

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**



NGUYỄN THỊ THU NGÀ

**GIẢI PHÁP TRUYỀN DẪN VÀ CHUYỂN
TIẾP TÍN HIỆU QUANG DỰA TRÊN HẠ TẦNG
TRÊN CAO**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội, 2021

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**



NGUYỄN THỊ THU NGÀ

**GIẢI PHÁP TRUYỀN DẪN VÀ CHUYỂN
TIẾP TÍN HIỆU QUANG DỰA TRÊN HẠ TẦNG
TRÊN CAO**

Chuyên ngành : Kỹ thuật Viễn Thông

Mã số: 9.52.02.08

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

PGS. TS Đặng Thế Ngọc

Hà Nội, 2021

LỜI CAM ĐOAN

Nghiên cứu sinh xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của chính mình. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được công bố trong bất cứ công trình nào khác. Các kết quả được viết chung với các tác giả khác đều được các tác giả đồng ý trước khi đưa vào luận án.

Nghiên cứu sinh

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới Thầy hướng dẫn PGS. TS Đặng Thế Ngọc đã định hướng nghiên cứu và liên tục dành nhiều thời gian, công sức hướng dẫn nghiên cứu sinh thực hiện các nhiệm vụ nghiên cứu trong suốt quá trình thực hiện luận án này.

Nghiên cứu sinh trân trọng cảm ơn các Thầy Cô trong Khoa Viễn Thông 1, Khoa Quốc tế và Đào tạo sau đại học, Lãnh đạo Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông đã động viên và tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong suốt thời gian thực hiện luận án.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn chân thành tới gia đình đã tạo điều kiện thuận lợi cũng như luôn ủng hộ, động viên nghiên cứu sinh trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Hà Nội, tháng năm 2021

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	iii
LỜI CẢM ƠN	iv
MỤC LỤC	v
THUẬT NGỮ VIẾT TẮT	viii
DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU	xi
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ	xv
DANH MỤC CÁC BẢNG	xix
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TRUYỀN THÔNG QUANG DỰA TRÊN HAP	6
1.1. Hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP	6
1.1.1. Bộ phát.....	7
1.1.2. Kênh truyền dẫn khí quyển.....	8
1.1.3. Trạm hạ tầng trên cao	11
1.1.4. Bộ thu.....	13
1.2. Hiệu năng hệ thống OWC dựa trên HAP	15
1.3. Các công trình nghiên cứu liên quan.....	16
1.3.1. Các kịch bản triển khai hệ thống OWC dựa trên HAP.....	17
1.3.2. Đánh giá hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP	20
1.3.3. Cải thiện hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP	21
1.4. Nhận xét các công trình nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của luận án	25
1.4.1. Nhận xét về công trình nghiên cứu liên quan.....	25
1.4.2. Hướng nghiên cứu của luận án	26
1.5. Kết luận chương 1	26
CHƯƠNG 2: HỆ THỐNG TRUYỀN DẪN QUANG DỰA TRÊN HAP VỚI CHUYỂN TIẾP O/E/O	28
2.1. Mở đầu.....	28

2.2. Mô hình kênh OWC	28
2.2.1. Suy hao đường truyền.....	28
2.2.2. Nhiễu loạn khí quyển.....	32
2.2.3. Nhiễu loạn Gamma-Gamma.....	35
2.3. Hệ thống truyền dẫn OWC dựa trên HAP chuyển tiếp O/E/O.....	37
2.3.1. Mô hình hệ thống đề xuất	38
2.3.2. Phân tích hiệu năng.....	40
2.3.3. Kết quả khảo sát hiệu năng.....	43
2.4 Kết luận chương 2	48
CHƯƠNG 3: CHUYỂN TIẾP TOÀN QUANG ĐƠN HƯỚNG DỰA TRÊN HAP CHO HỆ THỐNG OWC	50
3.1. Đặt vấn đề.....	50
3.2. Hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang dựa trên nhiễu HAP và tách sóng coherent	51
3.2.1. Mô hình thiết kế hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiễu HAP.....	52
3.2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống.....	54
3.2.3. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống.....	58
3.3. Hệ thống OWC vệ tinh-mặt đất chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP	62
3.3.1. Mô hình thiết kế hệ thống OWC vệ tinh- mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP	62
3.3.2. Phân tích hiệu năng hệ thống.....	63
3.3.3. Mô hình mô phỏng hệ thống.....	71
3.3.4. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống.....	74
3.4. Kết luận chương 3	83
CHƯƠNG 4: CHUYỂN TIẾP TOÀN QUANG SONG HƯỚNG DỰA TRÊN HAP CHO HỆ THỐNG OWC	84
4.1. Đặt vấn đề.....	84
4.2. Hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP	85
4.2.1. Mô hình hệ thống.....	85

4.2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống.....	88
4.2.3. Mô hình mô phỏng hệ thống.....	96
4.2.4. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống.....	98
4.3. Kết luận chương 4	104
KẾT LUẬN	106
CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ	109
TÀI LIỆU THAM KHẢO	110

THUẬT NGỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
APD	Avalanche Photodiode	Photodiode quang thác
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Nhiều phát xạ tự phát được khuếch đại
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Nhiều Gauss trắng cộng
BER	Bit Error Rate	Tỉ lệ lỗi bit
BTS	Base Transceiver Station	Trạm thu phát gốc
BPF	Band Pass Filter	Bộ lọc thông dải
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Điều chế khóa dịch pha nhị phân
CW	Continuous Wave	Sóng liên tục
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
CN	Core Network	Mạng lõi
DL	Down Link	Đường xuống
DSP	Digital Signal Processor	Bộ xử lý tín hiệu số
DPIM	Digital Pulse Intensity Modulation	Điều chế cường độ xung số
DPSK	Differential Phase Shift Keying	Điều chế dịch pha vi sai
EAM	Electro-Absorption Modulator	Bộ điều chế hấp thụ điện
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	Khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium
EGC	Equal-Gain Combining	Kết hợp độ lợi cân bằng
FEC	Forward Error Correction	Sửa lỗi trước
GS	Ground Station	Trạm mặt đất
HAP	High Altitude Platform	Hạ tầng trên cao
HNLF	Highly Nonlinear Fiber	Sợi phi tuyến cao

IM/DD	Intensity Modulation/ Direct Detection	Điều chế cường độ/ Tách sóng trực tiếp
IR	Infrared	Hồng ngoại
LEO	Low Earth Orbit	Vệ tinh quỹ đạo trái đất tầm thấp
LOS	Line Of Sight	Tầm nhìn thẳng
LO	Local Oscillator	Bộ dao động nội
LPF	Low-Pass Filter	Bộ lọc thông thấp
MZMs	Mach-Zehnder Modulator	Giao thoa kế Mach-Zehnder
MRC	Maximal-Ratio Combining	Kết hợp tỉ số cực đại
MISO	Multiple Input, Single Output	Nhiều đầu vào một đầu ra
OOK	On-Off Keying	Điều chế khóa đóng mở
OWC	Optical Wireless Communications	Truyền thông quang không dây
O/E	Optical/ Electric	Quang/ điện
OAF	Optical Amplify and Forward	Khuếch đại và chuyển tiếp quang
ORF	Optical Regenerate and Forward	Tái tạo và chuyển tiếp quang
OHL	Optical Hard Limiter	Bộ giới hạn quang cứng
ODAF	Optical Detect Amplify and Forward	Tách sóng khuếch đại và Chuyển tiếp quang
PAT	Pointing Acquisition Tracking	Tìm bắt bám
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio	Tỷ lệ công suất đỉnh-trung bình
PPM	Pulse Position Modulation	Điều chế vị trí xung
PD	Photodiode	Diode tách quang
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
SC	Selection Combining	Kết hợp lựa chọn

SIMO	Single Input, Multiple Output	Một đầu vào nhiều đầu ra
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
SPM	Self Phase Modulation	Tự điều chế pha
SOA	Semiconductor Optical Amplifiers	Khuếch đại quang bán dẫn
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Thiết bị bay không người lái
UL	Up Link	Đường lên

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU

λ	Bước sóng
θ_{eff}	Góc phân kỳ hiệu dụng
θ_{DL}	Giới hạn phân kỳ
L	Khoảng cách
ζ	Góc thiên đỉnh
ζ_s	Góc thiên đỉnh của vệ tinh
ζ_P	Góc thiên đỉnh của HAP
h_c	Trạng thái kênh
h_l	Suy hao đường truyền
h_a	Nhiều loạn khí quyển
h_0	Độ cao GS
γ	Hệ số suy hao
α_m	Hệ số hấp thụ do hơi nước
α_a	Hệ số hấp thụ do phân tử khí
β_m	Hệ số tán xạ do hơi nước
β_a	Hệ số tán xạ do phân tử khí
β_{fog}	Suy hao do sương mù
α_{rain}	Suy hao do mưa
α_{snow}	Suy hao do tuyết
α, β	Tham số hiệu dụng của môi trường truyền dẫn tán xạ
H	Độ cao
r_0	Độ dài kết hợp
W_0	Kích thước chùm ban đầu
σ^2	Chỉ số nhấp nháy
I	Cường độ phát xạ

C_n^2	Tham số cấu trúc chỉ số phản xạ
V^2	Giá trị bình phương trung bình của tốc độ gió
$\Gamma(\cdot)$	Hàm Gamma
$K_{\alpha-\beta}(x)$	Hàm Bessel sửa đổi loại 2 bậc ($\alpha - \beta$)
M	Số bậc điều chế
P_{e2e}	BER đầu cuối
$P_e^{(UL)}$	Xác suất lỗi bit của đường lên UL
$P_e^{(DL)}$	Xác suất lỗi bit của đường xuống DL
P_T	Công suất phát
P_R	Công suất thu
P_{in}	Công suất đầu vào OHL
P_{out}	Công suất đầu ra OHL
\Re	Đáp ứng của PD
$Q(\cdot)$	Hàm Q
Δf	Băng thông
B	Tốc độ bit của hệ thống
P_{bn}	Công suất nhiễu nền
ω_0	Tần số sóng mang
$\phi_{s,k}$	Pha của tín hiệu thu
$A_{s,k}$	Biên độ của tín hiệu thu
A_{LO}	Biên độ của LO
ω_{LO}	Tần số của LO
ϕ_{LO}	Pha của LO
k_B	Hằng số Boltzman
q	Điện tích điện tử

w	Tốc độ gió
σ^2_b	Phương sai của nhiễu nền
ω_{IF}	Tần số trung tần
φ	Độ lệch pha giữa bộ dao động nội và tín hiệu
M_A	Hệ số nhân thác của APD
F_n	Hệ số nhiễu của bộ khuếch đại
$\sigma^2_{thermal}$	Phương sai nhiễu nhiệt
σ^2_{shot}	Phương sai nhiễu nơ
x	Hệ số nhiễu của APD
I_d	Dòng điện tối
I_{th}	Dòng điện ngưỡng
R_L	Điện trở tải
$L^q_v(p)$	Hàm đa thức Laguerre
\oplus	Phép toán XOR
G	Hệ số khuếch đại
G_{RX}	Hệ số khuếch đại của thấu kính thu
G_{TX}	Hệ số khuếch đại của thấu kính phát
T	Nhiệt độ
D_P	Bán kính vùng phủ
N_b	Mật độ phổ công suất phát xạ nền
I_1	Dòng quang điện tương ứng với bit “1”
I_0	Dòng quang điện tương ứng với bit “0”
n_1	Dòng nhiễu tương ứng với bit “1”
n_0	Dòng nhiễu tương ứng với bit “0”
V	Phạm vi tầm nhìn
x_{mn}	Pixel của ảnh gốc

y_{mn}	Pixel của hình ảnh được xây dựng lại
p	Số bit của một pixel
$M_p \times N_p$	Kích thước của ảnh

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Sơ đồ khối hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP.	6
Hình 1.2 Sơ đồ khối cơ bản của bộ phát.	7
Hình 1.3 Sự trải rộng chùm tia [36].	10
Hình 1.4 (a) Sự lệch dọc chùm tia và (b) Sự nhấp nháy gây ra bởi biến động chỉ số khúc xạ ngẫu nhiên [68].	11
Hình 1.5 Một số HAP và UAV [36].	12
Hình 1.6 Góc thiên đỉnh giữa HAP và GS.	12
Hình 1.7 Sơ đồ khối cơ bản của bộ thu.	14
Hình 1.8 Truyền thông quang không dây dựa trên HAP [37].	18
Hình 2.1 Giá trị của α và β theo khoảng cách truyền dẫn trong pha-đỉnh Gamma-Gamma ($C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14}$, $\lambda = 1550$ nm và $D/L \rightarrow 0$ [91]).	36
Hình 2.2. Phân bố pha-đỉnh Gamma-Gamma với khoảng cách truyền dẫn khác nhau ($C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14}$, $\lambda = 1550$ nm [18]).	37
Hình 2.3 Truyền thông quang không dây OWC dựa trên HAP cho mạng backhaul.	38
Hình 2.4 Sơ đồ khối hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP chuyển tiếp ODAF và tách sóng coherent.	39
Hình 2.5 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS - HAP với các mức điều chế và số thấu kính thu phát khác nhau với $P_b(HAP) = 9$ dBm và $P_{LO} = 0$ dBm.	45
Hình 2.6 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS - HAP với các mức điều chế và số thấu kính thu phát khác nhau với $P_b(HAP) = 25$ dBm và $P_{LO} = -15$ dBm.	46

Hình 2.7 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ HAP với các giá trị công suất LO khác nhau.....	47
Hình 3.1. Sơ đồ hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên nhiều HAP.	52
Hình 3.2 Hai khả năng trao đổi bit nhị phân giữa GS-A và GS-B.	54
Hình 3.3 BER theo công suất ngưỡng của HAP P_{th} đầu tiên với $P_{t\Sigma} = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}(i) = -50$ dBm.	60
Hình 3.4 BER so với công suất ngưỡng của HAP thứ i ($2 \leq i \leq NHAP$) với $P_{t\Sigma} = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}(1) = -50$ dBm.	61
Hình 3.5 BER theo tổng khoảng cách truyền giữa GS-A và GS-B với $P_{LO} = 0$ dBm, $P_{th}(1) = P_{th}(i) = -50$ dBm.	61
Hình 3.6 Sơ đồ khối của hệ thống OWC LEO- mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP.....	62
Hình 3.7 Mô hình mô phỏng của vệ tinh LEO.....	71
Hình 3.8a. Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ vệ tinh LEO đến HAP.....	72
b. Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ HAP- GS.....	72
Hình 3.9. Mô hình mô phỏng HAP.....	72
Hình 3.10 Mô hình mô phỏng M-C cho GS.....	73
Hình 3.11 BER theo công suất phát của hệ thống OWC LEO – mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP so với hệ thống OWC LEO – mặt đất thông thường.....	76
Hình 3.12 BER theo công suất ngưỡng với các công suất phát khác nhau từ vệ tinh và HAP.....	77
Hình 3.13 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các giá trị mật độ phổ công suất nhiễu nền khác nhau.....	78
Hình 3.14 BER theo các khoảng cách từ HAP tới GS khác nhau.....	78
Hình 3.15 BER theo các hệ số suy hao khác nhau.....	79

Hình 3.16 BER theo các góc thiên đỉnh khác nhau	80
Hình 3.17 Hiệu năng BER theo bán kính vùng phủ (D_P).	80
Hình 3.18 Hình ảnh gốc để mô phỏng.	81
Hình 3.19 Hình ảnh khôi phục được truyền bởi hệ thống thông thường với công suất phát là 35 dBm.....	81
Hình 3.20 Hình ảnh được xây dựng lại trong hệ thống đề xuất với công suất phát là 35 dBm.	82
Hình 3.21 Hình ảnh được khôi phục hệ thống thông thường khi công suất phát tăng lên đến 55 dBm.	82
Hình 3.22 Hình ảnh được xây dựng lại trong hệ thống đề xuất khi công suất phát tăng lên đến 55 dBm.	82
Hình 4.1 Hệ thống OWC chuyển tiếp song hướng cho truyền dẫn băng rộng dựa trên HAP.....	85
Hình 4.2 Sơ đồ khối của hệ thống.....	86
Hình 4.3 Bốn trường hợp xảy ra khi phát 2 bit từ 2 GS.....	88
Hình 4.4 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho GS.	96
Hình 4.5 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho kênh OWC	97
Hình 4.6 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho HAP.	97
Hình 4.7 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các giá trị khác nhau của công suất phát từ HAP và $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t(X) = 30$ dBm.....	99
Hình 4.8 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các công suất phát khác nhau từ GS và $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t^{(P)} = 18$ dBm.....	100
Hình 4.9 Hiệu năng BER theo công suất ngưỡng P_{th} với $P_t(P) = 18$ dBm và $P_t(X) = 30$ dBm.....	101

Hình 4.10 Hiệu năng BER theo công suất ngưỡng với các độ cao khác nhau của HAP.	102
Hình 4.11 BER theo hệ số suy hao σ cho các công suất phát từ HAP khác nhau; $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W và $P_t(X) = 30$ dBm.	102
Hình 4.12 BER theo góc thiên đỉnh ζ với các giá trị khác nhau của công suất phát từ HAP và $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t(X) = 30$ dBm.....	103
Hình 4.13 BER theo khoảng cách trực tiếp L_{A-B} với công suất phát từ HAP khác nhau; $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t(X) = 30$ dBm.	104

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2.1 Một số giá trị tiêu biểu của các hệ số hấp thụ phân tử	29
Bảng 2.2 Các tham số hệ thống.....	44
Bảng 3.1 Các tham số hệ thống OWC chuyển tiếp nhiều HAP.....	59
Bảng 3.2 Các tham số mô phỏng hệ thống truyền dẫn LEO- GS sử dụng chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP	74
Bảng 4.1 Các thông số và hằng số hệ thống.	98

MỞ ĐẦU

Hạ tầng trên cao HAP (High Altitude Platform) được triển khai trên các khinh khí cầu hoặc thiết bị bay không người lái ở độ cao khoảng 17–25 km, đang thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu với vai trò như các trạm chuyển tiếp tín hiệu giữa các vệ tinh, giữa vệ tinh và trạm mặt đất hoặc giữa các trạm mặt đất. Cụ thể, HAP được dùng như hạ tầng cho các cảm biến từ xa thu thập dữ liệu về các đối tượng khác nhau mà không cần liên hệ trực tiếp với đối tượng đó. HAP cũng được dùng trong các ứng dụng như bản đồ địa lý, quan sát thiên văn, quân sự, giám sát các sự kiện, giao thông, những vùng nông thôn hẻo lánh, vùng dịch bệnh, thu thập dữ liệu về thời tiết, giám sát điều kiện môi trường như không khí, đất và nước. Sử dụng các HAP có tầm quan trọng lớn với các vùng mật độ dân cư thưa thớt với cơ sở hạ tầng kém hoặc không có. Do vùng phủ lớn, các HAP có thể giữ một vai trò tích cực trong hàng hải và định vị để phát hiện chính xác vị trí của mục tiêu trên mặt đất hoặc trên không.

Ngoài các ứng dụng nêu trên, HAP có thể ứng dụng trong viễn thông để kết nối các trạm mặt đất hoặc chuyển tiếp tín hiệu từ vệ tinh với những ưu điểm có được từ cả truyền thông mặt đất và truyền thông vệ tinh [29]. HAP có vị trí gần như cố định với mặt đất, thuận tiện cho việc duy trì kết nối. HAP có vùng phủ sóng rộng hơn các hệ thống vô tuyến mặt đất và có chi phí phóng, triển khai, nâng cấp và sửa chữa nhỏ hơn hệ thống thông tin vệ tinh, sử dụng năng lượng mặt trời thân thiện với môi trường [53]. Các nghiên cứu gần đây cho thấy HAP đang được coi như một ứng cử viên hứa hẹn được sử dụng để thiết lập các hệ thống truyền thông phục vụ cứu trợ thiên tai, khôi phục thảm họa, cung cấp các ứng dụng và dịch vụ mới trong môi trường đô thị cũng như cung cấp các dịch vụ cơ bản tới các vùng xa xôi hẻo lánh [122]. Các hệ thống truyền thông dựa trên HAP cũng có thể tích hợp vào mạng truy nhập vô tuyến không đồng nhất HetNet trong tương lai để sử dụng làm các kết nối backhaul cho mạng thông tin di động [51].

Các hệ thống truyền thông dựa trên HAP hiện nay chủ yếu dựa trên các kết nối ở tần số vô tuyến RF (Radio Frequency) với tốc độ hạn chế khoảng vài trăm

Mb/s. Tốc độ này không thể đáp ứng được nhu cầu của các dịch vụ băng rộng, thời gian thực như video độ phân giải cao hay các kết nối backhaul/truy nhập không dây tốc độ hàng Gigabit/s trong mạng thông tin di động 5G. Để giải quyết vấn đề này giải pháp truyền thông dựa trên HAP với kết nối quang không dây thay thế cho truyền dẫn bằng RF đang dành được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Truyền thông quang không dây (OWC) sử dụng các búp sóng laser để truyền tải thông tin qua không gian. Hệ thống truyền thông quang không dây có nhiều ưu điểm như tốc độ cao, không bị ảnh hưởng của nhiễu điện từ, không yêu cầu cấp phép tần số, triển khai nhanh và linh hoạt với chi phí hiệu quả. Một tuyến OWC bao gồm hai bộ thu-phát được đặt trong tầm nhìn thẳng. Các hệ thống truyền thông quang không dây điển hình bao gồm OWC mặt đất và OWC không gian. Cụ ly hoạt động của một tuyến OWC mặt đất từ vài trăm mét tới vài km. Với các hệ thống OWC trong không gian, cụ ly kết nối có thể vài chục km (từ mặt đất tới hạ tầng trên cao HAP và ngược lại); vài trăm tới vài nghìn km (từ mặt đất tới vệ tinh quỹ đạo thấp LEO và ngược lại); cụ ly thậm chí còn xa hơn đối tới các vệ tinh địa tĩnh GEO hoặc tàu thăm dò các vì sao.

