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.

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.

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.

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.

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

Chương 1: Tổng quan về hệ thống FSO.

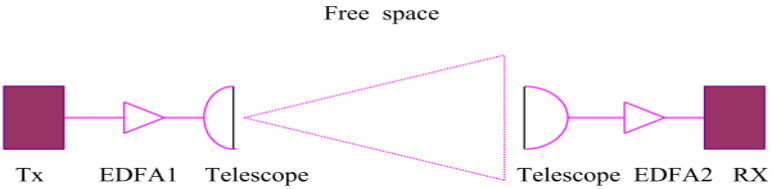
Chương 2: Mô hình kênh của hệ thống FSO trong điều kiện thời tiết miền trung du bắc bộ.

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

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.



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:

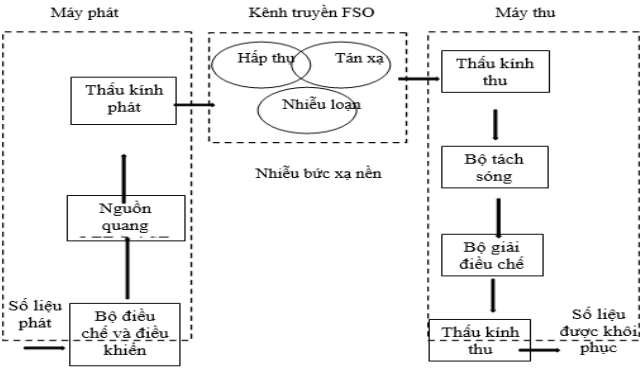
+ Cự ly truyền dẫn của FSO thường không quá dài (chỉ từ vài km đến dưới 20 km), phụ thuộc mạnh vào điều kiện thời tiết và suy hao khí quyển.

+ 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.

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.



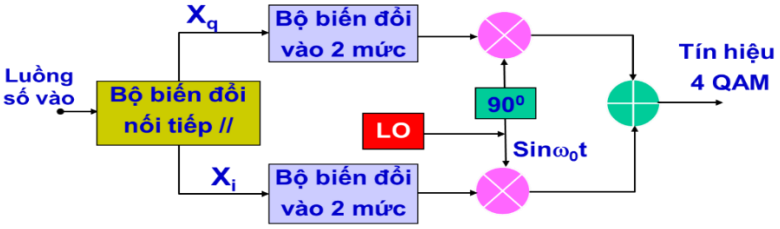
Hình 1.2. Sơ đồ hệ thống FSO với sự nhiễu loạn không khí

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.

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. 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.

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.



Hình 1.3. Sơ đồ khối điều chế QAM

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.

Một ưu điểm đáng kể khác của FSO là tính linh hoạt rất cao trong lắp đặt và cấu hình mạng.

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.

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.

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.

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.

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.

1.5 Ứng dụng của hệ thống FSO

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

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

Ứng dụng FSO trong kết nối giữa các tòa nhà

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

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

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

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

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

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

1.6 Kết luận 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.

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. Những thách thức chính trong việc thiết kế các hệ thống FSO như: Sương mù, sự nhấp nháy, sự trôi búp, sự lệch tia, nhiễu trong hệ thống FSO.

2.2 Suy hao đường truyền

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:

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

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:

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

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. 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.

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. 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. 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.

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

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.

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. 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:

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

Trong đó, k = 2π/λ là số sóng, toán tử véc tơ gradient

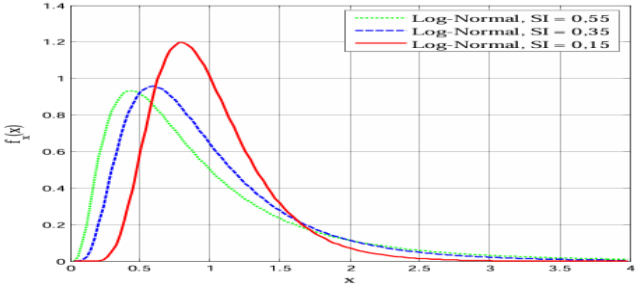
$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\vec{i} + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\vec{j} + \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)\vec{k}$$

Với i,j, k là các véc tơ đơn vị theo các trục x,y,z. Thành phần $2\nabla(\overrightarrow{E\nabla}\,(\ln n)$ trong vế trái đặc trưng cho nhiễu loạn gây ra sự suy giảm phân cực của sóng. Công thức được viết gọn lại như sau:

$$\nabla^2\vec{E} + k^2n^2\vec{E} = 0$$

Trong điều kiện nhiễu loạn yếu, phân bố chuẩn mô hình Log-Normal là mô hình phù hợp.

