, trong đó mức suy giảm diễn ra đặc biệt nhanh khi cự ly vượt quá khoảng 2.5–3 km. Trong các điều kiện thời tiết bất lợi như mưa lớn hoặc sương mù dày đặc, tốc độ suy giảm còn mạnh hơn. Điều này được thể hiện rõ qua độ dốc lớn của đồ thị trong Hình 3.6 và Hình 3.10, cho thấy độ dài tuyến có ảnh hưởng đặc biệt nghiêm trọng đến chất lượng tín hiệu trong môi trường truyền dẫn bị suy hao mạnh.

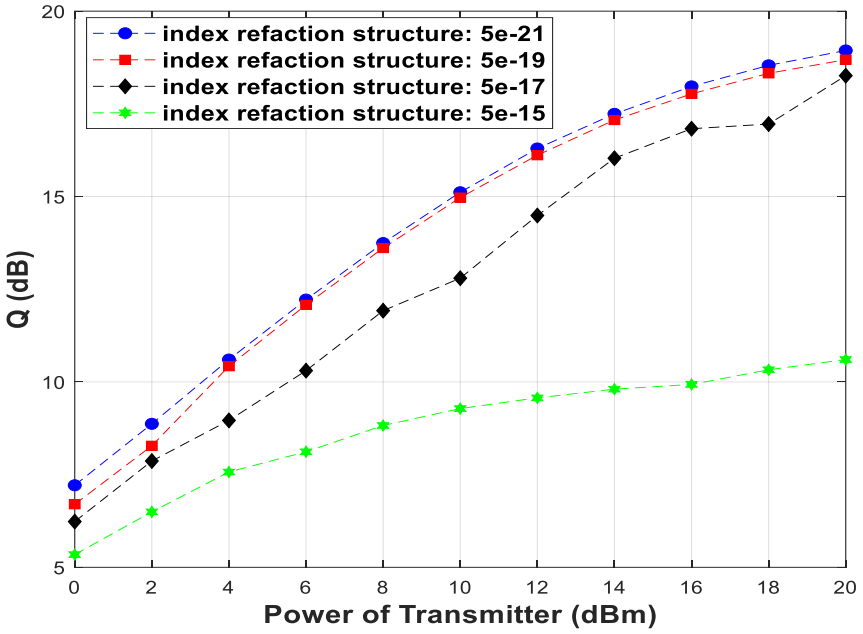
Như vậy, trong phần này, việc khảo sát chất lượng tín hiệu QPSK và 16-QAM khi truyền qua tuyến FSO đã được thực hiện với bốn tham số chính: công suất tín hiệu phát, độ rộng chùm tia phát, đường kính thấu kính thu và cự ly tuyến truyền. Các kết quả thu được là cơ sở quan trọng cho phần mô phỏng tiếp theo, nơi hệ thống FSO được kết hợp với tuyến metro DWDM để đánh giá tổng thể hiệu năng truyền dẫn.

3.2.2. Khảo sát tác động của tham số chỉ số chiết suất môi trường đến chất lượng hệ thống

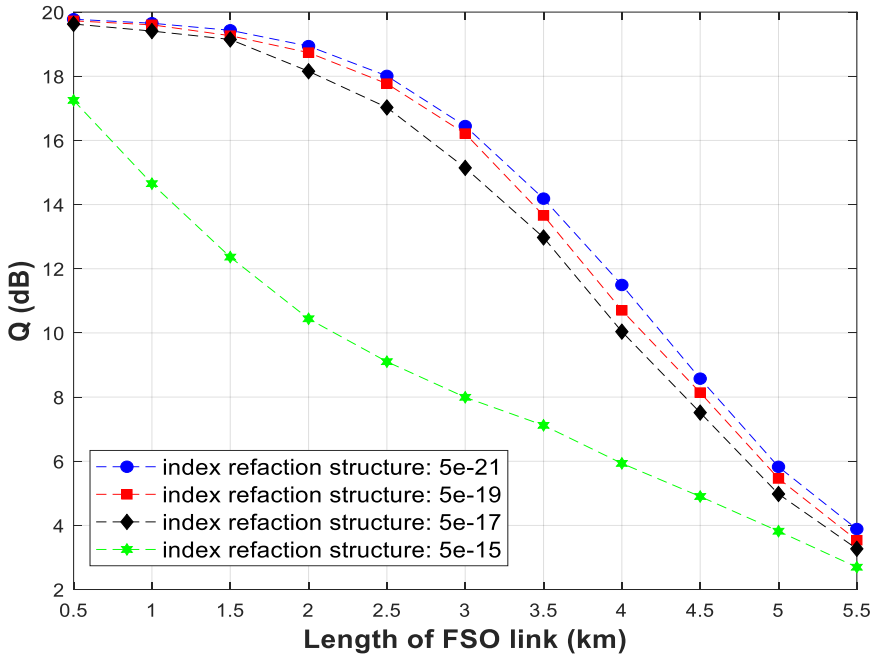
Trong phần tiếp theo, ảnh hưởng của tham số chỉ số chiết suất đến chất lượng hệ thống được tiến hành đánh giá. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.11 và Hình 3.12, trong đó Hình 3.11 thể hiện kết quả trong điều kiện thời tiết bình thường, còn Hình 3.12 mô tả kết quả trong điều kiện thời tiết xấu. Có thể nhận thấy rằng ở cả hai trường hợp, tác động của chỉ số chiết suất đến chất lượng hệ thống chỉ trở nên rõ rệt khi tham số này đạt giá trị lớn (trên 10^{-17}, ví dụ giá trị 5×10^{-15} thể hiện qua đường màu xanh lá). Ngược lại, với các giá trị nhỏ trong khoảng từ 10^{-19} đến 10^{-21}, sự thay đổi chất lượng tín hiệu là không đáng kể.