Với mục đích kết hợp các ưu điểm của HAP trong triển khai nhanh, vận hành và khai thác linh hoạt, chi phí thấp với ưu điểm của công nghệ OWC trong truyền dẫn tốc độ cao, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài: “***Giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên hạ tầng trên cao***” cho luận án nghiên cứu của mình. Theo đó, đối tượng nghiên cứu của luận án là hệ thống OWC sử dụng HAP làm trạm chuyển tiếp tín hiệu nhằm tăng cụ ly và cải thiện hiệu năng hệ thống. Giống như các hệ thống OWC khác, hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP chịu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường không gian tự do đặc biệt là nhiễu loạn khí quyển gây ra sự thăng giáng cường độ tín hiệu. Ngoài ra còn có các ảnh hưởng của nhiễu và tạp âm tại các bộ phát/thu [51]. Do đó, việc tiến hành nghiên cứu các ảnh hưởng của kênh truyền khí quyển đến hiệu năng hệ thống cũng như đề xuất các giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang tại HAP nhằm nâng cao tốc độ và cải thiện cụ ly truyền dẫn trong khi vẫn đảm bảo yêu cầu về tỉ lệ lỗi bit (BER) của hệ thống là hết sức cấp thiết.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học của luận án mà luận án hướng tới là xây dựng các mô hình toán học, chương trình tính toán và mô phỏng để đánh giá hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP. Các mô hình toán học, chương trình tính toán và mô phỏng này sẽ là công cụ hỗ trợ cho việc thiết kế, đánh giá tính khả thi, và điều kiện hoạt động tin cậy của hệ thống. Ý nghĩa thực tiễn của luận án mà nghiên cứu sinh kỳ vọng đạt được thể hiện ở các giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên HAP mà luận án đề xuất có thể áp dụng vào thực tế để cải thiện hiệu năng, tăng cự ly và dung lượng truyền dẫn của các hệ thống OWC.

Mục tiêu

Mục tiêu chính của luận án là đề xuất được những giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên HAP cho các hệ thống OWC nhằm tăng cự ly truyền dẫn và cung cấp khả năng truyền dẫn tốc độ Gigabit trong khi vẫn đảm bảo được yêu cầu về tỉ lệ lỗi bit. Để đạt được mục tiêu đó, luận án cần xây dựng được mô hình giải tích phân tích các ảnh hưởng của môi trường không gian tự do cũng như ảnh hưởng của các loại tạp âm/nhiều lên hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP. Tiếp theo, luận án cần phải đề xuất được các giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống OWC dựa trên HAP thông qua việc sử dụng các kỹ thuật truyền dẫn và xử lý tín hiệu tiên tiến như điều chế, phân tập, tách sóng và xử lý tín hiệu toàn quang.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là hệ thống truyền thông quang không dây chuyển tiếp dựa trên hạ tầng trên cao, các giải pháp kỹ thuật như điều chế, phân tập, tách sóng và xử lý tín hiệu, kênh truyền thông quang trong không gian và các đặc tính của nó.

Phạm vi nghiên cứu của đề tài luận án giới hạn trong các hệ thống truyền dẫn quang không dây điểm-điểm và trạm chuyển tiếp được đặt trên HAP. HAP có thể sử dụng để chuyển tiếp tín hiệu giữa hai trạm mặt đất hoặc chuyển tiếp tín hiệu từ vệ tinh đến trạm mặt đất. Luận án cũng giả thiết trên HAP được trang bị các hệ

thông tự động tìm, bắt và bám tín hiệu nên ảnh hưởng của lệch hướng thu phát được bỏ qua. Đồng thời việc truyền dẫn giữa thiết bị phát và thiết bị thu được giả thiết là đồng bộ.

Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu dự kiến là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng kiểm chứng:

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết: sử dụng lý thuyết thông tin, xác suất và công cụ toán học để mô hình hóa các kỹ thuật truyền dẫn và xử lý tín hiệu trong hệ thống OWC chuyên tiếp dựa trên HAP. Xây dựng các công thức giải tích biểu diễn sự phụ thuộc của hiệu năng hệ thống theo các tham số hệ thống và đặc tính kênh truyền cũng như các tham số tạp âm/nhiều.

Phương pháp nghiên cứu mô phỏng: xây dựng các chương trình mô phỏng theo các kịch bản truyền dẫn và chuyên tiếp tín hiệu quang, thực hiện mô phỏng để kiểm chứng các kết quả nghiên cứu lý thuyết.

Cấu trúc của luận án

Nội dung luận án có bố cục gồm 4 chương với các nội dung như sau:

Chương 1 “*Tổng quan về truyền thông quang dựa trên HAP*”, trình bày về cấu trúc hệ thống, các phần tử của hệ thống thông tin quang không dây dựa trên HAP. Các tham số hiệu năng và các yếu tố ảnh hưởng lên hiệu năng hệ thống cũng được đề cập trong chương này. Nội dung chương cũng khảo sát đánh giá các nghiên cứu trong nước và ngoài nước về hệ thống thông tin quang không dây dựa trên HAP. Từ hạn chế của các nghiên cứu đó để đề xuất các hướng nghiên cứu của luận án.

Chương 2 “*Hệ thống truyền dẫn quang dựa trên HAP với chuyên tiếp O/E/O*” trình bày về tham số, mô hình toán học của kênh truyền như suy hao, nhiễu loạn khí quyển và nghiên cứu hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP với chuyên tiếp O/E/O. Đóng góp của luận án trong chương này là đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP bằng cách

dùng phân tập không gian và tách sóng heterodyne. Kết quả nghiên cứu của chương 2 được công bố trong 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế ISI/Scopus.

Chương 3 “*Chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP cho hệ thống OWC*”. Nội dung của chương trình bày về hệ thống truyền dẫn quang dựa trên HAP chuyển tiếp toàn quang và tách sóng coherent. Đồng thời cũng trình bày giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống thông tin quang không dây dựa trên HAP từ vệ tinh đến mặt đất với HAP chuyển tiếp toàn quang. Kết quả nghiên cứu trong chương này đã được công bố trong 01 bài báo quốc tế đăng trên tạp chí quốc tế ISI/Scopus và 01 bài báo hội nghị quốc tế.

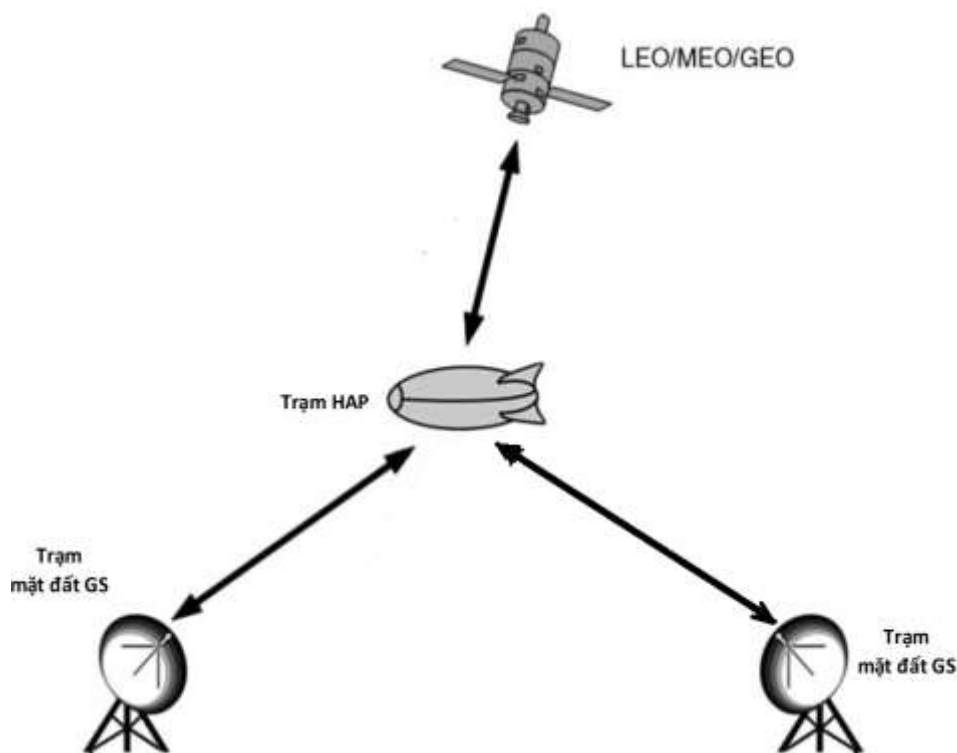
Chương 4 với tiêu đề “*Chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP cho hệ thống OWC*” tập trung trình bày về đề xuất mô hình hệ thống OWC dựa trên HAP song hướng toàn quang cho mạng backhaul. Giải pháp đưa ra khắc phục được khó khăn khi xảy ra các thảm họa như động đất, lũ lụt dẫn đến sợi quang bị đứt. Kết quả nghiên cứu của chương đã được công bố trong 01 bài báo quốc tế đăng trên tạp chí quốc tế ISI/Scopus.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TRUYỀN THÔNG QUANG DỰA TRÊN HAP

Tóm tắt: Nội dung chương trình bày về mô hình, các phần tử của hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP. Ngoài ra, các tham số hiệu năng và các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống OWC dựa trên HAP cũng được trình bày trong chương. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến hệ thống OWC dựa trên HAP cũng được khảo sát theo các hướng khác nhau. Trên cơ sở các hướng nghiên cứu đó, các hướng nghiên cứu của luận án sẽ được đề xuất.

1.1. Hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP

Sơ đồ khối của hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên hạ tầng trên cao (HAP) được thể hiện trên Hình 1.1. Hình vẽ thể hiện 02 kịch bản truyền thông dựa trên HAP bao gồm: (1) hệ thống truyền thông vệ tinh – HAP – trạm mặt đất (GS) và (2) hệ thống truyền thông GS – HAP – GS. Các thành phần chính của hệ thống bao gồm bộ phát quang, trạm chuyển tiếp đặt trên HAP và bộ thu quang.

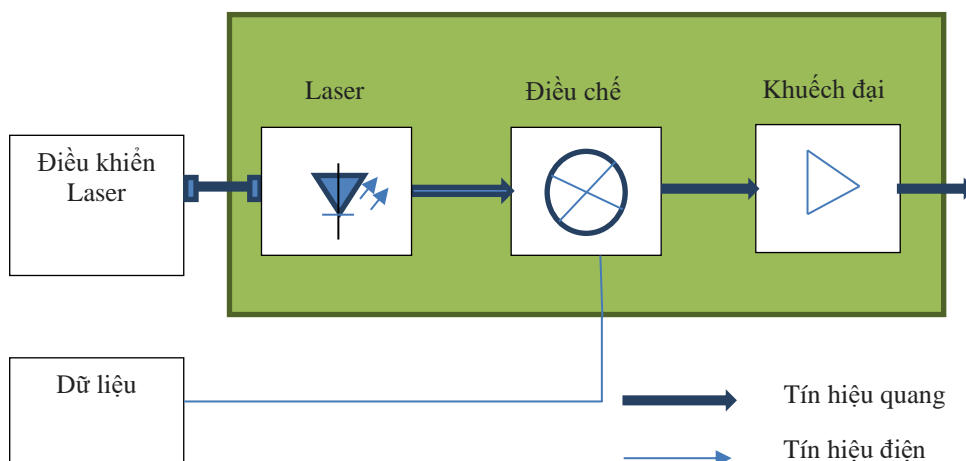


Hình 1.1 Sơ đồ khối hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP

1.1.1. Bộ phát

Bộ phát đặt tại trạm mặt đất và vệ tinh có nhiệm vụ chính là điều chế số liệu băng gốc vào tín hiệu quang sau đó truyền qua không gian. Sơ đồ khối của bộ phát như hình 1.2 bao gồm nguồn phát Laser, bộ điều chế và bộ khuếch đại công suất sợi pha tạp Erbium.

Laser tạo tín hiệu liên tục hoặc mô-đun điều chế trực tiếp đóng vai trò như một nguồn phát ra bước sóng hoạt động của hệ thống. Bộ điều chế Mach-Zehnder (MZM) hoặc bộ điều chế hấp thụ điện (EAM) thiết lập các sơ đồ điều chế tiên tiến có tỷ lệ phân biệt cao. Điều chế pha có thể đạt được thông qua bộ điều chế MZM hoặc bộ điều biến pha chuyên dụng [107]. Để đạt được tốc độ dữ liệu cao, các thiết kế khác nhau của bộ điều chế phân cực cũng đã được đề xuất, chủ yếu dựa trên thiết bị Lithium niobate (LiNbO_3).



Hình 1.2 Sơ đồ khối cơ bản của bộ phát.

Nếu bước sóng của laser được đặt trong băng tần C (từ 1530 đến 1560 nm), tín hiệu dữ liệu được điều chế có thể được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại công suất sợi pha tạp Erbium (EDFA) để đạt được công suất đầu ra quang lên đến 10 W trước khi nó được phát ra thấu kính [42]. Hệ thống coherent có các yêu cầu về nhiễu pha rất cao và do đó chủ yếu sử dụng laser trạng thái rắn, ví dụ: Nd: YAG ở bước sóng 1064 nm [114]. Ngay cả ở bước sóng này, các bộ khuếch đại quang đã được triển khai dựa trên các bộ khuếch đại Yb và công suất quang đầu ra lên đến 8,8 W

[100]. Nhìn chung, việc lựa chọn bước sóng của máy phát không chỉ được điều khiển bởi máy thu, mà còn bởi mong muốn giảm thiểu suy hao khí quyển, yêu cầu công suất đầu ra, chi phí và chất lượng của hệ thống quang.

Để truyền thông tin qua kênh quang, có một số cách để điều chế tín hiệu quang như: biên độ, pha (tần số), hoặc phân cực tín hiệu quang. Mặc dù có nhiều phương pháp điều chế quang tiên tiến được xem là phù hợp cho truyền thông quang [107], nhưng chỉ một vài định dạng được nghiên cứu cho truyền thông không dây là điều chế khóa đóng mở (OOK) [69], [126], [86], BPSK [81], khóa dịch pha DPSK [118], [43] và khóa dịch pha phân cực POLSK [128].

Việc sử dụng định dạng điều chế ở máy phát phụ thuộc vào cấu tạo của máy thu. Không phải mọi kỹ thuật thu đều phù hợp với các định dạng điều chế. Máy thu tách sóng trực tiếp (DD) không phù hợp với điều chế pha và phân cực mà yêu cầu chuyển đổi thành OOK bằng các phần tử quang bên ngoài [50], [107]. Các máy thu kết hợp tách tín hiệu quang trực tiếp, do đó cho phép bất kỳ định dạng điều chế nào mà không cần xử lý trước.

1.1.2. Kênh truyền dẫn khí quyển

Truyền thông quang qua không gian từ mặt đất đến HAP, từ HAP đến vệ tinh và ngược lại thực hiện thông qua kênh truyền dẫn khí quyển. Môi trường khí quyển có tính chất là ngẫu nhiên theo không gian và thời gian. Chính vì vậy, OWC cũng phụ thuộc ngẫu nhiên vào thời tiết và vị trí địa lý. Các yếu tố môi trường khác nhau không thể đoán trước như mây, tuyết, sương mù, mưa v.v..., gây ra sự suy giảm mạnh tín hiệu quang và giới hạn khoảng cách truyền dẫn. Các ảnh hưởng đối với đường lên/đường xuống trong các hệ thống OWC là khác nhau. Các tổn hao gặp phải trong đường lên của OWC là rất lớn so với đường xuống khi chùm tia bắt đầu lan rộng và tích lũy méo tín hiệu quang từ thiết bị đầu cuối mặt đất. Trong trường hợp đường lên, nguồn nhiễu gần với nguồn phát. Do đó, mô hình truyền sóng tương ứng với mô hình sóng hình cầu. Với đường xuống, nguồn gây nhiễu gần với thiết bị đầu cuối máy thu. Do đó, mô hình truyền sóng tương ứng với mô hình sóng phẳng. Các loại suy hao khi tín hiệu quang truyền qua kênh khí quyển là:

a. Hấp thụ và tán xạ

Hấp thụ phụ thuộc mạnh vào bước sóng [128]. Trong thực tế, chỉ có cửa sổ khí quyển (nơi sự suy giảm là tối thiểu) phù hợp cho OWC. Các bước sóng truyền thông laser điển hình 1,064 μm và 1,55 μm rơi vào cửa sổ truyền dẫn tốt [50], [128]. Hấp thụ chiếm ưu thế trong điều kiện bầu trời trong và tỷ lệ thuận với λ^{-4} . Tán xạ khí quyển do các hạt có kích thước phân tử được gọi là tán xạ Rayleigh. Đối với các hạt có kích thước lớn so với bước sóng, xảy ra tán xạ Mie (không phụ thuộc mạnh vào λ).

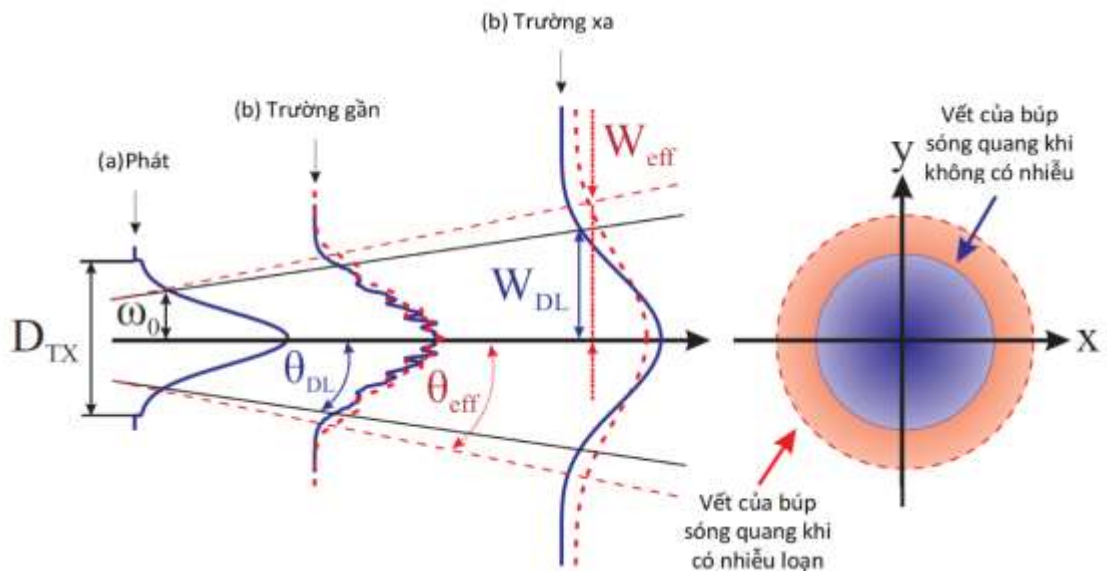
Khi tín hiệu quang truyền dọc theo phương thẳng đứng từ mặt đất qua bầu khí quyển, suy hao khí quyển α_A trong điều kiện trời trong (tại góc thiên đỉnh và $\lambda = 1550 \text{ nm}$) do hấp thụ và tán xạ là 1-2 dB [128]. Nếu máy phát đặt ở HAP có độ cao 20 km thì giá trị này giảm xuống 0,2 dB [32]. Sự biến thiên của suy hao khí quyển theo góc thiên đỉnh (là góc tạo bởi đường theo phương thẳng đứng và đường truyền tầm nhìn thẳng (LOS) giữa hai thấu kính phát và thu) được tính xấp xỉ như sau [46]:

$$\alpha_A(\xi) = \alpha_A(0) \sec(\xi) \quad \forall 0 \leq \xi < 70^\circ \quad (1.1)$$

Giá trị suy hao từ 0,2 đến 0,8 dB đối với các đường truyền từ HAP đến vệ tinh.

b. Sự trải rộng chùm tia (mở rộng búp)

Nhiều loạn khí quyển làm cho chùm tia trải rộng vượt ra ngoài giới hạn phân kỳ [62], θ_{DL} , dẫn đến góc phân kỳ hiệu dụng [78] θ_{eff} , do đó làm giảm công suất quang thu trung bình theo hệ số $(\theta_{eff} / \theta_{DL})^2$. Nếu nhiễu loạn yếu và tương đối xa nguồn phát, ví dụ, trong tuyến đường xuống từ vệ tinh đến HAP, kích thước vùng hiệu dụng tại máy thu về cơ bản giống với kích thước vùng nhiễu loạn. Do đó, suy hao do trải rộng chùm tia là không đáng kể. Trong đường lên, nơi có kích thước của các xoáy nhiễu loạn (nằm ngay trước máy phát) lớn hơn đường kính chùm tia, suy hao trung bình do sự trải rộng chùm tia dao động từ 3 dB (trong kịch bản từ mặt đất đến vệ tinh) đến 0,03 dB trong đường lên từ HAP tới vệ tinh [42].



