HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Bùi Minh Hoàng

NGHIÊN CỨU CÁC GIẢI PHÁP TÍCH HỢP ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ TRUYỀN THÔNG ÁNH SÁNG NHÌN THẤY TRONG MẠNG 6G

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT
(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI – NĂM 2026

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Bùi Minh Hoàng

NGHIÊN CỨU CÁC GIẢI PHÁP TÍCH HỢP ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ TRUYỀN THÔNG ÁNH SÁNG NHÌN THẤY TRONG MẠNG 6G

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:
PGS.TS. ĐẶNG THẾ NGỌC

HÀ NỘI – NĂM 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề án tốt nghiệp thạc sĩ với đề tài "Nghiên cứu các giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trong mạng 6G" là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn của PGS.TS. Đặng Thế Ngọc. Các số liệu, kết quả mô phỏng và trích dẫn trong đề án là trung thực, có nguồn gốc rõ ràng và được trích dẫn đầy đủ theo quy định. Những kết quả phân tích, mô phỏng do tôi tự thực hiện và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Hà Nội, tháng 7 năm 2026

Học viên thực hiện

Bùi Minh Hoàng

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới PGS.TS. Đặng Thế Ngọc đã tận tình hướng dẫn, định hướng và góp ý cho tôi trong suốt quá trình thực hiện đề án. Tôi cũng xin chân thành cảm ơn các thầy cô Khoa Viễn thông, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông đã trang bị cho tôi những kiến thức nền tảng quý báu. Cuối cùng, tôi xin cảm ơn gia đình, đồng nghiệp và bạn bè đã luôn động viên, hỗ trợ tôi hoàn thành đề án này.

Học viên

Bùi Minh Hoàng

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN ii

LỜI CẢM ƠN ii

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT vi

DANH MỤC HÌNH VẼ ix

DANH MỤC BẢNG BIỂU x

MỞ ĐẦU 1

1. Lý do chọn đề tài 1

2. Tổng quan tình hình nghiên cứu 2

3. Mục tiêu nghiên cứu 3

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 4

5. Phương pháp nghiên cứu 4

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn 5

7. Đóng góp của đề án 5

8. Bố cục của đề án 6

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ MẠNG DI ĐỘNG 6G VÀ NHU CẦU VỀ PHỔ TẦN QUANG 8

1.1. Tổng quan lịch sử phát triển mạng di động 8

1.2. Tầm nhìn IMT-2030 và các kịch bản sử dụng của mạng 6G 10

1.3. Các chỉ tiêu năng lực của IMT-2030 12

1.4. Bài toán phổ tần và vị trí của truyền thông quang không dây 15

1.5. Kiến trúc mạng 6G và vị trí của VLC trong kiến trúc 17

1.6. Xác định bài toán nghiên cứu 18

Kết luận chương 1 19

CHƯƠNG 2: CÔNG NGHỆ TRUYỀN THÔNG ÁNH SÁNG NHÌN THẤY (VLC) 20
2.1. Khái niệm và nguyên lý truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy 20
2.2. Mô hình hệ thống và thành phần của hệ thống VLC 21
2.3. Các kỹ thuật điều chế trong VLC 25
2.4. Đặc tính kênh, ưu điểm và hạn chế của VLC 28
2.5. Kỹ thuật đa truy nhập, MIMO và điều khiển độ sáng trong VLC 29
2.6. Các tiêu chuẩn và tình hình chuẩn hóa VLC 30
2.7. Một số hướng nghiên cứu mở của VLC 32
Kết luận chương 2 32
CHƯƠNG 3: GIẢI PHÁP TÍCH HỢP ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ VLC TRONG MẠNG 6G 33
3.1. Các kịch bản tích hợp VLC trong mạng 6G 33
3.2. Mô hình mạng VLC nhiều tế bào trong môi trường 6G 34
3.3. Đa kết nối VLC/RF và cơ chế chuyển giao trong kiến trúc 6G 36
3.4. Mô phỏng đánh giá mạng VLC theo chỉ tiêu IMT-2030 37
3.4.1. Kịch bản và thông số mô phỏng 37
3.4.2. Ảnh hưởng của nhiễu liên tế bào và tái sử dụng tần số 39
3.4.3. Mật độ dung lượng vùng và tốc độ người dùng so với chỉ tiêu IMT-2030 40
3.4.4. Độ nhạy với hướng đặt thiết bị và che khuất 43
3.4.5. Kiểm chứng ảnh hưởng của thành phần phản xạ 44
3.4.6. Đánh giá cấu hình lai ghép VLC/RF 45
3.4.7. Hiệu suất phổ, hiệu suất năng lượng và mật độ kết nối 47

3.5. Đối chiếu khả năng đáp ứng chỉ tiêu IMT-2030 của công nghệ VLC49
3.6. Các ứng dụng chuyên biệt của VLC trong 6G 53
3.7. Thách thức và lộ trình triển khai..... 54
Kết luận chương 3 55
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN..... 57
Kết luận..... 57
Hướng phát triển 58
TÀI LIỆU THAM KHẢO 60
PHỤ LỤC A: CHƯƠNG TRÌNH MÔ PHỎNG 64
A.1. Môi trường và cấu trúc chương trình..... 64
A.2. Các hàm chính của mô hình..... 64
A.3. Cách tái lập kết quả..... 65

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ACO-OFDM	Asymmetrically Clipped Optical OFDM	OFDM quang cắt bất đối xứng
AP	Access Point	Điểm truy nhập
APD	Avalanche Photodiode	Điốt quang thác lũ
ATC	Area Traffic Capacity	Mật độ dung lượng vùng
BER	Bit Error Rate	Tỉ lệ lỗi bit
CAP	Carrierless Amplitude and Phase	Điều chế biên độ và pha không sóng mang
CDF	Cumulative Distribution Function	Hàm phân bố tích lũy
DCO-OFDM	DC-biased Optical OFDM	OFDM quang có thiên áp một chiều
eMBB	enhanced Mobile Broadband	Băng rộng di động nâng cao
FEC	Forward Error Correction	Sửa lỗi hướng đi
FOV	Field of View	Góc nhìn của bộ thu
FSO	Free Space Optics	Truyền thông quang không gian tự do
IM/DD	Intensity Modulation / Direct Detection	Điều chế cường độ / tách sóng trực tiếp
IMT	International Mobile Telecommunications	Viễn thông di động quốc tế
ISAC	Integrated Sensing and Communication	Cảm biến và truyền thông tích hợp
ISI	Inter-Symbol Interference	Nhiễu liên ký tự
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	Bộ phận Thông tin vô tuyến của ITU
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector	Bộ phận Tiêu chuẩn hóa viễn thông của ITU
KPI	Key Performance Indicator	Chỉ tiêu hiệu năng then chốt
LD	Laser Diode	Điốt laser
LED	Light Emitting Diode	Điốt phát quang
LiFi	Light Fidelity	Mạng không dây hai chiều dùng ánh sáng
LioT	Light-based Internet of Things	Internet vạn vật dựa trên ánh sáng
LoS	Line of Sight	Tầm nhìn thẳng

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Nhiều đầu vào nhiều đầu ra
mMTC	massive Machine-Type Communications	Truyền thông máy - máy mật độ lớn
NLoS	Non Line of Sight	Không có tầm nhìn thẳng
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access	Đa truy nhập phi trực giao
OCC	Optical Camera Communication	Truyền thông bằng camera quang
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo tần số trực giao
OOK	On-Off Keying	Khóa đóng - mở
OWC	Optical Wireless Communication	Truyền thông quang không dây
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio	Tỉ số công suất đỉnh trên công suất trung bình
PD	Photodiode	Điốt quang (bộ thu)
PIN	Positive-Intrinsic-Negative photodiode	Điốt quang lớp p-i-n
PPM	Pulse Position Modulation	Điều chế vị trí xung
PWM	Pulse Width Modulation	Điều chế độ rộng xung
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Điều chế biên độ cầu phương
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	Bề mặt phản xạ thông minh
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tạp âm
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên tạp âm
THz	Terahertz	Tera-héc
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications	Truyền thông độ trễ thấp siêu tin cậy
UVLC	Underwater VLC	VLC dưới nước
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser	Laser phát xạ bề mặt hốc dọc
VLC	Visible Light Communication	Truyền thông ánh sáng nhìn thấy
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo bước sóng

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
WRC	World Radiocommunication Conference	Hội nghị Thông tin vô tuyến thế giới
XR	Extended Reality	Thực tại mở rộng

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Xu hướng tăng tốc độ qua các thế hệ mạng di động. 10

Hình 1.2: Sáu kịch bản sử dụng của IMT-2030 và khả năng đóng góp của VLC. 12

Hình 1.3: So sánh vị trí phổ tần của VLC với RF/THz. 16

Hình 1.4: Kiến trúc mạng 6G tích hợp đa lớp truy nhập và vị trí của VLC. . 18

Hình 2.1: Sơ đồ khối hệ thống truyền thông VLC. 21

Hình 2.2: Giản đồ bức xạ Lambertian theo góc nửa công suất. 24

Hình 2.3: Hiệu suất phổ theo SNR và các mức điều chế M-QAM. 28

Hình 3.1: Các kịch bản tích hợp công nghệ VLC trong mạng 6G. 33

Hình 3.2: Phân bố SINR trong mạng VLC attocell 16 tế bào với K = 1 và K = 4. 39

Hình 3.3: Mật độ dung lượng vùng của mạng VLC so với chỉ tiêu IMT-2030. 40

Hình 3.4: Phân bố tốc độ người dùng so với chỉ tiêu trải nghiệm IMT-2030. 42

Hình 3.5: Độ nhạy của mạng VLC với hướng đặt thiết bị và che khuất. 44

Hình 3.6: So sánh mạng VLC đơn lẻ và mạng lai ghép VLC/RF. 46

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Đặc trưng cơ bản của các thế hệ mạng di động 8

Bảng 1.2: Mười lăm năng lực của IMT-2030 theo ITU-R M.2160-0 [8], đối chiếu IMT-2020 [13] 12

Bảng 2.1: Một số kết quả thực nghiệm tiêu biểu về tốc độ của các loại nguồn quang [26], [27] 22

Bảng 2.2: So sánh các sơ đồ điều chế tiêu biểu trong VLC 26

Bảng 2.3: So sánh VLC với truyền thông RF và hồng ngoại [2], [11] 29

Bảng 2.4: Các chuẩn hiện hành về truyền thông quang không dây [6], [7], [16], [17], [18] 31

Bảng 3.1: Thông số mô phỏng mạng VLC attocell 37

Bảng 3.2: Mật độ dung lượng vùng (Mbit/s/m^2) theo băng thông nguồn quang và số điểm truy nhập, K = 4 40

Bảng 3.3: Ảnh hưởng của thành phần phản xạ tới hiệu năng mạng 44

Bảng 3.4: Hiệu quả của cơ chế đa kết nối VLC/RF theo mức độ che khuất (36 điểm truy nhập, nguồn quang 100 MHz, thiết bị nghiêng 30 độ, 6400 mẫu mỗi hàng) 46

Bảng 3.5: Hiệu suất phổ, hiệu suất năng lượng và mật độ kết nối của mạng VLC (K = 4; mật độ kết nối tính với tốc độ 100 kbit/s cho mỗi thiết bị) 48

Bảng 3.6: Các chỉ tiêu IMT-2030 được đánh giá bằng mô phỏng của đề án 50

Bảng 3.7: Các chỉ tiêu IMT-2030 đánh giá từ đặc tính công nghệ và tài liệu đã công bố 51

Bảng 3.8: Thách thức chính và hướng giải quyết, sắp theo mức độ ưu tiên . 54

Bảng A.1: Các tệp chương trình mô phỏng và kết quả tương ứng 64

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Mạng 5G được triển khai thương mại từ cuối năm 2019. Ngay sau đó, các nhóm nghiên cứu và tổ chức tiêu chuẩn đã bắt đầu định hình thế hệ thứ sáu. Kỳ vọng đặt vào 6G rất lớn: tốc độ dữ liệu cao hơn 5G từ 100 đến 1.000 lần, độ trễ dưới mili-giây, độ tin cậy gần như tuyệt đối và mật độ kết nối cực lớn, để phục vụ các dịch vụ như Công nghiệp 4.0, y tế số, thực tại mở rộng (XR), phương tiện tự hành và cảm biến - truyền thông tích hợp [1], [2]. Nhưng để đạt được những con số đó, có một nút thắt phải tháo gỡ: phổ tần. Các thế hệ 2G đến 4G chỉ dùng băng tần dưới 6 GHz; 5G bổ sung dải sóng milimet 24-100 GHz. Ngay cả dải này cũng chưa đủ cho nhu cầu băng thông của 6G. Vì vậy, 6G buộc phải vượt qua ngưỡng 100 GHz và tìm đến những nguồn phổ mới [1].

Truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy (Visible Light Communication - VLC) là một trong những nguồn phổ mới đó. VLC dùng dải tần 400-800 THz, tương ứng bước sóng 380-780 nm, không cần cấp phép và có băng thông lớn hơn hàng nghìn lần toàn bộ phổ vô tuyến hiện có. Điểm hấp dẫn nhất của nó nằm ở chỗ tận dụng ngay hạ tầng chiếu sáng LED: một bóng đèn vừa chiếu sáng vừa truyền dữ liệu, nên chi phí triển khai giảm đáng kể. VLC cũng an toàn cho mắt, không gây nhiễu điện từ, và khó bị nghe lén vì ánh sáng không xuyên tường [1], [2], [11]. Những đặc điểm này phù hợp nhất với môi trường trong nhà, nơi con người dành hơn 80% thời gian, cùng một số môi trường đặc thù như dưới nước hay không gian yêu cầu bảo mật cao.

Thời điểm hiện tại cũng thuận lợi cho VLC, nhờ nhiều yếu tố cùng chín muồi. Đèn LED đã gần như thay thế hoàn toàn nguồn sáng truyền thống, tạo sẵn một hạ tầng chiếu sáng rộng khắp; linh kiện quang như LED tốc độ cao và PD độ nhạy tốt ngày càng rẻ. Trong khi đó, nhu cầu dữ liệu trong nhà bùng nổ theo đà phổ biến của thiết bị thông minh, còn phổ vô tuyến thì ngày một chật chội. Những điều kiện này gặp nhau đúng lúc để đưa VLC vào nghiên cứu và triển khai cho 6G.

Tuy vậy, việc đưa VLC từ phòng thí nghiệm vào ứng dụng thực tế trong kiến trúc mạng 6G vẫn còn nhiều vấn đề cần được nghiên cứu, đặc biệt là các giải pháp tích hợp VLC với mạng vô tuyến và đánh giá khả năng ứng dụng trong các kịch bản cụ thể. Xuất phát từ thực tiễn đó, đề tài "Nghiên cứu các giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trong mạng 6G" được lựa chọn nhằm hệ thống hóa cơ sở lý thuyết, phân tích các giải pháp tích hợp và đánh giá tính khả thi ứng dụng của VLC, phù hợp với định hướng ứng dụng của đề án tốt nghiệp thạc sĩ kỹ thuật.

Ở đây cần phân biệt rõ hai khái niệm trong tên đề tài, vì chúng dễ bị hiểu lẫn. "Ứng dụng công nghệ VLC" là việc dùng VLC cho một mục đích cụ thể, chẳng hạn truyền dữ liệu, định vị hay kết nối IoT, một cách tương đối độc lập với phần còn lại của mạng. "Tích hợp ứng dụng công nghệ VLC" có phạm vi rộng hơn: vừa lồng ghép VLC vào kiến trúc và hạ tầng mạng 6G sẵn có, tức là phối hợp với lớp vô tuyến, cơ chế chuyển giao và quản lý tài nguyên, vừa khai thác các ứng dụng trên nền tích hợp đó. Nói cách khác, "tích hợp ứng dụng" bao hàm cả bài toán hệ thống là đưa VLC vào mạng như thế nào, lẫn bài toán ứng dụng là dùng VLC để làm gì; trong khi "ứng dụng" đơn thuần chỉ dừng ở về sau. Đề án đi theo hướng "tích hợp ứng dụng": không xem VLC như một công nghệ đứng riêng, mà đặt nó trong mối quan hệ với mạng vô tuyến của 6G, rồi từ đó đánh giá khả năng triển khai trong các kịch bản thực tế.

2. Tổng quan tình hình nghiên cứu

Trên thế giới, VLC đã được nghiên cứu rộng rãi ở cả khía cạnh lý thuyết lẫn thương mại hóa. Ở khía cạnh học thuật, nhiều công trình tổng quan đã hệ thống hóa tiến bộ, thách thức và triển vọng của VLC trong bối cảnh 6G [1], [2], khảo sát toàn diện về mô hình kênh, kỹ thuật điều chế và mạng VLC [11], [12], cũng như phân tích xu hướng hội tụ công nghệ truy nhập quang - vô tuyến hướng tới 6G [3]. Các nghiên cứu nền tảng về mô hình hóa kênh VLC trong nhà dựa trên bức xạ Lambertian đã được thiết lập từ sớm và đến nay vẫn là cơ sở cho hầu hết các phân tích hiệu năng [10].

Về mặt kỹ thuật, hướng nghiên cứu chủ đạo là nâng tốc độ và độ tin cậy của liên kết. Các kỹ thuật cân bằng và tiền xử lý tín hiệu mở rộng được băng thông điều chế hiệu dụng của LED. Điều chế đa sóng mang kết hợp ánh xạ bậc cao nâng hiệu suất phổ. LED đa màu và micro-LED đẩy tốc độ trong phòng thí nghiệm lên hàng chục Gb/s. Song song với đó, các công trình về mô hình hóa kênh, định vị bằng ánh sáng và mạng LiFi dần hoàn thiện cơ sở lý thuyết cho triển khai thực tế.

Ở khía cạnh triển khai, nhiều doanh nghiệp đã đưa VLC và công nghệ LiFi tốc độ cao ra thị trường. Công ty pureLiFi đã phát triển front-end quang tương thích với các giải pháp băng tần cơ sở 802.11, đạt tốc độ đường xuống trên 1 Gb/s và đường lên dưới 600 Mb/s. Viện Fraunhofer Heinrich Hertz đã xây dựng một phòng hội thảo sử dụng mạng LiFi dựa trên VLC với tốc độ dữ liệu trên 1 Gb/s. Công ty Oledcomm đã trình diễn LiFi với tốc độ tới 100 Mb/s trên mỗi ghế trong chuyến bay thương mại của hãng Air France, và cho biết các sản phẩm thế hệ tiếp theo có thể đạt tốc độ 1 Gb/s [1], [2].

Ở trong nước, truyền thông quang không dây và VLC cũng đã thu hút sự quan tâm của một số nhóm nghiên cứu tại các trường đại học và viện nghiên cứu, tập trung vào mô hình hóa kênh, kỹ thuật điều chế và ứng dụng định vị trong nhà. Các nghiên cứu gắn VLC với kiến trúc và yêu cầu cụ thể của mạng 6G, nhất là theo hướng tích hợp với mạng vô tuyến, thì vẫn còn ít.

Dù vậy, phần lớn công trình mới dừng ở việc lập kỷ lục tốc độ trong phòng thí nghiệm. Những bài toán mang tính hệ thống thì còn để ngỏ: phối hợp ra sao với mạng vô tuyến, chuyển giao giữa các lớp truy nhập thế nào, bảo đảm đường lên và tính di động bằng cách nào, và hiệu năng thực tế trong từng kịch bản (trong nhà, dưới nước, Internet vạn vật) ra sao khi đo đạc cụ thể. Đề án đi vào chính những khoảng trống này, theo hướng ứng dụng.

3. Mục tiêu nghiên cứu

Đề án hướng tới ba mục tiêu chính:

a. Hệ thống hóa cơ sở lý thuyết về mạng di động 6G và công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy VLC.

b. Xây dựng mô hình mạng VLC nhiều tế bào trong nhà có xét nhiễu liên tế bào, và mô hình đa kết nối giữa lớp VLC với lớp vô tuyến trong kiến trúc 6G.

c. Mô phỏng đánh giá khả năng đáp ứng các chỉ tiêu của IMT-2030, so sánh cấu hình VLC đơn lẻ với cấu hình lai ghép VLC/RF, từ đó chỉ ra chỉ tiêu nào VLC đáp ứng được, chỉ tiêu nào không, và đề xuất hướng phát triển.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của đề án là công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy VLC và các giải pháp tích hợp, ứng dụng của VLC trong mạng di động 6G.

Phạm vi nghiên cứu được giới hạn như sau:

a. Nguồn phát ánh sáng sử dụng LED (điốt phát quang) và LD (điốt laser); bộ thu là điốt quang (PD).

b. Kỹ thuật điều chế xem xét ở mức nguyên lý; phần đánh giá sử dụng điều chế thích nghi M-QAM với M thay đổi từ 4 đến 4096 trên nền DCO-OFDM.

c. Dải tần công tác 400-800 THz, tương ứng bước sóng 380-780 nm.

d. Về ứng dụng, đề án tập trung vào mạng VLC nhiều tế bào trong nhà và cơ chế đa kết nối với lớp vô tuyến; phần mô phỏng đánh giá được thực hiện cho hai cấu hình là mạng VLC đơn lẻ và mạng lai ghép VLC/RF. Các hướng ứng dụng chuyên biệt gồm định vị, Internet vạn vật dựa trên ánh sáng và VLC dưới nước chỉ được khảo sát ở mức phân tích, không mô phỏng.

5. Phương pháp nghiên cứu

Đề án theo định hướng ứng dụng, sử dụng kết hợp các phương pháp:

a. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết: thu thập, tổng hợp và phân tích tài liệu khoa học; sử dụng các công thức và mô hình toán học để mô tả hệ thống VLC, bao gồm mô hình kênh, tỉ số tín hiệu trên nhiễu và dung lượng liên kết.

b. Phương pháp phân tích - so sánh: đối chiếu VLC với các công nghệ vô tuyến và quang khác; phân tích ưu, nhược điểm của từng giải pháp tích hợp.

c. Phương pháp mô phỏng: xây dựng chương trình mô phỏng mạng VLC nhiều tế bào trong nhà có xét nhiễu liên tế bào và cơ chế đa kết nối với lớp vô tuyến, nhằm lượng hóa các đại lượng tương ứng trực tiếp với chỉ tiêu của IMT-2030 gồm tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tạp âm, mật độ dung lượng vùng, phân bố tốc độ người dùng, hiệu suất phổ, hiệu suất năng lượng và tỉ lệ mất kết nối.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Về mặt khoa học, đề án hệ thống hóa và làm rõ vai trò của VLC như một lớp truy nhập bổ trợ trong kiến trúc mạng 6G, đồng thời lượng hóa hiệu năng của mạng VLC nhiều tế bào bằng mô phỏng và đối chiếu trực tiếp với bộ chỉ tiêu IMT-2030. Về mặt thực tiễn, kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở để lựa chọn giải pháp tích hợp VLC/RF phù hợp cho từng môi trường ứng dụng, tận dụng hạ tầng chiếu sáng LED sẵn có nhằm giảm chi phí triển khai và mở rộng vùng phủ cho các dịch vụ 6G.

Việt Nam đang từng bước chuẩn bị cho các thế hệ mạng tương lai, nên việc làm chủ sớm những công nghệ truy nhập mới như VLC là cần thiết. Chương trình mô phỏng kèm theo đề án có thể dùng lại làm tài liệu tham khảo cho giảng dạy, nghiên cứu và cho việc thiết kế các thử nghiệm VLC quy mô nhỏ trong điều kiện thực tế.