Kết quả này cho thấy khi chỉ số chiết suất biến thiên do sự thay đổi nhanh của các lớp không khí—thường bắt nguồn từ sự chênh lệch nhiệt độ giữa các tầng khí quyển—chất lượng hệ thống có thể bị ảnh hưởng đáng kể. Tuy nhiên, sự ảnh hưởng

này chỉ thực sự rõ ràng khi nhiễu loạn khí quyển đủ mạnh, điều vốn ít xảy ra tại khu vực trung du và miền núi phía Bắc, đặc biệt ở các vùng núi cao.

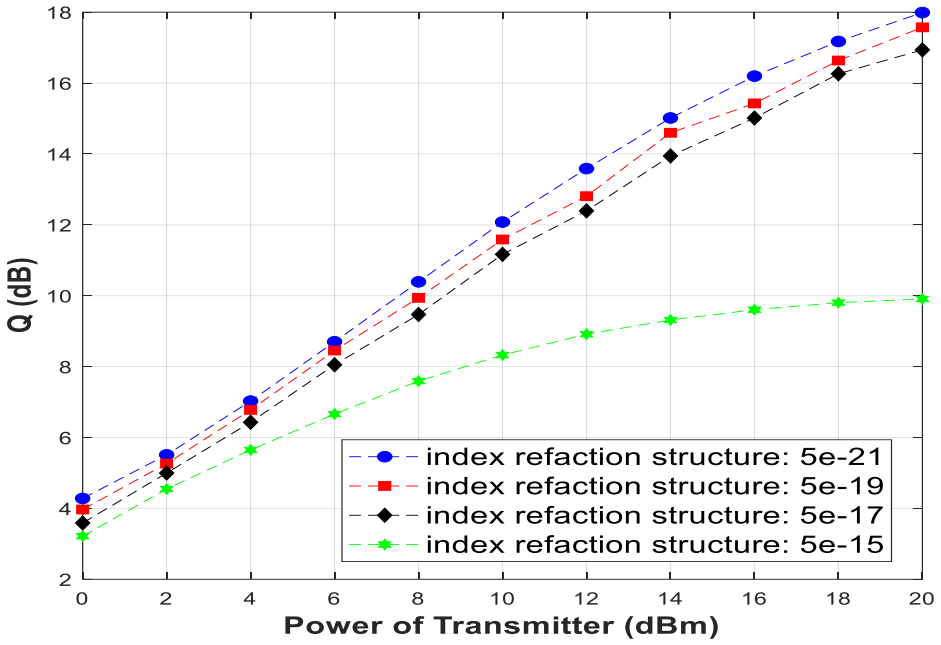


a) *Khảo sát với công suất ghép vào tuyến FSO*

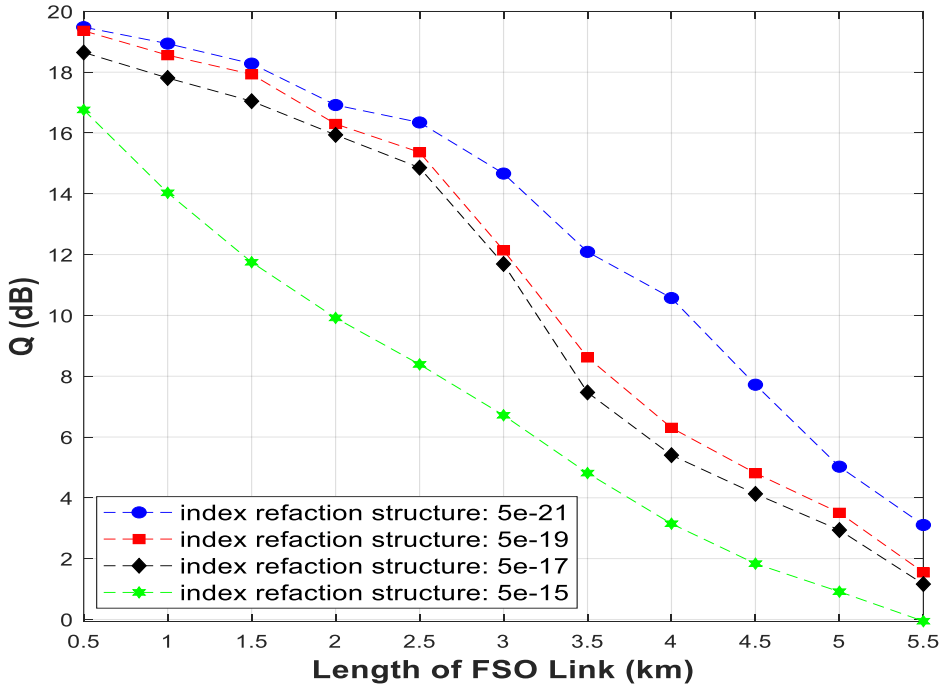


b) Khảo sát với cự ly tuyến FSO

Hình 3.11. Chất lượng hệ thống theo giá trị chỉ số chiết suất trong điều kiện thời tiết bình thường



a) Khảo sát với công suất ghép vào tuyến FSO



b) Khảo sát với cự ly tuyến FSO

Hình 3.12. Chất lượng hệ thống theo giá trị chỉ số chiết suất trong điều kiện thời tiết xấu

Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng cũng chỉ ra rằng tác động của chỉ số chiết suất trở nên quan trọng hơn khi chiều dài tuyến FSO tăng lên mức vài kilomet. Do đó, trong quá trình thiết kế tuyến truyền FSO, cần xem xét cẩn trọng ảnh hưởng của tham số này, đặc biệt khi