Hình 1.3 Sự trải rộng chùm tia [36].

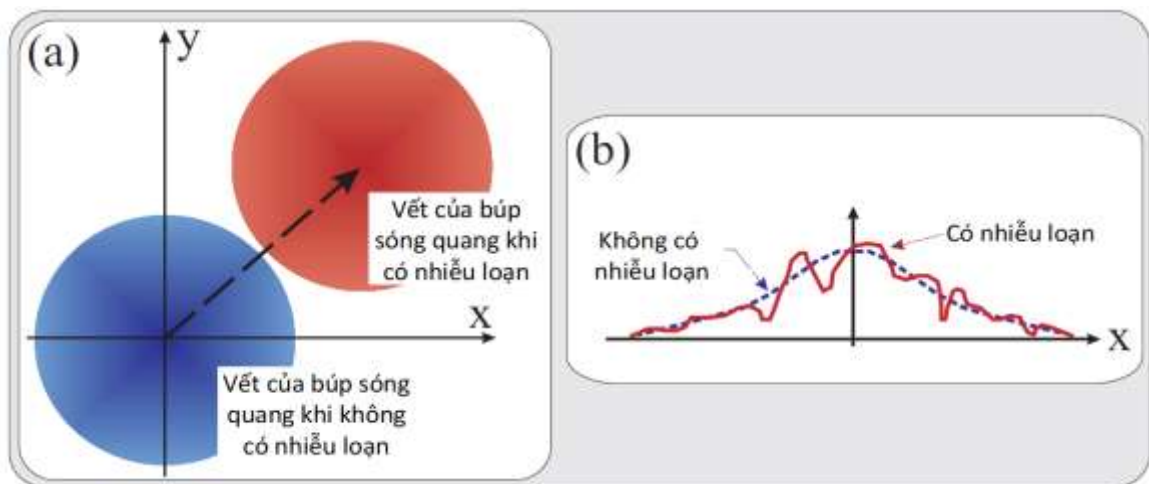
c. Pha đỉnh

Sự suy giảm của cường độ tín hiệu thu do hiệu ứng giao thoa và lệch hướng chùm tia thường được gọi là pha đỉnh. Chuyển động hỗn loạn của khí quyển cùng với sự thay đổi nhiệt độ và áp suất gây ra các nhiễu loạn trong chỉ số khúc xạ của bầu khí quyển ở dạng các xoáy hoạt động như các thấu kính quang ngẫu nhiên khúc xạ ánh sáng truyền lan. Người ta có thể phân biệt giữa hai hiệu ứng chính sau đây.

- Sự lệch dọc theo đường truyền lan di chuyển chùm tia sáng một cách ngẫu nhiên khỏi đường LOS giữa máy phát và máy thu. Trung tâm của chùm tia (điểm cường độ tối đa) được di chuyển ngẫu nhiên trong mặt phẳng thu. Sự lệch hướng chùm tia này chủ yếu là do nhiễu loạn quy mô lớn gần máy phát, và do đó, thường có thể bị bỏ qua đối với các đường xuống từ vệ tinh đến HAP [78].
- Sự nhấp nháy được gây ra bởi biến động chỉ số khúc xạ ngẫu nhiên. Nó dẫn đến cả sự thay đổi theo thời gian của cường độ thu và sự thay đổi không gian của khẩu độ máy thu.

Các kết quả mô phỏng trong [43], [51], cho thấy rằng - trái với đường truyền mặt đất vệ tinh – chỉ số nhấp nháy thường từ 0,3 đến 0,8 cho các kịch bản từ HAP-

tới-HAP[105], giữa 0,28 và 1,12 đối với các kịch bản HAP-tới mặt đất [67], và giảm xuống các giá trị dưới 0,025 cho các đường truyền HAP-vệ tinh [42]. Quy mô thời gian của các dao động phụ thuộc vào vận tốc của các xoáy nhiễu loạn chuyển sang chùm quang. Trong tuyến OWC từ HAP, thời gian tương quan này được tính theo miligiây và do đó, thường lớn hơn nhiều so với khoảng thời gian của bit (pico giây đến nano giây). Do đó, mức công suất quang của tín hiệu thu là không đổi trên một số lượng lớn các bit.



Hình 1.4 (a) Sự lệch dọc chùm tia và (b) Sự nhấp nháy gây ra bởi biến động chỉ số khúc xạ ngẫu nhiên [68].

1.1.3. Trạm hạ tầng trên cao

Trạm hạ tầng trên cao là các khinh khí cầu hoặc máy bay không người lái đặt ở tầng bình lưu. HAP đóng vai trò như một trạm chuyển tiếp tín hiệu giữa hai trạm mặt đất hoặc giữa trạm mặt đất và vệ tinh. Nhiệm vụ của HAP là nhận thông tin từ trạm mặt đất GS-A (hoặc GS-B) chuyển đến, thực hiện chuyển đổi quang điện (O/E), tái tạo xử lý, khuếch đại tín hiệu sau đó thực hiện chuyển đổi điện quang (E/O) và chuyển tiếp đến phía thu GS-B (hoặc GS-A). Những trạm HAP này thường xử lý tín hiệu dạng điện do đó phức tạp, tốc độ thấp và tiêu thụ công suất lớn. Nếu tại trạm HAP thực hiện xử lý tín hiệu quang sẽ giải quyết được các nhược điểm trên đồng thời nâng cao hiệu năng hệ thống.

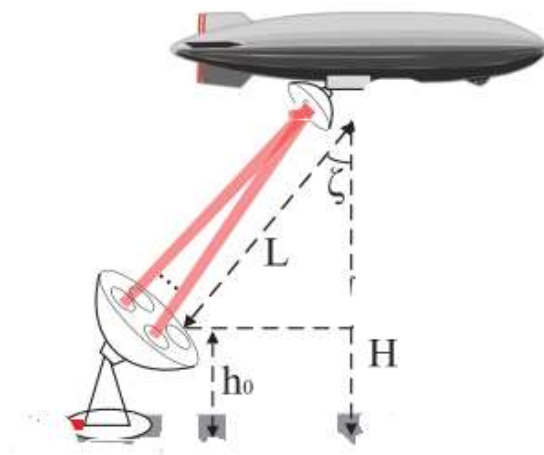


Hình 1.5 Một số HAP và UAV [36].

Khoảng cách từ HAP đến các trạm mặt đất, ở đây chính là các trạm thu phát, thường được xét đến trong các tính toán về ảnh hưởng của môi trường, được tính như sau:

$$L = (H - h_0) / \cos(\zeta), \quad (1.2)$$

với H là độ cao của HAP, h_0 là độ cao của GS và ζ là góc thiên đỉnh (góc tạo bởi đường theo phương thẳng đứng với đường nối giữa HAP và trạm mặt đất).



Hình 1.6 Góc thiên đỉnh giữa HAP và GS.

1.1.4. Bộ thu

Bộ thu được đặt tại các trạm mặt đất GS-A (hoặc GS-B). Bộ thu chuyển đổi tín hiệu quang đầu vào thành tín hiệu điện đầu ra. Trong trường hợp không có khuếch đại đường truyền giữa bộ phát và bộ thu thì bộ thu cần có độ nhạy thu cao. Độ nhạy này được biểu thị bằng số lượng photon trên mỗi bit hoặc bằng công suất quang tại một tốc độ dữ liệu nhất định để đạt được tỉ lệ lỗi bit (BER) theo yêu cầu. Có hai kiểu bộ thu quang cơ bản: bộ thu coherent và bộ thu tách sóng trực tiếp (DD).

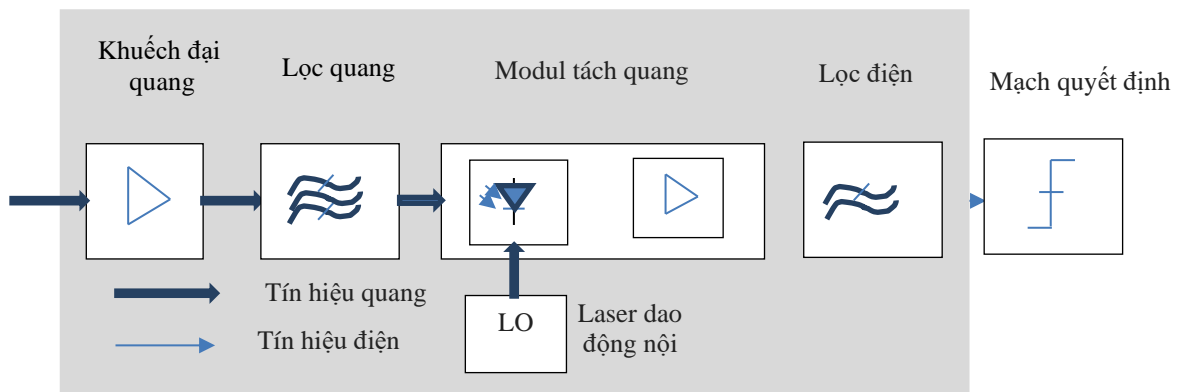
Thu tách sóng trực tiếp: kiểu tách sóng này sử dụng cường độ hoặc công suất của phát xạ quang đến bộ thu để tách tín hiệu. Do vậy, cường độ dòng điện đầu ra của bộ tách quang (PD) sẽ tỉ lệ với công suất quang đến. Cách xử lý tín hiệu này rất đơn giản và phù hợp với hầu hết các hệ thống quang sử dụng điều chế cường độ (IM).

Thu coherent: sử dụng laser dao động nội (LO) để tăng tín hiệu đầu ra của bộ tách sóng quang. Cơ chế thu này có độ nhạy cao và nhiễu nền thấp. Tùy thuộc vào sự khác nhau giữa tần số laser phát và laser dao động nội sẽ có tách sóng homodyne và heterodyne. Trong homodyne, tín hiệu quang được chuyển trực tiếp xuống băng gốc, trong khi trong heterodyne, có sự khác biệt tần số giữa LO và tín hiệu quang thu, dẫn đến tín hiệu trung tần IF trong dải tần số vô tuyến (RF). Thu coherent đặt ra các yêu cầu nghiêm ngặt về phổ của nguồn laser.

Các yêu cầu quan trọng đối với laser LO: phải là laser đơn mode để IF là một sóng mang đơn sắc; có phổ hẹp nhằm giảm thiểu nhiễu pha laser; có tần số khả chỉnh để bù lại sự thay đổi tần số phát laser và sự dịch chuyển Doppler. Những tiến bộ gần đây trong xử lý tín hiệu số (DSP) tốc độ cao cũng cho phép sử dụng LO dao động nội [10]. Tín hiệu số sau khi thu được hiệu chỉnh tần số và lệch pha giữa tần số laser phát và LO nhờ DSP. Trong bộ thu DD, dòng tách quang tỉ lệ với công suất của tín hiệu thu. Do đó, bất kỳ thông tin về pha hoặc phân cực nào bị mất thì cũng không làm ảnh hưởng tới các định dạng điều chế. Tách sóng trực tiếp có các ưu điểm so với tách sóng coherent về chi phí và độ phức tạp, khi sự kết hợp của laser phát tín

hiệu hoặc laser dao động nội LO không thể được kiểm soát suôn sẻ, hoặc khi các đặc tính pha của tín hiệu thu được bị nhiễu.

Hình 1.7 cho thấy một sơ đồ thu ở dạng đơn giản. Ở sơ đồ này, khối tiền khuếch đại quang là tùy chọn, còn bộ lọc băng thông quang ở bước sóng mang dùng để giảm phát xạ nền và nhiễu khuếch đại tự phát được khuếch đại ASE do bộ khuếch đại tạo ra. Sau khi đi qua bộ lọc, tín hiệu dữ liệu được chuyển đổi thành dòng điện nhờ sử dụng bộ tách sóng quang. Quá trình xử lý bằng gốc tiếp theo là lấy mẫu và quyết định.



Hình 1.7 Sơ đồ khối cơ bản của bộ thu.

Bộ tách sóng quang thường sử dụng là đi-ốt p-i-n hoặc đi-ốt quang thác APD. Một trong những đặc điểm chính của APD là đáp ứng hay độ nhạy cao, được xác định là tỷ lệ dòng điện trên công suất-quang (tính bằng ampe/watt). Giá trị cực đại của độ nhạy thường khoảng 0,7 A/W ở bước sóng 950 nm đối với các linh kiện Si và 1,1 A/W ở 1550 nm đối với InGaAs [59]. APD nhân số lượng các điện tử sinh ra bởi hệ số nhân M (ví dụ: $M \approx 100$ cho APD Si và $M \approx 10$ cho các APD InGaAs). Hiệu ứng này cũng xảy ra với nhiễu.

Trong trường hợp APD không thể cung cấp đủ băng thông, độ nhạy thu quang có thể được cải thiện bằng các bộ tiền khuếch đại quang nhiễu thấp [42]. Cho đến nay, các bộ khuếch đại Erbium (EDFA) đã được sử dụng chủ yếu trong các máy thu quang tốc độ cao của hệ thống OWC. Các EDFA được thiết kế cho hoạt động đơn mode. EDFA có sẵn cho cả băng tần C (1530–1560 nm) và băng tần L (1570–1600nm), hoạt động gần với hệ số nhiễu 3dB, và có thể đạt được $G > 35$ dB [59].

Quá trình tách của các trường quang bị tác động bởi nhiều loại nguồn nhiễu khác nhau xuất hiện tại bộ thu. Ba loại nguồn nhiễu chủ yếu trong truyền thông OWC là: ánh sáng nền, nhiễu do bộ tách quang, nhiễu nhiệt trong mạch điện tử. Mặc dù phát xạ nền có thể được hạn chế bằng cách sử dụng bộ lọc quang nó vẫn gây ra nhiễu đáng kể trong quá trình tách. Nhiễu lượng tử của bộ tách quang bắt nguồn từ sự ngẫu nhiên của quá trình đếm photon tại bộ tách quang. Nhiễu nhiệt có thể được mô hình hóa dưới dạng nhiễu Gauss trắng cộng AWGN, có mức phổ tỷ lệ thuận với nhiệt độ bộ thu.

1.2. Hiệu năng hệ thống OWC dựa trên HAP

Hiệu năng là vấn đề luôn được quan tâm đánh giá trong bất kỳ một hệ thống truyền thông nào. Có rất nhiều các tham số để đánh giá hiệu năng của hệ thống. Trong đó các tham số thường sử dụng như tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), tỉ lệ lỗi bit BER, dung lượng kênh C, xác suất/dung lượng dưới ngưỡng... Tuy nhiên, việc lựa chọn tham số nào để đánh giá tùy thuộc vào đặc điểm và ứng dụng của từng hệ thống. Trong luận án, với hệ thống truyền thông quang dựa trên HAP, các tham số nghiên cứu sinh sử dụng là tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tỉ lệ lỗi bit.

a. Tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR: là một trong các tham số quan trọng nhất để đánh giá hiệu năng hệ thống ở lớp vật lý. Đây cũng là một thước đo được sử dụng trong khoa học và kỹ thuật để so sánh mức độ của tín hiệu mong muốn với mức nhiễu nền. SNR được định nghĩa là tỷ lệ công suất tín hiệu so với công suất nhiễu, thường được biểu thị bằng decibel. SNR phụ thuộc vào nhiều yếu tố như công suất tín hiệu thu, các tham số kênh truyền. Tỷ số tín hiệu trên nhiễu, băng thông và dung lượng kênh của kênh truyền thông được kết nối bằng định lý Shannon.

b. Tỷ lệ lỗi bit (BER): là số lỗi bit (BER) là tỉ số giữa số bit lỗi chia cho tổng số bit được truyền trong khoảng thời gian xem xét. Tỷ lệ lỗi bit là một phép đo hiệu năng hệ thống. Tỷ lệ lỗi bit có thể được coi là ước tính gần đúng của xác suất lỗi bit. Ước tính này là chính xác trong một khoảng thời gian dài và số bit lỗi cao.

Trong một hệ thống truyền thông, BER phía máy thu có thể bị ảnh hưởng bởi nhiều kênh truyền, méo, vấn đề đồng bộ hóa bit, suy hao, v.v. Trong truyền dẫn số, lỗi là số bit nhận được của luồng dữ liệu qua kênh truyền thông đã bị thay đổi do nhiễu, méo hoặc lỗi đồng bộ hóa bit. Đối với các hệ thống khác nhau thì BER yêu cầu cũng khác nhau, ví dụ với hệ thống PDH BER từ 10^{-3} - 10^{-6} , nhưng với SDH, WDM là 10^{-9} , 10^{-12} . BER thường được đo bằng các máy đo BER.

1.3. Các công trình nghiên cứu liên quan

Theo tìm hiểu của nghiên cứu sinh, ở Việt Nam hiện tại các nghiên cứu về truyền thông quang không dây chuyển tiếp dựa trên hạ tầng trên cao HAP chưa được quan tâm nhiều. Các công trình nghiên cứu liên quan về hệ thống truyền thông quang không dây OWC mới chỉ là các nghiên cứu về công nghệ OWC mặt đất, tình hình triển khai công nghệ OWC trên thế giới và khả năng ứng dụng công nghệ OWC tại Việt Nam [3]; nghiên cứu nâng cao chất lượng tuyến thông tin quang không dây mặt đất trong điều kiện khí hậu Việt Nam [2]; nghiên cứu cải thiện hiệu năng hệ thống OWC mặt đất được thực hiện bởi nhóm nghiên cứu của tác giả thuộc Đại học Bách Khoa Hà Nội trong đó các tác giả đã đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống OWC mặt đất dựa trên các kỹ thuật điều chế sóng mang phụ, phân tập không gian và truyền dẫn chuyển tiếp [64]. Nghiên cứu cải thiện hiệu năng hệ thống OWC bằng cách kết hợp kỹ thuật chuyển tiếp với phân tập và điều chế đa mức, kỹ thuật MWPPM [4]. Một nghiên cứu về hệ thống thông tin HAP nhưng là nghiên cứu giải pháp thiết kế và đánh giá hiệu năng mã kênh cho hệ thống vô tuyến [1]. Các đề xuất này chủ yếu dựa trên các kỹ thuật xử lý tín hiệu trong miền điện với hạn chế về tốc độ, độ phức tạp và năng lượng tiêu thụ.

Trên thế giới, một số các hệ thống truyền thông dựa trên HAP đã được triển khai. Năm 1980, hệ thống SHARP đã được phát triển bởi một trung tâm nghiên cứu truyền thông tại Canada, lần đầu tiên sử dụng HAP dưới dạng các máy bay không người lái ở độ cao 21 km [56]. Để phủ sóng toàn cầu, các trạm không gian được phát triển bởi Sky Station International có khả năng hỗ trợ nhiều loại dịch vụ truyền

thông không dây với tốc độ từ 2 Mbit/s tới 10 Mbit/s. Ở châu Âu, Cơ quan hàng không vũ trụ châu Âu và ủy ban châu Âu cũng rất quan tâm tới hệ thống truyền thông dựa trên HAP thông qua việc tài trợ cho các dự án nghiên cứu như HALE, STATOS, HeliNet, CAPANINA, HAPCOS... Trong số các dự án trên, CAPANINA và HAPCOS có thể sử dụng cả tuyến truyền dẫn RF và truyền dẫn quang. SkyNet được phát triển bởi NICT, Nhật Bản sử dụng các khinh khí cầu ở độ cao 20 km với nhiều chức năng như truyền thông, truyền hình và quan sát môi trường. Tại Hàn Quốc, ETRI và Viện nghiên cứu hàng không vũ trụ Hàn Quốc lên kế hoạch xây dựng các trạm không gian và mặt đất trong một chương trình kéo dài 10 năm [86]. Các hệ thống truyền thông dựa trên HAP cũng đang được nghiên cứu phát triển bởi các tập đoàn lớn trên thế giới như Google, Facebook, SpaceX, OneWeb (US) và SkyFi (Israel). Các hướng nghiên cứu chính hiện nay về các hệ thống OWC dựa trên HAP bao gồm:

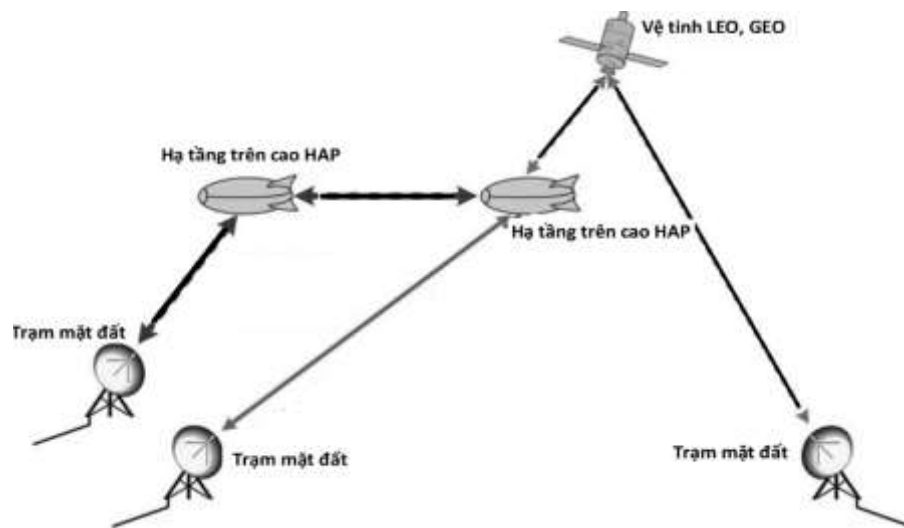
- 1) *Nghiên cứu các kịch bản triển khai truyền thông quang không dây dựa trên HAP và các vấn đề liên quan.*
- 2) *Nghiên cứu ảnh hưởng của kênh OWC từ đó phân tích, đánh giá và đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP.*
- 3) *Nghiên cứu các giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP.*

1.3.1. Các kịch bản triển khai hệ thống OWC dựa trên HAP

a. Truyền thông quang từ vệ tinh đến HAP

Một số nghiên cứu lý thuyết về các đường truyền vệ tinh-HAP đã được công bố trong những năm qua. Knappek và các đồng nghiệp đã nghiên cứu thông lượng đạt được của các hệ thống OWC từ vệ tinh quỹ đạo thấp (LEO) xuống mặt đất [86]. Trong một số kịch bản mạng, HAP được sử dụng như các trạm chuyển tiếp. Tốc độ dữ liệu 5,6 Gb/s được giả định dựa trên thiết bị đầu cuối TerraSAR-X [114]. Giggenbach và các cộng sự nhấn mạnh vào các ràng buộc tầm nhìn hình học giữa các vệ tinh, HAP và các trạm mặt đất. Các nghiên cứu này được thực hiện đối với

kiến trúc thiết bị đầu cuối và lựa chọn các công nghệ truyền dẫn tối ưu. Perlot và các cộng sự đã nghiên cứu các thuộc tính của các kênh truyền thông vệ tinh - HAP, nhiễu loạn khí quyển và tổn hao đường truyền gây ra bởi các đám mây [31]. Fidler [42] đã nghiên cứu tính khả thi của các đường truyền thông quang tại bước sóng $\lambda = 1550$ nm qua kênh khí quyển giữa HAP và vệ tinh địa tĩnh, cho tốc độ dữ liệu lên tới 10,7 Gb/s dùng mã sửa lỗi hướng phát (FEC). Hệ thống truyền thông được đề xuất sử dụng điều chế ngoài trở về không (RZ) điều chế OOK, bộ khuếch đại quang sợi Erbium có công suất đầu ra 10 W và máy thu DD tiền khuếch đại quang. Máy thu được khảo sát cho thấy độ nhạy chỉ cao hơn giới hạn lượng tử 1,6 dB. Betti và các cộng sự đã nghiên cứu tuyến HAP-GEO-HAP [118] và kịch bản HAP-LEO [81] sử dụng điều chế khóa dịch pha vi sai (DPSK), hiệu năng cải thiện 3 dB so với OOK.