7. Đóng góp của đề án

So với các tài liệu tổng quan hiện có về VLC, đề án có bốn điểm đóng góp cụ thể:

a. Xác định chính xác vị trí định chế của VLC đối với IMT-2030. Đề án chỉ ra bằng đối chiếu văn bản gốc rằng VLC không được ITU-R định danh là công nghệ truy nhập ứng viên của IMT-2030, và làm rõ nguyên nhân nằm ở định nghĩa sóng vô tuyến của Thể lệ Vô tuyến điện chứ không phải ở đánh giá năng lực kỹ thuật. Nhiều tài liệu thứ cấp trình bày điểm này thiếu chính xác.

b. Đối chiếu định lượng VLC với từng chỉ tiêu của IMT-2030. Thay vì đánh giá VLC một cách định tính, đề án xây dựng bảng đối chiếu mười ba trên mười lăm năng lực, trong đó năm chỉ tiêu được đánh giá bằng mô phỏng riêng của đề án, phần còn lại được tổng hợp từ tài liệu, và mỗi kết luận đều ghi rõ loại căn cứ.

c. Chỉ ra tồn tại một mật độ triển khai tối ưu của mạng attocell. Kết quả mô phỏng cho thấy mật độ dung lượng vùng không tăng đơn điệu theo số điểm truy nhập mà đạt cực đại ở khoảng mười một điểm truy nhập trên một trăm mét vuông sàn, sau đó giảm do nhiễu liên tế bào tăng nhanh hơn lợi ích tái sử dụng không gian.

d. Lượng hóa đúng vai trò của lớp vô tuyến trong cấu hình lai ghép. Đề án chứng minh bằng số liệu rằng lớp RF bổ trợ hầu như không đóng góp vào dung lượng tổng mà có giá trị ở chỗ loại bỏ phần đuôi dưới của phân bố tốc độ, tức bảo đảm độ tin cậy và tính liên tục dịch vụ.

Độ tin cậy của mô hình được kiểm chứng chéo với kết quả đã công bố của Chen và cộng sự [19]: ở cùng cấu hình bán kính tế bào khoảng 2 m và băng thông nguồn quang khoảng 500 MHz, đề án thu được mật độ dung lượng vùng 48,6 Mbit/s/m^2 so với 49 Mbit/s/m^2 trong công bố gốc.

8. Bố cục của đề án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Tài liệu tham khảo, nội dung chính của đề án gồm ba chương:

- Chương 1: Tổng quan về mạng di động 6G và nhu cầu về phổ tần quang.
- Chương 2: Công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy VLC.
- Chương 3: Giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ VLC trong mạng 6G.

Phần Phụ lục trình bày cấu trúc chương trình mô phỏng, môi trường chạy và cách tái lập toàn bộ kết quả số của Chương 3.

Cần nói rõ một điểm khác biệt so với đề cương đã được phê duyệt. Đề cương ban đầu dự kiến Chương 3 gồm bốn mục ứng dụng trình bày song song là mạng lai ghép quang - vô tuyến, VLC có tương tác, VLC dưới nước và Internet vạn vật dựa

trên ánh sáng, kèm một ví dụ mô phỏng minh họa cho một liên kết VLC đơn lẻ ở phần Phụ lục. Trong quá trình thực hiện, cách tổ chức này bộc lộ hai hạn chế: các mục ứng dụng chỉ dừng ở mức mô tả định tính nên không trả lời được câu hỏi VLC đáp ứng chỉ tiêu 6G tới đâu; và mô phỏng một liên kết đơn lẻ không cho phép tính các chỉ tiêu mang tính mạng như mật độ dung lượng vùng hay tốc độ người dùng trải nghiệm, vốn chỉ có ý nghĩa khi xét nhiều tế bào có nhiễu lẫn nhau. Vì vậy, Chương 3 được tổ chức lại theo trục chỉ tiêu IMT-2030: phần trọng tâm chuyển sang mô hình mạng attocell nhiều tế bào và cơ chế đa kết nối VLC/RF được đánh giá định lượng, còn các hướng ứng dụng chuyên biệt gồm định vị, VLC dưới nước và Internet vạn vật dựa trên ánh sáng được giữ lại ở mục 3.6 dưới dạng phân tích. Nội dung về VLC có tương tác được lồng vào mục định vị và cảm biến vì hai chủ đề này trùng nhau về bản chất kỹ thuật.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ MẠNG DI ĐỘNG 6G VÀ NHU CẦU VỀ PHỔ TẦN QUANG

Để hiểu vì sao VLC được quan tâm trong 6G, cần bắt đầu từ bối cảnh mạng di động. Nhu cầu băng thông tăng qua từng thế hệ đã đẩy mạng lên các dải tần ngày càng cao, và đến 6G thì phổ vô tuyến không còn đủ để đáp ứng. Đó là lý do phổ ánh sáng nhìn thấy được xem xét như một nguồn tài nguyên bổ sung. Chương này trình bày quá trình phát triển đó, phân tích tầm nhìn và chỉ tiêu kỹ thuật của 6G, làm rõ bài toán khan hiếm phổ tần và xác định vị trí của VLC trong kiến trúc mạng 6G.

1.1. Tổng quan lịch sử phát triển mạng di động

Cứ khoảng mười năm, mạng di động lại bước sang một thế hệ mới. Thế hệ thứ nhất (1G) xuất hiện đầu thập niên 1980, dùng kỹ thuật tương tự và chỉ hỗ trợ thoại. Thế hệ thứ hai (2G) số hóa tín hiệu thoại, thêm tin nhắn ngắn (SMS) và dữ liệu tốc độ thấp. Đến 3G, dữ liệu di động thực sự phổ biến với tốc độ vài Mb/s, đủ để truy nhập Internet. 4G/LTE chuyển hẳn sang nền tảng chuyển mạch gói IP và nâng tốc độ lên hàng trăm Mb/s. 5G thì mở rộng theo ba nhóm dịch vụ: băng rộng di động nâng cao (eMBB), truyền thông độ trễ thấp siêu tin cậy (URLLC) và truyền thông máy - máy mật độ lớn (mMTC).

Một số đặc trưng cơ bản của các thế hệ mạng di động được tóm tắt ở Bảng 1.1, cho thấy sự tiến hóa cả về công nghệ lẫn dịch vụ qua từng giai đoạn.

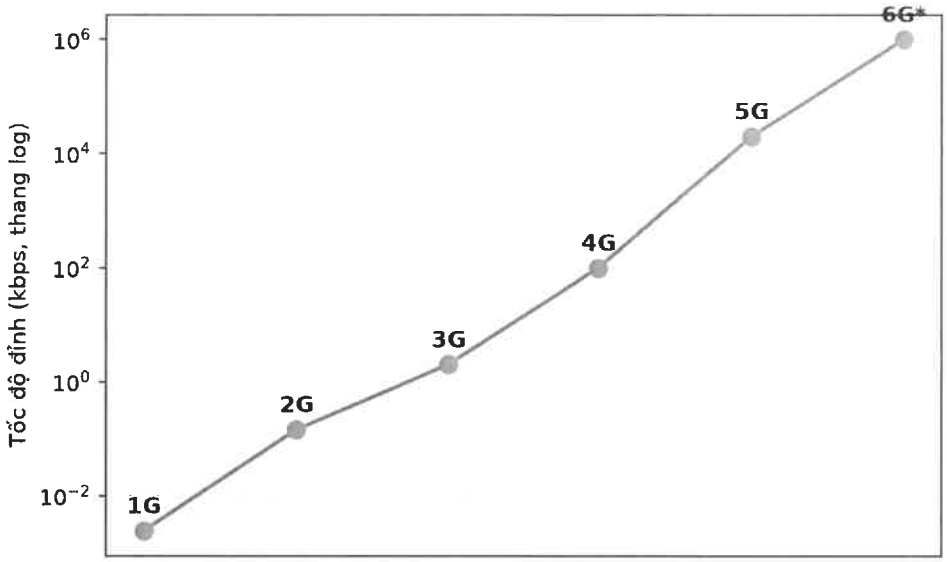
Bảng 1.1: Đặc trưng cơ bản của các thế hệ mạng di động

Thế hệ	Thời điểm	Công nghệ tiêu biểu	Dịch vụ chính	Băng tần
1G	1980s	Tương tự (FDMA)	Thoại	dưới 1 GHz
2G	1990s	Số (TDMA/CDMA)	Thoại, SMS	dưới 2 GHz
3G	2000s	WCDMA/HSPA	Dữ liệu di động	~2 GHz
4G	2010s	LTE/OFDMA	Băng rộng di động	dưới 6 GHz

Thế hệ	Thời điểm	Công nghệ tiêu biểu	Dịch vụ chính	Băng tần
5G	2019+	NR, mmWave	eMBB, URLLC, mMTC	dưới 6 GHz + 24-100 GHz
6G	~2030	AI-native, THz, phổ quang	XR, toàn ảnh, ISAC	mmWave + THz + VLC

5G đã mang lại bước tiến lớn nhưng vẫn bộc lộ giới hạn trước các nhu cầu tương lai. Băng tần sóng milimet tuy rộng nhưng suy hao mạnh, dễ bị vật cản chặn và vùng phủ hẹp. Tổng dung lượng chưa đủ cho truyền thông toàn ảnh hay thực tại mở rộng đắm chìm ở quy mô lớn. Hiệu suất năng lượng cũng còn cách xa mục tiêu mạng bền vững. Những giới hạn đó thúc đẩy nghiên cứu 6G, trong đó khai thác các nguồn phổ mới (dải THz và phổ quang) được xem là một hướng đột phá.

Xuyên suốt quá trình đó nổi lên một quy luật: mỗi thế hệ mới đều đòi hỏi băng thông lớn hơn và do đó phải dịch chuyển lên các dải tần cao hơn. Các thế hệ 2G đến 4G khai thác băng tần dưới 6 GHz; 5G kết hợp dải dưới 6 GHz với băng tần sóng milimet 24-100 GHz [1]. Xu hướng này là tiền đề trực tiếp cho thấy thế hệ 6G sẽ buộc phải khai thác dải tần trên 100 GHz và tìm đến các nguồn phổ hoàn toàn mới, trong đó có phổ quang. Hình 1.1 minh họa xu hướng tăng tốc độ đỉnh qua các thế hệ, cho thấy mức tăng gần như theo hàm mũ.



Hình 1.1: Xu hướng tăng tốc độ qua các thế hệ mạng di động.

1.2. Tầm nhìn IMT-2030 và các kịch bản sử dụng của mạng 6G

Khác với các thế hệ trước, khung phát triển của 6G đã được Liên minh Viễn thông quốc tế chính thức hóa trong Khuyến nghị ITU-R M.2160-0 ban hành tháng 11 năm 2023 [8]. Khuyến nghị này xác lập tên gọi chính thức của hệ thống là IMT-2030, đồng thời định nghĩa sáu kịch bản sử dụng (usage scenario) và mười lăm nhóm năng lực (capability) làm cơ sở cho hoạt động nghiên cứu và tiêu chuẩn hóa. Toàn bộ phần đánh giá ở Chương 3 của đề án được xây dựng trên khung chỉ tiêu này, do đó nội dung dưới đây trình bày chi tiết các kịch bản và chỉ tiêu đó.

Sáu kịch bản sử dụng của IMT-2030 gồm ba kịch bản mở rộng từ 5G và ba kịch bản hoàn toàn mới:

a. Truyền thông đắm chìm (Immersive Communication), mở rộng từ eMBB: cung cấp trải nghiệm video phong phú và có tương tác, phục vụ thực tại mở rộng, hiện diện từ xa đa giác quan và truyền thông toàn ảnh.

b. Truyền thông tin cậy cao độ trễ cực thấp (Hyper Reliable and Low-Latency Communication), mở rộng từ URLLC: dành cho các ứng dụng mà việc không đạt

yêu cầu gây hậu quả nghiêm trọng, như điều khiển công nghiệp toàn phần, dịch vụ khẩn cấp, y tế từ xa và giám sát lưới điện.

c. Truyền thông mật độ lớn (Massive Communication), mở rộng từ mMTC: kết nối số lượng cực lớn thiết bị và cảm biến cho thành phố thông minh, logistics, nông nghiệp và giám sát môi trường, bao gồm cả thiết bị không dùng pin hoặc pin tuổi thọ dài.

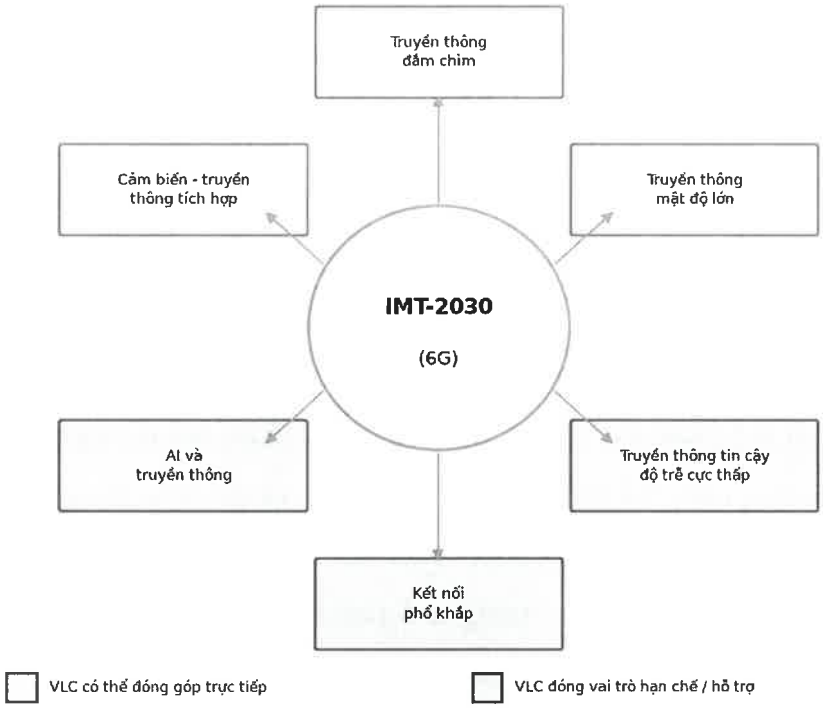
d. Kết nối phổ khắp (Ubiquitous Connectivity), kịch bản mới: thu hẹp khoảng cách số, tập trung vào vùng nông thôn, vùng sâu và khu vực dân cư thưa thớt.

e. Trí tuệ nhân tạo và truyền thông (Artificial Intelligence and Communication), kịch bản mới: hỗ trợ điện toán phân tán và các ứng dụng AI như phương tiện tự hành, cộng tác tự trị giữa các thiết bị y tế và song sinh số.

f. Cảm biến và truyền thông tích hợp (Integrated Sensing and Communication), kịch bản mới: cung cấp khả năng cảm nhận không gian đối với cả vật thể không kết nối, phục vụ dẫn đường, nhận dạng cử chỉ, phát hiện chuyển động và giám sát môi trường.

Bao trùm sáu kịch bản trên, M.2160-0 nêu bốn nguyên tắc thiết kế xuyên suốt: tính bền vững, kết nối cho những khu vực chưa được kết nối, trí tuệ phổ khắp, cùng bảo mật và khả năng phục hồi [8].

VLC không phù hợp đồng đều với cả sáu kịch bản, và Hình 1.2 phân định rõ chỗ nào phù hợp. Do cự ly ngắn, phụ thuộc tầm nhìn thẳng và gắn với hạ tầng chiếu sáng, VLC đóng góp trực tiếp được cho ba kịch bản diễn ra chủ yếu trong nhà là truyền thông đắm chìm, truyền thông mật độ lớn và cảm biến - truyền thông tích hợp. Với kết nối phổ khắp trên diện rộng hay truyền thông tin cậy cao đòi hỏi tính di động lớn, vai trò của VLC chỉ là hỗ trợ. Phân định này là điều kiện để đánh giá VLC khách quan ở Chương 3, vì đánh giá một công nghệ cự ly ngắn theo các chỉ tiêu diện rộng sẽ luôn cho kết luận sai lệch.



Hình 1.2: Sáu kịch bản sử dụng của IMT-2030 và khả năng đóng góp của VLC.

1.3. Các chỉ tiêu năng lực của IMT-2030

Khuyến nghị M.2160-0 định nghĩa mười lăm nhóm năng lực của IMT-2030, gồm chín năng lực nâng cao từ IMT-2020 và sáu năng lực mới. Bảng 1.2 tổng hợp đầy đủ các năng lực này cùng giá trị mục tiêu và giá trị tương ứng của 5G để đối chiếu.

Bảng 1.2: Mười lăm năng lực của IMT-2030 theo ITU-R M.2160-0 [8], đối chiếu IMT-2020 [13]

Năng lực	**Nhóm**	**Mục tiêu IMT-2030**	**IMT-2020 (5G)**
Tốc độ dữ liệu đỉnh	Nâng cao	50 / 100 / 200 Gbit/s	20 Gbit/s
Tốc độ người dùng trải nghiệm	Nâng cao	300 / 500 Mbit/s	100 Mbit/s
Hiệu suất phổ	Nâng cao	gấp 1,5 - 3 lần IMT-2020	mốc cơ sở

Năng lực	Nhóm	Mục tiêu IMT-2030	IMT-2020 (5G)
Mật độ dung lượng vùng	Nâng cao	30 / 50 Mbit/s/m^2	10 Mbit/s/m^2
Mật độ kết nối	Nâng cao	10^6 - 10^8 thiết bị/km^2	10^6 thiết bị/km^2
Tính di động	Nâng cao	500 - 1.000 km/h	500 km/h
Độ trễ giao diện vô tuyến	Nâng cao	0,1 - 1 ms	1 ms
Độ tin cậy	Nâng cao	$1\text{-}10^{-5}$ đến $1\text{-}10^{-7}$	$1\text{-}10^{-5}$
Bảo mật và khả năng phục hồi	Nâng cao	không nêu giá trị số	không có chỉ tiêu số
Vùng phủ	Mới	không nêu giá trị số	không có chỉ tiêu số
Định vị	Mới	độ chính xác 1 - 10 cm	không có chỉ tiêu
Năng lực cảm biến	Mới	không nêu giá trị số	không có
Năng lực liên quan AI	Mới	không nêu giá trị số	không có
Tính bền vững	Mới	không nêu giá trị số; đo bằng bit/Joule	hiệu suất năng lượng gấp 100 lần IMT-Advanced
Khả năng liên vận hành	Mới	không nêu giá trị số	không có

Có ba điểm cần lưu ý khi sử dụng bộ chỉ tiêu này, và đây cũng là những điểm thường bị hiểu sai trong các tài liệu thứ cấp.

Thứ nhất, M.2160-0 nêu rõ các giá trị trong bảng là mục tiêu ước lượng phục vụ nghiên cứu và khảo sát, mọi giá trị trong khoảng đều có mức ưu tiên như nhau, và các giá trị này chỉ áp dụng cho một số kịch bản sử dụng chứ không nhất thiết đạt được đồng thời trong cùng một kịch bản [8]. Đây không phải là yêu cầu tối thiểu bắt buộc; bộ yêu cầu tối thiểu chính thức của IMT-2030 nằm ở một báo cáo riêng của Nhóm công tác 5D và dự kiến được phê duyệt cuối năm 2026. Vì vậy, khi đánh giá VLC ở Chương 3, đề án đối chiếu với các giá trị mục tiêu này theo đúng tinh thần tham chiếu nghiên cứu.

Thứ hai, chỉ chín trong mười lăm năng lực được gán giá trị số, gồm tốc độ dữ liệu đỉnh, tốc độ người dùng trải nghiệm, hiệu suất phổ, mật độ dung lượng vùng, mật độ kết nối, tính di động, độ trễ giao diện vô tuyến, độ tin cậy và định vị. Sáu năng lực

còn lại, gồm bảo mật và khả năng phục hồi, vùng phủ, năng lực cảm biến, năng lực liên quan AI, tính bền vững và khả năng liên vận hành, chỉ được mô tả định tính. Do đó việc đánh giá một công nghệ truy nhập chỉ có thể định lượng trên chín năng lực có giá trị số; sáu năng lực còn lại phải đánh giá theo hướng phân tích đặc tính. Riêng tính bền vững tuy không có ngưỡng số nhưng M.2160-0 chỉ rõ đơn vị đo là bit/Joule, nên vẫn có thể lượng hóa và so sánh tương đối, và đề án thực hiện việc này ở mục 3.4.7.

Thứ ba, và quan trọng nhất đối với đề tài này, M.2160-0 hoàn toàn không đề cập tới phổ quang, truyền thông quang không dây, VLC hay LiFi. Đây không phải là một sơ suất mà phản ánh ranh giới có tính định chế, và cần được làm rõ để xác định đúng vị trí của đề tài.

Diễn biến của vấn đề này khá rõ nét khi đối chiếu hai tài liệu của ITU-R. Báo cáo ITU-R M.2516-0 ban hành năm 2022 về xu hướng công nghệ IMT hướng tới 2030 có nhắc tới truyền thông quang không dây tại mục 5.4, khi liệt kê các ứng viên tiềm năng cho truyền thông trực tiếp giữa các thiết bị: "các công nghệ băng thông cực rộng với cự ly lan truyền ngắn, như công nghệ THz, công nghệ quang không dây..." [14]. Tuy nhiên, khi ITU-R xây dựng khung chính thức IMT-2030 trong M.2160-0 một năm sau đó, câu tương ứng đã được viết lại và cụm "công nghệ quang không dây" bị lược bỏ, chỉ còn giữ công nghệ THz và định vị sidelink [8], [14].

Nguyên nhân nằm ở định nghĩa pháp lý chứ không phải ở đánh giá kỹ thuật. Thể lệ Vô tuyến điện của ITU, điều 1.5, định nghĩa sóng vô tuyến là sóng điện từ có tần số thấp hơn 3.000 GHz [15]. IMT là một nghiệp vụ thông tin vô tuyến, trong khi dải ánh sáng nhìn thấy 400-800 THz nằm cao hơn ngưỡng này khoảng hai bậc độ lớn. Do đó, về nguyên tắc, phổ ánh sáng nhìn thấy không thể được một Hội nghị Thông tin vô tuyến thế giới ấn định cho IMT. Rào cản ở đây thuộc về định nghĩa, không phải về mức độ ưu tiên hay quan điểm kỹ thuật.

Hệ quả là công tác chuẩn hóa VLC diễn ra ở những tổ chức khác: tại IEEE với các chuẩn 802.15.7, 802.11bb, 802.15.13 và 802.11br, và tại ITU-T với khuyến nghị

G.9991 cho truyền thông ánh sáng nhìn thấy tốc độ cao trong nhà [16]. Các nội dung này được trình bày ở mục 2.6.

Cách đặt vấn đề chính xác về mặt học thuật do đó là: VLC không phải công nghệ truy nhập ứng viên của IMT-2030 theo định danh của ITU-R, mà là một công nghệ bổ trợ được chuẩn hóa song song, hoạt động cùng lớp vô tuyến trong mạng 6G. Câu hỏi nghiên cứu vì thế không phải "ITU đã đưa VLC vào 6G như thế nào", mà "VLC đáp ứng được những chỉ tiêu nào của IMT-2030, trong những kịch bản nào, và tích hợp vào mạng 6G bằng cơ chế gì".

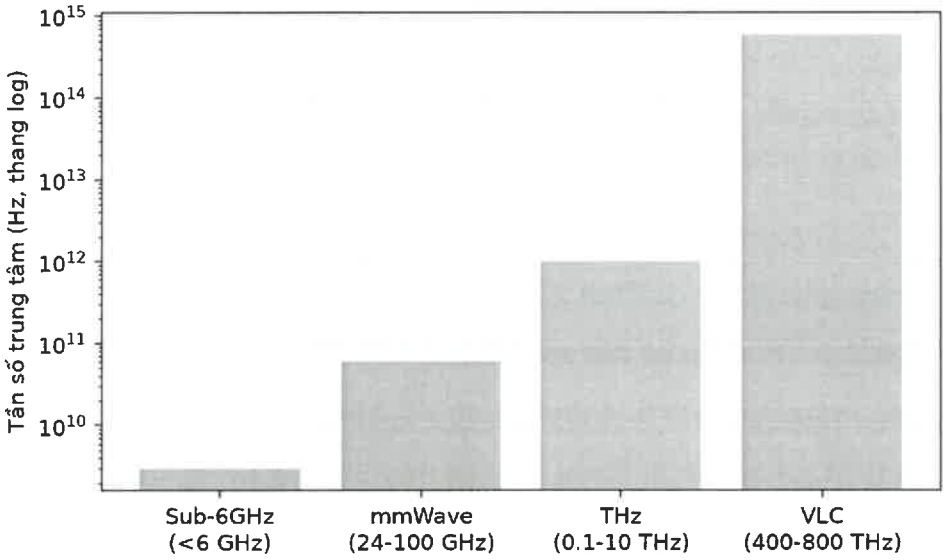
1.4. Bài toán phổ tần và vị trí của truyền thông quang không dây

Trong số các năng lực nêu ở Bảng 1.2, hai chỉ tiêu tạo áp lực lớn nhất lên tài nguyên phổ là tốc độ đỉnh 50-200 Gbit/s và mật độ dung lượng vùng ở mức 30 và 50 Mbit/s/m^2, tức gấp ba đến năm lần mức 10 Mbit/s/m^2 của 5G. Theo định lý Shannon, dung lượng liên kết tỉ lệ tuyến tính với băng thông nhưng chỉ tăng theo hàm logarit với tỉ số tín hiệu trên nhiễu. Vì vậy, muốn nâng dung lượng lên bậc độ lớn thì hoặc phải mở rộng băng thông, hoặc phải tăng mật độ tái sử dụng không gian, chứ không thể chỉ dựa vào việc tăng công suất phát.