các trạm phát–thu được bố trí tại những vị trí có sự thay đổi nhanh của các lớp không khí phía trên. Việc đánh giá này càng trở nên cần thiết khi yêu cầu cự ly truyền dẫn vượt quá 2–3 km.

3.2.3. Khảo sát ứng dụng FSO kết hợp với tuyến truyền dẫn sợi quang

Từ các kết quả mô phỏng trước đó có thể nhận thấy rằng việc truyền tín hiệu qua tuyến FSO hầu như không chịu ảnh hưởng đáng kể từ tán sắc hay phi tuyến Kerr. Nguyên nhân là do môi trường truyền dẫn là không khí – một môi trường gần giống chân không với chiết suất xấp xỉ 1. Vì vậy, các suy giảm chất lượng tín hiệu chủ yếu xuất phát từ suy hao đường truyền và các yếu tố thời tiết.

Khi tích hợp tuyến FSO với hệ thống truyền dẫn sợi quang, cần tiến hành đánh giá lại mức độ ảnh hưởng của cả hai tuyến truyền đến chất lượng tín hiệu tổng thể. Sơ đồ mô phỏng cho cấu hình kết hợp này được thể hiện trong Hình 3.1b. Trong mô phỏng, sợi quang sử dụng là SSMF với các thông số đặc trưng gồm:

+ Suy hao trung bình: $\alpha = 0.2$ dB/km;
+ Tán sắc ở bước sóng 1550 nm: $D = 17$ ps/km/nm;
+ Độ dốc tán sắc: $S = 0.075$ ps/km/nm^2;
+ Độ dài mỗi tuyến lặp: $L = 20$ km.