Hình 1.8 Truyền thông quang không dây dựa trên HAP [37].

b. Truyền thông quang từ HAP đến HAP

Năm 2002, Giggenbach và các cộng sự [32] đã nghiên cứu khái niệm về các đường truyền giữa các HAP nhằm vào các mạng truyền thông quy mô lớn phía trên lớp mây. Một phân tích lý thuyết cho các đường truyền HAP-tới-HAP ở độ cao 20 km cũng được tiến hành ở [38], giả thiết khoảng cách 500 km, bước sóng truyền thông 1550 nm, điều chế cường độ và máy thu dựa trên APD lượng tử (QAPD).

QAPD được sử dụng để thực hiện ở cả thiết bị định hướng, bắt và bám (PAT) và hệ thống truyền thông với sự trợ giúp của duy nhất một bộ tách quang. Hệ thống đạt được $BER = 10^{-6}$ tại tốc độ dữ liệu 384 Mb/s với công suất phát 800 mW. Năm 2006, các thử nghiệm đầu tiên của các thiết bị đầu cuối, hoạt động ở bước sóng 1550 nm được thực hiện trên mặt đất. Các đường truyền thông song hướng đã được thử nghiệm trên một khoảng cách lên đến 2 km với tốc độ dữ liệu 2,5 Gb/s.

Một số nghiên cứu đã được tiến hành giải quyết các vấn đề liên quan đến việc hình thành mạng truyền thông quang HAP-tới-HAP. Fortuna và các cộng sự [23] mô tả các mạng đường trục quang giữa các HAP. Họ khảo sát các ràng buộc vật lý của các mạng quang ghép kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao và thảo luận các vấn đề về định tuyến toàn quang trong mạng. Định tuyến thích ứng mang lại kết quả tốt hơn so với định tuyến cố định luân phiên hoặc cố định về xác suất tắc nghẽn và sử dụng kênh bước sóng. Số bước sóng truyền thông yêu cầu được ước tính với mục tiêu kết nối đầy đủ mà không cần chuyển đổi bước sóng. De Rango và các cộng sự [34] đã trình bày một thuật toán định tuyến nhận biết chất lượng dịch vụ dựa trên hành vi của đàn kiến, nhằm giảm thiểu độ dài tuyến và cân bằng tải trên mạng HAP.

c. Truyền thông quang giữa trạm mặt đất và HAP

Năm 2003, Phòng thí nghiệm Jet Propulsion (JPL) báo cáo về sự phát triển của một thiết bị đầu cuối quang được thiết kế cho thiết bị bay không người lái (UAV) Altair, được lên kế hoạch bay ở độ cao 18 km. Hệ thống hoạt động với tốc độ 2,5 Gb/s, khoảng cách 50 km bước sóng 1550 nm [16]. Dự án EU Capanina thực hiện đường truyền quang đơn hướng từ các khinh khí cầu đến mặt đất [69]. Thiết bị đầu cuối trên khinh khí cầu có tốc độ 1,25 Gb/s ở bước sóng 1550 nm. Chức năng PAT được thực hiện bằng tín hiệu hoa tiêu 810 nm tại trạm mặt đất và tín hiệu hoa tiêu 977 nm tại thiết bị đầu cuối. Argos đã nghiên cứu ứng dụng giám sát thời gian thực cho các ứng dụng như quản lý thiên tai hoặc quan sát giao thông. Trong dự án này, một thiết bị đầu cuối quang thế hệ thứ hai được xây dựng vào năm 2007/2008 cho việc triển khai trên một máy bay. Giám sát đường xuống đơn hướng đầu tiên

của các thiết bị đầu cuối được thực hiện trong năm 2008 trên một khoảng cách lên đến 40 km [68]. Hệ thống không sử dụng tín hiệu hoa tiêu. Các chùm laser tương ứng ở 1550 nm trên các HAP và 1590 nm từ trạm mặt đất, sử dụng đồng thời cho PAT và truyền thông tin. Hệ thống PAT của cả hai thiết bị đầu cuối được sử dụng Laser InGaAs hoạt động tại bước sóng 1550/1590 nm.

1.3.2. Đánh giá hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP

Như đã trình bày trong phần 1.1.2 việc truyền tín hiệu quang của hệ thống truyền thông quang không dây dựa trên HAP phải đi qua bầu khí quyển và môi trường này đã gây ra các ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống. Một số nghiên cứu về ảnh hưởng của kênh truyền đến hiệu năng hệ thống OWC đã được thực hiện. Trong [129] các tác giả đã nghiên cứu tổn hao do tán xạ và hấp thụ từ các phân tử và hạt khí trong khí quyển. Đồng thời trong các nghiên cứu này cũng đề cập đến tổn hao do phân kỳ búp sóng quang và phương pháp làm giảm tổn hao này. Búp sóng laser có tính định hướng cao và độ rộng chùm hẹp nên sự lệch hướng giữa phía phát và thu gây tổn hao cho hệ thống OWC dựa trên HAP. Tổn hao do sự lệch hướng này được nghiên cứu trong [120]. Nghiên cứu về lỗi do mất đồng chỉnh giữa bộ phát và bộ thu được thực hiện trong [36]. Akbar và các cộng sự nghiên cứu hiệu năng BER và xác suất dừng của tuyến quang giữa các HAP qua kênh nhiễu loạn yếu được mô hình hóa bởi phân bố log-chuẩn [7], [8]. Nhiễu loạn khí quyển theo phân bố gamma-gamma được nghiên cứu trong [96].

Song song với các nghiên cứu thử nghiệm hệ thống OWC dựa trên HAP, các nghiên cứu lý thuyết cũng tập trung vào đánh giá hiệu năng hệ thống dưới ảnh hưởng của các điều kiện đường truyền khác nhau. Fidler và các cộng sự nghiên cứu tổng quan về truyền thông quang không dây dựa trên HAP [125]. Các công trình [19], [30] tập trung nghiên cứu các tuyến truyền dẫn giữa các HAP. Akbar và các cộng sự nghiên cứu hiệu năng BER và xác suất dừng của tuyến quang giữa các HAP qua kênh nhiễu loạn yếu được mô hình hóa bởi phân bố log-chuẩn [77], [129]. Trong [4], [104], truyền thông giữa HAP và các trạm mặt đất đã được tiến hành nghiên

cứu trong đó hệ thống gồm một HAP và hai trạm thu phát OWC trên mặt đất. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, Tosovsky và các cộng sự chỉ ước lượng các tham số kênh OWC bao gồm: tổn hao phân kỳ, tổn hao khí quyển, tổn hao nhiễu loạn và trễ đường truyền. Trong [131], Giggenbach và các cộng sự triển khai thí nghiệm truyền dẫn quang đường xuống cho dự án CAPANINA. Một trong các nghiên cứu điển hình được tiến hành gần đây là nghiên cứu phân tích hiệu năng đường xuống từ vệ tinh tới trạm mặt đất của hệ thống OWC sử dụng phân tập không gian trong điều kiện nhiễu loạn khí quyển được mô hình hóa bởi phân bố Gamma-Gamma. Việc nghiên cứu đánh giá hiệu năng và độ tin cậy hệ thống OWC dựa trên HAP cũng đã được thực hiện trong [71]. Trong nghiên cứu này, các tác giả đề xuất việc chuyển tiếp tín hiệu giữa hai trạm mặt đất qua nhiều trạm chuyển tiếp HAP nhằm cải thiện cự ly và độ tin cậy của hệ thống OWC.

1.3.3. Cải thiện hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP

Việc nghiên cứu cải thiện hiệu năng hệ thống thông tin quang không dây dựa trên HAP theo các hướng sau đây:

a. Điều chế:

Trong truyền thông OWC, việc lựa chọn các sơ đồ điều chế phụ thuộc vào hai tiêu chí chính: hiệu năng quang và hiệu năng băng thông. Hiệu năng quang có thể đo được bằng cách tính toán mức tăng công suất quang với điều kiện cả hai sơ đồ điều chế đều có cùng khoảng cách. Các sơ đồ điều chế hiện thực đơn giản hơn và khá hiệu quả trong việc giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu loạn đối với tốc độ dữ liệu thấp.

Truyền thông OWC hỗ trợ định dạng điều chế nhị phân và điều chế đa mức. Trong đó điều chế nhị phân được sử dụng phổ biến nhất do tính đơn giản và hiệu quả công suất cao. Các sơ đồ điều chế nhị phân phổ biến nhất là OOK và điều chế vị trí xung (PPM). Sơ đồ điều chế OOK đòi hỏi ngưỡng thích nghi trong điều kiện khí quyển nhiễu loạn để có kết quả tốt nhất [14]. Do tính đơn giản điều chế OOK rất phổ biến trong truyền thông OWC và phổ biến nhất là được triển khai với hệ

thống điều biến cường độ/tách sóng trực tiếp (IM/DD). Việc lựa chọn chu kỳ xung cho tín hiệu điều chế cường độ sẽ tác động đến các tham số thiết kế hệ thống như tốc độ bit truyền và khoảng cách kênh

Trong trường hợp M -PPM, mỗi khoảng thời gian ký hiệu được chia thành M khe thời gian và xung quang khác không được đặt tại các khe thời gian này trong khi các khe khác được để trống. Đối với truyền dẫn khoảng cách lớn hoặc không gian vũ trụ, sơ đồ M -PPM được sử dụng rộng rãi vì nó cung cấp tỷ lệ công suất đỉnh-trung bình (PAPR) cao giúp cải thiện hiệu năng [19], [58]. Ngoài ra, không giống như OOK, M -PPM không yêu cầu ngưỡng thích ứng. Tuy nhiên, phương thức M -PPM có hiệu năng băng thông kém ở các giá trị M lớn và do đó, đối với các hệ thống giới hạn băng thông, các phương thức điều chế đa mức được ưu tiên. Ở đây, dữ liệu truyền có thể có nhiều mức biên độ và các phương thức điều chế cường độ đa mức được sử dụng, phổ biến nhất là điều chế biên độ xung PAM [9] và điều chế biên độ cầu phương QAM.

Tuy nhiên, cái giá phải trả cho hiệu quả băng thông là sự giảm mức công suất. Do đó, các phương thức điều chế này không phải là một lựa chọn tốt cho điều kiện khí quyển nhiễu loạn mạnh hoặc hệ thống hạn chế về công suất. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng trong trường hợp nhiễu nền cao, M -PPM được coi là phương thức điều chế tối ưu cho kênh Poisson [112], [115]. M -PPM với M lớn có khả năng thích ứng với bức xạ nền lớn do chu kỳ xung nhỏ và khoảng thời gian tích hợp ít hơn của đi-ốt tách quang.

Nhờ những ưu điểm của PPM trong OWC, các dạng khác nhau của PPM đã được phát triển nhằm mục đích nâng cao hiệu năng hệ thống. Một phần mở rộng của PPM đơn xung là sử dụng hai hoặc nhiều xung trong mỗi ký hiệu để truyền tải thông tin là PPM đa xung [85]. Điều này được thực hiện bằng cách đặt cơ số (K) xung trên mỗi khoảng ký hiệu theo tất cả các cách có thể trong M khe và do đó, cung cấp chòm sao tín hiệu có kích thước thay đổi M^K (đối với M lớn) thay vì tuyến tính với M , như trong trường hợp PPM thông thường. Các dạng khác của PPM là PPM

vi sai (DPPM) [35], [123], PPM vi sai thích nghi (DAPPM) [106], điều chế xung nhịp PIM [63], điều chế khoảng thời gian xung tiêu đề kép DHPIM và PPM chồng lấn OPPM [27], [28]. Tất cả các phương thức điều chế này có được bằng cách điều chỉnh đơn giản thành PPM để đạt được hiệu quả công suất và cải thiện băng thông. Trong DPPM, các khe trống không có xung trong ký hiệu PPM bị loại bỏ, do đó làm giảm độ dài ký hiệu trung bình và cải thiện hiệu quả băng thông. DPPM có được sự đồng bộ ký hiệu sẵn có khi mọi ký hiệu kết thúc bằng một xung. Tuy nhiên, đối với một chuỗi bit không dài có thể xảy ra sự cố đồng bộ khe, có thể xử lý bằng cách sử dụng băng bảo vệ ngay sau khi xung được loại bỏ. Hiệu năng của DPPM và PPM đã được so sánh về BER và mật độ phổ công suất trong [34], cải thiện hiệu năng trong [64]. Người ta nhận thấy rằng DPPM cải thiện băng thông, tăng tốc độ bit trung bình so PPM. DAPPM là sự kết hợp giữa DPPM và PAM. Do đó, một sơ đồ điều chế đa mức trong đó độ dài ký hiệu thay đổi từ $1, 2, \dots, M$ và biên độ xung được chọn từ $1, 2, \dots, A$ trong đó A và M là số nguyên. Phân tích hiệu năng của hệ thống OWC từ mặt đất đến vệ tinh với DAPPM trong tình trạng nhiễu loạn khí quyển yếu được nghiên cứu trong [106].

b. Phân tập:

Phân tập là một phương pháp để nâng cao độ tin cậy của việc truyền tín hiệu bằng cách truyền một tín hiệu giống nhau trên nhiều kênh truyền khác nhau để đầu thu có thể chọn trong số những tín hiệu thu được hoặc kết hợp những tín hiệu đó thành một tín hiệu tốt nhất. Kỹ thuật phân tập giúp giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu loạn khí quyển có thể hoạt động theo thời gian, tần số và không gian. Trong phân tập, thay vì sử dụng một anten lớn duy nhất, một mảng anten thu nhỏ hơn được sử dụng để nhiều bản sao tín hiệu không tương quan với nhau có thể được truyền. Điều này sẽ cải thiện khả năng truyền dẫn và hiệu năng BER của hệ thống. Nó cũng hạn chế sự cần thiết phải theo dõi hoạt động do sai lệch chùm tia. Dự án GOLD năm 1998 cho thấy chỉ số nhấp nháy được cải thiện mạnh với bốn chùm tia 514,5nm cho truyền dẫn đường lên. Giá trị nhấp nháy đã giảm từ 0,12 với hai chùm tia xuống còn 0,045 với bốn chùm tia[83].

Giảm phương sai cường độ tín hiệu theo hệ số căn bậc hai của số lượng ăng ten phát được quan sát thấy trong [25], [89] đối với đường lên OWC từ mặt đất đến vệ tinh. Để đạt được lợi thế tối đa do phân tập, số anten tại máy phát hoặc máy thu ít nhất phải lớn hơn độ dài kết hợp của khí quyển để làm cho nhiều chùm tia độc lập hoặc ít nhất là không bị giao thoa.

Trong trường hợp phân tập máy thu nhiều đầu ra một đầu vào (SIMO), phân tập đạt được bằng cách lấy trung bình trên nhiều đường tín hiệu độc lập. Các tín hiệu có thể được kết hợp tại máy thu bằng cách sử dụng kết hợp lựa chọn (SC) hoặc kết hợp độ lợi cân bằng (EGC) hoặc kết hợp tỷ lệ tối đa (MRC). SC đơn giản hơn, nhưng độ lợi trong trường hợp này là thấp. Độ lợi đạt được thông qua MRC cao hơn một chút so với EGC, nhưng chi phí lại cao hơn. Do đó, việc triển khai EGC được ưu tiên hơn MRC do có tính đơn giản mà hiệu năng vẫn tương đương [76], [87]. Đối với phân tập phát nhiều đầu vào một đầu ra (MISO), các mã đặc biệt như mã Alamouti quang được sử dụng [72], [84]. Mã này được thiết kế chỉ cho hai ăng ten truyền nhưng có thể được mở rộng đến số lượng ăng ten nhiều hơn.

Hệ thống OWC nhiều đầu vào nhiều đầu ra (MIMO) hoạt động tốt nếu các chùm độc lập hoặc không tương quan. Hiệu năng của các hệ thống MIMO và RF MIMO quang gần như tương đương. Nó làm tăng dung lượng kênh của hệ thống gần như tuyến tính với số lượng ăng ten phát. Trong trường hợp nhiễu loạn khí quyển yếu, xác suất ngừng hoạt động của kênh OWC Gauss tỷ lệ thuận với $[\log(\text{SNR})]^2$ trong khi đối với nhiễu loạn trung bình đến mạnh, tỷ lệ với $[\log(\text{SNR})]$ [98].

c. Chuyển tiếp

Tại một nút chuyển tiếp của các hệ thống OWC, hai loại kỹ thuật chuyển tiếp có thể được thực hiện bao gồm chuyển tiếp điện và chuyển tiếp quang [74]. Sử dụng chuyển tiếp điện cần chuyển đổi quang/điện và điện/quang (O/E/O) [37, 132] nên bị giới hạn về tốc độ xử lý và yêu cầu xử lý quang điện phức tạp tại nút chuyển tiếp. Chuyển tiếp điện đã được nghiên cứu cho các hệ thống OWC trên mặt đất và cũng

được áp dụng cho HAP [95,96]. Kỹ thuật chuyển tiếp quang, cho phép tín hiệu quang được xử lý trực tiếp trong miền quang, không chỉ tránh sử dụng các thành phần phức tạp tại HAP mà còn cung cấp tốc độ dữ liệu cao lên tới 10 Gbps [101,102].

Chuyển tiếp toàn quang bao gồm kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp quang (OAF) và kỹ thuật tái tạo và chuyển tiếp quang (ORF). Đây là hai loại kỹ thuật chuyển tiếp quang phổ biến đã được nghiên cứu trong [121]. Trong ORF, tín hiệu đầu tiên được lọc bởi bộ lọc thông dải quang (BPF) để loại bỏ các thành phần tần số nhiễu trắng thu được và sau đó được khuếch đại trước khi được tái tạo bằng bộ tự điều chế pha (SPM) trong sợi quang phi tuyến cao (HNLF). Các tín hiệu được tái tạo, khuếch đại lại và chuyển tiếp đến nút tiếp theo. Kỹ thuật chuyển tiếp toàn quang đơn giản hơn là OAF, khuếch đại tín hiệu trong miền quang và sau đó chuyển tiếp đến nút tiếp theo. Tuy nhiên, hiệu năng của hệ thống OWC sử dụng OAF có thể bị suy giảm nghiêm trọng do nhiễu nền [75]. Trong [111], việc sử dụng OAF trong hệ thống OWC trên mặt đất thành công bằng cách sử dụng bộ giới hạn cứng quang (OHL) để loại bỏ nhiễu nền trước khi khuếch đại tín hiệu thu được. Kỹ thuật chuyển tiếp toàn quang này được gọi là tách quang- khuếch đại- và chuyển tiếp (ODAF).