Về hướng mở rộng băng thông, M.2160-0 dự kiến IMT-2030 khai thác dải tần từ dưới 1 GHz tới trên 100 GHz, trong đó băng tần trên 92 GHz được xem xét vì có các khối băng thông liền kề rộng hàng chục GHz [8].

Tiến trình pháp lý hóa các dải tần này diễn ra qua các Hội nghị Thông tin vô tuyến thế giới. Hội nghị WRC-23 đã ấn định cho IMT các băng 3.300-3.400 MHz, 3.600-3.800 MHz, 4.800-4.990 MHz, 6.425-7.125 MHz và 10-10,5 GHz tùy theo khu vực. Chương trình nghị sự của WRC-27, theo Nghị quyết 813, tiếp tục nghiên cứu các băng 4.400-4.800 MHz, 7.125-8.400 MHz và 14,8-15,35 GHz. Việc ấn định các dải trên 100 GHz cho IMT chỉ nằm trong chương trình nghị sự sơ bộ của WRC-31 theo Nghị quyết 255. Như vậy, ngay cả với phổ vô tuyến, tiến trình mở rộng lên dải tần rất cao vẫn kéo dài tới sau năm 2030.

Trong khi đó, xét thuần túy về tài nguyên, ngay cả toàn bộ phổ vô tuyến tới ngưỡng 300 GHz cũng chỉ cung cấp tổng băng thông cỡ vài trăm GHz, còn riêng dải ánh sáng nhìn thấy 400-800 THz đã có độ rộng khoảng 400 THz, tức lớn hơn ba bậc độ lớn. Chênh lệch tài nguyên đó là lý do vật lý khiến phổ quang được quan tâm, và VLC còn có thêm một lợi thế thủ tục: nằm ngoài phạm vi quản lý của Thể lệ Vô tuyến điện nên dải này không phải trải qua tiến trình ấn định phổ nói trên.



Hình 1.3: So sánh vị trí phổ tần của VLC với RF/THz.

Truyền thông quang không dây (Optical Wireless Communication - OWC) là lĩnh vực khai thác nguồn phổ đó. Xác định đúng vai trò của VLC trong 6G đòi hỏi trước hết phải đặt nó đúng vị trí trong nhóm OWC, vì các nhánh của nhóm này khác nhau rất xa về cự ly và mục đích. Các nhánh chính gồm: truyền thông quang không gian tự do (FSO) ở dải hồng ngoại cho liên kết điểm - điểm cự ly xa, thường dùng làm đường truyền dẫn backhaul giữa các tòa nhà; truyền thông hồng ngoại tầm ngắn trong nhà; truyền thông ánh sáng nhìn thấy (VLC) khai thác dải khả kiến và tận dụng hạ tầng chiếu sáng; và truyền thông bằng camera quang (OCC) dùng camera của thiết bị di động làm bộ thu.

Trong nhóm này, mỗi nhánh gắn với một vai trò khác nhau trong kiến trúc 6G. FSO phù hợp với phần truyền dẫn giữa các nút mạng, còn VLC là nhánh duy nhất có

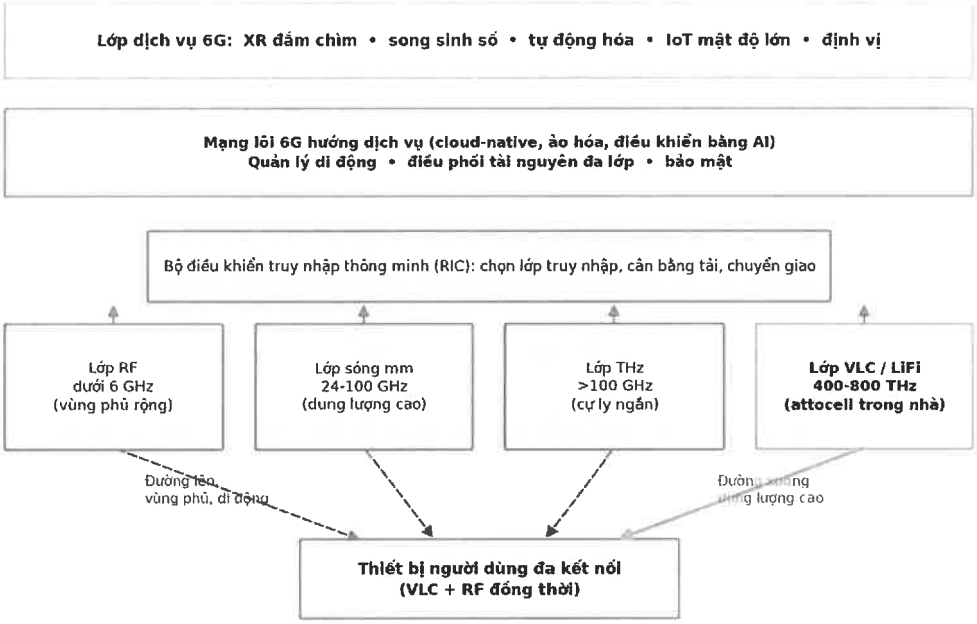
thể đảm nhận vai trò lớp truy nhập cho người dùng cuối trong nhà, do tận dụng được hạ tầng chiếu sáng LED sẵn có nên chi phí triển khai thấp. Khi được tổ chức thành mạng hai chiều hoàn chỉnh có chuyển giao và quản lý di động, hệ thống được gọi là LiFi. Một chi tiết dễ bị bỏ qua: chuẩn IEEE 802.11bb-2023 dành cho LiFi thực tế quy định dải 800-1.000 nm thuộc vùng hồng ngoại gần, còn dải ánh sáng nhìn thấy được đưa vào họ 802.11 qua dự án 802.11br; chi tiết trình bày ở mục 2.6 [17]. Vai trò lớp truy nhập trong nhà nói trên quyết định phạm vi nghiên cứu của đề án.

1.5. Kiến trúc mạng 6G và vị trí của VLC trong kiến trúc

Để trả lời câu hỏi VLC tham gia vào mạng 6G bằng cách nào, cần đặt nó vào kiến trúc tổng thể. Hình 1.4 mô tả kiến trúc 6G tích hợp đa lớp truy nhập cùng vị trí của VLC trong kiến trúc đó.

Kiến trúc gồm bốn tầng. Trên cùng là lớp dịch vụ tương ứng với các kịch bản sử dụng đã nêu ở mục 1.2. Kế đến là mạng lõi 6G hướng dịch vụ, xây dựng theo nguyên tắc cloud-native với mức độ ảo hóa cao và điều khiển bằng trí tuệ nhân tạo, đảm nhiệm quản lý di động, điều phối tài nguyên đa lớp và bảo mật; mô hình mạng lõi này cùng các thành phần chức năng của nó được trình bày chi tiết trong [4]. Tầng thứ ba là bộ điều khiển truy nhập vô tuyến thông minh, chịu trách nhiệm lựa chọn lớp truy nhập phù hợp cho từng luồng dữ liệu, cân bằng tải và ra quyết định chuyển giao. Dưới cùng là các lớp truy nhập song song: lớp RF dưới 6 GHz cho vùng phủ rộng, lớp sóng milimet cho dung lượng cao, lớp THz cho cự ly ngắn tốc độ cực cao, và lớp VLC/LiFi cho các tế bào cực nhỏ trong nhà.

Về mặt kiến trúc, VLC không hoạt động như một hệ thống độc lập song song với mạng di động mà tham gia với tư cách một lớp truy nhập chịu sự điều phối chung. Thiết bị người dùng duy trì đa kết nối, nhận đường xuống dung lượng cao từ lớp VLC đồng thời giữ đường lên và kết nối dự phòng qua lớp RF. Khi liên kết quang bị che khuất hoặc người dùng ra khỏi vùng phủ của một tế bào, bộ điều khiển chuyển luồng dữ liệu sang lớp RF mà không làm gián đoạn phiên truyền thông. Chương 3 phân tích và định lượng cơ chế phối hợp này.



Ghi chú: VLC tham gia mạng 6G như một LỚP TRUY NHẬP trong nhà, chịu sự điều phối chung của mạng lõi và bộ điều khiển RIC, chứ không hoạt động như một hệ thống độc lập.

Hình 1.4: Kiến trúc mạng 6G tích hợp đa lớp truy nhập và vị trí của VLC.

1.6. Xác định bài toán nghiên cứu

Từ các phân tích trên, đề án xác định bài toán nghiên cứu một cách cụ thể như sau: trong sáu kịch bản sử dụng và mười lăm năng lực của IMT-2030, VLC có thể đáp ứng những chỉ tiêu nào, ở mức độ nào, với cấu hình mạng ra sao, và cần cơ chế tích hợp gì để hoạt động trong kiến trúc 6G.

Bài toán này đặt ra ba yêu cầu đối với phần nghiên cứu tiếp theo. Thứ nhất, cần một mô hình kênh và mô hình hệ thống đủ chi tiết để tính được các đại lượng tương ứng với chỉ tiêu của IMT-2030, đây là nội dung Chương 2. Thứ hai, việc đánh giá phải thực hiện trên cấu hình mạng nhiều tế bào có xét nhiễu liên tế bào, vì các chỉ tiêu như mật độ dung lượng vùng và tốc độ người dùng trải nghiệm chỉ có ý nghĩa ở quy mô mạng chứ không phải trên một liên kết đơn lẻ. Thứ ba, kết quả phải được đối chiếu trực tiếp với các giá trị mục tiêu ở Bảng 1.2 để kết luận về khả năng đáp ứng. Hai yêu cầu sau là nội dung Chương 3.

Kết luận chương 1

Chương 1 đã xác lập khung tham chiếu cho toàn bộ đề án: sáu kịch bản sử dụng và mười lăm năng lực của IMT-2030 theo Khuyến nghị ITU-R M.2160-0, trong đó chín năng lực có giá trị số dùng làm thước đo định lượng ở Chương 3.

Ba kết luận của chương như sau. Thứ nhất, áp lực lên tài nguyên phổ, cụ thể là chỉ tiêu mật độ dung lượng vùng gấp ba đến năm lần 5G, là động lực kỹ thuật đưa phổ quang vào xem xét. Thứ hai, VLC không được ITU-R định danh là công nghệ truy nhập ứng viên của IMT-2030, và đây là rào cản mang tính định nghĩa do Thể lệ Vô tuyến điện giới hạn sóng vô tuyến ở dưới 3.000 GHz, chứ không phải đánh giá về năng lực kỹ thuật; việc chuẩn hóa VLC diễn ra tại IEEE và ITU-T. Thứ ba, về mặt kiến trúc, VLC chỉ có thể tham gia mạng 6G với tư cách một lớp truy nhập trong nhà chịu sự điều phối chung, không phải một hệ thống độc lập.

Từ đó, bài toán nghiên cứu được phát biểu ở mục 1.6: xác định VLC đáp ứng được những chỉ tiêu nào của IMT-2030, ở cấu hình mạng nào, và cần cơ chế tích hợp gì. Chương 2 xây dựng mô hình kênh và mô hình hệ thống cần thiết để trả lời bài toán này.

CHƯƠNG 2: CÔNG NGHỆ TRUYỀN THÔNG ÁNH SÁNG NHÌN THẤY (VLC)

Sau khi Chương 1 làm rõ vì sao 6G cần đến VLC, chương này đi vào bản thân công nghệ: nguyên lý hoạt động, mô hình hệ thống, kỹ thuật điều chế, đặc tính kênh và tình hình chuẩn hóa. Toàn bộ mô hình toán dùng cho phần mô phỏng ở Chương 3 được thiết lập tại đây.

2.1. Khái niệm và nguyên lý truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy

Nguyên lý của VLC khá đơn giản. Dữ liệu được mã hóa bằng cách điều chế cường độ ánh sáng của LED hoặc LD, ở tốc độ cao hơn nhiều ngưỡng cảm nhận của mắt. Nhờ vậy đèn vẫn chiếu sáng bình thường, người dùng không thấy nhấp nháy, mà bên trong ánh sáng đã mang thông tin. Phía thu chỉ cần một điốt quang (PD) để đổi cường độ ánh sáng trở lại thành tín hiệu điện. Cách làm này gọi là điều chế cường độ và tách sóng trực tiếp (Intensity Modulation / Direct Detection - IM/DD). Nó phổ biến nhất trong VLC vì đơn giản và rẻ.

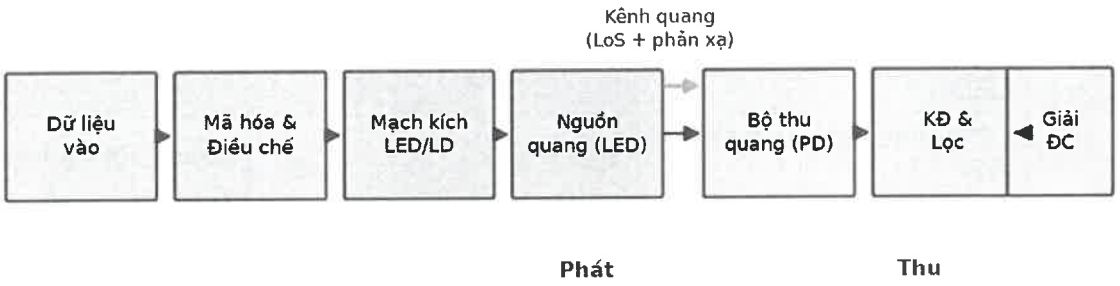
Về mặt lịch sử, ý tưởng truyền tin bằng ánh sáng đã có từ lâu, nhưng VLC hiện đại chỉ thực sự phát triển từ đầu những năm 2000 khi đèn LED trắng công suất cao trở nên phổ biến trong chiếu sáng. Các nghiên cứu nền tảng về hệ thống VLC dùng đèn LED, trong đó có mô hình hóa kênh trong nhà, đã được công bố từ năm 2004 [10] và tạo tiền đề cho hàng loạt công trình sau này. Từ đó đến nay, VLC đã phát triển nhanh cả về tốc độ, kỹ thuật điều chế lẫn phạm vi ứng dụng.

VLC là một nhánh của truyền thông quang không dây (Optical Wireless Communication - OWC). Khi VLC được tổ chức thành một mạng không dây hai chiều, tích hợp cả đường lên và đường xuống với khả năng chuyển giao và nối mạng, hệ thống thường được gọi là LiFi (Light Fidelity) [2], [7]. Một biến thể khác là truyền thông bằng camera quang (OCC), trong đó bộ thu là camera của điện thoại thông minh - tận dụng thiết bị sẵn có nhưng tốc độ thấp hơn do giới hạn tốc độ khung hình. So với truyền thông hồng ngoại, VLC tận dụng được hệ thống chiếu sáng sẵn có và

an toàn cho mắt; so với truyền thông vô tuyến, VLC có băng thông lớn hơn nhiều và không gây can nhiễu điện từ. Hai ưu thế đó, kế thừa hạ tầng và an toàn quang, là lý do VLC được chú ý cho các ứng dụng trong nhà.

2.2. Mô hình hệ thống và thành phần của hệ thống VLC

Một hệ thống VLC điển hình gồm ba khối chính: khối phát, kênh truyền quang và khối thu. Khối phát bao gồm bộ mã hóa và điều chế, mạch kích (driver) và nguồn quang (LED hoặc LD). Dữ liệu được điều chế thành tín hiệu điện điều khiển dòng qua LED, làm thay đổi cường độ phát quang theo thông tin cần truyền. Kênh truyền quang là môi trường không khí trong nhà, gồm thành phần tia thẳng (LoS) và các thành phần phản xạ khuếch tán từ tường, trần, sàn. Khối thu gồm điốt quang PD, mạch tiền khuếch đại, bộ lọc và bộ giải điều chế để khôi phục dữ liệu. Hình 2.1 minh họa sơ đồ khối tổng quát của hệ thống.



Hình 2.1: Sơ đồ khối hệ thống truyền thông VLC.

Về nguồn phát, LED là lựa chọn phổ biến nhờ chi phí thấp và sự hiện diện rộng khắp trong hệ thống chiếu sáng. Tuy nhiên, các loại LED có băng thông điều chế rất khác nhau. LED trắng dùng lớp phủ phốt-pho (phosphor-converted) phổ biến trong chiếu sáng nhưng băng thông chỉ vài MHz do thời gian đáp ứng chậm của lớp phốt-pho; có thể cải thiện bằng bộ lọc xanh lam ở phía thu để loại bỏ thành phần phốt-pho chậm. LED đa màu RGB cho băng thông cao hơn và hỗ trợ ghép kênh theo bước sóng. Gần đây, micro-LED đạt băng thông điều chế tới hàng trăm MHz, mở ra khả

năng truyền tốc độ Gb/s. LD (điốt laser) có băng thông điều chế cao hơn nữa và mật độ công suất lớn, cho phép đạt tốc độ rất cao nhưng đòi hỏi kiểm soát an toàn quang chặt chẽ hơn. Về bộ thu, hai loại điốt quang thường dùng là PIN và APD; PIN đơn giản, chi phí thấp, còn APD có độ nhạy cao hơn nhờ hệ số nhân thác lũ nhưng nhiễu cũng lớn hơn. Lựa chọn nguồn phát và bộ thu do đó là một bài toán đánh đổi giữa chi phí, tốc độ và độ phức tạp, phụ thuộc vào yêu cầu cụ thể của từng ứng dụng. Bảng 2.1 tổng hợp các kết quả thực nghiệm tiêu biểu đã công bố, cho thấy rõ khoảng cách năng lực giữa các loại nguồn quang.

Bảng 2.1: Một số kết quả thực nghiệm tiêu biểu về tốc độ của các loại nguồn quang [26], [27]

Loại nguồn quang	**Tốc độ đã đạt**	**Điều kiện**
LED trắng phủ phốt-pho, một nguồn	2,0 Gbit/s	OFDM cấp phát bit thích nghi
Micro-LED, một điểm ảnh	7,91 Gbit/s	băng thông điện-quang 655 MHz
LED thương mại, ghép kênh 4 bước sóng	15,73 Gbit/s	cự ly 1,6 m, OFDM thích nghi
Ghép kênh LED và micro-LED	25,20 Gbit/s	cự ly 25 cm
Laser đơn bước sóng nhìn thấy	36,5 Gbit/s	laser GaN xanh lam
Laser ghép kênh bước sóng	trên 100 Gbit/s	10 kênh, trong nhà

Loại đang dùng phổ biến trong chiếu sáng, tức LED trắng phủ phốt-pho, chỉ đạt khoảng 2 Gbit/s trên một nguồn. Con số đó thấp hơn khoảng mười hai lần so với cấu hình ghép kênh nhiều LED và khoảng năm mươi lần so với hệ thống dùng laser. Khoảng cách năng lực này là cơ sở thực nghiệm cho kết luận định lượng ở Chương 3: tái sử dụng nguyên trạng hạ tầng chiếu sáng hiện hữu không đủ để đáp ứng chỉ tiêu dung lượng của 6G.

Thiết kế bộ thu quang có ảnh hưởng lớn tới hiệu năng hệ thống. Một bộ thu VLC thường gồm ba thành phần quang học phía trước PD: bộ lọc quang (loại bỏ ánh sáng nền ngoài dải quan tâm), thấu kính hoặc bộ tập trung quang (concentrator) để tăng diện tích thu hiệu dụng, và bản thân điốt quang. Độ lợi của bộ tập trung tỉ lệ

nghịch với bình phương sin của góc FOV, do đó có sự đánh đổi giữa độ lợi (thu được nhiều công suất) và góc nhìn (bao phủ được vùng rộng). Trong phần mô phỏng ở Chương 3, góc FOV được cố định ở 70 độ và chiết suất bộ tập trung là 1,5, tương ứng độ lợi khoảng 2,5 lần; đây là cấu hình bộ thu thông dụng, còn việc tối ưu riêng cặp tham số này nằm ngoài phạm vi đề án. Ngoài ra, với các ứng dụng đòi hỏi tính di động, bộ thu dạng ảnh (imaging receiver) sử dụng mảng PD sau một thấu kính cho phép phân tách tín hiệu từ nhiều đèn theo hướng đến, hỗ trợ cả MIMO và định vị.

Đặc tính then chốt của kênh VLC trong nhà là độ lợi kênh một chiều theo mô hình bức xạ Lambertian. Với thành phần LoS, độ lợi kênh được xác định theo công thức (2.1) [9], [10]:

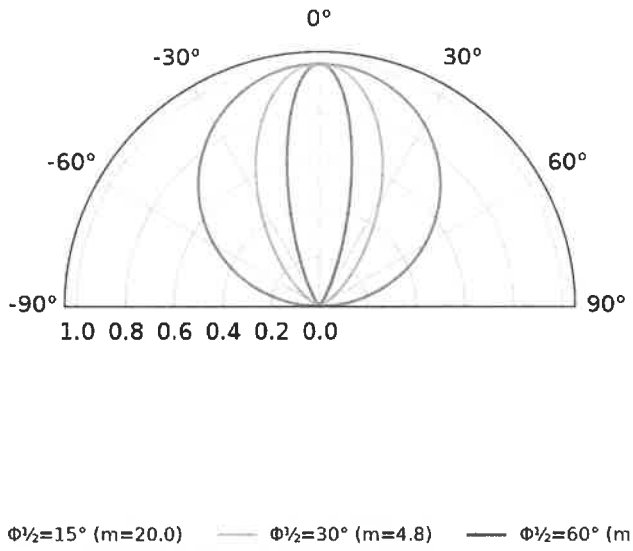
$$H_{LoS}(0) = \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d^2} cos^m \varphi \cdot T_s(\psi) g(\psi) \cos\psi, \ 0 \le \psi \le \Psi_c \qquad (2.1)$$

trong đó APD là diện tích hiệu dụng của điốt quang, d là khoảng cách phát - thu, φ là góc bức xạ, ψ là góc tới, Ts(ψ) là độ lợi bộ lọc quang, g(ψ) là độ lợi bộ tập trung và Ψc là góc nhìn của bộ thu. Bậc bức xạ Lambertian m được xác định từ góc nửa công suất Φ½ của nguồn, còn độ lợi bộ tập trung phụ thuộc chiết suất n theo các biểu thức (2.2):

$$m = -\frac{ln\,2}{ln\left(cos\,\Phi_{\frac{1}{2}}\right)}, \ g(\psi) = \frac{n^2}{sin^2\,\Psi_c} \qquad (2.2)$$

Giản đồ bức xạ Lambertian ứng với các giá trị góc nửa công suất khác nhau được minh họa ở Hình 2.2. Góc nửa công suất càng nhỏ thì búp sóng càng hẹp và tập trung.

Công suất quang thu được tại bộ thu là Pr = H(0)·Pt (chưa kể các thành phần phản xạ), với Pt là công suất quang phát. Từ công suất thu, có thể xác định tỉ số tín hiệu trên nhiễu và đánh giá hiệu năng liên kết, sẽ được sử dụng trong phần mô phỏng ở Chương 3.



Hình 2.2: Giản đồ bức xạ Lambertian theo góc nửa công suất.