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.

$I = I_x \times I_y$

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:

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

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

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:

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

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

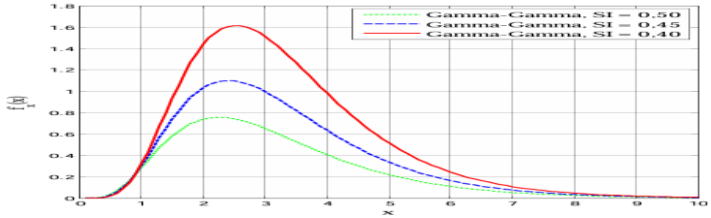
Để nhận được hàm mật độ xác suất vô điều kiện $p(I)$, ta lấy trung bình hàm xác suất có điều kiện $p(I/I_x)$ trên hàm phân bố xác suất của I_x được tính theo công thức trên. Từ đó, ta có được hàm phân bố cường độ bức xạ quang theo phân bố Gamma-Gamma như sau:

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

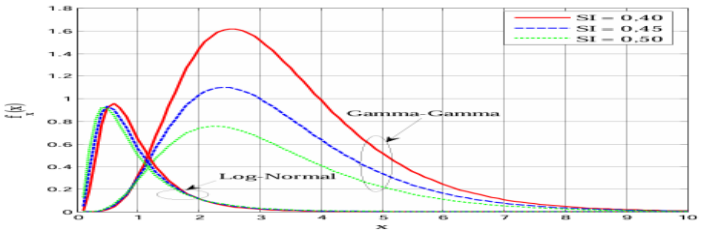
$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} k_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta I}\right);\ I > 0.$$

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.

Hình 2.2 dưới đây mô tả phân bố Gamma-Gamma với các giá trị khác nhau của chỉ số nhấp nháy *SI*. 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*.



Hình 2.2. Hàm mật độ xác suất của phân bố G-G với các tham số chỉ số nhấp 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

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:

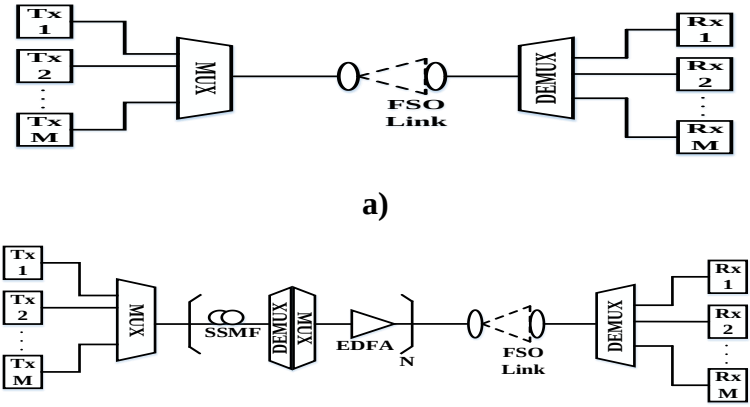
Thứ nhất, khí hậu trong vùng có sự phân hóa theo mùa rất rõ rệt.

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.

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.



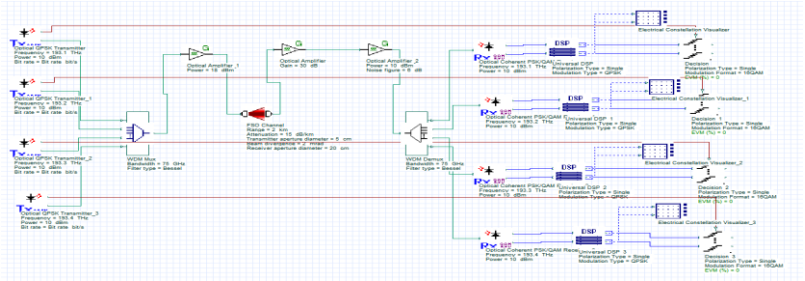
Hình 3.1 Mô hình truyền dẫn FSO 4 kênh
a) Không kết hợp tuyến cáp sợi quang
b) Có kết hợp tuyến cáp sợi quang

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.