1.4. Nhận xét các công trình nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của luận án

1.4.1. Nhận xét về công trình nghiên cứu liên quan

Qua khảo sát và phân tích ở trên, nghiên cứu sinh nhận thấy vẫn còn một số vấn đề chưa được đề cập đến trong các nghiên cứu trước đây cụ thể như sau:

a) Hạn chế trong các nghiên cứu về mô hình kênh

Trong các yếu tố chính ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống truyền thông quang không dây chuyển tiếp dựa trên HAP như đã đề cập ở trên, ảnh hưởng của các tham số đường truyền khí quyển, các điều kiện đường truyền, các loại nhiễu chưa được xem xét một cách đầy đủ và đồng thời trong mỗi công trình nghiên cứu.

b) Hạn chế trong các nghiên cứu về phân tích và đánh giá hiệu năng

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào các các kỹ thuật điều chế, giải điều chế đơn giản. Ít công trình nghiên cứu khảo sát việc sử dụng các kỹ thuật truyền dẫn và xử lý tín hiệu tiên tiến như tách sóng coherent, phân tập không gian, chuyển tiếp đa chặng...

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào các hệ thống đơn hướng chuyển tiếp điện hoặc quang. Chưa có công trình công bố liên quan đến việc đề xuất và nghiên cứu khả năng ứng dụng HAP trong mạng song hướng chuyển tiếp toàn quang.

1.4.2. Hướng nghiên cứu của luận án

Trên cơ sở kết quả phân tích các hạn chế của các nghiên cứu liên quan, các hướng nghiên cứu được đề xuất trong luận án này bao gồm

(1) Xây dựng mô hình giải tích phân tích một cách toàn diện các ảnh hưởng của môi trường không gian tự do cũng như ảnh hưởng của các loại nhiễu lên hiệu năng hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP.

(2) Đề xuất sử dụng kết hợp đồng thời nhiều giải pháp kỹ thuật như điều chế, phân tập, tách sóng nhằm cải thiện hiệu năng truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên HAP. Đặc biệt tập trung vào các kỹ thuật xử lý tín hiệu toàn quang nhằm nâng cao tốc độ xử lý.

(3) Đề xuất mô hình và nghiên cứu khả năng truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP cho các hệ thống OWC đơn hướng và song hướng.

1.5. Kết luận chương 1

Nội dung chương 1 đã trình bày tổng quan về cấu trúc, các phần tử, các tham số hiệu năng và các yếu tố ảnh hưởng lên hiệu năng của hệ thống OWC dựa trên HAP. Ngoài ra, các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến hệ thống OWC dựa trên HAP cũng được khảo sát trong chương này. Qua phân tích, đánh giá tình hình nghiên cứu đó, luận án đã đưa ra các hạn chế của các nghiên cứu

trước đây. Trên cơ sở các hạn chế này, hướng nghiên cứu của luận án đã được đề xuất là kết hợp đồng thời nhiều giải pháp kỹ thuật như điều chế, phân tập, tách sóng nhằm cải thiện hiệu năng của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP, đặc biệt tập trung vào các kỹ thuật xử lý tín hiệu toàn quang nhằm nâng cao tốc độ xử lý. Đồng thời đề xuất mô hình và nghiên cứu khả năng ứng dụng hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP cho truyền dẫn đơn hướng và song hướng.

CHƯƠNG 2: HỆ THỐNG TRUYỀN DẪN QUANG DỰA TRÊN HAP VỚI CHUYỂN TIẾP O/E/O

Tóm tắt: *Chương 2 trình bày về tham số và mô hình toán học của các tham số kênh truyền như suy hao, nhiễu loạn khí quyển. Ngoài ra, nội dung chương còn trình bày giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên kỹ thuật O/E/O. Giải pháp được đề xuất là kết hợp phân tập không gian và bộ thu coherent. Mô hình giải tích phân tích hiệu năng hệ thống đề xuất dưới ảnh hưởng của các tham số đường truyền cũng đã được xây dựng. Kết quả nghiên cứu của chương 2 đã được công bố trên 01 bài báo quốc tế ISI [J1].*

2.1. Mở đầu

Hệ thống truyền thông quang không dây OWC dựa trên HAP có môi trường truyền dẫn hở là môi trường động và rất phức tạp. Các ảnh hưởng của môi trường và nhiễu loạn khí quyển lên búp sóng quang sẽ gây ra tổn hao công suất, biến đổi về biên độ và pha của tín hiệu quang. Do kênh truyền khí quyển có tính chất ngẫu nhiên nên các ảnh hưởng của nó có thể đặc tính hóa bởi các mô hình thống kê. Một trong các mô hình thống kê được đề xuất để mô hình hóa đặc tính của kênh truyền khí quyển là mô hình nhiễu loạn Gamma- Gamma. Các nghiên cứu trong luận án sẽ sử dụng mô hình này để ước tính công suất quang tại phía thu.

2.2. Mô hình kênh OWC

Hai ảnh hưởng chính của kênh khí quyển bao gồm suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển [88]. Do đó, trạng thái kênh (h_c) có thể biểu diễn như sau

$$h_c = h_l h_a \quad (2.1)$$

trong đó h_l và h_a tương ứng là ảnh hưởng của suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển.

2.2.1. Suy hao đường truyền

Khi chùm tia laser truyền qua bầu khí quyển Trái đất phải tương tác với hơi

nước và các phân tử khí khác nhau có mặt trong khí quyển. Suy hao khí quyển chủ yếu là do sự hấp thụ và tán xạ, công suất tín hiệu thu được tại khoảng cách L có quan hệ với công suất tín hiệu phát theo quy luật Beer – Lambert như sau:

$$h_l = \frac{P_R}{P_T} = \exp[-\gamma(\lambda)L] \quad (2.2)$$

trong đó $\gamma(\lambda)$ (tính theo đơn vị m^{-1}) là hệ số suy hao và h_l là suy hao tổng tại bước sóng λ .

Ở bước sóng hồng ngoại và nhìn thấy, suy hao do khí quyển chủ yếu là hấp thụ phân tử nước, carbon dioxide và ozon. Hấp thụ khí quyển là một hiện tượng phụ thuộc bước sóng. Một số giá trị tiêu biểu của các hệ số hấp thụ phân tử được đưa ra trong bảng 2.1 cho điều kiện trời trong.

Bảng 2.1: Một số giá trị tiêu biểu của các hệ số hấp thụ phân tử [77]

Số thứ tự	Bước sóng (nm)	Hấp thụ phân tử (dB/km)
1	550	0,13
2	690	0,01
3	850	0,41
4	1550	0,01

Phạm vi bước sóng của hệ thống truyền thông OWC được chọn để có hấp thụ khí quyển là tối thiểu. Trong cửa sổ truyền dẫn khí quyển, suy hao do hấp thụ phân tử khí hoặc hơi nước ít hơn 0,2 dB/km. Có một số cửa sổ truyền trong phạm vi 700 – 1600 nm. Đa số các hệ thống OWC được thiết kế để hoạt động trong các cửa sổ 780 - 850 nm và 1520 - 1600 nm. Những bước sóng này đã được lựa chọn và đây cũng là bước sóng hoạt động của các máy phát và máy thu quang.

Tán xạ ánh sáng cũng là nguyên nhân gây suy giảm hiệu năng của hệ thống OWC. Giống như hấp thụ, tán xạ cũng phụ thuộc mạnh vào bước sóng. Nếu kích thước của các hạt khí quyển là nhỏ so với bước sóng quang, thì tán xạ Rayleigh là chủ yếu. Tán xạ này khá nổi bật đối với bước sóng truyền dẫn OWC trong vùng

nhìn thấy hoặc tia cực tím, bước sóng dưới 1 μm . Tuy nhiên, nó có thể bị bỏ qua ở bước sóng dài hơn gần phạm vi hồng ngoại IR. Các hạt không khí, các phân tử và khói mù gây ra tán xạ Rayleigh [63]. Nếu kích thước hạt khí quyển tương đương với bước sóng quang, sẽ tạo ra tán xạ Mie. Hiện tượng này chiếm ưu thế ở vùng bước sóng IR hoặc dài hơn. Phân tử khí, sương mù là những thành phần chính gây tán xạ Mie. Nếu các hạt khí quyển lớn hơn nhiều bước sóng quang như trong trường hợp mưa, tuyết và mưa đá, tán xạ được mô tả tốt hơn bằng mô hình quang [63].

Tổng suy hao khí quyển gồm suy hao do hấp thụ và tán xạ. Hệ số suy hao là tổng của hệ số hấp thụ và tán xạ từ hơi nước và các phân tử khí trong khí quyển được xác định như sau:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (2.3)$$

trong đó α_m và α_a tương ứng là hệ số hấp thụ do hơi nước và các phân tử khí trong khí quyển, β_m và β_a tương ứng là hệ số tán xạ do hơi nước và các phân tử khí trong khí quyển.

Các yếu tố khác nhau gây ra sự hấp thụ và tán xạ trong hệ thống OWC bao gồm:

a. Sương mù:

Sương mù là nguyên nhân chính gây suy hao do khí quyển vì nó dẫn đến cả hiện tượng hấp thụ và tán xạ. Trong điều kiện sương mù dày đặc, khi tầm nhìn thậm chí còn ít hơn 50 m, độ suy giảm có thể hơn 350 dB/km [48]. Điều này cho thấy rằng nó có thể hạn chế đường truyền OWC. Trong những trường hợp như vậy, laser công suất lớn với các kỹ thuật giảm thiểu đặc biệt giúp cải thiện chất lượng đường truyền. Nhìn chung, laser 1550 nm là ưu tiên lựa chọn trong trường hợp suy hao lớn do có công suất phát cao.

Sương mù có thể kéo dài lên tới độ cao 400 m trên bề mặt Trái đất. So sánh suy hao do sương mù với bước sóng hoạt động khác nhau được nghiên cứu trong [17]. Suy hao do sương mù có thể được dự đoán bằng cách áp dụng lý thuyết tán xạ Mie. Tuy nhiên, nó liên quan đến các tính toán phức tạp và yêu cầu thông tin chi tiết về các thông số sương mù. Phương pháp thay thế dựa trên phạm vi tầm nhìn, trong

đó suy hao do sương mù được dự đoán bằng cách sử dụng các mô hình thực nghiệm phổ biến. Bước sóng 550 nm thường được lấy là tầm nhìn tham chiếu bước sóng. Công thức (2.4) định nghĩa sự suy giảm cụ thể của sương mù được đưa ra bởi mô hình thực nghiệm cho tán xạ Mie.

$$\beta_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-p} \quad (2.4)$$

trong đó V (km) là phạm vi tầm nhìn, λ (nm) là bước sóng hoạt động và p là phân bố kích thước hệ số tán xạ. Giá trị của p có thể xác định bằng mô hình Kim hoặc Kruse [65], [100].

b. Mưa

Ảnh hưởng của mưa không rõ rệt như sương mù do những hạt mưa lớn hơn đáng kể (100 đến 10.000 μm) so với bước sóng được sử dụng trong OWC. Suy hao do mưa nhẹ (2,5 mm/giờ) đến mưa lớn (25 mm/giờ) từ 1 dB/km đến 10 dB/km cho các bước sóng xung quanh 850 nm và 1500 nm [13], [15]. Mô hình dự đoán suy hao do mưa sử dụng phương pháp thực nghiệm do Liên minh viễn thông- Truyền thông vô tuyến quốc tế (ITU-R) đề xuất cho truyền thông OWC. Các suy giảm cụ thể, α_{rain} (tính bằng dB/km) cho truyền thông OWC được đưa ra bởi [113]

$$\alpha_{rain} = k_1 R^{k_2} \quad (2.5)$$

trong đó R là tốc độ mưa tính bằng mm/giờ và k_1, k_2 là các tham số mô hình có giá trị phụ thuộc vào kích thước hạt mưa và nhiệt độ mưa. Nó cho thấy cơn mưa kèm theo những đám mây thấp dẫn đến suy hao rất cao. Để bù lại suy hao do mưa lớn kèm theo mây thấp, Laser công suất cao và quĩ công suất quang lớn hơn 30 dB được sử dụng cho hệ thống OWC. Ngoài ra, các nhà thiết kế hệ thống thường áp dụng mã hóa thích ứng và kỹ thuật điều chế do sự thay đổi nhanh chóng trong điều kiện khí quyển giữa vệ tinh và trạm mặt đất [5]

c. Tuyết

Kích thước của các hạt tuyết nằm giữa sương mù và các hạt mưa. Do đó, suy giảm do tuyết nhiều hơn mưa nhưng ít hơn sương mù. Trong thời gian tuyết nặng

hạt, đường truyền của tia laser bị chặn do mật độ mảnh tuyết tăng. Trong trường hợp này, sự suy giảm do tuyết là tương đương với sương mù khoảng từ 30-350 dB/km và điều này có thể giảm đáng kể chất lượng của hệ thống OWC. Đối với tuyết, suy hao được phân loại thành tuyết khô và tuyết ướt. Suy hao cụ thể (dB/km), được đưa ra cho tốc độ tuyết S tính bằng mm /giờ như sau [33]

$$\alpha_{snow} = aS^b \quad (2.6)$$

trong đó các giá trị của tham số a và b cho tuyết khô và tuyết ướt

Tuyết khô: $a = 5,42 \times 10^{-5} + 5,49$; $b = 1,38$

Tuyết ướt: $a = 1,02 \times 10^{-4} + 3,78$; $b = 0,72$

2.2.2. Nhiễu loạn khí quyển

Nhiễu loạn khí quyển là một hiện tượng ngẫu nhiên được gây ra bởi sự thay đổi nhiệt độ và áp suất của khí quyển dọc theo đường truyền. Nó sẽ dẫn đến sự hình thành của các ô hỗn loạn, còn được gọi là xoáy lốc nhiễu loạn có kích thước và các chỉ số khúc xạ khác nhau. Những xoáy lốc này sẽ hoạt động như một lăng kính hoặc ống kính khúc xạ và gây ra giao thoa chùm tia. Những nhiễu loạn trong mặt sóng có thể được mô tả vật lý bởi mô hình Kolmogorov [78]. Tùy thuộc vào kích thước của các xoáy lốc hỗn loạn và kích thước chùm phát, các loại hiệu ứng nhiễu loạn không khí được xác định như sau:

a. Sự dao động chùm tia:

Sự dao động chùm tia là hiện tượng xảy ra khi kích thước của xoáy nhiễu loạn lớn hơn kích thước chùm tia. Nó sẽ dẫn đến sự lệch ngẫu nhiên của chùm tia khỏi đường truyền gây ra lỗi đường truyền. Sự dao động chùm tia cần quan tâm trong trường hợp đường lên khi kích thước chùm tia nhỏ hơn xoáy hỗn loạn và nó sẽ dẫn đến sự dịch chuyển chùm vài trăm mét. Sự dao động chùm tia được xác định như sau [61]:

$$\sigma_{BW}^2 = 0,54(H - h_0)^2 \sec^2(\xi) \left(\frac{\lambda}{2W_0}\right)^2 \left(\frac{2W_0}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (2.7)$$

trong đó H và h_0 tương ứng là độ cao của vệ tinh và máy phát, r_0 là độ dài kết hợp (còn gọi là tham số Fried), λ là bước sóng hoạt động, ζ là góc thiên đỉnh, W_0 là kích thước chùm ban đầu.

b. Nhiễu loạn gây ra do sự nhấp nháy:

Khi kích thước xoáy nhỏ hơn kích thước chùm tia, các xoáy lốc sẽ hoạt động như thấu kính. Điều này sẽ dẫn đến sự phân phối lại năng lượng tín hiệu dẫn đến thăng giáng cường độ về thời gian và không gian của tín hiệu thu được. Những thăng giáng của tín hiệu thu được biết như hiện tượng nhấp nháy và là nguyên nhân chính của sự suy giảm hiệu năng hệ thống OWC.

Hàm cấu trúc cho dao động pha và tương quan pha giữa hai vectơ vị trí (ρ_1 và ρ_2) trong mặt phẳng quan sát trên chùm tia được nghiên cứu trong [118]. Mức độ kết hợp cho sóng phẳng và sóng hình cầu được thể hiện như sau

$$\gamma = \exp \left[- \left(\frac{|\rho_1 - \rho_2|}{\rho_0} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \quad (2.8)$$

trong đó ρ_0 là bán kính kết hợp pha. Với $\rho_0 > 0$, góc pha ngẫu nhiên lớn hơn π , mặt sóng mất đi sự kết hợp không gian của nó. Nhiễu loạn khí quyển cũng có thể tạo ra phân cực ánh sáng và kéo dài thời gian của xung quang. Ánh sáng phân cực làm giảm đáng kể công suất trung bình. Suy hao công suất trung bình khoảng 160 dB được quan sát cho ánh sáng phân cực so với chùm tia tới. Sự thay đổi góc phân cực của chùm tia quang truyền qua bầu khí quyển hỗn loạn là 10^{-9} rad/km và sẽ tăng tuyến tính theo quãng đường truyền [12]. Sự mở rộng theo thời gian là do độ dài đa đường khi chùm tia quang truyền qua bầu khí quyển hỗn loạn. Nó hạn chế băng thông và tốc độ dữ liệu một cách nghiêm trọng. Trong đường xuống từ vệ tinh đến mặt đất, suy giảm chất lượng tín hiệu là do sự mở rộng chùm tia, nhấp nháy và mất kết hợp không gian. Đối với đường lên, sự suy giảm chất lượng tín hiệu là do sự dao động chùm tia trong góc đến của mặt phẳng máy thu.

Nhiễu loạn khí quyển được đo bằng chỉ số nhấp nháy σ^2 được xác định bởi [79], [80]

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.9)$$

trong đó I là phát xạ (cường độ) tại một số điểm máy thu. Chỉ số nhấp nháy được thể hiện như phương sai của biên độ log, σ_I^2 chỉ số nhấp nháy là một hàm của tham số cấu trúc chỉ số khúc xạ C_n^2 . Tham số này xác định độ lớn của sự hỗn loạn trong bầu khí quyển. C_n^2 sẽ thay đổi theo thời gian trong ngày, vị trí địa lý và độ cao. Đối với đường truyền theo phương ngang gần mặt đất, giá trị của C_n^2 gần như không đổi và giá trị tiêu biểu của nó trong trường hợp nhiễu loạn yếu là $10^{-17} \text{ m}^{-3/2}$ và đối với nhiễu loạn mạnh nó có thể lên tới $10^{-13} \text{ m}^{-3/2}$ hoặc lớn hơn. Đối với đường truyền theo phương thẳng, giá trị của C_n^2 thay đổi theo độ cao h (không giống như đường truyền ngang trong đó giá trị của nó được giả định là không đổi).

Khi tăng độ cao, giá trị của C_n^2 giảm theo tỷ lệ $h^{-4/3}$. Do đó với truyền dẫn theo phương thẳng đứng, giá trị của C_n^2 thay đổi theo độ cao của máy thu. Vì lý do này, ảnh hưởng của nhiễu loạn khí quyển từ mặt đất đến vệ tinh (đường lên) khác với vệ tinh đến mặt đất (đường xuống). Mô hình thực nghiệm của C_n^2 đã được đề xuất để ước tính nhiễu loạn dựa trên các phép đo thực nghiệm được thực hiện ở nhiều vị trí địa lý, thời gian trong ngày, tốc độ gió, loại địa hình, v.v.[40].