Bên cạnh thành phần tia thẳng, bộ thu còn nhận các thành phần phản xạ từ tường, trần và sàn. Mỗi phần tử bề mặt dA có hệ số phản xạ ρ đóng vai trò một nguồn Lambertian thứ cấp, nên độ lợi kênh của thành phần phản xạ bậc một được tính theo (2.3):

$$dH_{ref}(0) = \frac{(m+1)A_{PD}\rho\, dA}{2\pi^2 d_1^2 d_2^2} cos^m \varphi \cos\alpha \cos\beta\, T_s(\psi) g(\psi) \cos\psi \qquad (2.3)$$

trong đó d_1, d_2 là khoảng cách từ nguồn tới phần tử phản xạ và từ phần tử đó tới bộ thu, còn α, β là góc tới và góc phản xạ tại bề mặt. Cách phân tách đáp ứng xung theo số lần phản xạ này được Barry và cộng sự đề xuất từ năm 1993 và đến nay vẫn là phương pháp nền tảng để mô phỏng kênh quang không dây trong nhà [23]. Đáp ứng xung tổng của kênh là tổng của thành phần tia thẳng và các thành phần phản xạ bậc k, theo (2.4):

$$h(t) = h_{LoS}(t) + \sum_{k=1}^{\infty} h_{ref}^{(k)}(t) \qquad (2.4)$$

Do các thành phần phản xạ tới bộ thu với độ trễ khác nhau, kênh xuất hiện hiện tượng trải trễ. Trải trễ căn quân phương được định nghĩa theo (2.5):

$$D_{RMS} = \sqrt{\frac{\int (t-\mu)^2 h^2(t)dt}{\int h^2(t)dt}}, \quad \mu = \frac{\int t\, h^2(t)dt}{\int h^2(t)dt} \tag{2.5}$$

Đại lượng này giới hạn tốc độ truyền dẫn nếu không dùng kỹ thuật cân bằng: để nhiễu liên ký tự không đáng kể, tốc độ bit thường phải thỏa mãn điều kiện kinh nghiệm $R^b \leq 1/(10\ DRMS)$. Trong phòng có kích thước điển hình, trải trễ căn quân phương vào khoảng vài nano giây, tương ứng giới hạn tốc độ cỡ vài chục Mbit/s cho một sóng mang đơn. Giới hạn đó buộc các hệ thống VLC tốc độ cao phải dùng điều chế đa sóng mang OFDM quang, vốn chia băng thông thành nhiều sóng mang con băng hẹp nên mỗi sóng mang chịu kênh gần như phẳng.

Ngoài trải trễ của kênh, băng thông hệ thống còn bị giới hạn bởi chính đáp ứng tần số của nguồn quang. Đối với LED, đáp ứng này xấp xỉ bộ lọc thông thấp bậc nhất, theo (2.6):

$$H_{LED}(f) = \frac{1}{1+j\frac{f}{f_{3dB}}} \tag{2.6}$$

với f_{3dB} là băng thông điều chế của LED. Giá trị này chỉ vài MHz với LED trắng phủ phốt-pho nhưng đạt hàng trăm MHz với micro-LED. Kết quả mô phỏng ở Chương 3 sẽ cho thấy đây là tham số quyết định năng lực của cả mạng VLC.

Về nhiễu, hai nguồn nhiễu chính tại bộ thu là nhiễu bắn phát sinh từ dòng quang và ánh sáng nền, cùng nhiễu nhiệt từ mạch tiền khuếch đại. Tổng phương sai nhiễu và tỉ số tín hiệu trên tạp âm điện được xác định theo (2.7):

$$\sigma^2 = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{th}^2, \quad \gamma = \frac{(RP_r)^2}{\sigma^2} \tag{2.7}$$

trong đó $\mathscr{R}$ là đáp ứng của điốt quang và Pr là công suất quang thu được. Các biểu thức chi tiết của hai thành phần nhiễu, cùng giá trị cụ thể của từng tham số mạch, được trình bày ở mục 3.4.1 khi thiết lập mô phỏng.

2.3. Các kỹ thuật điều chế trong VLC

Do sử dụng cơ chế IM/DD, tín hiệu trong VLC phải là tín hiệu thực và không âm. Các kỹ thuật điều chế trong VLC có thể chia thành hai nhóm chính: điều chế đơn sóng mang và điều chế đa sóng mang.

Nhóm điều chế đơn sóng mang gồm khóa đóng - mở (OOK) và điều chế vị trí xung (PPM). OOK là sơ đồ đơn giản nhất, biểu diễn bit "1" và "0" bằng mức sáng và tối của nguồn quang; ưu điểm là dễ triển khai nhưng hiệu suất phổ thấp. PPM mã hóa thông tin theo vị trí của xung trong một khe thời gian, có hiệu suất công suất tốt hơn nhưng hiệu suất phổ vẫn hạn chế.

Nhóm điều chế đa sóng mang, tiêu biểu là ghép kênh phân chia theo tần số trực giao quang (OFDM quang), nâng được hiệu suất phổ và chống nhiễu liên ký tự do tán sắc kênh. Ý tưởng của OFDM là chia băng thông thành nhiều sóng mang con băng hẹp trực giao; mỗi sóng mang con chịu kênh gần như phẳng nên việc cân bằng đơn giản hơn hẳn ở tốc độ cao. Hai biến thể phổ biến cho VLC là DCO-OFDM (thêm thành phần một chiều để tín hiệu không âm) và ACO-OFDM (cắt bất đối xứng phần âm). Trên nền OFDM, mỗi sóng mang con có thể mang các sơ đồ ánh xạ bậc cao, để tăng số bit trên mỗi ký hiệu và nâng tốc độ dữ liệu [3]. Đề án sử dụng điều chế thích nghi với tập mức từ 4-QAM đến 4096-QAM: tại mỗi vị trí trong phòng, hệ thống chọn mức cao nhất còn thỏa mãn ngưỡng tỉ lệ lỗi bit, thay vì cố định một mức duy nhất. Cách này phản ánh đúng hoạt động của hệ thống thực, nơi điều kiện kênh biến thiên mạnh giữa tâm và biên tế bào. Tuy nhiên, OFDM cũng có nhược điểm là tỉ số công suất đỉnh trên công suất trung bình (PAPR) cao, đòi hỏi vùng làm việc tuyến tính của LED đủ rộng để tránh méo phi tuyến; đây là một yếu tố cần cân nhắc khi thiết kế mạch kích và chọn điểm làm việc cho nguồn quang.

Ngoài hai nhóm trên, một số kỹ thuật điều chế khác cũng được nghiên cứu cho VLC, chẳng hạn điều chế biên độ - pha không sóng mang (CAP) cho phép đạt hiệu suất phổ cao với độ phức tạp vừa phải, hay điều chế theo miền không gian (spatial modulation) tận dụng nhiều nguồn LED. Bảng 2.2 so sánh khái quát các sơ đồ điều chế tiêu biểu theo hiệu suất phổ, độ phức tạp và khả năng chống nhiễu liên ký tự.

Bảng 2.2: So sánh các sơ đồ điều chế tiêu biểu trong VLC

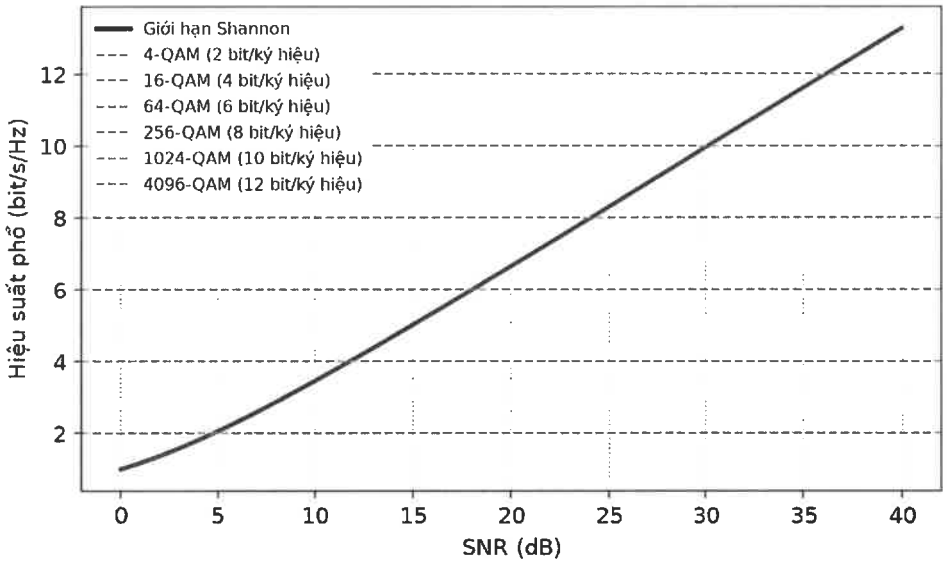
Sơ đồ điều chế	Hiệu suất phổ	Độ phức tạp	Chống ISI	Ghi chú
OOK	Thấp	Rất thấp	Kém	Đơn giản, dễ triển khai

Sơ đồ điều chế	Hiệu suất phổ	Độ phức tạp	Chống ISI	Ghi chú
PPM	Thấp	Thấp	Trung bình	Hiệu suất công suất tốt
DCO/ACO-OFDM	Cao	Cao	Tốt	Nền cho ánh xạ M-QAM bậc cao
CAP	Cao	Trung bình	Trung bình	Không cần sóng mang

Việc lựa chọn mức điều chế thể hiện sự đánh đổi giữa tốc độ và độ tin cậy: mức điều chế càng cao thì hiệu suất phổ càng lớn nhưng lại đòi hỏi SNR cao hơn để duy trì cùng một tỉ lệ lỗi bit. Hình 2.3 minh họa hiệu suất phổ theo SNR, trong đó đường Shannon theo (2.8) được vẽ để tham chiếu:

$$C = B\,log_2(1+\gamma) \tag{2.8}$$

Công thức Shannon cần được dùng thận trọng ở đây. Nó được thiết lập cho kênh có nhiễu Gauss cộng tính với tín hiệu vào không bị ràng buộc dấu. Trong hệ thống IM/DD của VLC, tín hiệu vào là cường độ quang nên bắt buộc không âm và bị giới hạn biên độ; phân bố tối ưu do đó không phải phân bố Gauss, và biểu thức Shannon chỉ cho cận trên chứ không phải dung lượng thực của kênh. Các cận chặt hơn cho kênh cường độ quang đã được thiết lập trong [28]. Phần đánh giá ở Chương 3 vì vậy không dùng Shannon để tính tốc độ, mà lấy tốc độ từ mức điều chế M-QAM thực tế thỏa mãn ngưỡng tỉ lệ lỗi bit, sát với hệ thống thực hơn. Mỗi mức M-QAM cho một hiệu suất phổ cố định log2(M) bit/s/Hz, chỉ đạt được khi SNR đủ lớn, và đó là cơ sở để chọn mức điều chế theo điều kiện kênh của từng vùng phủ. Với M-QAM trên nền OFDM, tốc độ liên kết xấp xỉ $R \approx B \cdot \log_2(M) \cdot \eta$, trong đó B là băng thông khả dụng và η là hệ số hiệu dụng tính đến khoảng bảo vệ và mào đầu. Bước nhảy giữa hai mức liền kề trong tập 4-QAM đến 4096-QAM tương ứng thêm một bit trên mỗi ký hiệu, chẳng hạn từ 256-QAM lên 1024-QAM là từ 8 lên 10 bit, tức tăng một phần tư tốc độ nếu kênh đủ tốt.



Hình 2.3: Hiệu suất phổ theo SNR và các mức điều chế M-QAM.

2.4. Đặc tính kênh, ưu điểm và hạn chế của VLC

Kênh VLC trong nhà mang những đặc trưng riêng. Thành phần LoS thường chiếm ưu thế về công suất và quyết định chất lượng liên kết, trong khi các thành phần phản xạ khuếch tán gây trải trễ và có thể dẫn tới nhiễu liên ký tự ở tốc độ cao. Chất lượng liên kết phụ thuộc mạnh vào khoảng cách, góc bức xạ, góc tới và hiện tượng che khuất.

Để đánh giá định lượng chất lượng liên kết, người ta thường lập ngân sách công suất (link budget): công suất quang thu được xác định từ công suất phát và độ lợi kênh, sau đó so với phương sai nhiễu để tính SNR, và từ SNR suy ra tỉ lệ lỗi bit ứng với từng sơ đồ điều chế. Chuỗi tính toán này (công suất thu → SNR → BER → tốc độ) là phương pháp dùng trong phần mô phỏng ở Chương 3.

Về ưu điểm, VLC có băng thông rất lớn, dùng phổ không cần cấp phép, bảo mật vật lý cao do ánh sáng không xuyên tường, không gây nhiễu điện từ nên dùng được ở bệnh viện hay máy bay, an toàn cho mắt và tận dụng được hạ tầng chiếu sáng sẵn có [1], [2], [12]. Những đặc điểm đó hợp nhất với truyền thông trong nhà và các không gian có mật độ đèn LED cao. Ngoài trời, ánh sáng mặt trời trở thành một nguồn

nhiễu nền mạnh nên hệ thống cần bộ lọc quang và xử lý tín hiệu tương ứng; dù vậy VLC ngoài trời vẫn có chỗ dùng, chẳng hạn truyền thông giữa các phương tiện (V2V) qua đèn xe và đèn giao thông.

Về hạn chế, VLC phụ thuộc nhiều vào tầm nhìn thẳng và suy giảm nhanh khi có vật che khuất. Hiệu năng cũng chịu ảnh hưởng của ánh sáng nền. Nặng nhất là bài toán đường lên và tính di động, vì thiết bị đầu cuối không tiện phát ánh sáng ngược lên trần. Hai hạn chế sau cùng là lý do căn bản đòi hỏi tích hợp VLC với mạng vô tuyến, nội dung được phân tích ở Chương 3.

VLC được so sánh với truyền thông vô tuyến (RF) và truyền thông hồng ngoại (IR) trên một số tiêu chí then chốt ở Bảng 2.3. VLC hơn hẳn về băng thông, bảo mật vật lý và khả năng tận dụng hạ tầng chiếu sáng, còn RF hơn hẳn về vùng phủ và tính di động. Hai công nghệ mạnh ở đúng những chỗ công nghệ kia yếu, và đó là cơ sở cho mô hình lai ghép.

Bảng 2.3: So sánh VLC với truyền thông RF và hồng ngoại [2], [11]

Tiêu chí	**VLC**	**RF**	**Hồng ngoại (IR)**
Dải phổ	400-800 THz	tới ~300 GHz	~300 GHz - 400 THz
Băng thông khả dụng	Rất lớn, không cấp phép	Hạn chế, cấp phép	Lớn
Vùng phủ / xuyên tường	Ngắn, không xuyên tường	Rộng, xuyên tường	Ngắn, không xuyên tường
Bảo mật vật lý	Cao	Thấp	Cao
Nhiễu điện từ	Không	Có	Không
Tận dụng hạ tầng	Đèn LED chiếu sáng	Trạm phát riêng	Thiết bị IR riêng
Đường lên / di động	Khó	Tốt	Trung bình

2.5. Kỹ thuật đa truy nhập, MIMO và điều khiển độ sáng trong VLC

Để phục vụ nhiều người dùng và nâng cao dung lượng, VLC cần các kỹ thuật đa truy nhập và ghép kênh. Đa truy nhập phân chia theo tần số trực giao (OFDMA) phân bổ các nhóm sóng mang con cho từng người dùng, phù hợp tự nhiên với nền OFDM đã trình bày ở mục 2.3. Ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) tận

dụng các màu (đỏ, lục, lam) của LED RGB để truyền song song nhiều luồng dữ liệu, qua đó nhân bội tốc độ. Ngoài ra, đa truy nhập phi trực giao (NOMA) cũng được nghiên cứu cho VLC nhằm tăng hiệu suất phổ trong vùng phủ nhỏ.

Kỹ thuật MIMO quang khai thác việc bố trí nhiều nguồn LED và nhiều PD để truyền song song các luồng dữ liệu trong không gian (spatial multiplexing), nhờ đó tăng dung lượng mà không cần thêm băng thông. Do đặc thù kênh VLC có tính tương quan cao khi các LED đặt gần nhau, việc thiết kế bố trí đèn và bộ thu (ví dụ dùng thấu kính tạo ảnh) là yếu tố quyết định hiệu quả MIMO. Ngoài spatial multiplexing, MIMO quang còn dùng được cho phân tập không gian (spatial diversity) để tăng độ tin cậy khi một số đường truyền bị che khuất, hoặc kết hợp cả hai theo điều kiện kênh. MIMO vì thế nâng được đồng thời tốc độ và độ ổn định của liên kết, và kết quả ở mục 3.4.7 sẽ cho thấy đây là điều kiện bắt buộc nếu muốn đạt chỉ tiêu hiệu suất phổ của IMT-2030.

Kỹ thuật nào phù hợp thì tùy kịch bản. OFDMA và NOMA hợp với nhiều người dùng trong một attocell. WDM hợp khi cần nhân bội tốc độ bằng đèn RGB. MIMO hợp với không gian nhiều đèn và thiết bị ít di chuyển. Trên thực tế các kỹ thuật này thường được dùng kết hợp.

Một yêu cầu riêng của VLC là điều khiển độ sáng (dimming), vì hệ thống phải đồng thời bảo đảm chức năng chiếu sáng. Các kỹ thuật như điều chế độ rộng xung (PWM) kết hợp với sơ đồ điều chế dữ liệu, hay điều chỉnh mức một chiều trong DCO-OFDM, cho phép thay đổi độ sáng theo nhu cầu mà vẫn duy trì truyền dữ liệu và tránh hiện tượng nhấp nháy gây khó chịu cho mắt. Ràng buộc kép này, vừa chiếu sáng vừa truyền tin, phân biệt thiết kế hệ thống VLC với các hệ thống truyền thông thông thường.

2.6. Các tiêu chuẩn và tình hình chuẩn hóa VLC

Như đã nêu ở mục 1.3, do rào cản định nghĩa của Thể lệ Vô tuyến điện, việc chuẩn hóa truyền thông quang không dây không diễn ra trong khuôn khổ IMT của

ITU-R mà tại IEEE và ITU-T. Bảng 2.4 tổng hợp các chuẩn hiện hành cùng thông số chính; toàn cảnh hoạt động chuẩn hóa truyền thông ánh sáng trong IEEE 802 được trình bày hệ thống trong tài liệu hướng dẫn của Jungnickel [18].

Bảng 2.4: Các chuẩn hiện hành về truyền thông quang không dây [6], [7], [16], [17], [18]

Chuẩn	Nội dung	Dải bước sóng	Tốc độ
IEEE 802.15.7-2018	Truyền thông quang không dây tầm ngắn	190 - 10.000 nm	tới khoảng 96 Mbit/s
IEEE 802.11bb-2023	Truyền thông bằng ánh sáng cho họ 802.11	800 - 1.000 nm	10 Mbit/s - 9,6 Gbit/s
IEEE 802.15.13-2023	Truyền thông quang không dây đa Gbit/s, cự ly tới 200 m	190 - 10.000 nm	2,192 Gbit/s
IEEE 802.11br (đang xây dựng)	Truyền thông bằng ánh sáng nâng cao	400 - 600 nm và 1.200 - 1.600 nm	đang xác định
ITU-T G.9991	Máy thu phát VLC tốc độ cao trong nhà	ánh sáng nhìn thấy	tới khoảng 2 Gbit/s

Có hai điểm cần lưu ý về mặt kỹ thuật khi tham chiếu các chuẩn này.

Thứ nhất, chuẩn IEEE 802.11bb-2023, thường được gọi là chuẩn LiFi, thực chất quy định hoạt động trong dải 800-1.000 nm, tức dải hồng ngoại gần chứ không phải dải ánh sáng nhìn thấy. Chuẩn này đạt thông lượng từ 10 Mbit/s đến 9,6 Gbit/s tại điểm truy nhập dịch vụ lớp MAC, và mục tiêu chính là cho phép hệ thống 802.11 hoạt động trong suốt trên môi trường ánh sáng. Ánh sáng nhìn thấy chỉ chính thức bước vào họ 802.11 thông qua dự án 802.11br với dải 400-600 nm, được phê duyệt đề cương năm 2025 [17]. Việc phân biệt này là cần thiết vì nhiều tài liệu thứ cấp đồng nhất 802.11bb với VLC.

Thứ hai, ITU-T G.9991 là khuyến nghị quốc tế trực tiếp quy định máy thu phát VLC tốc độ cao trong nhà, sử dụng lớp vật lý DCO-OFDM và ACO-OFDM đúng như trình bày ở mục 2.3, với tốc độ tới khoảng 2 Gbit/s [16]. Sự tồn tại của khuyến nghị này cho thấy VLC đã có chuẩn quốc tế hoàn chỉnh, dù nằm ở nhánh ITU-T về mạng trong nhà chứ không thuộc nhánh ITU-R về thông tin vô tuyến.

Hệ thống chuẩn nói trên, cộng với các sản phẩm thương mại đã nêu ở phần Mở đầu, cho thấy VLC đủ chín muồi về công nghệ để xem xét tích hợp vào mạng thế hệ mới.

2.7. Một số hướng nghiên cứu mở của VLC

VLC còn nhiều vấn đề để ngỏ, nhất là khi đặt trong bối cảnh tích hợp vào 6G. Về lớp vật lý, hướng chính vẫn là nâng tốc độ và cự ly liên kết bằng nguồn phát băng thông cao như micro-LED và LD, kỹ thuật cân bằng thích ứng và điều chế hiệu suất phổ cao. Về dung lượng phục vụ nhiều người, VLC đang được nghiên cứu kết hợp với đa truy nhập phi trực giao (NOMA) và MIMO quang. Một hướng khác là VLC hỗ trợ bởi bề mặt phản xạ thông minh (RIS quang), định hướng lại chùm sáng để khắc phục che khuất và mở rộng vùng phủ. Trí tuệ nhân tạo và học máy được xem xét cho quản lý tài nguyên, dự đoán che khuất và ra quyết định chuyển giao, khớp với định hướng AI-native của 6G. Cuối cùng là bài toán đường lên hiệu quả và tiết kiệm năng lượng cho thiết bị đầu cuối, vốn chưa có lời giải thuyết phục.

Kết luận chương 2

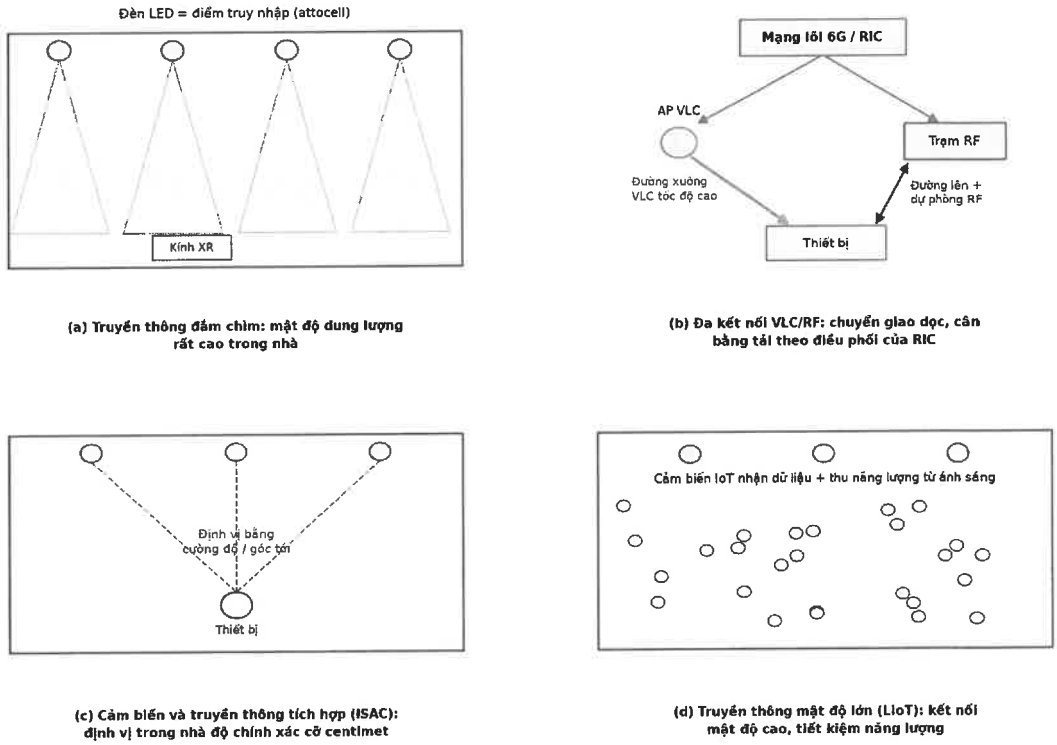
Chương 2 đã làm rõ khái niệm, nguyên lý, mô hình hệ thống, các kỹ thuật điều chế cùng đặc tính kênh và tình hình chuẩn hóa của công nghệ VLC. Chương cũng chỉ ra hai hạn chế cốt lõi: VLC phụ thuộc tầm nhìn thẳng, và khó bảo đảm đường lên cùng tính di động. Hai hạn chế đó đặt ra yêu cầu tích hợp VLC với mạng vô tuyến, để mỗi công nghệ bù vào chỗ yếu của công nghệ kia. Đó là nội dung trọng tâm của Chương 3.