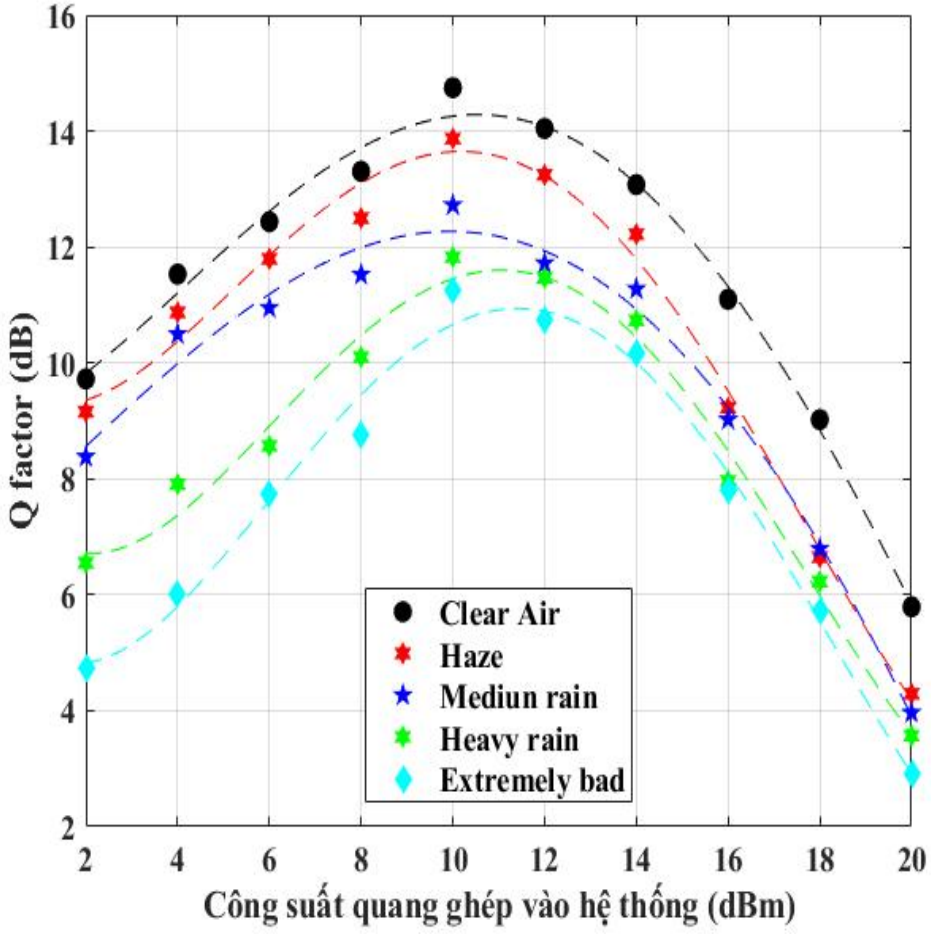
Để bù suy hao do cả tuyến sợi quang lẫn tuyến FSO, các bộ khuếch đại EDFA được sử dụng với hệ số tạp âm *noise figure* bằng 6, và hệ số khuếch đại được điều chỉnh phù hợp với từng cấu hình truyền dẫn.

Hình 3.13 mô tả sự biến thiên tham số Q theo công suất ghép vào hệ thống, xét cho 4 kênh DWDM hoạt động ở tốc độ 50 GBaud, với chiều dài tuyến FSO là 2 km.

Khi kết hợp tuyến FSO với tuyến sợi quang, sự phụ thuộc của tham số Q vào công suất đầu vào trở nên khác biệt đáng kể so với trường hợp chỉ có tuyến FSO. Trong mọi