Mô hình được sử dụng rộng rãi nhất cho đường truyền theo phương thẳng đứng là Hufnagel (HVB) được xác định theo công thức:

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left[\left(\frac{V}{27} \right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(\frac{-h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(\frac{-h}{100}\right) m^{\frac{-2}{3}} \right] \quad (2.10)$$

Trong đó V^2 là giá trị bình phương trung bình của tốc độ gió tính bằng m/s, h là độ cao tính bằng mét và A có giá trị có thể điều chỉnh được để phù hợp với các điều kiện khác nhau. Tham số A được xác định như sau:

$$A = 1.29 \times 10^{-12} r_0^{\frac{-5}{3}} \lambda^2 - 1.61 \times 10^{-13} r_0^{\frac{-5}{3}} \lambda^2 + 3.89 \times 10^{-15} \quad (2.11)$$

Trong phương trình trên, r_0 là độ dài kết hợp khí quyển [52]. Độ dài kết hợp của khí quyển là một tham số quan trọng phụ thuộc vào bước sóng hoạt động, C_n^2 và góc thiên đỉnh ξ . Đối với sóng phẳng (đường xuống) lan truyền từ độ cao h_0 đến ($h_0 + L$), giá trị r_0 được xác định như sau:

$$r_0 = \left[0.423k^2 \sec(\xi) \int_{h_0}^{h_0+L} C_n^2(h) dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (2.12)$$

Đối với sóng hình cầu (đường lên), giá trị r_0 được xác định như sau[18]:

$$r_0 = \left[0.423k^2 \sec(\xi) \int_{h_0}^{h_0+L} C_n^2(h) \left\{ \frac{L+h_0-h}{L} \right\}^{\frac{5}{3}} dh \right]^{-\frac{3}{5}} \quad (2.13)$$

2.2.3. Nhiễu loạn Gamma-Gamma

Trong những dải điều kiện nhiễu loạn rộng hơn, thông thường từ khoảng nhiễu loạn trung bình đến mạnh, trạng thái kênh có thể mô hình hóa bởi phân bố Gamma-Gamma [81,114]. Hàm mật độ phân bố xác suất của phân bố Gamma-Gamma được xác định như sau:

$$f_I(h_a, \alpha, \beta) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) \quad (2.14)$$

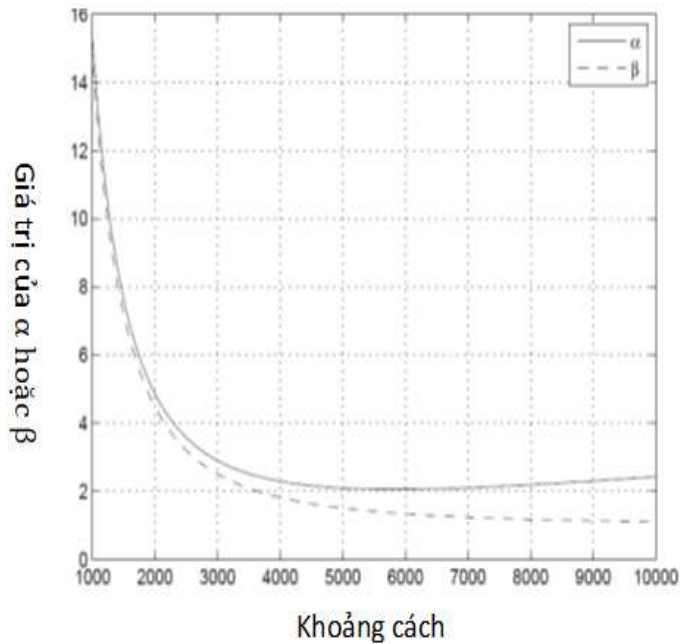
trong đó $\Gamma(\cdot)$ là hàm Gamma, $K_{\alpha-\beta}(x)$ là hàm Bessel sửa đổi loại 2 bậc ($\alpha-\beta$) với các tham số $\alpha > 0$ và $\beta > 0$ có quan hệ với chỉ số nhấp nháy σ_I^2 như sau: $\sigma_I^2 = 1/\alpha + 1/\beta + 1/(\alpha\beta)$. Với giả thiết truyền lan sóng cầu, α và β có thể tính toán từ các tham số vật lý của kênh khí quyển như sau [92, 93]

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\sigma_R^2}{\left(1 + 1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad \text{và} \quad (2.15)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0,51\sigma_R^2}{\left(1 + 0,69\sigma_R^{\frac{12}{5}}\right)^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.16)$$

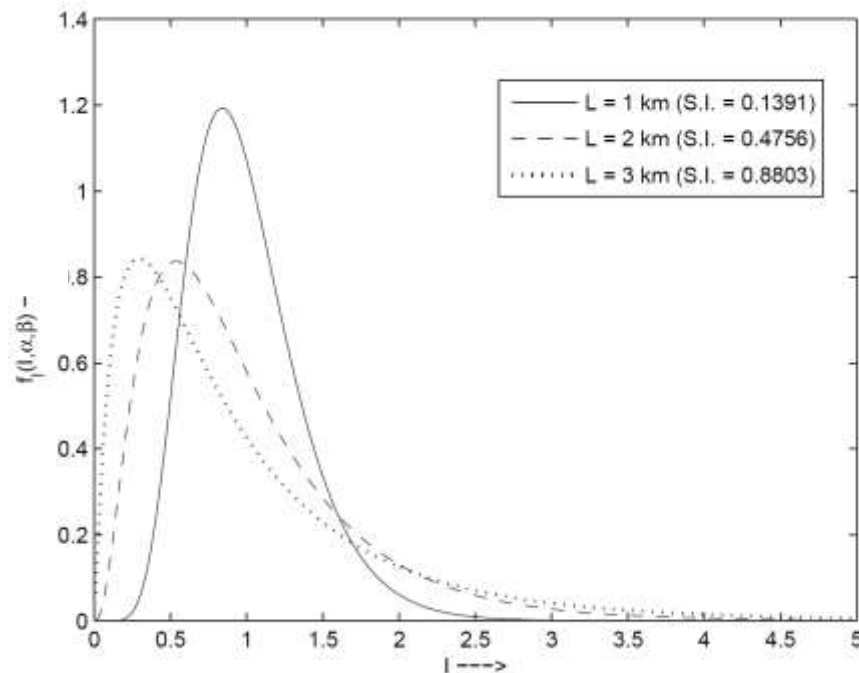
trong đó σ_R^2 là tham số Rytov được xác định như sau:

$$\sigma_R^2 = 2,25k^{\frac{7}{6}} \sec^{\frac{11}{6}}(\xi) \int_{h_0}^H C_n^2(h)(h - h_0)^{\frac{5}{6}} dh \quad (2.17)$$



Hình 2.1 Giá trị của α và β theo khoảng cách truyền dẫn trong pha-đỉnh Gamma-Gamma ($C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ và $D/L \rightarrow 0$ [91]).

Hình 2.1 biểu diễn các giá trị của α và β với các giá trị khoảng cách truyền dẫn khác nhau. Khi khoảng cách truyền dẫn tăng từ 1 km đến 3 km, giá trị của α và β giảm nhanh, điều này tương đương với việc giá trị chỉ số nhấp nháy σ_I^2 tăng nhanh. Hàm mật độ phân bố xác suất của phân bố Gamma-Gamma với ba khoảng cách truyền dẫn khác nhau được minh họa trong hình 2.2. Khi khoảng cách truyền dẫn tăng, σ_I^2 tăng và pha-đỉnh gây ra bởi nhiễu loạn trở nên nghiêm trọng hơn.



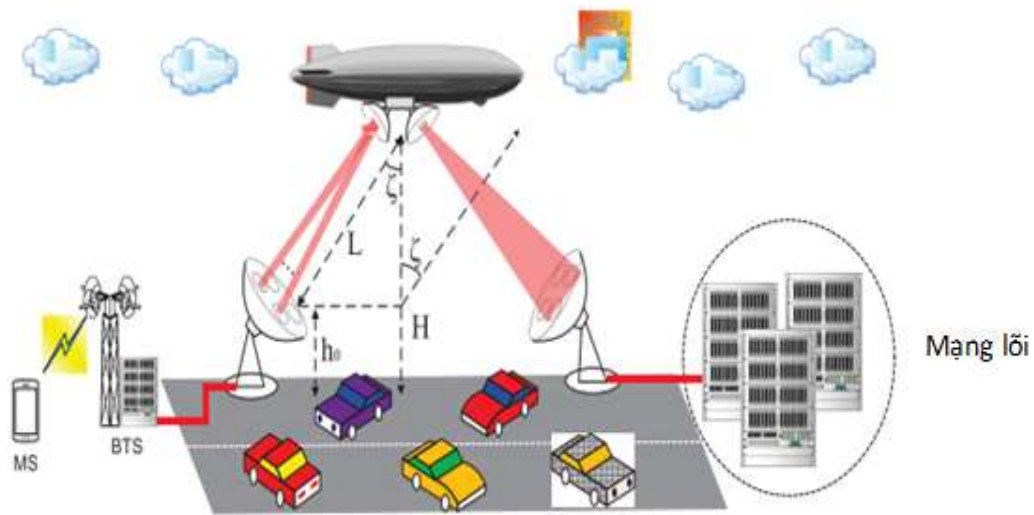
Hình 2.2. Phân bố pha-đỉnh Gamma-Gamma với khoảng cách truyền dẫn khác nhau ($C_n^2 = 1,7 \times 10^{-14}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ [18]).

2.3. Hệ thống truyền dẫn OWC dựa trên HAP chuyển tiếp O/E/O

Ở đây, luận án xem xét hệ thống truyền dẫn OWC dựa trên HAP bao gồm hai GS và một nút chuyển tiếp HAP. Như trình bày trong hình 2.3, hai GS, một GS nằm gần trạm gốc (BS) của mạng thông tin di động và một GS khác ở phía mạng lõi, đóng vai trò truyền tín hiệu từ BS đến mạng lõi thông qua HAP và ngược lại. Mô hình hệ thống này sẽ là một giải pháp backhaul đầy hứa hẹn để cung cấp cho mạng truy nhập không dây tốc độ cao cho vùng nông thôn, các khu vực đảo và các khu vực bị cô lập do thiên tai.

Các nghiên cứu trước đây thường phân tích hiệu năng của các hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP với các cấu hình đơn giản sử dụng điều chế OOK, điều chế cường độ/tách sóng trực tiếp IM/DD và một đầu vào một đầu ra SISO. Luận án đề xuất áp dụng một số kỹ thuật để cải thiện hiệu năng cho hệ thống OWC dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O. Đầu tiên, M -PPM được sử dụng do lợi ích về mặt hiệu quả năng lượng. Thứ hai, các kỹ thuật phân tập không gian với nhiều đầu vào đơn

đầu ra MISO cho đường lên (UL) và nhiều đầu ra đơn đầu vào SIMO cho đường xuống DL được sử dụng để đơn giản hóa kiến trúc HAP, trong khi vẫn giữ được khả năng giảm ảnh hưởng của nhiễu loạn. Thứ ba, máy thu tách sóng coherent được trang bị tại các GS để đạt được độ nhạy thu cao. Tại nút chuyển tiếp HAP sử dụng kỹ thuật tách tín hiệu và chuyển tiếp (DF).



Hình 2.3 Truyền thông quang không dây OWC dựa trên HAP cho mạng backhaul.

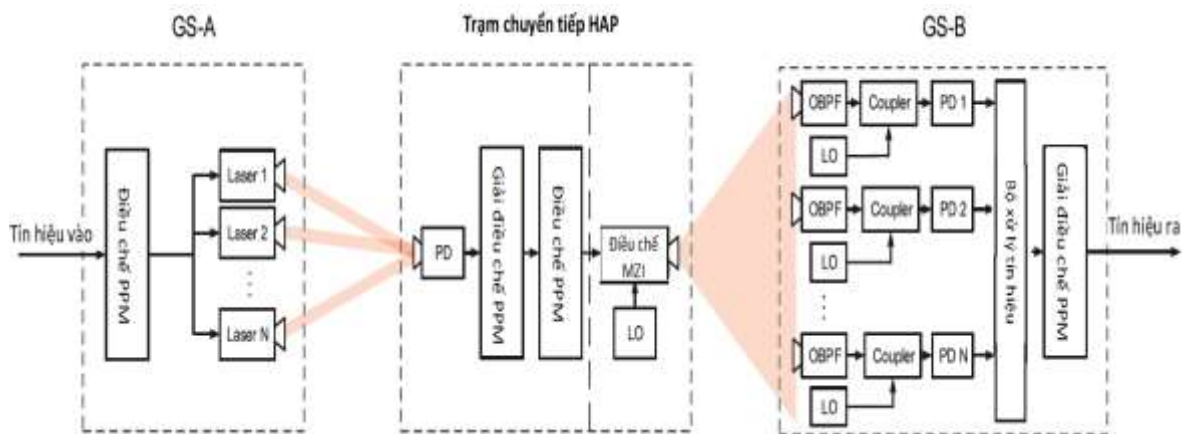
Để nghiên cứu tính khả thi của đề xuất, kiến trúc chi tiết của hệ thống OWC dựa trên HAP bao gồm máy phát, nút chuyển tiếp và máy thu tách sóng coherent được thiết kế như trong hình 2.4. Biểu thức cho BER của hệ thống OWC được đề xuất qua kênh nhiễu loạn khí quyển được mô hình hóa bởi mô hình Gamma-Gamma. Cuối cùng, hiệu năng BER được khảo sát theo các thông số khác nhau của hệ thống như công suất phát, công suất LO, số lượng thấu kính thu/phát, mức điều chế và khoảng cách hình học giữa hai GS.

2.3.1. Mô hình hệ thống đề xuất

Hình 2.4 mô tả sơ đồ khối của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP theo đề xuất bao gồm một nút chuyển tiếp HAP và hai trạm mặt đất, ký hiệu là GS-A và GS-B. Truyền dẫn đơn hướng từ máy phát đặt tại GS-A thông qua HAP đến máy

thu đặt tại GS-B được giả thiết trong hình này. Đối với hướng ngược lại, sơ đồ có thể được mô tả tương tự.

Tại GS-A, dữ liệu nhị phân đầu vào được điều chế PPM tại bộ điều chế PPM. Độ rộng mỗi ký hiệu PPM được ký hiệu là T_w được chia thành M khe thời gian và một xung quang có công suất trung bình không đổi $P_t^{(GS)}$ được phát đi trong một trong các khe thời gian này, trong khi $M - 1$ khe còn lại trống. Tiếp theo, N nguồn laser được điều chế cường độ bằng ký hiệu PPM. Cuối cùng, tín hiệu quang từ tất cả các nguồn laser đều hướng về bộ tách sóng quang PD đặt tại HAP nhờ N thấu kính phát.



Hình 2.4 Sơ đồ khối hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP chuyển tiếp ODAF và tách sóng coherent.

Tại nút chuyển tiếp dựa trên HAP, tín hiệu quang từ N nguồn laser được kết hợp ở thấu kính thu và chuyển đổi thành dòng quang điện nhờ vào PD. Tín hiệu này được đưa vào bộ giải điều chế PPM để xác định xem ký hiệu PPM nào đã được phát. Ký hiệu PPM này sau đó được tái điều chế PPM trước khi chuyển đổi thành tín hiệu quang và chuyển tiếp tới nút tiếp theo.

Tại máy thu GS-B, N thấu kính thu được sử dụng để thu tín hiệu quang. Tín hiệu quang nhận được từ đầu ra của bộ thu quang được kết hợp với trường quang sóng liên tục (CW) tạo ra từ bộ dao động nội LO nhờ một coupler quang. Tín hiệu quang kết hợp được chuyển đổi thành tín hiệu điện tại PD. Sau đó, tín hiệu điện

được lọc bởi bộ lọc thông dải (BPF) tại tần số trung tần ω_{IF} ($\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_{LO}$) để loại bỏ tín hiệu không mong muốn, trong đó ω_0 là tần số của tín hiệu quang thu được và ω_{LO} là tần số bộ dao động nội LO.

Tiếp theo, dòng điện ở đầu ra của BPF được nhân với tín hiệu cosin: $\cos(\omega_{IF}t)$ được tạo từ mạch khôi phục sóng mang. Vòng khóa pha được thực hiện trước khi tín hiệu điện được lọc bởi bộ lọc thông thấp (LPF). Tín hiệu băng gốc từ đầu ra của LPF được chuyển tiếp đến bộ xử lý tín hiệu, trong đó N tín hiệu được kết hợp lại bằng kỹ thuật kết hợp độ lợi cân bằng EGC. Cuối cùng dữ liệu nhị phân được phục hồi nhờ bộ giải mã PPM.

2.3.2. Phân tích hiệu năng

Trong khoảng thời gian một bit, GS-A có thể phát bit “1” hoặc bit “0” đến HAP thông qua đường lên (UL). Dữ liệu nhị phân đến HAP được tách dưới dạng ký hiệu và sau đó được chuyển tiếp đến GS-B thông qua đường xuống (DL). Do đó, BER đầu cuối – đầu cuối (P_{e2e}) giữa hai GS của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP phụ thuộc vào hiệu năng BER của cả UL và DL và được xác định như sau:

$$P_{e2e} = 1 - (1 - P_e^{(UL)})(1 - P_e^{(DL)}) \quad (2.18)$$

trong đó $P_e^{(UL)}$ và $P_e^{(DL)}$ tương ứng là xác suất lỗi bit của UL và DL. Đối với M -PPM, xác suất lỗi bit của OWC UL/DL được điều khiển bởi xác suất lỗi ký hiệu. Mối quan hệ giữa xác suất lỗi bit và xác suất lỗi ký hiệu được xác định như sau:

$$P_e^{(UL/DL)} = \frac{M}{2(M-1)} P_{e-sym}^{(UL/DL)} \quad (2.19)$$

a. Đường lên từ mặt đất đến HAP

P_{e-sym}^{UL} là xác suất mà vị trí (tức là khe thời gian) của xung truyền trong một thời gian ký hiệu (bao gồm cả thời gian M khe) bị phát hiện sai. Việc phát hiện ký hiệu PPM được dựa trên quy tắc giống nhất (ML) bằng cách so sánh cường độ tín hiệu điện ở tất cả các khe thời gian để tìm mức tối đa. Cường độ tín hiệu điện tỷ lệ

thuận với tổng công suất quang mà PD nhận được từ N nguồn laser. $h_{l,k}^{(u)}$ với $k = 1, \dots, N$ là các hệ số kênh do suy hao khí quyển, phụ thuộc vào khoảng cách từ nguồn laser k đến PD. Coi $h_{l,k}^{(u)}$ là xác định trong suốt một thời gian ký hiệu. Ngoài ra, khoảng cách từ tất cả các nguồn laser đến PD đều bằng nhau. Kết quả là, tất cả $h_{l,k}^{(u)}$ giống nhau; do đó, nó được ký hiệu là $h_l^{(u)} = h_{l,k}^{(u)}$.

Không mất tính tổng quát, giả sử xung quang được truyền đi ở khe thời gian đầu tiên của ký hiệu. Bằng cách sử dụng điều kiện bờ, $P_{e-sym}^{(UL)}$ có thể được tính như sau:

$$P_{e-sym}^{(UL)} \leq (M - 1) \int_0^\infty f_{h_{a,k}}(\overline{h_{a,k}^{(u)}}, \alpha, \beta, \Omega) Q\left(\frac{\Re P_t^{(GS)} h_l^{(u)} \sum_{k=1}^N h_{a,k}^{(u)}}{N\sigma_b}\right) \overline{dh_{a,k}^{(u)}} \quad (2.20)$$

trong đó $\overline{h_{a,k}^{(u)}} = (h_{a,1}^{(u)}, h_{a,2}^{(u)}, \dots, h_{a,N}^{(u)})$ là một vector có độ dài N . $P_t^{(GS)}(t)$ là công suất phát trung bình của xung quang trong khe thời gian. \Re là đáp ứng của PD; $Q(\cdot)$ là hàm Q; và $\sigma_b^2 = 2q \Re P_{bn} \Delta f$ là phương sai của nhiễu nền, được coi là chiếm ưu thế so với nhiễu thu như nhiễu nơ và nhiễu nhiệt, $\Delta f = MB/\log_2(M)$ là băng thông nhiễu, B là tốc độ bit của hệ thống và P_{bn} là công suất nhiễu nền. Trong nghiên cứu này, dưới tác dụng của ánh sáng mặt trời, P_{bn} lấy giá trị là $250\mu\text{W}$ cho cả UL và DL [47].

Ở đây $h_a^{(u)} = \sum_{k=1}^N h_{a,k}^{(u)}$. Theo [119], $h_a^{(u)}$ là tổng của các biến ngẫu nhiên Gamma-Gamma, có pdf là: $f_{h_a}(h_a^{(u)}, \alpha_T, \beta_T, \Omega_T)$ với $\alpha_T = Na_G + \epsilon_G$, $\beta_T = N$ và $\Omega_T = N$, trong đó $a_G = \alpha - \beta$ và

$$\epsilon_G = (N - 1) \frac{-0,127 - 0,95\alpha - 0,0058\beta}{1 + 0,00124\alpha + 0,98\beta} \quad (2.21)$$

Công thức (2.20) được viết lại như sau:

$$P_{e-sym}^{(UL)} \leq (M - 1) \int_0^\infty f_{h_a}(h_a^{(u)}, \alpha_T, \beta_T, \Omega_T) \times Q\left(\frac{\Re P_t^{(GS)} h_l^{(u)} h_a^{(u)}}{N\sigma_b}\right) dh_a^{(u)} \quad (2.22)$$

b. Đường xuống HAP- GS

Phần này phân tích hiệu năng đường xuống DL với máy thu kết hợp tại GS-B. Giả sử rằng máy thu kết hợp đồng bộ, mà không cần một thuật toán bổ sung để lấy thông tin pha khi thu được tín hiệu. Ngoài ra, phía thu có N nhánh. Với nhánh thứ k , tín hiệu quang nhận được trong một khe thời gian trên được xác định như sau:

$$E_{s,k} = A_{s,k} \exp [-i(\omega_0 t + \phi_{s,k})] \quad (2.23)$$

trong đó ω_0 là tần số sóng mang, $\phi_{s,k}$ là pha và $A_{s,k}$ là biên độ của tín hiệu thu được.

Trường LO được đưa ra bởi một biểu thức tương tự như sau:

$$E_{LO} = A_{LO} \exp [-i(\omega_{LO} t + \phi_{LO})] \quad (2.24)$$

trong đó A_{LO}, ω_{LO} và ϕ_{LO} lần lượt biểu thị biên độ, tần số và pha của LO.

Công suất quang tại PD ($P = K |E_{s,k} + E_{LO}|^2$, trong đó K là hằng số tỷ lệ) được xác định bằng cách sử dụng các công thức (2.23) và (2.24) như sau [6]:

$$P = P_{s,k} + P_{LO} + 2 \sqrt{P_{s,k} P_{LO}} \cos (\omega_{IF} t + \phi_k) \quad (2.25)$$

trong đó $P_{s,k} = KA_{s,k}^2 = P_t^{(HAP)} h_{l,k}^{(d)} h_{a,k}^{(d)} / N$ là công suất tín hiệu quang thu được, $h_{l,k}^{(d)}, h_{a,k}^{(d)}$ đại diện cho kênh đường xuống DL. $P_{LO} = KA_{LO}^2$ là công suất LO và

$\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_{LO}$ được gọi là tần số trung tần.