CHƯƠNG 3: GIẢI PHÁP TÍCH HỢP ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ VLC TRONG MẠNG 6G

Chương 1 đã xác lập bộ chỉ tiêu IMT-2030 và vị trí của VLC trong kiến trúc 6G; Chương 2 đã cung cấp mô hình kênh và mô hình hệ thống. Chương này giải quyết bài toán đã nêu ở mục 1.6: xác định các kịch bản tích hợp VLC vào mạng 6G, xây dựng mô hình mạng nhiều tế bào tương ứng, mô phỏng định lượng và đối chiếu trực tiếp kết quả với các giá trị mục tiêu ở Bảng 1.2 để kết luận VLC đáp ứng được những chỉ tiêu nào.

3.1. Các kịch bản tích hợp VLC trong mạng 6G

Như đã phân tích ở mục 1.2, VLC chỉ đóng góp trực tiếp cho một phần trong sáu kịch bản sử dụng của IMT-2030. Hình 3.1 mô tả bốn kịch bản tích hợp cụ thể tương ứng, là các kịch bản mà đề án tập trung phân tích.



Hình 3.1: Các kịch bản tích hợp công nghệ VLC trong mạng 6G.

Kịch bản thứ nhất, tương ứng với truyền thông đắm chìm, là mạng tế bào cực nhỏ trong nhà. Mỗi bộ đèn LED trên trần trở thành một điểm truy nhập phủ một vùng đường kính vài mét, gọi là attocell. Mật độ tái sử dụng không gian rất cao của cấu hình này là cơ sở để đạt chỉ tiêu mật độ dung lượng vùng, phục vụ các thiết bị thực tại mở rộng vốn đòi hỏi tốc độ lớn nhưng ít di chuyển.

Kịch bản thứ hai là đa kết nối VLC/RF. Thiết bị duy trì đồng thời liên kết quang cho đường xuống dung lượng cao và liên kết vô tuyến cho đường lên cùng dự phòng, dưới sự điều phối của bộ điều khiển truy nhập đã nêu ở mục 1.5. Cơ chế này giữ cho dịch vụ không gián đoạn khi liên kết quang bị che khuất.

Kịch bản thứ ba, tương ứng với cảm biến - truyền thông tích hợp, khai thác đặc điểm vị trí các đèn LED cố định và biết trước để định vị thiết bị theo cường độ tín hiệu thu hoặc góc tới, đạt độ chính xác cỡ centimet. Ở kịch bản này VLC hơn hẳn định vị bằng sóng vô tuyến.

Kịch bản thứ tư, tương ứng với truyền thông mật độ lớn, sử dụng hạ tầng chiếu sáng làm điểm truy nhập cho số lượng lớn cảm biến trong nhà máy hoặc tòa nhà thông minh, kết hợp khả năng thu năng lượng từ chính nguồn sáng.

Bốn kịch bản trên khác nhau về yêu cầu kỹ thuật, nhưng đều dựa trên cùng một hạ tầng vật lý là mạng attocell nhiều tế bào. Do đó, phần còn lại của chương tập trung mô hình hóa và đánh giá cấu hình mạng này.

3.2. Mô hình mạng VLC nhiều tế bào trong môi trường 6G

Điểm khác biệt căn bản giữa đánh giá một liên kết VLC đơn lẻ và đánh giá một mạng VLC trong bối cảnh 6G nằm ở nhiễu liên tế bào. Khi nhiều bộ đèn cùng phát dữ liệu trên cùng dải tần điều chế, tín hiệu từ các đèn lân cận trở thành nhiễu đối với thiết bị đang thu. Các chỉ tiêu như mật độ dung lượng vùng hay tốc độ người dùng trải nghiệm vì vậy chỉ có ý nghĩa khi được tính trên mô hình nhiều tế bào, chứ không thể suy ra từ một liên kết riêng lẻ.

Mô hình mạng tế bào quang sử dụng trong đề án kế thừa khung phân tích của Chen và cộng sự về hiệu năng đường xuống của mạng attocell quang [19]. Xét một mạng gồm N điểm truy nhập VLC bố trí trên trần. Với thiết bị ở vị trí i, điểm truy nhập phục vụ là điểm cho công suất thu lớn nhất. Tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tạp âm được xác định theo (3.1):

$$SINR_i = \frac{(RP_{i,s})^2}{\sum_{j\in J, j\neq s}(RP_{i,j})^2 + \sigma^2_{shot} + \sigma^2_{th}} \tag{3.1}$$

trong đó $\mathscr{R}$ là đáp ứng của điốt quang, P với chỉ số (i,s) là công suất quang thu từ điểm truy nhập phục vụ, J là tập các điểm truy nhập phát trên cùng nhóm tần số, còn hai số hạng cuối ở mẫu số là phương sai nhiễu bắn và nhiễu nhiệt đã nêu ở biểu thức (2.7) thuộc mục 2.2. Khác với tỉ số tín hiệu trên tạp âm của liên kết đơn, mẫu số ở đây có thêm thành phần tổng công suất nhiễu từ các tế bào đồng kênh. Một hệ quả của cấu trúc này cần nhớ khi đọc các kết quả số ở mục 3.4: phương sai nhiễu tăng theo băng thông của mỗi tế bào, nên cùng một cấu hình mạng sẽ cho SINR thấp hơn khi băng thông tăng. Mọi giá trị SINR trong đề án vì vậy đều được nêu kèm băng thông nguồn quang tương ứng.

Để hạn chế nhiễu liên tế bào, mạng áp dụng tái sử dụng tần số với hệ số K: toàn bộ băng thông điều chế B của nguồn quang được chia thành K nhóm, mỗi tế bào chỉ dùng băng thông B/K và các tế bào lân cận được gán nhóm khác nhau. Cơ chế này đánh đổi giữa băng thông khả dụng của mỗi tế bào và mức nhiễu, và sẽ được khảo sát định lượng ở mục 3.4. Các kỹ thuật nâng cao hơn cho bài toán này gồm tái sử dụng tần số theo phân đoạn không gian trong mạng attocell dùng DCO-OFDM [20] và truyền dẫn phối hợp đa điểm, tuy nhiên đề án giới hạn ở cơ chế tái sử dụng tần số cơ bản để làm rõ bản chất ảnh hưởng của nhiễu.

Với điều chế M-QAM thích nghi trên nền DCO-OFDM, mức điều chế tại mỗi vị trí được chọn là mức cao nhất còn thỏa mãn ngưỡng tỉ lệ lỗi bit sau sửa lỗi. Tốc độ dữ liệu của tế bào thứ k được tính theo (3.2):

$$R_k = \left(\frac{B}{2K}\right) log_2 M_k \tag{3.2}$$

trong đó hệ số 1/2 phản ánh ràng buộc đối xứng Hermit của DCO-OFDM đã nêu ở mục 2.3. Từ đó, mật độ dung lượng vùng của mạng, đại lượng tương ứng trực tiếp với chỉ tiêu area traffic capacity của IMT-2030, được xác định bởi (3.3):

$$C_{area} = \frac{1}{A_{room}} \sum_{k=1}^{N} R_k \tag{3.3}$$

với Aroom là diện tích sàn được phủ. Mật độ dung lượng vùng là đại lượng trung tâm của phần đánh giá vì nó so sánh trực tiếp được với giá trị mục tiêu 30 và 50 Mbit/s/m^2 của IMT-2030.

3.3. Đa kết nối VLC/RF và cơ chế chuyển giao trong kiến trúc 6G

Mô hình mạng ở mục 3.2 mới chỉ xét lớp quang. Trong kiến trúc 6G đã trình bày ở mục 1.5, lớp VLC luôn hoạt động cùng lớp vô tuyến dưới sự điều phối của bộ điều khiển truy nhập thông minh. Mô hình mạng lai ghép LiFi và Wi-Fi đã được khảo sát hệ thống trong tài liệu [21], trong đó các bài toán trọng tâm gồm liên kết người dùng với điểm truy nhập, cân bằng tải và chuyển giao. Sự phối hợp này giải quyết ba hạn chế cố hữu của VLC.

Thứ nhất là đường lên. Thiết bị đầu cuối khó phát ánh sáng ngược lên trần vì lý do công suất, thẩm mỹ và tiêu thụ năng lượng. Trong mô hình đa kết nối, đường lên được thực hiện qua lớp RF, còn lớp VLC chỉ đảm nhận đường xuống vốn chiếm phần lớn lưu lượng của các dịch vụ đắm chìm.

Thứ hai là che khuất và hướng đặt thiết bị. Khi tầm nhìn thẳng bị chắn hoặc thiết bị nghiêng ra khỏi vùng nhìn của bộ thu, liên kết quang suy giảm nhanh. Bộ điều khiển phát hiện sự suy giảm này và chuyển luồng dữ liệu sang lớp RF, thực hiện chuyển giao dọc. Để tránh hiện tượng chuyển giao lặp khi tín hiệu dao động do che khuất tạm thời, cơ chế điều khiển sử dụng ngưỡng trễ và bộ đếm thời gian trú.

Thứ ba là tính di động. Do bán kính tế bào chỉ vài mét, người dùng di chuyển sẽ vượt qua ranh giới tế bào rất thường xuyên. Việc duy trì song song kết nối RF cho phép giữ phiên liên tục trong lúc lớp quang thực hiện chuyển giao ngang giữa các attocell.

Mức độ ảnh hưởng của che khuất và hướng đặt thiết bị, tức mức độ cần thiết của lớp RF bổ trợ, được lượng hóa ở mục 3.4.4.

3.4. Mô phỏng đánh giá mạng VLC theo chỉ tiêu IMT-2030

3.4.1. Kịch bản và thông số mô phỏng

Kịch bản mô phỏng là một không gian làm việc trong nhà kích thước 15 × 15 × 3 m, mặt thu ở độ cao 0,85 m, bố trí lưới điểm truy nhập VLC trên trần với số lượng thay đổi từ 4 đến 36 để khảo sát ảnh hưởng của mật độ. Bảng 3.1 tổng hợp các thông số chính.

Bảng 3.1: Thông số mô phỏng mạng VLC attocell

Tham số	**Giá trị**
Kích thước phòng, mặt thu	15 × 15 × 3 m; mặt thu cao 0,85 m
Số điểm truy nhập khảo sát	4, 9, 16, 25, 36
Công suất quang mỗi điểm truy nhập	10 W
Góc nửa công suất, bậc Lambertian	60 độ; m = 1
Băng thông điều chế nguồn quang	20, 50, 100, 200, 500 MHz
Hệ số tái sử dụng tần số	K = 1 và K = 4
Diện tích PD, đáp ứng, góc FOV	1 cm^2; 0,53 A/W; 70 độ
Điều chế thích nghi	4 đến 4096-QAM trên nền DCO-OFDM
Ngưỡng tỉ lệ lỗi bit sau sửa lỗi	$3{,}8 \times 10^{-3}$

Dải băng thông điều chế được chọn nhằm phản ánh các thế hệ nguồn quang khác nhau đã nêu ở mục 2.2, và các giá trị này đều có cơ sở thực nghiệm. LED trắng phủ phốt-pho thông dụng có băng thông điều chế chỉ khoảng vài MHz đến 20 MHz. Mảng micro-LED GaN đã được đo đạt băng thông 285 MHz, còn micro-LED tím phân đoạn đạt băng thông điện-quang tới 655 MHz [26]. Các hệ thống dùng nguồn laser VCSEL trong nghiên cứu về LiFi thế hệ hai cho 6G giả thiết băng thông điều chế cỡ GHz [25]. Như vậy, dải khảo sát từ 20 đến 500 MHz bao trùm từ linh kiện chiếu sáng phổ thông hiện nay tới linh kiện quang tiên tiến đã được chứng minh trong phòng thí nghiệm.

Về mô hình nhiễu, hai thành phần đã nêu ở biểu thức (2.7) được triển khai cụ thể theo mô hình của Komine và Nakagawa [10]. Phương sai nhiễu bắn do ánh sáng nền và phương sai nhiễu nhiệt của mạch tiền khuếch đại được tính theo (3.4) và (3.5):

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\, I_{bg} I_2 B \tag{3.4}$$

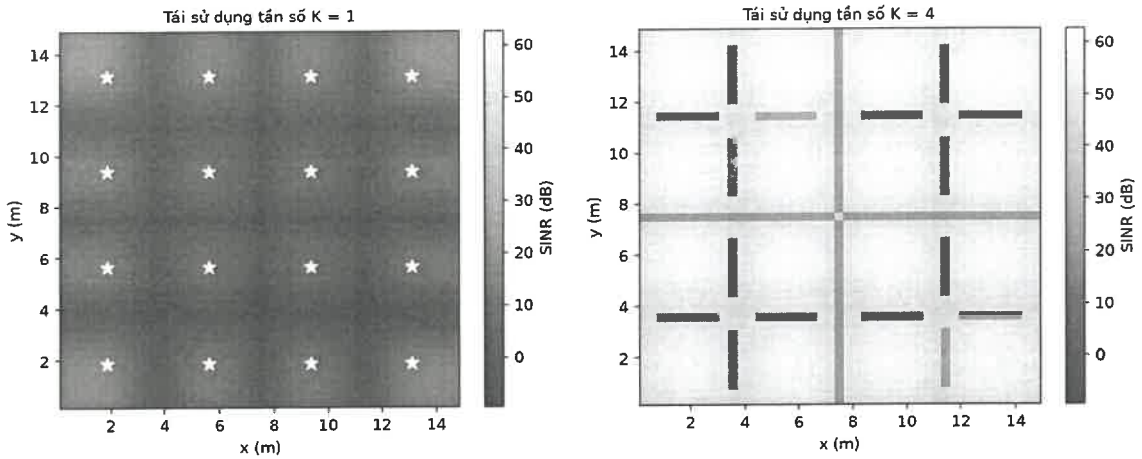
$$\sigma_{th}^2 = \frac{8\pi k_B T_k}{G_{ol}} \eta\, A\, I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k_B T_k \Gamma}{g_m} (\eta\, A)^2 I_3 B^3 \tag{3.5}$$

trong đó q là điện tích nguyên tố, kB là hằng số Boltzmann, Tk là nhiệt độ tuyệt đối, Ibg là dòng do ánh sáng nền, B là băng thông của mỗi tế bào, η là điện dung cố định trên đơn vị diện tích của điốt quang, A là diện tích mặt thu, Gol là độ lợi vòng hở, Γ là hệ số nhiễu kênh của transistor hiệu ứng trường, gm là hỗ dẫn, còn I_2 và I_3 là các hệ số băng thông nhiễu. Giá trị sử dụng trong mô phỏng là Ibg = 5,1 mA, Tk = 295 K, η = 112 pF/cm^2, Gol = 10, Γ = 1,5, gm = 30 mS, I_2 = 0,562 và I_3 = 0,0868. Cả hai thành phần đều tăng theo băng thông, và đó là lý do mở rộng băng thông nguồn quang làm giảm SINR tại từng điểm nhưng vẫn nâng được tổng dung lượng.

Về điều kiện tái lập kết quả, toàn bộ phần mô phỏng được viết bằng Python 3 với các thư viện NumPy, SciPy và Matplotlib; cấu trúc chương trình và cách chạy được trình bày ở Phụ lục A. Các bản đồ SINR và mật độ dung lượng vùng được tính trên lưới 45 × 45 điểm thu trải đều trên mặt thu, tức 2025 vị trí cho mỗi cấu hình. Riêng phần kiểm chứng thành phần phản xạ ở mục 3.4.5 dùng lưới thưa hơn là 31 × 31 điểm do khối lượng tính toán của mô hình phản xạ lớn hơn khoảng hai bậc độ lớn; đây là nguyên nhân khiến giá trị mật độ dung lượng vùng ở Bảng 3.3 lệch khoảng 4% so với Bảng 3.2 tại cùng cấu hình, và độ lệch này không ảnh hưởng tới kết luận vì mục 3.4.5 chỉ so sánh tương đối giữa hai trường hợp trên cùng một lưới. Các kết quả liên quan tới người dùng ngẫu nhiên ở mục 3.4.3 và 3.4.6 được lấy trung bình trên 200 lần thả người dùng độc lập, mỗi lần 32 người dùng, tức 6400 mẫu cho mỗi cấu hình; bộ sinh số ngẫu nhiên dùng hạt giống cố định để kết quả tái lập được. Khoảng tin cậy 95% của các giá trị phân vị được ước lượng bằng phương pháp bootstrap với 2000 lần lấy mẫu lại.

3.4.2. Ảnh hưởng của nhiễu liên tế bào và tái sử dụng tần số

Phân bố tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tạp âm trong mạng 16 tế bào được so sánh ở Hình 3.2 cho hai phương án tái sử dụng tần số.



Hình 3.2: Phân bố SINR trong mạng VLC attocell 16 tế bào với K = 1 và K = 4.

Khác biệt giữa hai phương án rất lớn. Khi tất cả các tế bào dùng chung băng thông, mạng rơi vào trạng thái giới hạn bởi nhiễu: SINR trung bình chỉ đạt 5,0 dB và giảm xuống -9,5 dB tại vùng biên giữa các tế bào, tức không đủ cho cả điều chế bậc thấp nhất. Khi áp dụng tái sử dụng tần số K = 4, SINR trung bình tăng lên 53,6 dB và giá trị thấp nhất vẫn đạt 21,9 dB. Mật độ dung lượng vùng tương ứng tăng từ 0,6 lên 2,0 Mbit/s/m^2, nghĩa là dù mỗi tế bào chỉ còn một phần tư băng thông, hiệu quả tổng thể vẫn cao hơn ba lần.

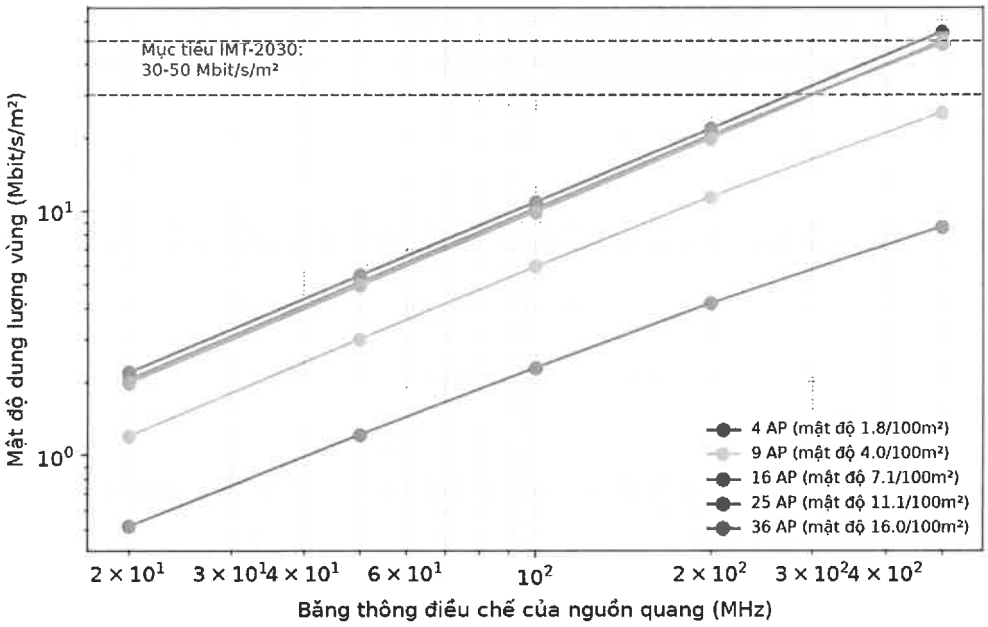
Các giá trị SINR nêu trên ứng với băng thông nguồn quang 20 MHz. Theo cơ chế đã phân tích ở mục 3.2, cùng cấu hình 16 điểm truy nhập với K = 4 sẽ cho SINR trung bình thấp hơn khi băng thông tăng, cụ thể là 45,6 dB ở 100 MHz như Bảng 3.3 sẽ chỉ ra. Mọi so sánh SINR trong đề án vì thế đều thực hiện ở cùng một mức băng thông.

Yếu tố quyết định hiệu năng của mạng VLC nhiều tế bào là quản lý nhiễu liên tế bào, không phải công suất phát. Điều này khác hẳn phân tích một liên kết đơn lẻ,

nơi hệ thống luôn giới hạn bởi tạp âm và SINR rất cao. Các khảo sát tiếp theo đều dùng K = 4.

3.4.3. Mật độ dung lượng vùng và tốc độ người dùng so với chỉ tiêu IMT-2030

Mật độ dung lượng vùng đạt được theo băng thông điều chế của nguồn quang và mật độ điểm truy nhập được biểu diễn ở Hình 3.3, đặt cạnh hai giá trị mục tiêu 30 và 50 Mbit/s/m^2 mà IMT-2030 nêu làm ví dụ.



Hình 3.3: Mật độ dung lượng vùng của mạng VLC so với chỉ tiêu IMT-2030.

Các giá trị số tương ứng được trình bày ở Bảng 3.2.

Bảng 3.2: Mật độ dung lượng vùng (Mbit/s/m^2) theo băng thông nguồn quang và số điểm truy nhập, K = 4

Số điểm truy nhập	20 MHz	50 MHz	100 MHz	200 MHz	500 MHz
4	0,5	1,2	2,3	4,2	8,6
9	1,2	3,0	5,9	11,4	25,3
16	2,0	5,1	10,2	20,4	48,6
25	2,2	5,4	10,9	21,7	54,1

Số điểm truy nhập	20 MHz	50 MHz	100 MHz	200 MHz	500 MHz
36	2,0	5,0	9,9	19,8	49,5

Bảng này cho ba nhận xét.

Trước hết là về linh kiện phổ thông. Với đèn LED phủ phốt-pho băng thông điều chế khoảng 20 MHz, mạng VLC chỉ đạt tối đa 2,2 Mbit/s/m^2, kém mục tiêu IMT-2030 từ mười lăm đến hai mươi lăm lần. Hạ tầng chiếu sáng hiện hữu, nếu giữ nguyên linh kiện, không thể đáp ứng chỉ tiêu mật độ dung lượng vùng của 6G. Con số đó cũng cho thấy giới hạn thực sự của VLC không nằm ở phổ tần vốn rất dồi dào mà nằm ở băng thông điều chế của nguồn quang.

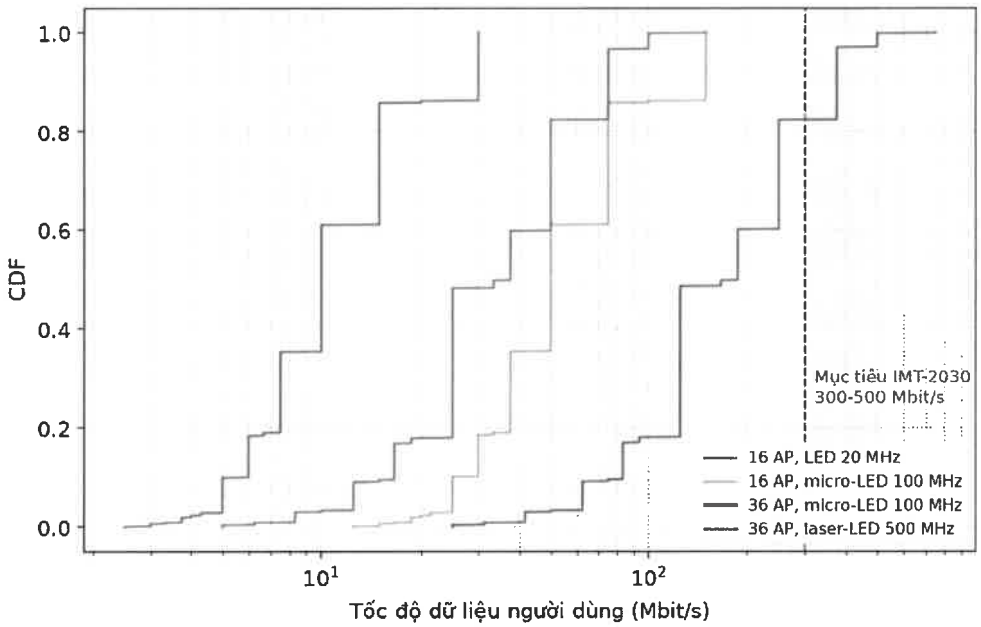
Tiếp theo là về nguồn quang thế hệ mới. Ở băng thông 500 MHz, cấu hình 25 điểm truy nhập đạt 54,1 Mbit/s/m^2, vượt cả hai giá trị ví dụ 30 và 50 Mbit/s/m^2 của IMT-2030. Cấu hình 16 điểm truy nhập đạt 48,6 Mbit/s/m^2, vượt mức 30 nhưng còn thiếu khoảng 3% so với mức 50. VLC do đó đáp ứng được chỉ tiêu mật độ dung lượng vùng, với điều kiện bắt buộc là nguồn quang thế hệ mới kết hợp mật độ tế bào đủ cao; riêng ở mức mục tiêu 50 Mbit/s/m^2 thì 16 điểm truy nhập trên 225 m^2 là chưa đủ.