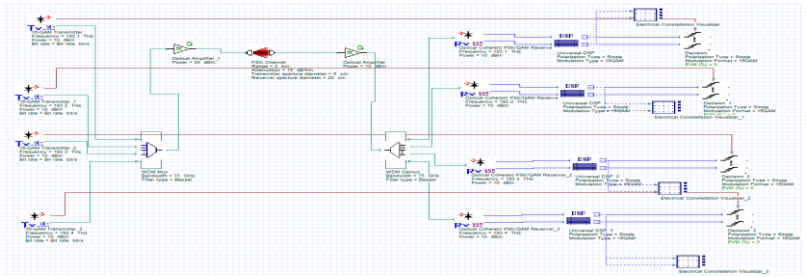
Trong Hình 3.2, các bộ phát tín hiệu quang có điều chế được sử dụng, để tiện cho việc mô phỏng, em sử dụng các bộ tạo

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.

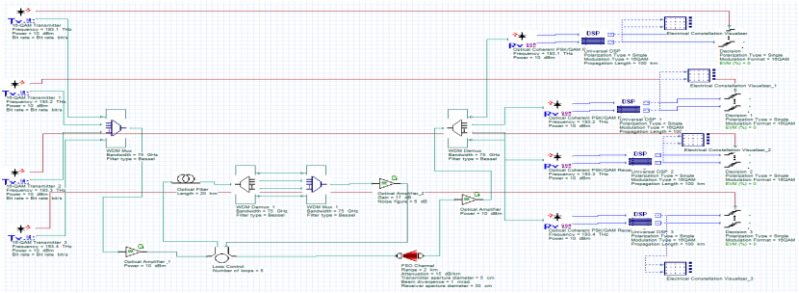
Tại phía thu, các bộ thu quang kết hợp được sử dụng tương ứng với từng kênh quang tại máy phát. Các bộ xử lý tín hiệu DSP và bộ so sánh Decision được sử dụng để tách tín hiệu. Kết quả là giá trị EVM (%) nhận được sau mỗi phép mô phỏng tại các bộ Decision tương ứng. Với DWDM, các kênh ở giữa băng thông 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)



b)



c)

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

a) Sử dụng điều chế QPSK

b) Sử dụng điều chế 16-QAM

c) Kết hợp tuyến cáp sợi quang

3.2. Kết quả mô phỏng

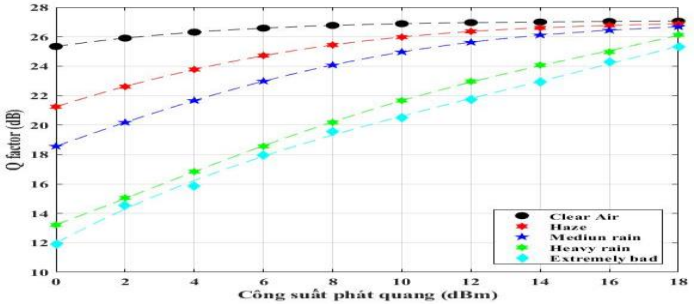
3.2.1. Đánh giá ảnh hưởng của tham số tuyến FSO đến chất lượng truyền dẫn tín hiệu QPSK và 16-QAM

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.