$\phi_k = \phi_{s,k} - \phi_{LO}$ là độ lệch pha giữa tín hiệu và dao động nội.

Dòng tách quang ($I_{PD} = \Re P$, trong đó \Re là độ nhảy) được suy ra bằng cách sử dụng công thức (2.25) [97]:

$$I_{PD,k}(t) = \Re(P_{s,k} + P_{LO}) + 2 \Re \sqrt{P_{s,k} P_{LO}} \cos (\omega_{IF} t + \phi_k) \quad (2.26)$$

Thực tế, P_{LO} lớn hơn nhiều so với $P_{s,k}$. Vì thế dòng tách quang (tức là $\Re(P_{s,k} + P_{LO})$) gần như cố định và được loại bỏ tốt bởi một BPF. Tiếp theo, đầu ra cuối cùng của máy thu kết hợp sau khi xử lý tại BPF được xác định là:

$$I_{p,k}(t) = 2 \Re \sqrt{P_{s,k} P_{LO}} \cos (\omega_{IF} t + \phi_k) \quad (2.27)$$

Đối với giải điều chế đồng bộ, $I_{p,k}(t)$ được nhân với $2\cos(\omega_{IF}t)$ và được lọc bởi LPF, loại bỏ các thành phần dao động xoay chiều AC tại $2\omega_{IF}$. Kết quả tín hiệu băng tần cơ sở là:

$$I_{d,k}(t) = 2 \Re \sqrt{P_{s,k} P_{LO}} + i_n \quad (2.28)$$

trong đó i_n là dòng nhiễu nền, nhiễu nỏ và nhiễu nhiệt được tạo ra tại máy thu và được mô hình hóa như nhiễu Gauss với phương sai bằng không. Cần lưu ý rằng nhiễu nỏ gây ra bởi LO và công suất nền lớn hơn nhiễu so với các thành phần nhiễu khác do công suất LO cao. Kết quả là phương sai của dòng nhiễu được tính như sau [121]:

$$\sigma_n^2 = \sigma_{sh}^2 + \sigma_b^2 = 2q\Re (P_{LO} + P_{bn})\Delta f \quad (2.29)$$

trong đó q là điện tích của electron, \Re là độ nhạy và $\Delta f = MB/\log_2(M)$ là băng thông nhiễu hiệu dụng.

Giả thiết rằng kỹ thuật EGC được thực hiện tại máy thu; do đó tín hiệu của tất cả các nhánh thu được cộng vào. Cũng giả sử rằng dữ liệu truyền đi đủ lớn để xác suất phát các ký hiệu là như nhau. Bằng cách sử dụng kỹ thuật đường bao, giới hạn trên xác suất lỗi ký hiệu của DL được ký hiệu là $P_{e-sym}^{(DL)}$ được xác định như sau:

$$\begin{aligned} P_{e-sym}^{(DL)} &\leq (M-1) \int_0^\infty f h_{a,k}(\overline{h_{a,k}^{(u)}}, \alpha, \beta, \Omega) \times Q\left(\frac{\sum_{k=1}^N 2 \Re \sqrt{P_{s,k} P_{LO}}}{\sigma_n}\right) d\overline{h_{a,k}^{(u)}} \\ &\leq (M-1) \int_0^\infty f h_{a,k}(\overline{h_{a,k}^{(u)}}, \alpha, \beta, \Omega) \times Q\left(\frac{2 \Re \sqrt{P_t^{(HAP)} h_l^{(d)} P_{LO} \sum_{k=1}^N \sqrt{h_{a,k}^{(d)}}}}{\sigma_n}\right) d\overline{h_{a,k}^{(d)}} \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.3.3. Kết quả khảo sát hiệu năng

Trong phần này, hiệu năng BER từ đầu cuối đến đầu cuối của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP được khảo sát và trình bày trong các hình 2.5, 2.6, 2.7, và 2.8. Hiệu năng hệ thống đề xuất được cải thiện nhờ sử dụng M -ary, phân tập không gian và thu heterodyne đồng thời cũng được so sánh với hệ thống thông thường sử dụng OOK, SISO-UL/SISO-DL và thu tách sóng trực tiếp. Để có sự so

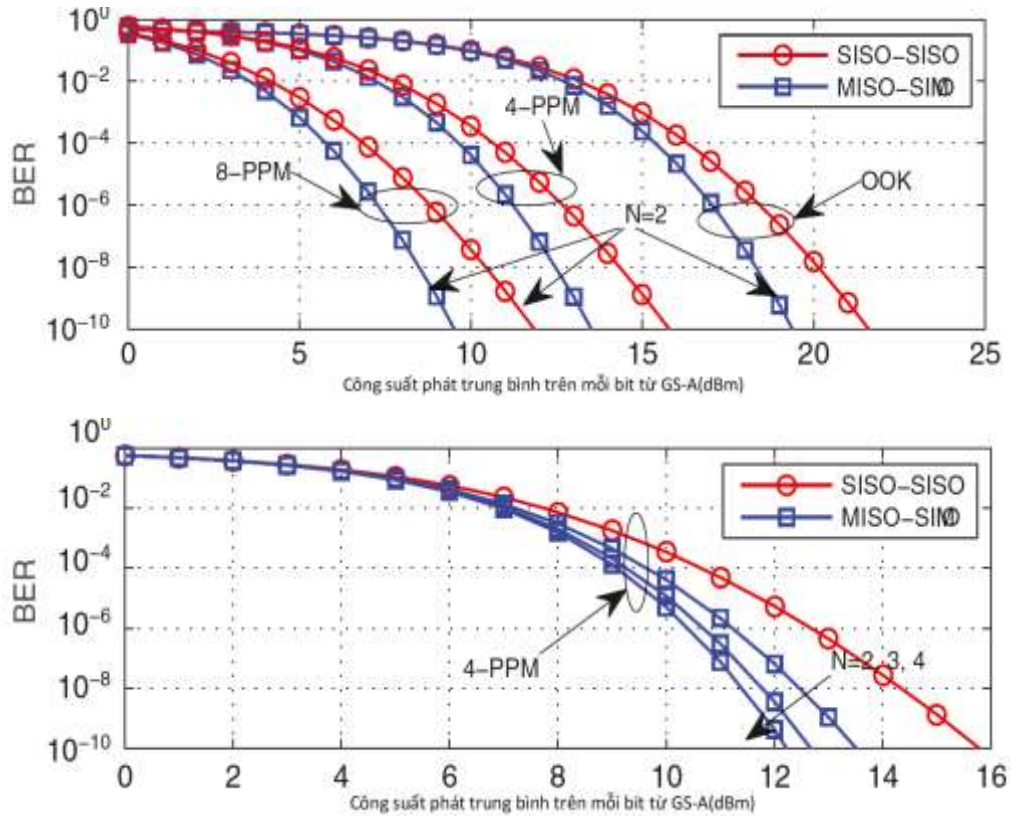
sánh công bằng giữa điều chế OOK và M -PPM, công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS ($P_b^{(GS)}$) và từ HAP ($P_b^{(HAP)}$) được sử dụng như các ràng buộc so sánh. Đối với M -PPM, mối quan hệ giữa công suất phát trung bình trên mỗi bit và công suất phát của xung quang trong một khe được biểu thị dưới dạng $P_t = (M \log_2 M)P_b$. Bảng 2.2 đưa ra một số tham số chính được sử dụng để phân tích hiệu năng BER của hệ thống đề xuất.

Bảng 2.2: Các tham số hệ thống

Tham số	Kí hiệu	Giá trị
Hằng số Boltzman	k_B	1.38×10^{-23} W/K/Hz
Điện tích điện tử	q	1.6×10^{-19} C
Tốc độ gió	w	21 m/s
Độ cao HAP	H	20 km
Độ cao GS	h_o	1 m
Góc thiên đỉnh	ζ	$\pi/6$
Bước sóng	λ	1550nm
Hệ số suy hao	γ	0.4 km^{-1}
Tốc độ bit	B	10Gbps
Đáp ứng	\Re	0.8A/W
Công suất nhiễu nền	P_{bn}	250 μ W

Hình 2.5 (a) khảo sát hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS-HAP dựa trên hệ thống chuyển tiếp sử dụng các sơ đồ OOK, 4-PPM và 8-PPM với SISO/SISO và 2-MISO/2-SIMO cho UL/DL. Công suất phát từ HAP và công suất LO được cố định tương ứng là $P_b^{(HAP)} = 9$ dBm và $P_{LO} = 0$ dBm. Ta thấy rằng công suất phát trung bình từ GS để đạt được BER yêu cầu giảm khi sử dụng M -arry PPM thay vì dùng OOK. Sử dụng

OOK và tách sóng trực tiếp [7], hiệu năng hệ thống giảm so với hệ thống đề xuất như trong hình 2.5.



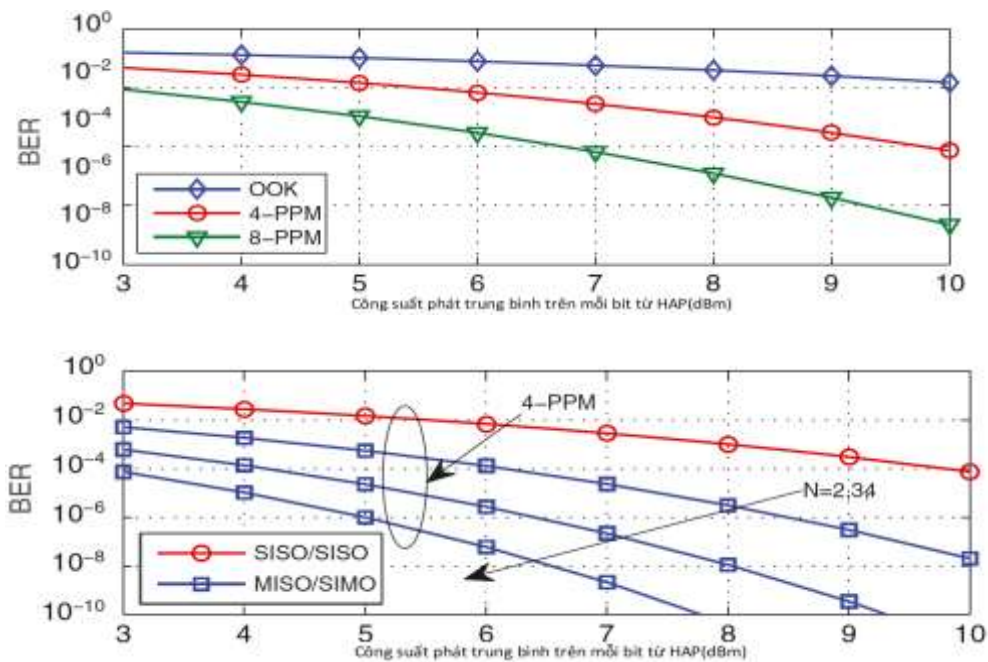
Hình 2.5 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ GS - HAP với các mức điều chế và số ăng ten thu phát khác nhau

$$\text{với } P_b^{(HAP)} = 9 \text{ dBm và } P_{LO} = 0 \text{ dBm.}$$

Xem xét trường hợp của UL/DL dựa trên SISO/SISO với BER là 10^{-6} , công suất phát trung bình cần thiết trên mỗi bit từ GS là 18,4 dBm đối với trường hợp OOK trong khi nó chỉ là 12,7 dBm cho trường hợp 4-PPM. Bằng cách sử dụng mức điều chế cao hơn như 8-PPM, có thể đạt được mức công suất phát yêu cầu từ GS. Thực hiện phân tập không gian với nhiều ăng ten thu phát ở mỗi GS, tức là N -MISO/ N -SIMO cho UL/DL, cũng giúp giảm công suất phát cần thiết từ GS. Hình 2.5 (b) mô tả mối quan hệ giữa BER và công suất phát từ GS cho hệ thống chuyển tiếp dựa trên HAP sử dụng 4-PPM. So với hệ thống sử dụng SISO/SISO, công suất

phát cần thiết từ GS ở BER 10^{-6} giảm xuống 1,5 dB; 2 dB; và 2,3 dB tương ứng với $N = 2; 3$ và 4.

Trong hình 2.6, khảo sát BER từ đầu đến cuối theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ HAP cho các M -ary PPM và số lượng thấu kính thu phát khác nhau. Những kết quả này được khảo sát với $P_b^{(GS)} = 25$ dBm và $P_{LO} = -15$ dBm. Tương tự, công suất phát yêu cầu trên mỗi bit từ HAP giảm khi sử dụng M -ary PPM như trong hình 2.6 (a) và phân tập không gian như trong hình 2.6(b).



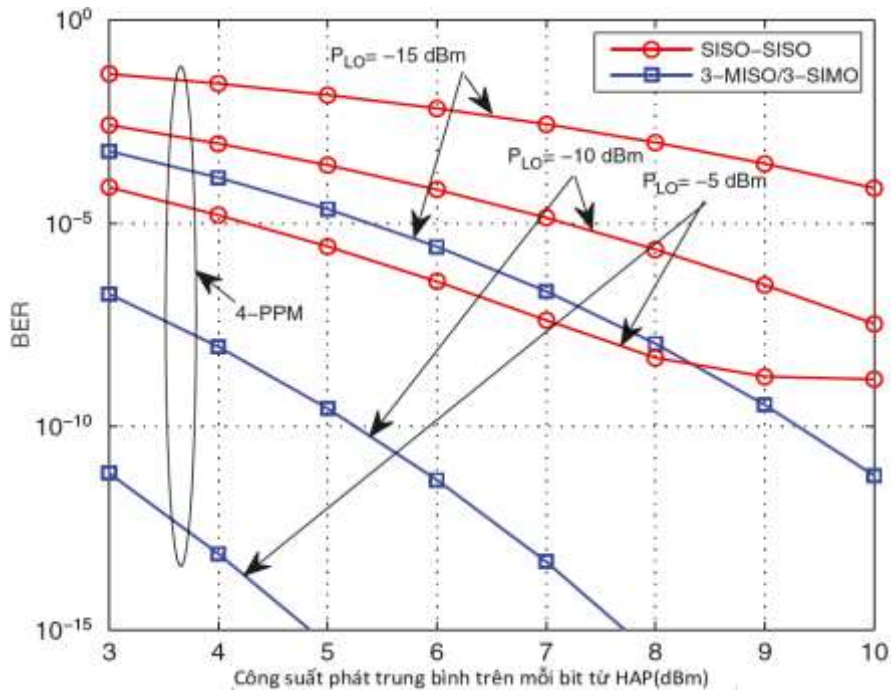
Hình 2.6 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ HAP với các mức điều chế và số thấu kính thu phát khác nhau

với $P_b^{(GS)} = 25$ dBm và $P_{LO} = -15$ dBm.

Ví dụ, công suất phát từ HAP trong hệ thống chuyển tiếp sử dụng 4-PPM và 4-MISO/4-SIMO cho UL/DL chỉ là 5 dBm. Công suất phát thấp là một vấn đề quan trọng vì nó giúp kéo dài thời gian hoạt động của HAP, vốn bị hạn chế bởi nhu cầu nhiên liệu.

Hình 2.7 thể hiện vai trò của máy thu coherent tại các GS bằng cách khảo sát hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ HAP với các giá trị

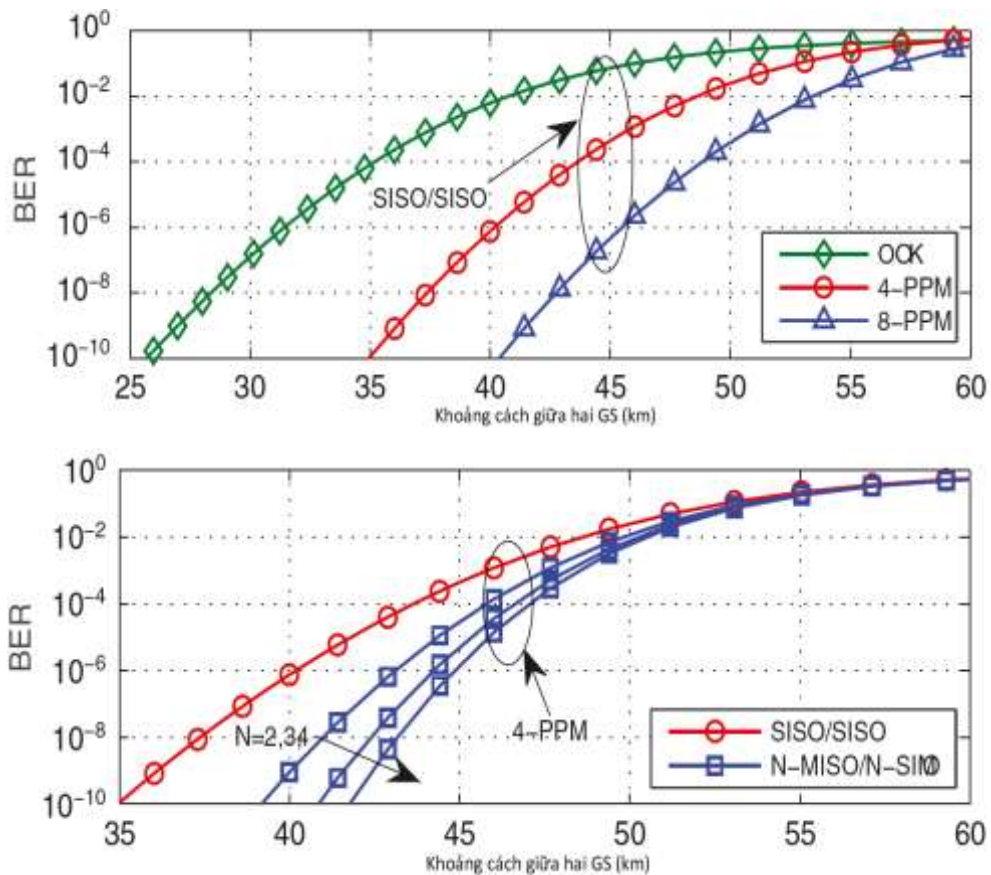
công suất LO khác nhau. BER đầu cuối của hệ thống thu được đối với trường hợp sử dụng SISO/SISO và 3-MISO-UL/3-SIMO với 4-PPM và $P_t = 25$ dBm. Khi công suất LO tăng, BER của hệ thống đề xuất được cải thiện đáng kể. Ngoài ra, hiệu năng BER tốt hơn đạt được khi sử dụng phân tập không gian 3-MISO/3-SIMO. Ngoài ra, với cùng giá trị BER, công suất phát trung bình yêu cầu trên mỗi bit từ HAP giảm. Cụ thể hơn, $P_b^{(HAP)}$ giảm khoảng 4,1 dB khi công suất LO tăng từ -15 dBm đến mức -10 dBm. Việc giảm công suất phát của HAP đã tiết kiệm được năng lượng tiêu thụ và chi phí vận hành cho hạ tầng trên cao này.



Hình 2.7 Hiệu năng BER theo công suất phát trung bình trên mỗi bit từ HAP với các giá trị công suất LO khác nhau.

Cuối cùng, trong hình 2.8, hiệu năng BER của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP được khảo sát theo khoảng cách giữa hai GS với M -ary PPM và số lượng thấu kính thu phát khác nhau khi $P_b^{(GS)} = 23$ dBm, $P_b^{(HAP)} = 9$ dBm và $P_{LO} = -5$ dBm. Việc sử dụng M -PPM hoặc phân tập không gian sẽ mở rộng khoảng cách giữa hai GS. Trong hình 2.8 (a), tại BER 10^{-6} , khoảng cách được mở rộng lên tới 45,5 km cho hệ thống sử dụng 8-PPM với SISO/SISO cho UL/DL, lớn hơn 14,25

km so với hệ thống sử dụng OOK. Tương tự, khoảng cách của hệ thống đề xuất tăng với số lượng thấu kính thu phát thể hiện trong hình 2.8 (b). Hệ thống OWC dựa trên HAP với 4-MISO/4-SIMO cho UL/DL có thể hỗ trợ khoảng cách lớn hơn 5 km so với hệ thống sử dụng SISO/SISO cho UL/DL.



Hình 2.8 Hiệu năng BER của hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP theo khoảng cách giữa hai GS với mức điều chế và số lượng thấu kính thu phát khác

n nhau khi $P_b^{(GS)} = 23 \text{ dBm}$, $P_b^{(HAP)} = 9 \text{ dBm}$ và $PLO = -5 \text{ dBm}$.

2.4 Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày chi tiết về mô hình kênh của hệ thống OWC dựa trên HAP với suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển. Nội dung chương 2 cũng đề xuất mô hình hệ thống OWC dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O sử dụng kết hợp điều chế PPM, phân tập không gian và tách sóng coherent. Các nghiên cứu có liên quan mới chỉ đề xuất được các phương pháp đơn lẻ như điều chế PPM, phân

tập không gian hoặc tách sóng Coherent. Ngoài ra các giải pháp phân tập không gian của các nghiên cứu liên quan mới chỉ đơn thuần là phân tập không gian cho hệ thống OWC . Các giải pháp này không phù hợp khi triển khai tại HAP. Kết quả phân tích cho thấy nhờ áp dụng kết hợp các phương pháp này đã nâng cao hiệu năng BER, tăng cự ly truyền dẫn đồng thời giảm được công suất tiêu thụ tại HAP. Mô hình đề xuất là giải pháp cho mạng truy nhập quang không dây thực hiện kết nối giữa trạm gốc và mạng lõi khi có sự cố không lắp đặt được cáp quang. Chuyển tiếp O/E/O được sử dụng trong trường hợp tốc độ xử lý hạn chế, sử dụng các phần tử xử lý tín hiệu điện sẵn có với chi phí thấp.