Hai kết quả trên có phạm vi hiệu lực cần nêu rõ. Các giá trị trong Bảng 3.2 chỉ tính với thành phần tia thẳng; phần phản xạ được kiểm chứng riêng ở mục 3.4.5. Mô hình cũng giả thiết kênh phẳng trong mỗi sóng mang con, tức bỏ qua nhiễu liên ký tự. Giả thiết sau được biện minh trong các nghiên cứu về mạng attocell với nguồn quang khoảng 20 MHz, vì khi đó chu kỳ ký hiệu dài hơn trải trễ căn quân phương nhiều lần và công suất nhiễu liên ký tự thấp hơn thành phần tia thẳng trên 30 dB. Nhưng các mô hình kênh tham chiếu chuẩn hóa cho môi trường trong nhà cho trải trễ căn quân phương khoảng 8 đến 19 ns, tập trung quanh 10 đến 15 ns [24]. Ở cấu hình 500 MHz, chu kỳ ký hiệu của một sóng mang đơn tiến gần tới trải trễ đó, nên nhiễu liên ký tự không còn bỏ qua được nếu dùng điều chế đơn sóng mang. Bảng 3.2 vì vậy chỉ có hiệu lực với hệ thống dùng OFDM quang có khoảng bảo vệ đủ dài, đúng cấu hình DCO-OFDM đã nêu ở mục 3.2. Thêm một lý do nữa để khẳng định điều chế đa sóng mang là bắt buộc với VLC tốc độ cao.

Con số 48,6 Mbit/s/m^2 còn khớp với công bố quốc tế. Chen và cộng sự khảo sát mạng attocell quang với bán kính tế bào 2 m và băng thông 501 MHz đã báo cáo mật độ dung lượng vùng 49 Mbit/s/m^2 [19], sai lệch dưới 1% so với kết quả của đề án ở cấu hình 16 điểm truy nhập, nguồn quang 500 MHz. Đây là một kiểm chứng chéo cho mô hình và bộ tham số đã dùng.

Nhận xét cuối cùng, và cũng là nhận xét ít được nêu trong tài liệu: mật độ dung lượng vùng không tăng đơn điệu theo số điểm truy nhập. Giá trị đạt cực đại tại 25 điểm truy nhập rồi giảm nhẹ ở 36 điểm, vì khi các tế bào tiến sát nhau thì nhiễu liên tế bào tăng nhanh hơn lợi ích từ tái sử dụng không gian. Tồn tại một mật độ triển khai tối ưu, và trong kịch bản khảo sát nó rơi vào khoảng 11 điểm truy nhập trên 100 m^2 sàn.

Chỉ tiêu tốc độ người dùng trải nghiệm, định nghĩa là phân vị 5% của phân bố tốc độ người dùng, được khảo sát ở Hình 3.4. Mỗi cấu hình được đánh giá trên 200 lần thả 32 người dùng ngẫu nhiên độc lập, tổng cộng 6400 mẫu, tài nguyên của mỗi tế bào chia đều cho số người dùng thuộc tế bào đó.



Hình 3.4: Phân bố tốc độ người dùng so với chỉ tiêu trải nghiệm IMT-2030.

Cấu hình 16 điểm truy nhập với LED 20 MHz chỉ đạt tốc độ trung vị 10,0 Mbit/s và phân vị 5% là 5,0 Mbit/s. Ngay cấu hình tốt nhất trong khảo sát, 36 điểm truy nhập với nguồn quang 500 MHz, cũng chỉ đạt trung vị 187,5 Mbit/s và phân vị 5% là 62,5 Mbit/s, còn xa mục tiêu 300-500 Mbit/s của IMT-2030. Khoảng tin cậy 95% của cả ba giá trị phân vị nói trên đều thu về đúng giá trị điểm, tức độ bất định thống kê không đáng kể; lý do là tốc độ người dùng chỉ nhận một tập giá trị rời rạc theo mức điều chế M-QAM, nên phân vị rất ổn định giữa các lần lấy mẫu. Ở cấu hình một luồng dữ liệu trên mỗi tế bào, VLC vì vậy chưa đáp ứng chỉ tiêu tốc độ người dùng trải nghiệm, và khoảng cách năm đến tám lần này là khoảng cách thật chứ không phải sai số ngẫu nhiên. Để thu hẹp khoảng cách này cần các kỹ thuật nhân bội dung lượng đã nêu ở mục 2.5, cụ thể là ghép kênh theo bước sóng với LED nhiều màu hoặc MIMO quang, vì cả hai đều nhân tốc độ lên nhiều lần mà không cần tăng băng thông của từng nguồn.

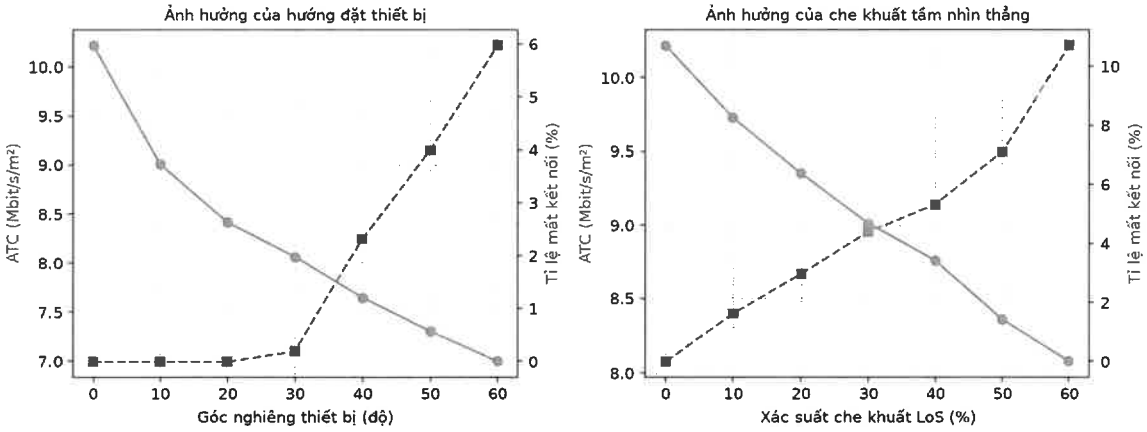
3.4.4. Độ nhạy với hướng đặt thiết bị và che khuất

Các kết quả trên giả thiết bộ thu hướng thẳng lên trần và không bị che khuất. Giả thiết này không phản ánh thực tế. Một nghiên cứu đo đạc trên 40 người dùng với 222 bộ dữ liệu cho thấy góc nghiêng của thiết bị cầm tay là biến ngẫu nhiên có giá trị trung bình khoảng 41 độ khi người dùng ngồi và khoảng 30 độ khi người dùng đi lại, với độ lệch chuẩn dưới 9 độ [22]. Dải khảo sát từ 0 đến 60 độ dưới đây do đó bao trùm cả hai trường hợp thực tế này. Hình 3.5 khảo sát ảnh hưởng của góc nghiêng và của che khuất với cấu hình 16 điểm truy nhập, nguồn quang 100 MHz.

Khi thiết bị nghiêng từ 0 đến 60 độ, mật độ dung lượng vùng giảm từ 10,2 xuống 7,0 Mbit/s/m^2, tương ứng mức suy giảm 31%, đồng thời tỉ lệ vị trí mất kết nối tăng từ 0 lên 6,0%. Khi xác suất che khuất tầm nhìn thẳng tăng từ 0 đến 60%, mật độ dung lượng vùng giảm từ 10,2 xuống 8,1 Mbit/s/m^2 nhưng tỉ lệ mất kết nối tăng mạnh lên 10,7%.

Hai yếu tố này đánh vào độ tin cậy nhiều hơn là vào dung lượng: dung lượng tổng chỉ giảm khoảng một phần ba, trong khi tỉ lệ mất kết nối tăng từ 0 lên trên 10%.

Đối chiếu với chỉ tiêu độ tin cậy $1\text{-}10^{-5}$ đến $1\text{-}10^{-7}$ của IMT-2030, một mạng VLC thuần túy không thể đạt yêu cầu. Hai yếu tố còn tác động cộng gộp: kết quả trên khảo sát riêng từng yếu tố, còn khi thiết bị vừa nghiêng vừa bị che khuất, như cấu hình ở mục 3.4.6, tỉ lệ mất kết nối cao hơn ngay cả khi mật độ điểm truy nhập lớn hơn. Đó là luận cứ định lượng cho sự cần thiết của lớp RF bổ trợ trong mô hình đa kết nối ở mục 3.3: lớp RF có mặt để bảo đảm độ tin cậy và tính liên tục dịch vụ, không phải để tăng dung lượng.



Hình 3.5: Độ nhạy của mạng VLC với hướng đặt thiết bị và che khuất.

3.4.5. Kiểm chứng ảnh hưởng của thành phần phản xạ

Các kết quả ở những mục trên được tính với thành phần tia thẳng. Để đánh giá mức độ hợp lệ của giả thiết này, phần dưới đây bổ sung thành phần phản xạ bậc một theo mô hình đã trình bày ở mục 2.2: bốn bức tường được chia thành các phần tử, mỗi phần tử đóng vai trò một nguồn Lambertian thứ cấp với hệ số phản xạ 0,7. Bảng 3.3 so sánh kết quả trong hai trường hợp, với cấu hình 16 điểm truy nhập, nguồn quang 100 MHz.

Bảng 3.3: Ảnh hưởng của thành phần phản xạ tới hiệu năng mạng

Thành phần kênh xét đến	**SINR trung bình**	**SINR thấp nhất**	**Mật độ dung lượng vùng**
Chỉ tia thẳng	45,64 dB	21,62 dB	9,81 Mbit/s/m^2
Tia thẳng và phản xạ bậc một	44,08 dB	21,62 dB	9,73 Mbit/s/m^2

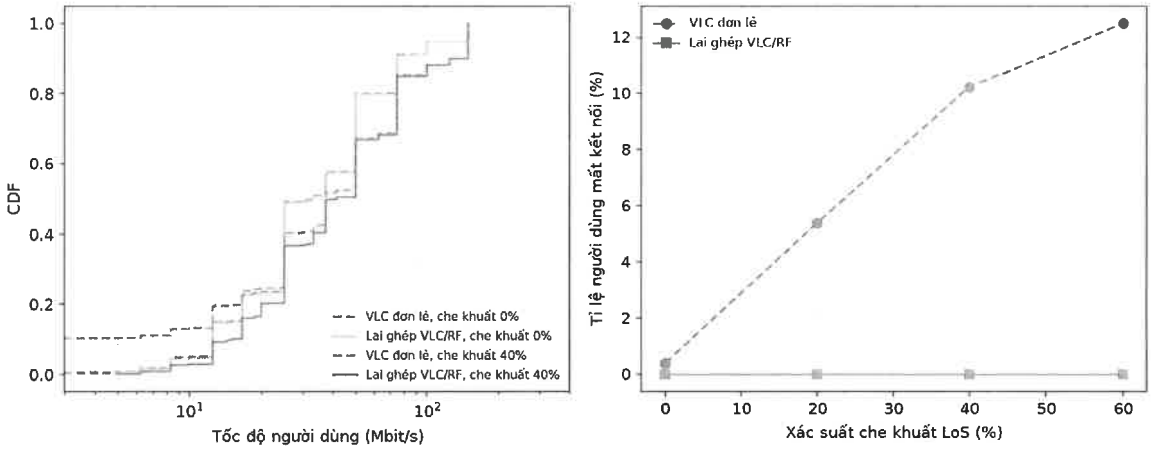
Hai hàng của Bảng 3.3 được tính trên lưới 31 × 31 điểm thu như đã nêu ở mục 3.4.1. Vì vậy mật độ dung lượng vùng ở hàng thứ nhất là 9,81 Mbit/s/m^2, thấp hơn khoảng 4% so với 10,2 Mbit/s/m^2 của cùng cấu hình trong Bảng 3.2 vốn dùng lưới 45 × 45. Chênh lệch đó đến từ độ mịn lấy mẫu không gian chứ không phải từ khác biệt mô hình, và không ảnh hưởng tới mục này vì phép so sánh ở đây là so sánh tương đối giữa hai hàng trên cùng một lưới.

Công suất phản xạ chiếm trung bình 4,8% tổng công suất thu. Điều bất ngờ là khi đưa thành phần phản xạ vào, SINR trung bình lại giảm 1,56 dB thay vì tăng. Lý do: phản xạ bổ sung công suất cho cả tín hiệu hữu ích lẫn nhiễu từ các tế bào đồng kênh, và trong cấu hình nhiều tế bào thì phần đóng góp vào nhiễu lớn hơn. Mức chênh lệch mật độ dung lượng vùng chỉ 0,8%, không làm thay đổi kết luận nào ở mục 3.4.3.

Kết quả này thống nhất với các nghiên cứu về mạng attocell: với bộ thu hướng lên trần và nhiều điểm truy nhập, thành phần tia thẳng chiếm ưu thế nên bỏ qua phản xạ chỉ gây sai số nhỏ [19]. Kết luận đó chỉ đúng cho bộ thu hướng lên. Khi thiết bị nghiêng nhiều hoặc mất hẳn tầm nhìn thẳng, tỉ trọng thành phần phản xạ tăng lên và giả thiết không còn dùng được.

3.4.6. Đánh giá cấu hình lai ghép VLC/RF

Các kết quả từ mục 3.4.2 đến 3.4.5 đều xét mạng VLC hoạt động độc lập. Mục này đánh giá định lượng lợi ích của cơ chế đa kết nối đã phân tích ở mục 3.3, bằng cách bổ sung một điểm truy nhập vô tuyến có dung lượng hiệu dụng 100 Mbit/s dùng chung. Người dùng nào mất liên kết quang, do che khuất hoặc do thiết bị nghiêng ra ngoài vùng nhìn, sẽ được chuyển sang lớp vô tuyến. Cấu hình khảo sát gồm 36 điểm truy nhập, nguồn quang 100 MHz, thiết bị nghiêng 30 độ theo giá trị đo đạc thực tế nêu ở mục 3.4.4. Đây là cấu hình khắc nghiệt hơn mục 3.4.4 vì có đồng thời cả nghiêng thiết bị lẫn che khuất, nên tỉ lệ mất kết nối cao hơn dù mật độ điểm truy nhập lớn hơn.



Hình 3.6: So sánh mạng VLC đơn lẻ và mạng lai ghép VLC/RF.

Kết quả theo xác suất che khuất, kèm khoảng tin cậy 95% của tốc độ phân vị 5%, được trình bày ở Bảng 3.4.

Bảng 3.4: Hiệu quả của cơ chế đa kết nối VLC/RF theo mức độ che khuất (36 điểm truy nhập, nguồn quang 100 MHz, thiết bị nghiêng 30 độ, 6400 mẫu mỗi hàng)

Xác suất che khuất	Phân vị 5%, VLC đơn lẻ (KTC 95%)	Phân vị 5%, lai ghép (KTC 95%)	Mất kết nối, VLC đơn lẻ	Mất kết nối, lai ghép
0%	8,3 Mbit/s [8,3 ; 12,5]	12,5 Mbit/s [8,3 ; 12,5]	0,5%	0%
20%	0 [0 ; 6,2]	12,5 Mbit/s [12,5 ; 12,5]	5,2%	0%
40%	0 [0 ; 0]	12,5 Mbit/s [12,5 ; 12,5]	8,7%	0%
60%	0 [0 ; 0]	12,5 Mbit/s [12,5 ; 12,5]	11,5%	0%

Vai trò của lớp vô tuyến hiện ra rất rõ. Với mạng VLC đơn lẻ, chỉ cần xác suất che khuất đạt 20% thì tốc độ ở phân vị 5% đã về 0, nghĩa là nhóm 5% người dùng kém nhất mất dịch vụ hoàn toàn; ở mức che khuất 60%, tỉ lệ mất kết nối lên tới 11,5%. Bổ sung lớp vô tuyến thì tỉ lệ mất kết nối về 0 trong mọi trường hợp khảo sát và tốc độ phân vị 5% giữ ổn định ở 12,5 Mbit/s.

Một lưu ý khi đọc bảng: tốc độ người dùng trong mô hình chỉ nhận một tập giá trị rời rạc, vì mức điều chế M-QAM rời rạc và tài nguyên tế bào chia đều cho số

người dùng trong tế bào. Với băng thông mỗi tế bào 25 MHz, một người dùng chiếm trọn tế bào sẽ nhận 25,0; 50,0; 75,0; 100,0; 125,0 hoặc 150,0 Mbit/s tương ứng các mức từ 4-QAM đến 4096-QAM, rồi chia tiếp cho số người dùng cùng tế bào. Các giá trị phân vị trong bảng do đó nhảy bậc thay vì biến thiên liên tục, và khoảng tin cậy ở hàng đầu tiên trải trên đúng hai bậc liền kề. Đó là đặc điểm của mô hình, không phải dấu hiệu kết quả thiếu ổn định.

Lớp vô tuyến hầu như không làm tăng dung lượng tổng: 100 Mbit/s của điểm truy nhập RF là rất nhỏ so với tổng dung lượng của 36 tế bào quang. Giá trị của nó nằm ở chỗ khác, là cắt bỏ hoàn toàn phần đuôi dưới của phân bố tốc độ. Trong kiến trúc 6G, lớp RF vì thế giữ vai trò bảo đảm độ tin cậy và tính liên tục dịch vụ chứ không phải tăng tốc độ, đúng như lập luận định tính ở mục 3.3. Điều này cũng giải thích vì sao chuẩn IEEE 802.11bb được thiết kế thành một lớp vật lý bổ sung trong họ 802.11 thay vì một hệ thống riêng biệt.

3.4.7. Hiệu suất phổ, hiệu suất năng lượng và mật độ kết nối

Ba chỉ tiêu còn lại của IMT-2030 mà mô hình mạng đã xây dựng cho phép lượng hóa là hiệu suất phổ, tính bền vững đo bằng bit/Joule và mật độ kết nối. Bảng 3.5 tổng hợp kết quả tính cho bốn cấu hình đại diện.

Hiệu suất phổ chỉ đối chiếu được khi có một mốc xác định. Khuyến nghị ITU-R M.2410-0 quy định hiệu suất phổ trung bình đường xuống của IMT-2020 trong kịch bản Indoor Hotspot - eMBB là 9 bit/s/Hz [31], nên mục tiêu gấp 1,5 đến 3 lần của IMT-2030 tương ứng khoảng 13,5 đến 27 bit/s/Hz. Mạng VLC trong khảo sát đạt 2,5 đến 5,8 bit/s/Hz, bằng khoảng một phần tư đến hai phần ba mốc IMT-2020 và kém mục tiêu IMT-2030 từ hai đến mười lần. Khoảng cách này không đến từ cấu hình khảo sát mà từ nguyên lý điều chế: ràng buộc đối xứng Hermit của DCO-OFDM một luồng làm mất một nửa băng thông, nên ngay cả khi toàn phòng đạt mức 4096-QAM thì trần hiệu suất phổ vẫn chỉ là 6 bit/s/Hz. Cải thiện linh kiện do đó không giải quyết được chỉ tiêu này. Muốn đạt thì phải dùng MIMO quang với ít nhất ba luồng

không gian song song, hoặc ghép kênh theo bước sóng; đây là luận cứ độc lập củng cố khuyến nghị đã nêu ở mục 3.4.3.

Bảng 3.5: Hiệu suất phổ, hiệu suất năng lượng và mật độ kết nối của mạng VLC (K = 4; mật độ kết nối tính với tốc độ 100 kbit/s cho mỗi thiết bị)

Cấu hình	Hiệu suất phổ (bit/s/Hz)	Tổng dung lượng (Gbit/s)	Hiệu suất năng lượng toàn phần (Mbit/J)	Hiệu suất năng lượng biên (Mbit/J)	Mật độ kết nối (thiết bị/km^2)
16 AP, 20 MHz	5,75	0,46	0,91	9,6	$2{,}0 \times 10^7$
16 AP, 100 MHz	5,75	2,30	4,55	47,9	$1{,}0 \times 10^8$
25 AP, 500 MHz	3,89	12,17	15,42	162,3	$5{,}4 \times 10^8$
36 AP, 500 MHz	2,48	11,14	9,80	103,1	$5{,}0 \times 10^8$

Một điểm dễ gây hiểu nhầm trong Bảng 3.5 là hiệu suất phổ giảm từ 5,75 xuống 2,48 bit/s/Hz khi tăng mật độ điểm truy nhập và băng thông, trong khi tổng dung lượng lại tăng. Hai xu hướng này không mâu thuẫn. Mật độ tế bào cao làm tăng nhiễu liên tế bào, băng thông lớn làm tăng phương sai nhiễu, cả hai đều kéo mức điều chế trung bình xuống; nhưng số tế bào nhiều hơn và băng thông rộng hơn bù lại nhiều hơn phần mất mát. Mạng VLC vì vậy đạt dung lượng bằng tái sử dụng không gian và mở rộng băng thông, không phải bằng hiệu suất phổ.

Với hiệu suất năng lượng, kết quả phụ thuộc hoàn toàn vào cách quy đổi nên phải nêu rõ giả thiết. Lấy hiệu suất điện - quang của bộ đèn LED bằng 0,35, một bộ đèn phát 10 W quang tiêu thụ khoảng 28,6 W điện cho riêng chức năng chiếu sáng; mạch kích và front-end điều chế ước tính thêm 3 W cho mỗi điểm truy nhập, tổng cộng 31,6 W. Quy toàn bộ công suất đèn cho chức năng truyền tin thì mạng VLC đạt 0,91 đến 15,4 Mbit/J, kém một điểm truy nhập Wi-Fi tham chiếu 1 Gbit/s tiêu thụ 12 W, tương đương 83 Mbit/J, từ năm đến chín mươi lần. Chỉ quy phần công suất tăng thêm so với hệ chỉ chiếu sáng, tức 3 W cho mỗi điểm truy nhập, thì cấu hình tốt nhất đạt 162 Mbit/J, cao gần gấp đôi mốc Wi-Fi.

Hai con số trái ngược đó cho phép phát biểu lại một lập luận hay bị nêu thiếu chính xác. Truyền dữ liệu bằng ánh sáng không miễn phí về năng lượng như cách nói thường gặp rằng đèn vốn đã bật, vì bổ sung chức năng truyền tin vẫn làm công suất mỗi bộ đèn tăng khoảng 10,5%. Ở chiều ngược lại, cũng không thể kết luận VLC kém hiệu quả năng lượng, vì phần lớn công suất trong phép tính toàn phần đã phải chi cho chiếu sáng bất kể có truyền tin hay không. Phát biểu đúng là chi phí năng lượng tăng thêm để có một lớp truy nhập dung lượng cao rất nhỏ, và lợi thế này chỉ hiện thực hóa ở những không gian vốn đã phải chiếu sáng liên tục.