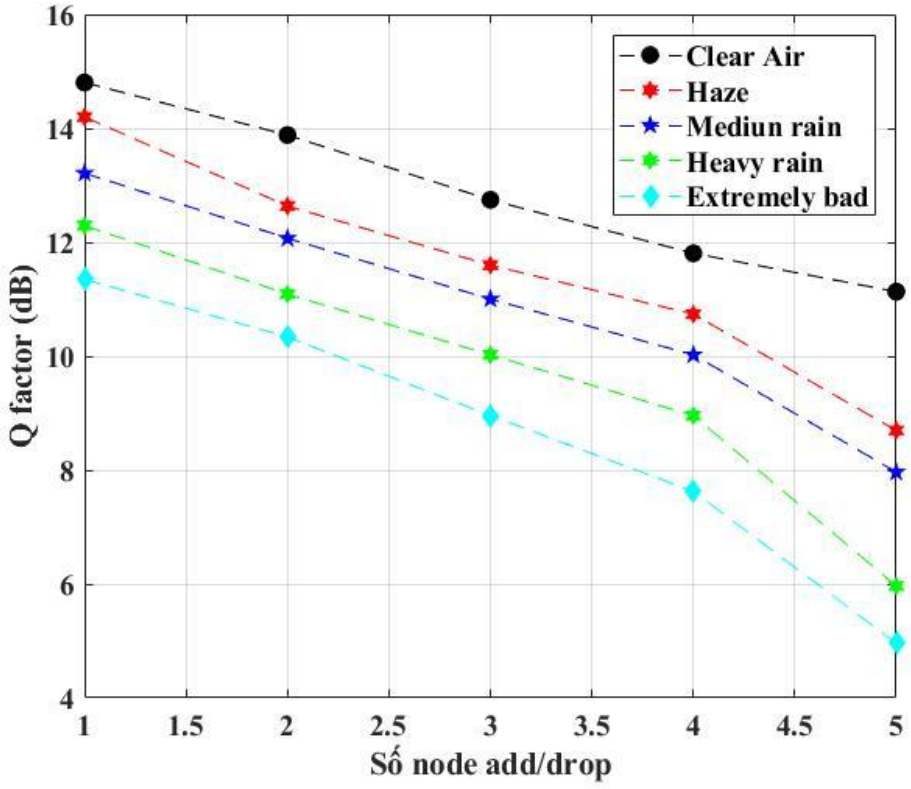
điều kiện thời tiết, đường cong biểu diễn sự biến thiên của Q có dạng gần giống một parabol ngược. Hiện tượng này bắt nguồn từ ảnh hưởng của tán sắc và phi tuyến Kerr trong sợi quang – các yếu tố vốn không tồn tại trong môi trường truyền dẫn không khí. Chính các tác động này có thể gây suy giảm đáng kể chất lượng tín hiệu.

Do đó, khi thiết kế các hệ thống FSO kết hợp với tuyến truyền sợi quang, cần tính toán cẩn trọng ảnh hưởng của tán sắc và phi tuyến, đặc biệt trong các điều kiện thời tiết bất lợi, nhằm đảm bảo chất lượng tín hiệu và độ ổn định của toàn tuyến truyền.



Hình 3.13. Tham số Q biến thiên theo công suất ghép vào hệ thống

Tiếp theo, sự phụ thuộc của tham số chất lượng Q vào chiều dài tuyến sợi quang (hay số nút xen/rẽ – add/drop) trong hệ thống đã được khảo sát, với tham số N thể hiện trong sơ đồ Hình 3.1b. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.14.



Hình 3.14. Tham số Q biến thiên theo số node add/drop.

Kết quả cho thấy tham số Q suy giảm rất nhanh khi số nút add/drop tăng. Nguyên nhân là do sự tích lũy tán sắc và hiệu ứng phi tuyến phát sinh trong sợi quang, cũng như nhiễu tạp âm do các bộ khuếch đại EDFA gây ra. Hiện tượng này trở nên rõ ràng hơn trong những điều kiện thời tiết bất lợi, khi tuyến FSO yêu cầu một bộ khuếch đại EDFA có hệ số khuếch đại lớn để bù suy hao. Việc khuếch đại mạnh tại cuối tuyến sẽ làm tăng tích lũy phi tuyến trước bộ thu – giải điều chế, dẫn đến suy giảm đáng kể chất lượng tín hiệu.

Khảo sát ảnh hưởng của số nút add/drop hay số đoạn tuyến metro đến chất lượng tín hiệu khi kết hợp với FSO đã đem lại cái nhìn cụ thể về yêu cầu thiết kế. Kết quả chỉ ra rằng để hạn chế tác động của tán sắc và phi tuyến, cần áp dụng các phương pháp bù tán sắc hoặc tối ưu hóa công suất khuếch đại trong các cấu hình kết hợp FSO–sợi quang. Những giải pháp này sẽ được nghiên cứu chi tiết hơn trong các hướng phát triển tiếp theo.

3.3. Kết luận chương 3

Trong chương 3, chất lượng tín hiệu quang điều chế QPSK và 16-QAM khi truyền qua tuyến FSO đã được đánh giá trong nhiều kịch bản mô phỏng và điều kiện thời tiết khác nhau, thông qua các tham số đặc trưng của hệ thống. Những kết quả này cung cấp cái nhìn toàn diện về mức độ ảnh hưởng của từng tham số đến khả năng ứng dụng FSO trong thực tế.

Bên cạnh đó, việc mô phỏng hệ thống truyền dẫn DWDM 4 kênh có tích hợp FSO ở cuối tuyến đã cho thấy những yêu cầu và thách thức quan trọng khi ứng dụng FSO vào mạng truyền dẫn quang. Các kết quả thu được cũng chỉ ra các vấn đề cần xem xét nhằm đảm bảo chất lượng tín hiệu khi triển khai FSO trong các cấu hình truyền dẫn kết hợp.