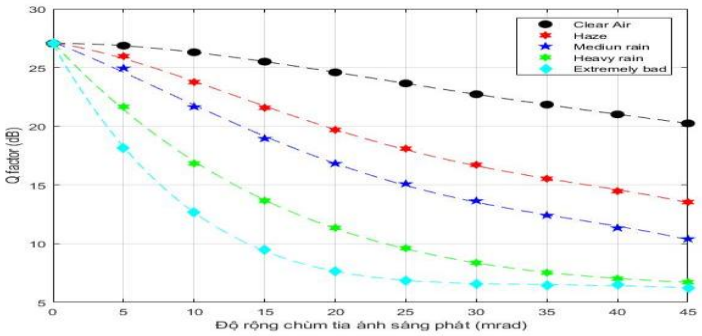


Hình 3.3 Tham số Q biến thiên theo công suất phát quang đối với tín hiệu QPSK

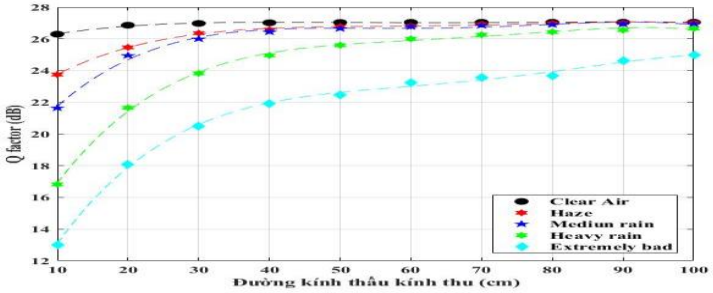
Tiếp theo, 2 tham số liên quan trực tiếp đến cấu trúc tuyến, thiết bị FSO, là độ rộng chùm tia sáng phát (mrad) và đường kính thấu kính thu (cm) được khảo sát.

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.

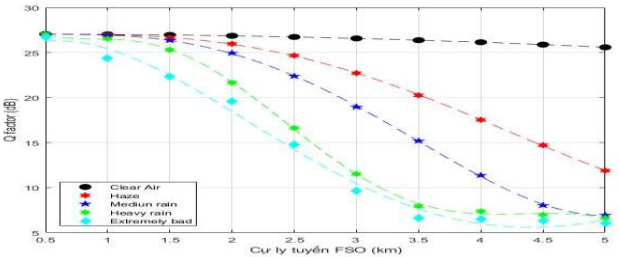
Trong Hình 3.5 và 3.9, dễ dàng nhận thấy việc tăng đường kính thấu kính thu sẽ cho phép tăng Q. Tuy vậy, dựa vào kết quả mô phỏng cho thấy, việc tăng đường kính này chỉ đến mức giới hạn, sau đó thì sẽ không mang lại hiệu quả đáng kể (khoảng 90 cm với điều kiện thời tiết rất xấu, khoảng 50-60 cm đối với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



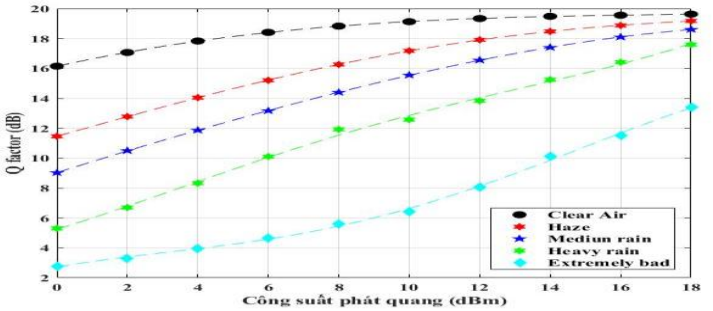
Hình 3.4. Tham số Q biến thiên theo độ rộng chùm tia ánh sáng phát đối với tín hiệu QPSK



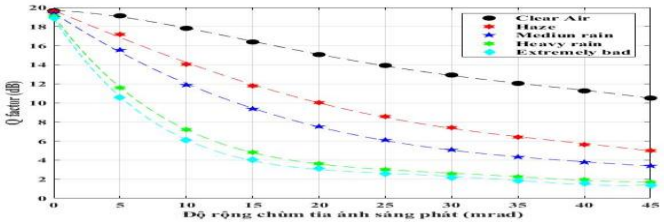
Hình 3.5. Tham số Q biến thiên theo đường kính thấu kính thu đối với tín hiệu QPSK



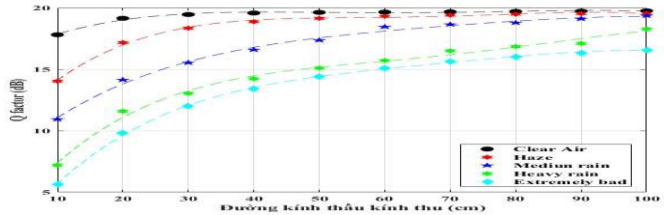
Hình 3.6. Tham số Q biến thiên theo cự ly tuyến FSO đối với tín hiệu QPSK