Mật độ kết nối trong bảng được suy ra từ dung lượng: mật độ dung lượng vùng nhân với diện tích một ki-lô-mét vuông sàn, chia cho tốc độ yêu cầu của mỗi thiết bị. Ở mức 100 kbit/s cho mỗi thiết bị, mức thường gặp với cảm biến trong kịch bản truyền thông mật độ lớn, ngay cấu hình dùng LED phốt-pho thông dụng cũng đạt 2,0 $\times$ 10^7 thiết bị/km^2, nằm trong dải mục tiêu 10^6 đến 10^8 của IMT-2030; các cấu hình nguồn quang băng rộng đạt tới 5,4 $\times$ 10^8, vượt trần mục tiêu. Con số này là cận trên và cần ba lưu ý khi diễn giải. Nó tính trên một ki-lô-mét vuông diện tích sàn được chiếu sáng chứ không phải diện tích địa lý, hai đại lượng khác nhau đáng kể ở nhà cao tầng theo hướng có lợi cho VLC và không áp dụng được ngoài trời. Nó chưa xét giới hạn của lớp điều khiển truy nhập khi số thiết bị đồng thời rất lớn, vốn mới là nút thắt thực sự của mạng mật độ cao. Và nó giả thiết mọi thiết bị đều nằm trong tầm nhìn thẳng của một điểm truy nhập, điều kiện khó bảo đảm với cảm biến đặt thấp hoặc bị che khuất. Đề án vì vậy kết luận VLC đáp ứng chỉ tiêu mật độ kết nối về mặt dung lượng, kèm ba điều kiện trên.

3.5. Đối chiếu khả năng đáp ứng chỉ tiêu IMT-2030 của công nghệ VLC

Các kết quả mô phỏng ở mục 3.4 cùng phân tích đặc tính công nghệ ở Chương 2 được tổng hợp ở Bảng 3.6 và Bảng 3.7, đối chiếu trực tiếp khả năng của VLC với các chỉ tiêu IMT-2030 đã nêu ở Bảng 1.2. Hai bảng này trả lời bài toán nghiên cứu đặt ra ở mục 1.6. Việc tách làm hai bảng theo loại căn cứ là có chủ ý: Bảng 3.6 gồm

các chỉ tiêu đề án tự đánh giá được bằng mô phỏng, Bảng 3.7 gồm các chỉ tiêu chỉ có thể kết luận từ đặc tính vật lý của công nghệ hoặc từ kết quả đã công bố.

Bảng 3.6: Các chỉ tiêu IMT-2030 được đánh giá bằng mô phỏng của đề án

Chỉ tiêu IMT-2030	Mục tiêu	Khả năng của VLC	Đánh giá	Căn cứ
Mật độ dung lượng vùng	30 và 50 Mbit/s/m^2	54,1 Mbit/s/m^2 với nguồn 500 MHz, 25 AP; chỉ 2,2 với LED phốt-pho	Đáp ứng, có điều kiện	Mục 3.4.3
Tốc độ người dùng trải nghiệm	300 và 500 Mbit/s	62,5 Mbit/s ở phân vị 5%, cấu hình tốt nhất	Chưa đáp ứng	Mục 3.4.3
Độ tin cậy	1-10^{-5} đến 1-10^{-7}	mất kết nối tới 11,5% nếu VLC đơn lẻ; về 0% khi lai ghép RF	Chỉ đáp ứng khi có lớp RF	Mục 3.4.4 và 3.4.6
Hiệu suất phổ	gấp 1,5-3 lần IMT-2020, tức 13,5-27 bit/s/Hz	2,5-5,8 bit/s/Hz; trần lý thuyết một luồng DCO-OFDM là 6 bit/s/Hz	Không đáp ứng nếu không có MIMO quang	Mục 3.4.7
Mật độ kết nối	10^6-10^8 thiết bị/km^2	$2,0 \times 10^7$ đến $5,4 \times 10^8$ thiết bị/km^2 sàn, với 100 kbit/s mỗi thiết bị	Đáp ứng, có điều kiện	Mục 3.4.7
Tính bền vững	đo bằng bit/Joule	0,9-15,4 Mbit/J nếu quy toàn bộ công suất đèn; 9,6-162 Mbit/J nếu chỉ quy công suất tăng thêm	Lợi thế biên, không phải lợi thế tuyệt đối	Mục 3.4.7

Cách chia hai bảng nói trên phân biệt rõ hai loại căn cứ. Trong mười ba chỉ tiêu được đối chiếu, sáu chỉ tiêu ở Bảng 3.6 được đánh giá bằng mô phỏng riêng của đề án, bảy chỉ tiêu ở Bảng 3.7 dựa trên đặc tính vật lý của công nghệ hoặc kết quả đã công bố.

Bảng 3.7: Các chỉ tiêu IMT-2030 đánh giá từ đặc tính công nghệ và tài liệu đã công bố

Chỉ tiêu IMT-2030	Mục tiêu	Khả năng của VLC	Đánh giá	Căn cứ
Tốc độ đỉnh	50, 100, 200 Gbit/s	cao nhất đã công bố cho VLC là cỡ 40 Gbit/s dùng laser ghép kênh	Chưa đáp ứng	Mục 2.2
Độ trễ giao diện vô tuyến	0,1-1 ms	lớp vật lý dưới 35 ns, nhưng đo thực tế cả ngăn xếp là 1,08 ms	Ở ranh giới trên	Tài liệu [29], [30]
Định vị	độ chính xác 1-10 cm	các hệ thực nghiệm đạt mức centimet	Đáp ứng tốt	Mục 3.6
Tính di động	500-1.000 km/h	bán kính tế bào vài mét, tần suất chuyển giao rất cao	Không đáp ứng	Suy luận từ mô hình, mục 3.2
Vùng phủ	không nêu giá trị số	chỉ trong nhà, không xuyên tường	Hạn chế	Đặc tính vật lý, mục 2.4
Bảo mật và khả năng phục hồi	không nêu giá trị số	ánh sáng không xuyên tường nên khó nghe lén từ ngoài phòng	Lợi thế định tính	Mục 2.4
Khả năng liên vận hành	không nêu giá trị số	đã có chuẩn ITU-T G.9991 và IEEE 802.11bb cho phép hoạt động cùng hệ sinh thái 802.11	Có cơ sở, chưa kiểm chứng thực nghiệm	Mục 2.6

Hai trong mười lăm năng lực của IMT-2030 không có mặt trong bảng là năng lực cảm biến và năng lực liên quan AI. Lý do là cả hai đều không được M.2160-0 gán giá trị số, đồng thời việc đánh giá chúng đòi hỏi mô hình hệ thống nằm ngoài phạm vi đề án: năng lực cảm biến cần mô hình bài toán phát hiện và ước lượng tham số mục tiêu, còn năng lực liên quan AI cần mô hình khối lượng tính toán phân tán trên

mạng. Đề án nêu rõ giới hạn này thay vì suy đoán. Về mặt định tính, có thể nhận xét rằng VLC có tiềm năng ở năng lực cảm biến do cùng khai thác được hạ tầng đèn cố định như bài toán định vị, còn ở năng lực liên quan AI thì VLC không khác biệt so với các lớp truy nhập khác vì đây là đặc tính của mạng lõi chứ không phải của giao diện vô tuyến.

Chỉ tiêu độ trễ dễ bị kết luận sai nên cần diễn giải thận trọng. Xét thuần túy lớp vật lý, liên kết quang có độ trễ rất nhỏ: một thử nghiệm truyền video không nén qua liên kết VCSEL đo được độ trễ đầu cuối dưới 35 ns [30], thấp hơn mục tiêu IMT-2030 khoảng bốn bậc độ lớn. Nhưng khi đo trên hệ thống LiFi thương mại với đầy đủ ngăn xếp giao thức, độ trễ một chiều là khoảng 1,08 ms [29], nằm ngay ranh giới trên của dải mục tiêu 0,1-1 ms và tương đương Wi-Fi 6 đo trong cùng điều kiện. Chênh lệch bốn bậc đó đến từ chỗ chuẩn IEEE 802.11bb kế thừa lớp MAC của 802.11 với cơ chế truy nhập cạnh tranh, nên phần lớn độ trễ nằm ở lớp MAC và ngăn xếp giao thức chứ không nằm ở môi trường truyền. Môi trường ánh sáng vì vậy không phải nút thắt về độ trễ, nhưng muốn xuống dưới 0,1 ms thì phải thiết kế lại cơ chế truy nhập, không thể trông vào ưu thế lớp vật lý.

Kết luận cốt lõi của đề án nằm ở sự phân hóa mà bảng này cho thấy. VLC đáp ứng được chỉ tiêu định vị, chỉ tiêu mật độ dung lượng vùng và chỉ tiêu mật độ kết nối, hai chỉ tiêu sau kèm điều kiện về linh kiện và mật độ tế bào; VLC cũng có lợi thế định tính về bảo mật và lợi thế biên về hiệu suất năng lượng. Ở phía ngược lại, VLC không đạt chỉ tiêu tính di động, không đạt hiệu suất phổ khi dùng một luồng, không đạt độ tin cậy khi hoạt động độc lập, và còn cách xa ở tốc độ đỉnh cùng tốc độ người dùng trải nghiệm.

Các chỉ tiêu VLC đáp ứng được đều gắn với mật độ không gian, còn các chỉ tiêu VLC không đáp ứng được đều gắn với chất lượng của từng liên kết đơn lẻ hoặc với tính di động. Sự phân bố đó phản ánh đúng bản chất vật lý của công nghệ: thế mạnh của VLC là đặt được rất nhiều tế bào rất nhỏ trong một không gian, không phải năng lực của từng liên kết.

Từ đó rút ra kết luận về vai trò của VLC trong 6G. VLC không phải công nghệ truy nhập vạn năng, cũng không thay thế được lớp vô tuyến, mà là một lớp truy nhập chuyên biệt, phát huy giá trị cao nhất ở những nơi mật độ lưu lượng lớn, cự ly ngắn, thiết bị ít di chuyển và diễn ra trong nhà. Kết luận này khớp với thực tế định chế đã nêu ở mục 1.3: khung IMT-2030 của ITU-R không định danh VLC là công nghệ truy nhập ứng viên, việc chuẩn hóa diễn ra ở IEEE. Cách đặt vấn đề phù hợp do đó là tích hợp VLC như một lớp bổ trợ trong kiến trúc đa lớp của 6G, không phải xem nó là lựa chọn cạnh tranh với lớp vô tuyến.

3.6. Các ứng dụng chuyên biệt của VLC trong 6G

Ngoài kịch bản mạng truy nhập trong nhà, VLC còn có ba hướng ứng dụng chuyên biệt gắn với các kịch bản sử dụng khác của IMT-2030.

Hướng thứ nhất là định vị và cảm biến bằng ánh sáng, tương ứng kịch bản cảm biến - truyền thông tích hợp. Do vị trí các đèn LED cố định và biết trước, hệ thống ước lượng được vị trí thiết bị bằng cường độ tín hiệu thu, góc tới, độ lệch thời gian đến hoặc phương pháp lấy dấu vân tay, với độ chính xác cỡ centimet. Theo Bảng 3.7, định vị là chỉ tiêu VLC đáp ứng tốt nhất trong toàn bộ bộ chỉ tiêu IMT-2030, đồng thời là hướng ứng dụng khả thi thương mại nhất trong ngắn hạn. Khi hệ thống định vị được mở rộng thành liên kết hai chiều giữa thiết bị và hạ tầng chiếu sáng, phục vụ quảng bá thông tin theo ngữ cảnh và điều khiển thiết bị, hướng ứng dụng này thường được gọi là VLC có tương tác; yêu cầu kỹ thuật cốt lõi của nó vẫn là bài toán đường lên và đồng bộ đã phân tích ở mục 3.3.

Hướng thứ hai là Internet vạn vật dựa trên ánh sáng (Light-based Internet of Things - LioT), tương ứng kịch bản truyền thông mật độ lớn. Hạ tầng chiếu sáng trong nhà máy hoặc tòa nhà thông minh trở thành mạng truy nhập cho cảm biến, với ưu thế cách ly vật lý, không chiếm phổ vô tuyến và không gây nhiễu điện từ trong môi trường công nghiệp. Kết quả ở mục 3.4.7 cho thấy về mặt dung lượng, một mạng attocell dùng LED phốt-pho thông dụng đã đủ phục vụ khoảng 2×10^7 thiết bị trên mỗi ki-lô-mét vuông sàn ở tốc độ 100 kbit/s, nên nút thắt của hướng ứng dụng này

nằm ở lớp điều khiển truy nhập và ở bài toán đường lên chứ không nằm ở dung lượng. Khả năng kết hợp truyền dữ liệu với thu năng lượng ánh sáng phù hợp với yêu cầu thiết bị tuổi thọ pin dài hoặc không dùng pin mà M.2160-0 nêu trong kịch bản này.

Hướng thứ ba là truyền thông ánh sáng nhìn thấy dưới nước (Underwater VLC - UVLC), gắn với kịch bản kết nối phổ khắp ở khía cạnh mở rộng vùng phủ tới môi trường mà sóng vô tuyến gần như không truyền được. Nước biển có cửa sổ truyền dẫn ở dải xanh lam - lục khoảng 450-550 nm, cho phép liên kết tốc độ hàng chục đến hàng trăm Mbit/s ở cự ly vài chục mét, vượt xa truyền thông thủy âm về băng thông. Hạn chế đặc thù gồm hấp thụ, tán xạ theo độ đục của nước và yêu cầu định hướng giữa các thiết bị di động.

3.7. Thách thức và lộ trình triển khai

Kết quả đánh giá ở các mục trên cho phép xác định các thách thức theo thứ tự ưu tiên, thay vì liệt kê chung chung. Các thách thức chính gắn với kết quả định lượng tương ứng được tổng hợp ở Bảng 3.8.

Bảng 3.8: Thách thức chính và hướng giải quyết, sắp theo mức độ ưu tiên

Thách thức	Bằng chứng định lượng	Hướng giải quyết
Băng thông điều chế nguồn quang	LED phốt-pho 20 MHz chỉ đạt 2,2 Mbit/s/m^2, kém mục tiêu 15-25 lần	micro-LED, nguồn laser, kỹ thuật cân bằng
Hiệu suất phổ của một luồng	trần lý thuyết 6 bit/s/Hz, kém mục tiêu 13,5-27 bit/s/Hz	MIMO quang từ ba luồng trở lên, ghép kênh bước sóng
Nhiễu liên tế bào	K = 1 cho SINR trung bình 5,0 dB, không dùng được	tái sử dụng tần số, phối hợp đa điểm
Tốc độ người dùng trải nghiệm	62,5 Mbit/s so với mục tiêu 300-500 Mbit/s	ghép kênh bước sóng, MIMO quang
Độ tin cậy khi che khuất	mất kết nối 10,7% khi chỉ che khuất, 11,5% khi có cả nghiêng thiết bị	đa kết nối với lớp RF, bố trí nhiều đèn
Đường lên và tính di động	bán kính tế bào vài mét	đường lên qua RF hoặc hồng ngoại

Trên cơ sở đó, lộ trình triển khai hợp lý gồm ba giai đoạn. Giai đoạn đầu tập trung kiểm chứng liên kết đơn với linh kiện phổ thông nhằm đối chiếu mô hình kênh

và mô hình nhiễu với đo đạc thực tế. Giai đoạn hai mở rộng thành mạng nhiều tế bào trong một phòng, kiểm chứng các kết quả về nhiễu liên tế bào và tái sử dụng tần số ở mục 3.4.2, đồng thời bổ sung đường lên để tạo hệ thống LiFi hoàn chỉnh theo IEEE 802.11bb. Giai đoạn ba tích hợp với hạ tầng mạng 6G thử nghiệm, tập trung vào cơ chế điều phối đa kết nối và chuyển giao dọc đã phân tích ở mục 3.3.

Về hạ tầng phụ trợ cho các giai đoạn trên, một vấn đề thực tế là mỗi điểm truy nhập VLC vừa cần đường truyền dẫn dung lượng cao vừa cần nguồn cấp. Kỹ thuật cấp nguồn qua sợi quang cho phép giải quyết đồng thời hai yêu cầu này trên cùng một sợi, qua đó đơn giản hóa việc bố trí điểm truy nhập trên trần và giữ được tính cách ly điện của hệ thống [5]; đây là hướng đáng xem xét khi triển khai mạng attocell mật độ cao như cấu hình 25 điểm truy nhập đã khảo sát ở mục 3.4.3.

Kết luận chương 3

Chương 3 đã xác định bốn kịch bản tích hợp VLC vào mạng 6G, xây dựng mô hình mạng nhiều tế bào có xét nhiễu liên tế bào, và mô phỏng đánh giá trực tiếp theo bộ chỉ tiêu IMT-2030.

Sáu kết quả chính đạt được như sau.

Một là, quản lý nhiễu liên tế bào có tính quyết định: tái sử dụng tần số K = 4 nâng SINR trung bình từ 5,0 lên 53,6 dB ở băng thông 20 MHz, và tăng mật độ dung lượng vùng hơn ba lần so với dùng chung băng thông.

Hai là, mạng VLC đạt 54,1 Mbit/s/m^2, thỏa mãn cả hai giá trị mục tiêu 30 và 50 Mbit/s/m^2 của IMT-2030, nhưng chỉ khi dùng nguồn quang băng thông 500 MHz với mật độ khoảng 11 điểm truy nhập trên 100 m^2; với LED phốt-pho thông dụng, giá trị đạt được kém mục tiêu 15 đến 25 lần. Kết quả này còn cho thấy tồn tại một mật độ triển khai tối ưu, vượt qua đó thì nhiễu liên tế bào tăng nhanh hơn lợi ích tái sử dụng không gian.

Ba là, VLC chưa đáp ứng chỉ tiêu tốc độ người dùng trải nghiệm, chỉ đạt 62,5 Mbit/s ở phân vị 5% so với mục tiêu 300 và 500 Mbit/s.

Bốn là, lớp vô tuyến bổ trợ là điều kiện cần để đạt độ tin cậy. Mạng VLC đơn lẻ có tới 11,5% người dùng mất kết nối khi thiết bị nghiêng 30 độ và che khuất ở mức 60%, và nhóm 5% người dùng kém nhất mất dịch vụ hoàn toàn ngay từ mức che khuất 20%; cơ chế đa kết nối VLC/RF đưa tỉ lệ này về 0 trong mọi trường hợp khảo sát, dù điểm truy nhập vô tuyến chỉ đóng góp không đáng kể vào dung lượng tổng.

Năm là, hiệu suất phổ là chỉ tiêu mà VLC gặp rào cản nguyên lý chứ không phải rào cản linh kiện. Do ràng buộc đối xứng Hermit của DCO-OFDM, hiệu suất phổ trần của một luồng là 6 bit/s/Hz, trong khi mục tiêu IMT-2030 quy đổi từ mốc 9 bit/s/Hz của IMT-2020 là 13,5 đến 27 bit/s/Hz. Do đó MIMO quang hoặc ghép kênh bước sóng là điều kiện bắt buộc chứ không phải tùy chọn nếu muốn đạt chỉ tiêu này.

Sáu là, về mật độ kết nối và tính bền vững, mạng VLC đạt từ $2{,}0 \times 10^7$ đến $5{,}4 \times 10^8$ thiết bị trên mỗi ki-lô-mét vuông sàn ở tốc độ 100 kbit/s cho mỗi thiết bị, nằm trong hoặc vượt dải mục tiêu; còn về năng lượng, việc bổ sung chức năng truyền tin làm công suất mỗi bộ đèn tăng khoảng 10,5%, tương ứng hiệu suất năng lượng biên đạt tới 162 Mbit/J, cao hơn mốc Wi-Fi tham chiếu, trong khi hiệu suất năng lượng toàn phần lại thấp hơn. Lợi thế bền vững của VLC vì vậy là lợi thế biên gắn với không gian vốn đã phải chiếu sáng.

Ngoài ra, kiểm chứng riêng cho thấy thành phần phản xạ chiếm 4,8% công suất thu và làm thay đổi mật độ dung lượng vùng dưới 1%, xác nhận giả thiết chỉ xét thành phần tia thẳng là chấp nhận được đối với cấu hình bộ thu hướng lên.

Từ đó, chương khẳng định vai trò của VLC trong 6G là một lớp truy nhập chuyên biệt cho môi trường trong nhà, hoạt động trong cơ chế đa kết nối với lớp vô tuyến, chứ không phải một công nghệ truy nhập độc lập hay thay thế.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Kết luận

Đề án "Nghiên cứu các giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trong mạng 6G" đã hoàn thành ba mục tiêu đề ra ở phần Mở đầu. Cụ thể, đề án đã thực hiện được các nội dung sau:

a. Hệ thống hóa bối cảnh và khung tham chiếu: làm rõ quá trình phát triển của mạng di động, sáu kịch bản sử dụng và mười lăm năng lực của IMT-2030 theo Khuyến nghị ITU-R M.2160-0, đồng thời xác định chính xác vị trí định chế của VLC, đó là một công nghệ bổ trợ được chuẩn hóa song song tại IEEE và ITU-T chứ không phải công nghệ truy nhập ứng viên của IMT theo định danh của ITU-R.

b. Hệ thống hóa cơ sở lý thuyết VLC: trình bày nguyên lý IM/DD, mô hình hệ thống và mô hình kênh Lambertian gồm cả thành phần phản xạ, các kỹ thuật điều chế từ OOK, PPM tới OFDM quang với ánh xạ M-QAM thích nghi, đặc tính kênh cùng ưu nhược điểm và tình hình chuẩn hóa.

c. Xây dựng mô hình và đánh giá định lượng: xây dựng mô hình mạng VLC nhiều tế bào trong nhà có xét nhiễu liên tế bào, tái sử dụng tần số, hướng đặt thiết bị, che khuất và thành phần phản xạ, cùng mô hình đa kết nối giữa lớp VLC và lớp vô tuyến; từ đó mô phỏng đánh giá và đối chiếu trực tiếp với mười ba trên mười lăm năng lực của IMT-2030.

Kết quả thu được phân hóa rõ rệt theo từng nhóm chỉ tiêu. VLC đáp ứng chỉ tiêu định vị ở mức centimet, chỉ tiêu mật độ dung lượng vùng với 54,1 Mbit/s/m^2 và chỉ tiêu mật độ kết nối tới $5{,}4 \times 10^8$ thiết bị trên mỗi ki-lô-mét vuông sàn, song hai chỉ tiêu sau chỉ đạt được khi dùng nguồn quang thế hệ mới băng thông khoảng 500 MHz với mật độ khoảng mười một điểm truy nhập trên một trăm mét vuông. Ở nhóm còn lại, VLC chỉ đạt 62,5 Mbit/s ở phân vị 5% so với mục tiêu 300 đến 500 Mbit/s về tốc độ người dùng trải nghiệm, không đạt chỉ tiêu hiệu suất phổ do trần lý thuyết của một luồng DCO-OFDM chỉ là 6 bit/s/Hz, và không đạt chỉ tiêu tính di động do bán kính tế bào chỉ vài mét.

Từ các số liệu trên rút ra ba kết luận. Thứ nhất, giới hạn thực sự của VLC không nằm ở tài nguyên phổ vốn rất dồi dào, mà nằm ở băng thông điều chế của nguồn quang và ở nhiễu liên tế bào; đây là lý do việc tái sử dụng nguyên trạng hạ tầng chiếu sáng hiện hữu không đủ để đáp ứng chỉ tiêu dung lượng của 6G. Thứ hai, lớp vô tuyến bổ trợ trong cấu hình lai ghép có vai trò bảo đảm độ tin cậy chứ không phải tăng dung lượng: nó gần như không làm thay đổi tổng dung lượng nhưng đưa tỉ lệ mất kết nối từ 11,5% về 0. Thứ ba, thế mạnh của VLC nằm ở mật độ không gian chứ không nằm ở chất lượng của từng liên kết, nên VLC phát huy giá trị cao nhất trong các kịch bản mật độ lưu lượng lớn, cự ly ngắn, thiết bị ít di chuyển và diễn ra trong nhà.

Vai trò phù hợp của VLC trong 6G do đó là một lớp truy nhập chuyên biệt trong kiến trúc đa lớp, hoạt động dưới sự điều phối chung cùng lớp vô tuyến, không phải một lựa chọn cạnh tranh hay thay thế lớp vô tuyến.

Về mặt phương pháp luận, đề án kết hợp nghiên cứu lý thuyết, phân tích - so sánh và mô phỏng theo hướng ứng dụng. Cách làm chú trọng gắn mỗi kết luận với một loại căn cứ xác định: phân biệt rõ đâu là kết quả mô phỏng của đề án, đâu là tổng hợp từ tài liệu, và nêu rõ những chỉ tiêu nằm ngoài phạm vi thay vì suy đoán. Mô hình cũng được kiểm chứng chéo với kết quả đã công bố của Chen và cộng sự, sai lệch dưới 1% ở cấu hình tương đương.