KẾT LUẬN CHUNG VÀ KIẾN NGHỊ

Nội dung đề án đã đáp ứng đúng các yêu cầu đặt ra khi trình bày một cách tổng quan về hệ thống truyền dẫn quang không dây FSO, nêu rõ các ưu điểm, hạn chế cũng như những thách thức gặp phải trong quá trình triển khai. Bên cạnh đó, đề án cũng phân tích các nguyên nhân gây suy giảm hiệu năng, đề xuất hướng khắc phục và xác định mô hình kênh phù hợp với điều kiện khí hậu – thời tiết khu vực Trung du Bắc bộ, bao gồm cả mô hình kênh điển hình và mô hình kênh đặc thù.

Với trọng tâm là xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống FSO áp dụng cho khu vực Trung du Bắc bộ, đề án đã trình bày đầy đủ các kiến thức lý thuyết liên quan như: các tham số đường truyền, suy hao truyền dẫn, nhiễu loạn khí quyển ở các mức độ yếu – trung bình – mạnh, và hiện tượng lệch hướng. Đồng thời, đề án đã xây dựng và mô phỏng mô hình kênh FSO dựa trên phân bố Gamma–Gamma, được đánh giá là phù hợp nhất với điều kiện thời tiết và địa hình khu vực này. Các mô phỏng được thực hiện với tín hiệu điều chế QPSK, 16-QAM và khảo sát ảnh hưởng của tham số chỉ số chiết suất không khí đến chất lượng hệ thống.

Ngoài ra, đề án cũng tham khảo, tổng hợp và phân tích các kết quả mô phỏng dựa trên mô hình kênh Gamma–Gamma để đánh giá tỉ lệ lỗi bit, xác suất dưới ngưỡng và tác động của hiện tượng lệch hướng lên chất lượng hệ thống. Những kết quả này cho thấy rõ hiệu năng hoạt động của hệ thống FSO trong khu vực Trung du Bắc bộ dưới nhiều điều kiện môi trường khác nhau. Trên cơ sở đó, đề án khẳng định tiềm năng lớn của công nghệ FSO trong tương lai, đặc biệt khi được triển khai tại các khu vực đồi núi – trung du, nơi yêu cầu các giải pháp truyền dẫn linh hoạt, hiệu quả và ít phụ thuộc vào hạ tầng cáp quang truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourth Quarter 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.

[2] N. A. Mohammed, A. A. El-Wakeel, and M. H. Aly, "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353-7373, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048049.

[3] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, "Classification Framework for Free Space Optical Communication Links and Systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 12, pp. 177-183, December 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700862.

[4] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Revolutionizing Free-Space Optics: A Survey of Enabling Technologies, Challenges, Trends, and Prospects of Beyond 5G Free-Space Optical (FSO) Communication Systems," *Sensors*, vol. 24, no. 24, article 8036, December 2024, doi: 10.3390/s24248036.

[5] J. Singh and N. Kumar, "Performance analysis of FSO links under strong atmospheric turbulence conditions using various modulation techniques," *Optik*, vol. 124, no. 20, pp. 4651-4656, October 2013, doi: 10.1016/j.ijleo.2013.01.036.

Tiếng Việt:

[1]. Võ Nguyễn Quốc Bảo, Lê Hải Châu, Giáo trình Mô Phỏng Hệ Thống Truyền Thông, Nhà xuất bản Khoa học & Kỹ thuật, 2021.

[2]. Nguyễn Quốc Trung (chủ biên), Thông tin di động và mạng không dây, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2015.

[3]. Nguyễn Thị Thu Hương, Trần Xuân Nam, Truyền thông không dây – Lý thuyết và mô phỏng, NXB Bách khoa Hà Nội, 2019.

[4]. PGS.TS, Đặng Thế Ngọc; TS Phạm Thị Thúy Hiền, "Nguyện lý và hiệu năng Hệ thống truyền thông quang không dây", Nhà xuất bản Thông tin và truyền thông, 3974-2024/CXBIPH/6-141/TTTT.

[5]. Luận án Tiến sĩ Dương Hữu Ái-Đại học Bách khoa Hà Nội "Đánh giá hiệu năng hệ thống FSO chuyển tiếp sử dụng điều chế SC-QAM dưới ảnh hưởng của lỗi lệch tia" năm 2018.