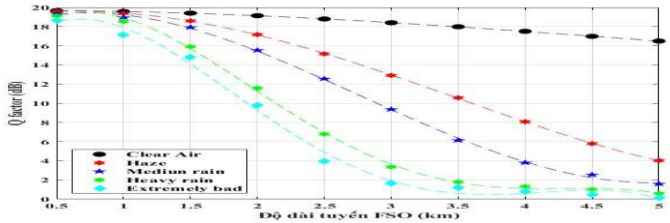
Hình 3.7. Tham số Q biến thiên theo công suất phát quang đối với tín hiệu 16-QAM



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

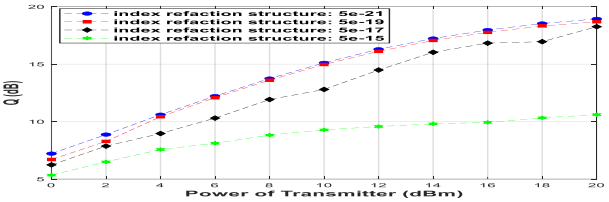


Hình 3.10. Tham số Q biến thiên theo cự ly tuyến FSO đối với tín hiệu 16-QAM

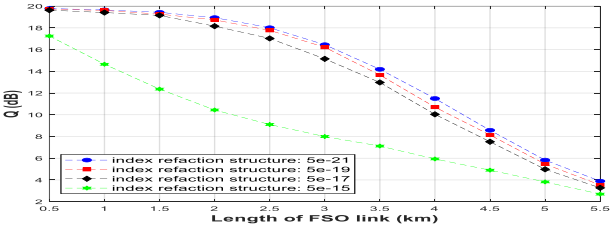
Dựa trên các kết quả thu được, có thể nhận thấy rằng khi chiều dài tuyến FSO tăng lên, giá trị Q suy giảm tương ứng, trong đó mức suy giảm diễn ra đặc biệt nhanh khi cự ly vượt quá khoảng 2.5–3 km.

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.



(a)



(b)

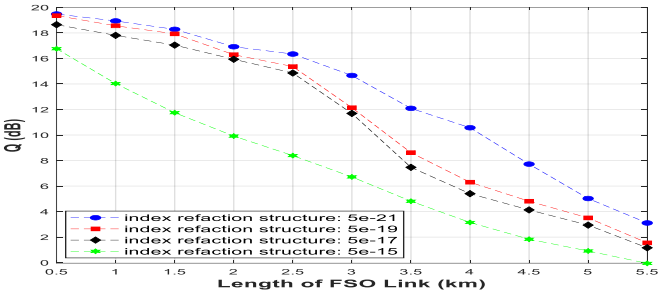
Hình 3.11. Chất lượng hệ thống theo giá trị chỉ số chiết suất trong điều kiện thời tiết bình thường

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

(b) Khảo sát với cự ly tuyến FSO



(a)



(b)

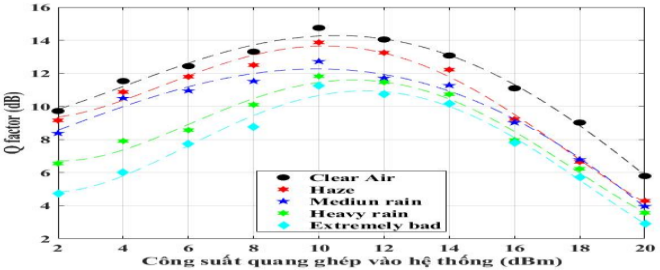
Hình 3.12. Chất lượng hệ thống theo giá trị chỉ số chiết suất trong điều kiện thời tiết xấu
(a) Khảo sát với công suất ghép vào tuyến FSO
(b) Khảo sát với cự ly tuyến FSO

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

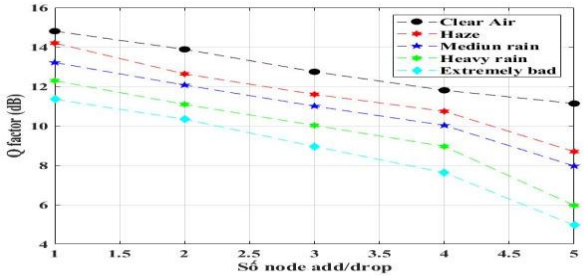
lượng tín hiệu chủ yếu xuất phát từ suy hao đường truyền và các yếu tố thời tiết.

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.



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.

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.