Hướng phát triển

Các kết quả trên cũng chỉ ra những vấn đề còn để ngỏ. Đề án đề xuất bốn hướng phát triển tiếp theo, sắp theo thứ tự ưu tiên rút ra từ Bảng 3.8:

a. MIMO quang và ghép kênh theo bước sóng. Đây là hướng ưu tiên cao nhất vì hai chỉ tiêu mà VLC còn cách xa nhất, gồm hiệu suất phổ và tốc độ người dùng trải nghiệm, đều bị chặn bởi giới hạn của cấu hình một luồng chứ không phải bởi chất lượng linh kiện. Cần xây dựng mô hình mạng attocell nhiều luồng có xét

tương quan kênh giữa các đèn đặt gần nhau, và xác định số luồng tối thiểu để đạt ngưỡng 13,5 bit/s/Hz.

b. Mô hình hóa lớp điều khiển truy nhập và tính di động. Các kết quả của đề án dừng ở lớp vật lý với giả thiết tài nguyên tế bào chia đều cho người dùng. Cần bổ sung mô hình lớp MAC, quỹ đạo di chuyển của người dùng và chi phí báo hiệu của chuyển giao, vì kết quả về độ trễ ở mục 3.5 cho thấy nút thắt nằm ở lớp MAC chứ không nằm ở môi trường truyền.

c. Thuật toán điều phối đa kết nối VLC/RF. Cơ chế chuyển giao trong đề án là chuyển giao theo ngưỡng khi mất liên kết quang. Cần nghiên cứu các thuật toán liên kết người dùng và cân bằng tải có dự đoán che khuất, kể cả hướng dùng học máy phù hợp với định hướng AI-native của 6G, cùng giải pháp đường lên bằng hồng ngoại hoặc RF công suất thấp.

d. Kiểm chứng thực nghiệm. Xây dựng mô hình thực nghiệm quy mô nhỏ theo giai đoạn một và hai của lộ trình ở mục 3.7, nhằm đối chiếu mô hình kênh và mô hình nhiễu với đo đạc thực tế, đồng thời đánh giá chi phí triển khai và mức công suất tăng thêm thực tế của bộ đèn có chức năng truyền tin, vốn trong đề án mới là giá trị ước lượng.

Trong bốn hướng đó, hướng thứ nhất có tính quyết định hơn cả. Hiệu suất phổ và tốc độ người dùng trải nghiệm là hai chỉ tiêu VLC còn cách mục tiêu xa nhất, đồng thời là hai chỉ tiêu duy nhất bị chặn bởi nguyên lý điều chế chứ không bởi trình độ chế tạo linh kiện. Kết quả của hướng này vì vậy quyết định liệu VLC có trở thành một lớp truy nhập thực sự của mạng 6G hay chỉ dừng ở vai trò bổ trợ trong một số kịch bản hẹp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nan Chi, Yingjun Zhou, Yiran Wei, Fangchen Hu, "Visible Light Communication in 6G: Advances, Challenges, and Prospects," IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020.

[2] Marcos Katz, Iqrar Ahmed, "Opportunities and Challenges for Visible Light Communications in 6G," 6G SUMMIT, 2020.

[3] H. R. D. Filgueiras, E. S. Lima, M. S. B. Cunha và cộng sự, "Wireless and Optical Convergent Access Technologies Toward 6G," IEEE Access, vol. 11, 2023.

[4] Qian Li, Zongrui Ding, Xiaopeng Tong và cộng sự, "6G Cloud-Native System: Vision, Challenges, Architecture Framework and Enabling Technologies," IEEE Access, vol. 10, 2022.

[5] Motoharu Matsuura, "Recent Advancement in Power-over-Fiber Technologies," Photonics, 2021.

[6] IEEE Std 802.15.7-2018, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications," 2018.

[7] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, C. Chen, "What is LiFi?," Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 6, 2016.

[8] ITU-R, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," Recommendation ITU-R M.2160-0, Geneva, 11/2023.

[9] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari, Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB, CRC Press, 2019.

[10] T. Komine, M. Nakagawa, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 1, 2004.

[11] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, 2015.

[12] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, R. Parthiban, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 3, 2015.

[13] ITU-R, "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Recommendation ITU-R M.2083-0, Geneva, 09/2015.

[14] ITU-R, "Future technology trends of terrestrial IMT systems towards 2030 and beyond," Report ITU-R M.2516-0, Geneva, 11/2022.

[15] ITU, Radio Regulations, Article 1, No. 1.5 (định nghĩa sóng vô tuyến), Geneva, 2020.

[16] ITU-T, "High-speed indoor visible light communication transceiver - System architecture, physical layer and data link layer specification," Recommendation ITU-T G.9991, 2019 (sửa đổi 2021).

[17] IEEE Std 802.11bb-2023, "IEEE Standard for Information Technology - Amendment 6: Light Communications," IEEE, 11/2023; IEEE Std 802.15.13-2023, "Multi-Gigabit per Second Optical Wireless Communications," IEEE, 2023.

[18] V. Jungnickel, "IEEE 802 Standards on Light Communications," IEEE 802 Tutorial, doc. 11-23/0277r0, 03/2023.

[19] C. Chen, D. A. Basnayaka, H. Haas, "Downlink Performance of Optical Attocell Networks," Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 1, pp. 137-156, 2016.

[20] C. Chen, S. Videv, D. Tsonev, H. Haas, "Fractional Frequency Reuse in DCO-OFDM-Based Optical Attocell Networks," Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 19, pp. 3986-4000, 2015.

[21] X. Wu, M. D. Soltani, L. Zhou, M. Safari, H. Haas, "Hybrid LiFi and WiFi Networks: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 1398-1420, 2021.

[22] M. D. Soltani, A. A. Purwita, Z. Zeng, H. Haas, M. Safari, "Modeling the Random Orientation of Mobile Devices: Measurement, Analysis and LiFi Use

Case," IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 3, pp. 2157-2172, 2019.

[23] J. R. Barry, J. M. Kahn, W. J. Krause, E. A. Lee, D. G. Messerschmitt, "Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, no. 3, pp. 367-379, 1993.

[24] M. Uysal, F. Miramirkhani, O. Narmanlioglu, T. Baykas, E. Panayirci, "IEEE 802.15.7r1 Reference Channel Models for Visible Light Communications," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 1, pp. 212-217, 2017.

[25] M. D. Soltani, A. A. Qidan, H. Haas, M. Safari và cộng sự, "Terabit Indoor Laser-Based Wireless Communications: LiFi 2.0 for 6G," IEEE Wireless Communications, vol. 30, no. 5, pp. 36-43, 2023.

[26] M. S. Islim, R. X. Ferreira, X. He, E. Xie và cộng sự, "Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED," Photonics Research, vol. 5, no. 2, A35-A43, 2017.

[27] R. Bian, I. Tavakkolnia, H. Haas, "15.73 Gb/s Visible Light Communication With Off-the-Shelf LEDs," Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 10, pp. 2418-2424, 2019.

[28] S. Hranilovic, F. R. Kschischang, "Capacity bounds for power- and band-limited optical intensity channels corrupted by Gaussian noise," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 50, no. 5, pp. 784-795, 2004.

[29] J. Navarro-Ortiz, J. J. Ramos-Munoz, F. Delgado-Ferro và cộng sự, "Combining 5G New Radio, Wi-Fi, and LiFi for Industry 4.0: Performance Evaluation," Sensors, vol. 24, no. 18, art. 6022, 2024.

[30] H. Kazemi, I. N. O. Osahon, T. Jiao và cộng sự, "Real-Time Transmission of Uncompressed High-Definition Video Via A VCSEL-Based Optical Wireless Link With Ultra-Low Latency," bản tiền ấn phẩm arXiv:2507.23746, 2025 (chưa qua bình duyệt).

[31] ITU-R, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," Report ITU-R M.2410-0, Geneva, 11/2017.

PHỤ LỤC A: CHƯƠNG TRÌNH MÔ PHỎNG

A.1. Môi trường và cấu trúc chương trình

Toàn bộ kết quả số của Chương 3 được sinh bằng chương trình viết trên Python 3 với các thư viện NumPy, SciPy và Matplotlib. Chương trình gồm ba tệp mã nguồn kèm theo đề án:

Bảng A.1: Các tệp chương trình mô phỏng và kết quả tương ứng

Tệp	Chức năng	Kết quả sinh ra
sim_vlc_6g_attocell.py	Mô hình mạng attocell nhiều tế bào: độ lợi kênh LoS và phản xạ bậc một, nhiễu, SINR, điều chế thích nghi, mật độ dung lượng vùng, tốc độ người dùng, che khuất, hướng đặt thiết bị, lai ghép VLC/RF	Bảng 3.2, 3.3, 3.4; Hình 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6
sim_bosung_chitieu.py	Hiệu suất phổ của tế bào quang, hiệu suất năng lượng toàn phần và biên, mật độ kết nối, khoảng tin cậy bootstrap	Bảng 3.5 và các khoảng tin cậy ở Bảng 3.4
gen_6g_figs.py, gen_extra_figs.py	Sinh các hình minh họa của Chương 1 và Chương 2	Hình 1.1 đến 1.4, Hình 2.1 đến 2.3, Hình 3.1

A.2. Các hàm chính của mô hình

Mô hình được tổ chức thành các hàm độc lập để có thể kiểm tra riêng từng khối:

a. Hàm tính độ lợi kênh tia thẳng, hiện thực biểu thức (2.1) và (2.2), có tham số góc nghiêng và góc phương vị của bộ thu để mô hình hóa hướng đặt thiết bị.

b. Hàm tính độ lợi kênh phản xạ bậc một, hiện thực biểu thức (2.3), chia bốn bức tường thành các phần tử Lambertian thứ cấp với hệ số phản xạ 0,7.

c. Hàm tính phương sai nhiễu theo biểu thức (3.4) và (3.5).

d. Hàm chọn mức điều chế thích nghi: duyệt tập mức từ 4-QAM đến 4096-QAM và giữ mức cao nhất còn thỏa mãn ngưỡng tỉ lệ lỗi bit $3{,}8 \times 10^{-3}$.

e. Hàm gán nhóm tần số cho các điểm truy nhập theo mẫu ô bàn cờ, hỗ trợ hệ số tái sử dụng K bằng 1, 3 và 4.

f. Hàm đánh giá cấu hình mạng: tính SINR theo biểu thức (3.1), tốc độ tế bào theo (3.2) và mật độ dung lượng vùng theo (3.3).

A.3. Cách tái lập kết quả

Chạy lần lượt hai lệnh sau tại thư mục chứa mã nguồn:

a. python sim_vlc_6g_attocell.py

b. python sim_bosung_chitieu.py

Chương trình tự ghi các hình vào thư mục con figs và in các bảng số ra màn hình. Bộ sinh số ngẫu nhiên dùng hạt giống cố định nên kết quả tái lập được nguyên vẹn giữa các lần chạy. Các tham số kịch bản gồm kích thước phòng, công suất quang, góc nửa công suất, diện tích và đáp ứng của điốt quang, góc nhìn, băng thông và ngưỡng tỉ lệ lỗi bit được khai báo tập trung ở đầu tệp, đúng bằng các giá trị liệt kê trong Bảng 3.1, nên có thể thay đổi để khảo sát cấu hình khác.

Link chương tình mô phỏng:

https://colab.research.google.com/drive/1tY5XYaISSNylzRi7AelwAgG5BvmI8YqB

KiểmTraTàiLiệu

BÁO CÁO KIỂM TRA TRÙNG LẶP

Thông tin tài liệu

Tên tài liệu:	DeAn_Ths_BuiMinhHoang_VLC-6G
Tác giả:	Bùi Minh Hoàng
Điểm trùng lặp:	7
Thời gian tải lên:	10:02 30/07/2026
Thời gian sinh báo cáo:	10:07 30/07/2026
Các trang kiểm tra:	74/74 trang

Kết quả kiểm tra trùng lặp



Có 7% nội dung trùng lặp



Có 93% nội dung không trùng lặp



Có 0% nội dung người dùng loại trừ



Có 0% nội dung hệ thống bỏ qua

Nguồn trùng lặp tiêu biểu

tailieu.vn 123docz.net arxiv.org

BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BÁO CÁO GIẢI TRÌNH
SỬA CHỮA, HOÀN THIỆN ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ và tên học viên: Bùi Minh Hoàng
Chuyên ngành: KTVT
Khóa: 2023 đợt 1

Tên đề tài: Nghiên cứu các giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trong mạng 6G

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. Đặng Thế Ngọc

Ngày bảo vệ: 21/07/2026

Các nội dung học viên đã sửa chữa, bổ sung trong đề án tốt nghiệp theo ý kiến đóng góp của Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp:

TT	Ý kiến hội đồng	Sửa chữa của học viên
1	Chỉnh sửa lỗi soạn thảo, lỗi ngữ pháp, chính tả	Tiếp thu góp ý của Hội đồng, học viên đã rà soát, chỉnh sửa các lỗi soạn thảo, các lỗi ngữ pháp.
2	Hiệu chỉnh hình ảnh và chú thích bị chồng chập	Tiếp thu góp ý của Hội đồng, học viên đã rà soát hiệu chỉnh tất cả các hình ảnh và bố trí lại bố cục.
3	Xem xét chỉnh sửa các tham số, ký tự số hóa, công thức,… cho đúng quy ước toán học	Tiếp thu góp ý của Hội đồng, học viên đã rà soát hiệu chỉnh lại các công thức và tham số toán học.
4	Bổ sung link mô phỏng để làm sở cứ cũng như dẫn chứng mô phỏng	Tiếp thu góp ý của Hội đồng, học viên đã bổ sung thêm link dẫn chứng mô phỏng kèm source code Python kèm theo.

Hà Nội, ngày 06 tháng 08 năm 2026

Ký xác nhận của

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN	THƯ KÝ HỘI ĐỒNG	NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC	HỌC VIÊN
TS. Nguyễn Trung Hiếu	TS. Nguyễn Thị Hương Thảo	PGS.TS. Đặng Thế Ngọc	Bùi Minh Hoàng

BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BIÊN BẢN
HỌP HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Căn cứ quyết định số Quyết định số 1949/QĐ-HV ngày 07 tháng 07 năm 2026 của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông về việc thành lập Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ. Hội đồng đã họp vào hồi 16 giờ 15 phút, ngày 21 tháng 07 năm 2026 tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông để chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ cho:

Học viên: **Bùi Minh Hoàng**

Tên đề án tốt nghiệp: **Nghiên cứu các giải pháp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trọng mạng 6G**

Chuyên ngành: **Kỹ thuật viễn thông** Mã số: **8520208**

Các thành viên của Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp có mặt: ...../ 05

TT	HỌ VÀ TÊN	TRÁCH NHIỆM TRONG HĐ	GHI CHÚ
1	**TS. Nguyễn Trung Hiếu**	Chủ tịch	
2	**TS. Nguyễn Thị Hương Thảo**	Thư ký	
3	**TS. Phạm Xuân Nghĩa**	Phản biện 1	
4	**TS. Nguyễn Thị Thu Hằng**	Phản biện 2	
5	**TS. Dư Đình Viên**	Uỷ viên	

Các nội dung thực hiện:

1. Chủ tịch Hội đồng điều khiển buổi họp. Công bố quyết định của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông về việc thành lập Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ.
2. Người hướng dẫn khoa học hoặc thư ký đọc lý lịch khoa học và các điều kiện bảo vệ đề án tốt nghiệp của học viên. (có bản lý lịch khoa học và kết quả các môn học cao học của học viên kèm theo).
3. Học viên trình bày tóm tắt đề án tốt nghiệp.
4. Phản biện 1 đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)
5. Phản biện 2 đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)
6. Các câu hỏi của thành viên Hội đồng:

- Khi điều chế bậc cao thì nội dung thì có ảnh hưởng gì đến chất lượng của hệ thống?
- Tỉ lệ lỗi bit là $3.8.10^{-3}$ có phù hợp trong thực tế không?
- Giải thích khái niệm "truyền thông đám rối"
- Trình bày về kịch bản thử nghiệm

7. Trả lời của học viên:

- Điều chỉnh mức M được lựa chọn thích nghi theo điều kiện phòng vì càng cao thì tỷ lệ lỗi bit càng tăng.
- Tái cấu dung lượng SNR có thể gian
- "Truyền thông dàn chiếm để chỉ việc truyền tín hiệu nằm trọn vẹn trong vùng ánh sáng nhìn thấy

8. Thư ký đọc nhận xét về quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp của học viên *(có văn bản kèm theo).*

9. Hội đồng họp riêng:

- Bầu Ban kiểm phiếu:
  1. Trưởng Ban kiểm phiếu: TS. Nguyễn Trung Hiếu
  2. Uỷ viên Ban kiểm phiếu: TS. Nguyễn Thị Thu Hằng
  3. Uỷ viên Ban kiểm phiếu: ThS. Nguyễn Thu Hường Thảo
- Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp bằng bỏ phiếu kín.
- Ban kiểm phiếu làm việc:
- Trưởng Ban kiểm phiếu báo cáo kết quả kiểm phiếu *(có Biên bản họp Ban kiểm phiếu kèm theo)*
- **Điểm trung bình của đề án tốt nghiệp:** 8.16

Kết luận:

1. Các nội dung cần chỉnh sửa, hoàn thiện sau bảo vệ đề án tốt nghiệp:
   - Học viên sửa đổi theo các ý kiến đóng góp của phản biện và hội đồng

2. Đề nghị Học viện công nhận (hoặc không) và cấp bằng (hoặc không) thạc sĩ cho học viên:

3. Đề án tốt nghiệp có thể phát triển thành đề tài nghiên cứu cho NCS.....

Buổi làm việc kết thúc vào..... cùng ngày.

Chủ tịch	**Thư ký**
Nguyễn Trung Hiếu	Nguyễn Thị Hường Thảo

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

(Dùng cho người phản biện)

Tên đề tài luận văn: **Nghiên cứu các giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trong mạng 6G**

Chuyên ngành: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Mã chuyên ngành: 95.50.02.08

Họ và tên học viên: Bùi Minh Hoàng

Họ và tên người nhận xét: Phạm Xuân Nghĩa

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Cơ quan công tác: Học viện Kỹ thuật Quân sự

Số điện thoại: 0989 505 717 E-mail: nghiapx@mta.edu.vn

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề tài:

Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy (Visible Light Communication - VLC) là một trong những kỹ thuật mới đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của thực tế. Với dải tần không cần cấp phép, có băng thông lớn hơn hàng nghìn lần toàn bộ phổ vô tuyến hiện có, bên cạnh đó, điểm hấp dẫn của phương thức truyền thông này là tận dụng ngay hạ tầng chiếu sáng, vừa cung cấp ánh sáng vừa truyền dữ liệu, nên chi phí triển khai giảm đáng kể. Bên cạnh đó, VLC cũng an toàn cho mắt, không gây nhiễu điện từ, và khó bị nghe lén vì ánh sáng không xuyên tường. Những đặc điểm này phù hợp nhất với môi trường trong nhà, nơi con người dành hơn 80% thời gian, cùng một số môi trường đặc thù như dưới nước hay không gian yêu cầu bảo mật cao. Việc làm chủ các giải pháp kỹ thuật trong hệ thống VLC, áp dụng linh hoạt hệ thống này trong thực tế là vấn đề mang ý nghĩa khoa học và thực tiện cao.

II/ Nội dung của đề án, các kết quả đã đạt được:

Đề án gồm phần mở đầu, 3 chương chính và phần kết luận với các nội dung chính sau:

- Trình bày tổng quan về mạng thông tin di động 6G cũng như nhu cầu về phổ tần số cung cấp cho hệ thống, từ đó cho thấy vai trò của VLC.
- Phân tích những vấn đề cơ bản trong truyền thông ánh sáng nhìn thấy như các kỹ thuật điều chế (bậc cao), kỹ thuật đa truy nhập, MIMO và điều khiển ánh sáng áp dụng cho VLC.
- Các vấn đề liên quan đến giải pháp tích hợp VLC vào mạng 6G, các kịch bản tích hợp, mô hình mạng VLC nhiều tế bào
- Mô phỏng đánh giá một số tham số mạng VLC theo chỉ tiêu IMT-2030.

III/ Những vấn đề cần trao đổi và yêu cầu giải thích thêm:

- Đề án đề cập tới công nghệ mới, hiện đại, có triển vọng tốt ứng dụng trong mạng thông tin thế hệ mới, đáp ứng yêu cầu tốc độ truyền tin cao, băng thông rộng, chính vì vậy còn nhiều vấn đề cần trao đổi sâu hơn, trong khuôn khổ đề án, cần làm rõ và logic hơn các yếu tố làm ảnh hưởng đến chất lượng và dung lượng hệ thống VLC nhất là khi thực hiện điều chế bậc cao cũng như kỹ thuật tái sử dụng tần số trong điều kiện bị ảnh hưởng của môi trường có các nguồn sáng khác cũng như vật che khuất.

- Cần khảo sát kỹ hơn chất lượng và dung lượng hệ thống VLC dưới tác động của các yếu tố ảnh hưởng nêu trên.

IV/ Kết luận:

Tuy còn tồn tại một số hạn chế, nhưng nhìn chung đề án đáp ứng được yêu cầu của bộ GD&ĐT đối với một đề án tốt nghiệp thạc sỹ. Đề nghị cho học viên được bảo vệ trước hội đồng.

Ngày 19 tháng 7 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT



Phạm Xuân Nghĩa

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

(Dùng cho người phản biện)

Tên đề tài đề án tốt nghiệp: Nghiên cứu các giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy trong mạng 6G.

Chuyên ngành: Kỹ thuật viễn thông

Mã chuyên ngành: 8.52.02.08

Họ và tên học viên: Bùi Minh Hoàng

Họ và tên người nhận xét: Nguyễn Thị Thu Hằng .....

Học hàm, học vị: TS .....

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông .....

Cơ quan công tác: Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông .....

Số điện thoại: 0912 614 545 E-mail: hangntt@ptit.edu.vn

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề tài:

Đề tài có cơ sở khoa học vững chắc khi dựa trên các hướng nghiên cứu hiện đại về công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy và mạng 6G. Về thực tiễn, công nghệ truyền thông bằng ánh sáng nhìn thấy sử dụng đèn LED đã được triển khai hạ tầng thuận tiện, an toàn cho người dùng song để ứng dụng thực tế trong kiến trúc mạng 6G thì vẫn cần khảo sát, đánh giá cụ thể trong các tình huống thực tế. Vì vậy, hướng nghiên cứu của đề tài có ý nghĩa và có tính cấp thiết.

II/ Nội dung của đề án tốt nghiệp, các kết quả đã đạt được:

- Phần mở đầu được viết tốt, nêu được lý do lựa chọn đề tài, tổng quan tình hình nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu và phương pháp nghiên cứu định hướng theo ứng dụng.
- Phần nội dung viết logic, gồm ba chương:
  - Giới thiệu tổng quan về lịch sử mạng di động, bộ chỉ tiêu IMT-2030 và nhu cầu về phổ tần quang.
  - Tổng quan về công nghệ truyền thông ánh sáng nhìn thấy VLC.
  - Giải pháp tích hợp ứng dụng công nghệ VLC trong mạng 6G. Xây dựng mô hình và đánh giá định lượng mạng VLC nhiều tế bào trong nhà có xét nhiễu liên tế bào. Mô phỏng đánh giá và đối chiếu trực tiếp với một số năng lực của IMT-2030.

III/ Những vấn đề cần giải thích thêm:

1. Những thách thức chính khi tích hợp VLC vào kiến trúc mạng 6G là gì?
2. Các kỹ thuật điều chế và mã hóa nào phù hợp nhất để đảm bảo tốc độ và độ tin cậy khi kết hợp VLC với 6G?

3. Giải pháp nào để giảm nhiễu và tăng khả năng xuyên suốt tín hiệu VLC trong môi trường đô thị phức tạp?
4. VLC có thể nâng cao mức độ bảo mật trong mạng 6G so với sóng vô tuyến truyền thống không?
5. VLC có thể được ứng dụng hiệu quả trong các kịch bản mạng 6G nào (ví dụ: smart city, IoT, xe tự hành)?

IV/ Kết luận:

Đồng ý cho phép học viên bảo vệ đề án tốt nghiệp.

Ngày 20 tháng 7 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT

Nguyễn Thị Thu Hằng