CHƯƠNG 3: CHUYỂN TIẾP TOÀN QUANG ĐƠN HƯỚNG DỰA TRÊN HAP CHO HỆ THỐNG OWC

Tóm tắt: Nội dung của chương 3 đề xuất hai giải pháp cho hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang đơn hướng dựa trên HAP. Hệ thống thứ nhất với kịch bản là truyền dẫn đa chặng dựa trên HAP chuyển tiếp toàn quang và tách sóng coherent kết nối 02 trạm mặt đất. Hệ thống thứ hai với kịch bản truyền dẫn quang từ vệ tinh LEO đến trạm mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP. Xây dựng mô hình giải tích và mô phỏng hiệu năng của các hệ thống này cũng được trình bày trong chương. Hiệu năng BER được khảo sát với các thông số khác nhau của hệ thống như: công suất phát, công suất ngưỡng, công suất LO và độ cao của HAP. Kết quả nghiên cứu chương 3 đã được công bố trong 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế ISI [J2] và 2 hội nghị khoa học [C1] và [C2].

3.1. Đặt vấn đề

Như đã trình bày trong chương 2, hạ tầng trên cao HAP đóng vai trò là nút chuyển tiếp, thực hiện khuếch đại hoặc tái tạo tín hiệu nhận được trước khi chuyển tiếp đến nút tiếp theo. Tuy nhiên, với chuyển tiếp O/E/O, tín hiệu quang được chuyển đổi thành tín hiệu điện sau đó được khuếch đại trước khi chuyển đổi trở lại miền quang và truyền đến nút tiếp theo [26], [22]. Kỹ thuật chuyển tiếp này giới hạn tốc độ xử lý tín hiệu. Nó cũng đòi hỏi các thành phần bổ sung cho chuyển đổi quang/điện/quang, dẫn đến kiến trúc của HAP phức tạp. Trong trường hợp chuyển tiếp toàn quang, tín hiệu được xử lý trong miền quang và sau đó chuyển tiếp đến nút tiếp theo. Kỹ thuật chuyển tiếp này cung cấp tốc độ dữ liệu cao với sự trợ giúp của các bộ lọc và bộ khuếch đại quang, được gọi là kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp toàn quang (OAF) [74], [88]. Một nghiên cứu gần đây cho thấy rằng tái tạo và chuyển tiếp toàn quang (ORF) là một kỹ thuật chuyển tiếp quang tốt hơn, có thể giúp loại bỏ nhiều nền tích lũy tại các nút chuyển tiếp [9]. ORF có thể được thực hiện bằng cách sử dụng bộ giới hạn cứng quang (OHL) kết hợp với bộ khuếch đại

quang [85]. Với những ưu điểm của kỹ thuật chuyển tiếp toàn quang như đã đề cập ở trên, trong chương này, luận án đề xuất 02 kịch bản truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP. Trong đó, kỹ thuật tái tạo và chuyển tiếp toàn quang được áp dụng cho cả hai kịch bản.

Kịch bản thứ nhất: luận án đề xuất mô hình hệ thống OWC kết nối 02 trạm mặt đất với sự hỗ trợ chuyển tiếp đa chặng toàn quang nhiều HAP. Đồng thời, bộ thu tách sóng coherent được sử dụng để tăng độ nhạy thu, giảm công suất phát yêu cầu hay tăng cự ly truyền dẫn giữa hai trạm mặt đất.

Kịch bản thứ hai: luận án đề xuất mô hình hệ thống OWC kết nối một vệ tinh ở quỹ đạo thấp với một trạm mặt đất, trong đó tín hiệu được chuyển tiếp toàn quang thông qua một HAP. Trong kịch bản này, ngoài việc đánh giá hiệu năng BER của hệ thống, mô hình mô phỏng và đánh giá chất lượng truyền dẫn ảnh cũng được thực hiện.

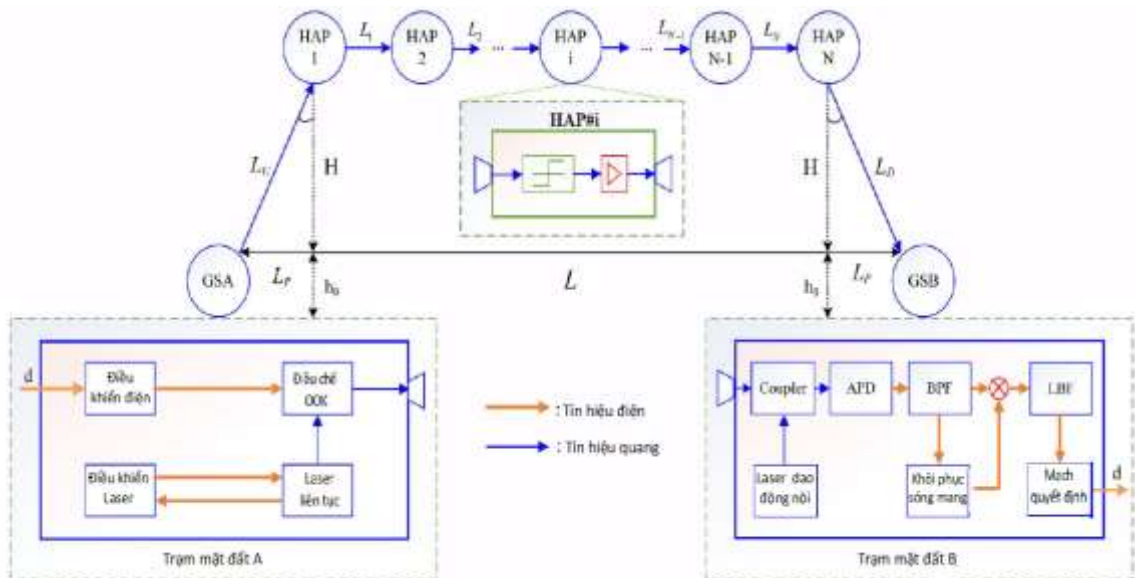
3.2. Hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang dựa trên nhiều HAP và tách sóng coherent

Mô hình hệ thống OWC bao gồm một HAP và hai GS được xem xét trong [125], trong đó các tác giả chỉ xem xét ước tính các tham số kênh OWC bao gồm sự suy hao do phân kỳ, suy hao do khí quyển, suy hao do nhiễu loạn và trễ lan truyền. Nghiên cứu sinh cũng đã đề xuất hệ thống truyền dẫn quang kết nối hai trạm mặt đất với chuyển tiếp toàn quang dựa trên một HAP trong công trình nghiên cứu [C1]. Tuy nhiên, thực tế khi khoảng cách giữa hai trạm mặt đất quá xa nhau, việc sử dụng một trạm chuyển tiếp HAP là không đủ. Trong [96], các tác giả đã đề xuất mô hình hệ thống OWC dựa trên nhiều HAP với hai GS. Xem xét ảnh hưởng của suy hao đường truyền, nhiễu loạn khí quyển bởi phân phối gamma gamma và lỗi đồng chỉnh, các tác giả đã rút ra biểu thức dạng tường minh cho BER và công suất trung bình cho các hệ thống OWC đa chặng trong tầng bình lưu. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này hệ thống là chuyển tiếp điện và tách sóng trực tiếp. Do đó, trong nghiên cứu này, luận án đề xuất một hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP sử dụng

chuyển tiếp toàn quang và tách sóng coherent. Chuyển tiếp toàn quang dựa trên thiết bị tách quang-khuếch đại-và-chuyển tiếp ODAF, giúp đơn giản hóa kiến trúc của HAP. Ngoài ra, máy thu tách sóng coherent được sử dụng để cải thiện độ nhạy của hệ thống. Để xem xét tính khả thi trong đề xuất, luận án đưa ra kiến trúc chi tiết của hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP bao gồm một máy phát, các nút chuyển tiếp toàn quang và máy thu tách sóng coherent. Biểu thức cho tỷ lệ lỗi bit BER của hệ thống OWC được đề xuất cho kênh nhiễu loạn khí quyển được mô hình hóa bởi phân bố Gamma-Gamma. Cuối cùng, hiệu năng BER được khảo sát với các thông số khác nhau của hệ thống như: công suất phát, công suất ngưỡng, công suất LO, số trạm HAP.

3.2.1. Mô hình thiết kế hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP

Hình 3.1 mô tả sơ đồ của hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP được đề xuất bao gồm hai trạm mặt đất, được ký hiệu là trạm GS-A, trạm GS-B và các trạm chuyển tiếp HAP.



Hình 3.1. Sơ đồ hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên nhiều HAP.

Mô hình hệ thống bao gồm ba phần. Phần thứ nhất là trạm mặt đất phát tín hiệu. Phần thứ hai là hệ thống chuyển tiếp đa chặng dựa trên nhiều HAP như các trạm trung gian ($HAP_i, i = 1, 2, 3, \dots$). Phần thứ ba là trạm mặt đất thu tín hiệu.

Trong hệ thống này, giả sử rằng tổng khoảng cách truyền từ GS-A đến GS-B qua N HAP là:

$$L_{A-B} = \sum_{i=1}^N L_i + L_U + L_D \quad (3.1)$$

trong đó L_i là khoảng cách truyền từ HAP thứ (i) đến HAP thứ $(i + 1)$, L_U là khoảng cách từ GS-A đến HAP₁ và L_D là khoảng cách từ HAP _{N} đến GS-B. L là khoảng cách địa lý trên mặt đất giữa GS-A và GS-B.

Tại GS-A, tín hiệu được điều chế OOK, sử dụng diode laser ở bước sóng 1550 nm. Sau đó, tín hiệu được truyền đi qua kênh OWC chuyển tiếp qua N HAP đến phía thu. Chuyển tiếp toàn quang ODAF được sử dụng tại mỗi HAP. Tại HAP, tín hiệu thu sẽ được quyết định giữa bit 1 và bit 0 nhờ bộ giới hạn quang (OHL). Sau đó, tín hiệu đầu ra của OHL được khuếch đại với hệ số khuếch đại $G = P_t/P_{th}$, với P_t là công suất phát và P_{th} là công suất ngưỡng. Tín hiệu sau đó được chuyển đến HAP tiếp theo.

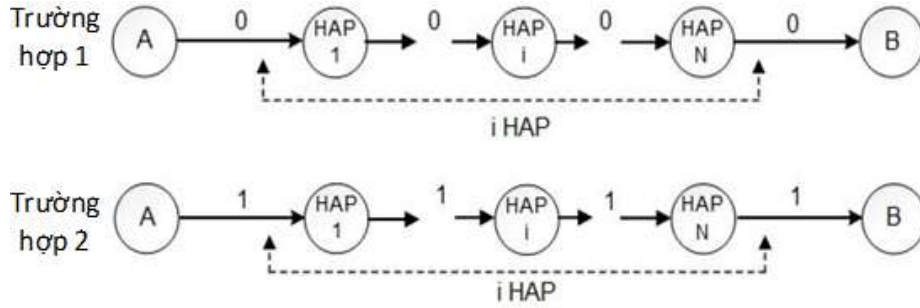
Tại GS-B, tín hiệu thu được kết hợp với tín hiệu quang liên tục từ bộ dao động nội. Tiếp theo, tín hiệu quang được chuyển đổi thành điện bằng bộ tách sóng quang APD. Sau đó, bộ lọc thông dải BPF được sử dụng để loại bỏ tín hiệu không mong muốn. Các tín hiệu đầu ra kết hợp với tín hiệu tham chiếu và vòng khóa pha được thực hiện bởi bộ lọc thông thấp LPF. Tín hiệu đầu ra của LPF được sử dụng để phát hiện bit 1 hoặc bit 0 dựa trên giá trị ngưỡng ở mạch quyết định.

Điều đáng chú ý là hiệu năng của máy thu bị ảnh hưởng bởi nhiễu nền không mong muốn do ánh sáng mặt trời trực tiếp, ánh sáng mặt trời phản xạ. Nhiễu nền được mô tả bằng nhiễu Gauss trắng với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai $\delta_b^2 = N_b/2$, trong đó $N_b = P_b/B_0$ là mật độ phổ công suất phát xạ nền, P_b biểu thị công suất ánh sáng nền ở đầu vào của HAP hoặc các GS và B_0 là băng tần của bộ khuếch đại quang.

Trong hệ thống đề xuất, các kênh có thể được chia thành hai phần. Phần đầu tiên là kênh OWC giữa các GS và HAP. Phần thứ hai là kênh OWC giữa các HAP.

3.2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

Trong hệ thống, có hai khả năng trao đổi bit nhị phân chính xác giữa GS-A và GS-B: Truyền bit 0 và truyền bit 1, được mô tả trong hình 3.2.



Hình 3.2 Hai khả năng trao đổi bit nhị phân giữa GS-A và GS-B.

a. Đường truyền từ GS- HAP

Xác suất lỗi của đường lên OWC bị chi phối bởi công suất ngưỡng P_{th} của OHL tại HAP. $P_{X-P}(a|b)$, xác suất có điều kiện của sự kiện mà nút X (tức là A hoặc B) truyền bit b và HAP nhận bit a với $a, b \in \{0,1\}$, được xác định như sau:

$$P_{A-H_1}(0/1) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} f_{h_a}(h_a) \operatorname{erfc} \left(\frac{P_t h_a h_l - P_{th}}{\sqrt{2\delta_b^2}} \right) dh_a \quad (3.2)$$

$$P_{A-H_1}(1/0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{2\delta_b^2}} \right) \quad (3.3)$$

trong đó P_{th} là công suất ngưỡng của OHL tại HAP₁, δ_b^2 là phương sai của nhiễu nền và hàm bù lỗi được xác định như sau [111]:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (3.4)$$

$P_{A-H_1}(0/1)$ được xác định như sau:

$$P_{X-P}(0/1) \approx \frac{1}{2}(N_1 + N_2) \quad (3.5)$$

ở đây

$$N_1 \approx \frac{e^{-\frac{(P_{th})^2}{2\sigma_b^2}} X^{2\alpha+\beta-3}}{3\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{1}{\kappa!} \left(\frac{4P_t P_{th} h_l}{\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^\kappa$$

$$\times G_{4,1}^{1,4} \left[\left\langle \frac{8(P_t h_l)^2}{(\alpha\beta)^2\sigma_b^2} \middle| \frac{1-\kappa-\alpha}{2}, \frac{2-\kappa-\alpha}{2}, \frac{1-\kappa-\beta}{2}, \frac{2-\kappa-\beta}{2} \right\rangle \right] \quad (3.6)$$

và

$$N_2 \approx \frac{e^{-\frac{2(P_{th})^2}{3\sigma_b^2}} X^{2\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \left(\frac{16P_t P_{th} h_l}{3\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^i$$

$$\times G_{4,1}^{1,4} \left[\left\langle \frac{32(P_t h_l)^2}{3(\alpha\beta)^2\sigma_b^2} \middle| \frac{1-i-\alpha}{2}, \frac{2-i-\alpha}{2}, \frac{1-i-\beta}{2}, \frac{2-i-\beta}{2} \right\rangle \right] \quad (3.7)$$

t Trong đó G là hàm Meijer.

b. Đường truyền HAP- HAP

$P_{H_i-H_{i+1}}(a/b)$ xác suất có điều kiện của sự kiện mà HAP_i truyền bit b và HAP_(i+1) nhận bit a với $a, b \in \{0,1\}$ được xác định như sau:

$$P_{H_i-H_{i+1}}(0/1) = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_{h_a^i}(h_a^i) \operatorname{erfc} \left(\frac{P_t h_a^i h_l^i - P_{th}^i}{\sqrt{2\delta_{b_i}^2}} \right) dh_a^i \quad (3.8)$$

$$P_{H_i-H_{i+1}}(1/0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}^i}{\sqrt{2\delta_{b_i}^2}} \right) \quad (3.9)$$

trong đó P_{th}^i và $\delta_{b_i}^2$ tương ứng là công suất ngưỡng của OHL, phương sai của nhiễu nền tại HAP_i, $P_{H_i-H_{i+1}}(0/1)$ được xác định như sau:

$$P_{H_i-H_{i+1}}(0/1) \approx \frac{1}{2}(M_i + M_{i+1}) \quad (3.10)$$

ở đây

$$M_i \approx \frac{e^{-\frac{(P_{th}^i)^2}{2\sigma_{b_i}^2}} \chi_{2\alpha_i+\beta_i-3}}{3\pi\Gamma(\alpha_i)\Gamma(\beta_i)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{4P_t P_{th}^i h_l^i}{\alpha_i\beta_i\delta_{b_i}^2} \right)^n \quad (3.11)$$

$$\times G_{4,1}^{1,4} \left[\left\langle \frac{8(P_{th}^i h_l^i)^2}{(\alpha_i\beta_i)^2\delta_{b_i}^2} \middle| \frac{1-n-\alpha_i}{2}, \frac{2-n-\alpha_i}{2}, \frac{1-n-\beta_i}{2}, \frac{2-n-\beta_i}{2} \right\rangle \right]$$

và

$$M_{i+1} \approx \frac{e^{-\frac{(P_{th}^i)^2}{3\sigma_{b_i}^2}} \chi_{2\alpha_i+\beta_i-3}}{\pi\Gamma(\alpha_i)\Gamma(\beta_i)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} \left(\frac{16P_t P_{th}^i h_l^i}{3\alpha_i\beta_i\delta_{b_i}^2} \right)^m \quad (3.12)$$

$$\times G_{4,1}^{1,4} \left[\left\langle \frac{32(P_{th}^i h_l^i)^2}{3(\alpha_i\beta_i)^2\delta_{b_i}^2} \middle| \frac{1-m-\alpha_i}{2}, \frac{2-m-\alpha_i}{2}, \frac{1-m-\beta_i}{2}, \frac{2-m-\beta_i}{2} \right\rangle \right]$$

c. Đường truyền HAP- GS

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR được tính bằng tỉ số giữa công suất tín hiệu trung bình và công suất nhiễu trung bình. SNR được xác định trong trường hợp tách heterodyne như sau:

$$SNR = \frac{\langle I_{out}^2 \rangle}{\sigma^2} = \frac{2M^2\mathfrak{R}^2 P_s P_{LO}}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2} = \frac{2M^2\mathfrak{R}^2 P_s P_{LO}}{2qM^{2+x}(\mathfrak{R} P_{LO} + I_d)\Delta f + \frac{4k_B T}{R_L}\Delta f} \quad (3.13)$$

trong đó $P_s = KA_s^2 = P_{th} h_a$ là công suất quang thu được tại GS- B, P_{LO} là công suất LO, M là hệ số nhân của APD, \mathfrak{R} là đáp ứng của APD, q là điện tích điện tử, x là hệ số nhiễu trội, I_d là dòng tối, k_B là hằng số Boltzman và T là nhiệt độ tuyệt đối.

Mức ngưỡng quyết định tối ưu (I_{th}) có giá trị là trung bình của giá trị dòng điện bằng 0 ($I_0 = 0$ đối với các bit 0) và giá trị của dòng điện cực đại cho các bit 1 được xác định như sau:

$$I_1 = 2M\Re\sqrt{P_S P_{LO}} \quad (3.14)$$

$$I_{th} \cong \frac{I_1 + I_0}{2} = M\Re\sqrt{P_S P_{LO}} \quad (3.15)$$

Do đó, xác suất lỗi có điều kiện của đường xuống được xác định như sau:

$$P_{H_N-B} = P_{H_N-B}(0/1) = P_{H_N-B}(1/0) \quad (3.16)$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^\infty f_{h_a}(h_a) \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) dh_a$$

$P_{H_N-B}(a|b)$ xác suất có điều kiện của sự kiện mà HAP_N truyền bit b và nút GS-B nhận bit a với $a, b \in \{0,1\}$, và Q được xác định như sau:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{SNR} \quad (3.17)$$

theo hàm Meijer [124] là

$$\operatorname{erfc}(\sqrt{z}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left(z \middle| \begin{matrix} 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right) \quad (3.18)$$

P_{P-X} được xác định như sau [111]:

$$P_{P-X} = \frac{1}{2\Gamma(\alpha)(\beta)\sqrt{\pi}} G_{3,2}^{2,2} \left(\frac{M_A^2 \Re^2 P_t h_i P_{LO}}{4\alpha\beta(\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2)} \middle| \begin{matrix} 1, 1 - \alpha, 1 - \beta \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right) \quad (3.19)$$

d. BER đầu cuối- đầu cuối

Xác suất truyền chính xác từ đầu cuối tới đầu cuối được xác định như sau:

$$P_c = P_0 P_{A-H_1}(0/0) \dots P_{H_i-H_{i+1}}(0/0) \dots P_{H_N-B}(0/0)$$

$$+ P_1 P_{A-H_1}(1/1) \dots P_{H_i-H_{i+1}}(1/1) \dots P_{H_N-B}(1/1) \quad (3.20)$$

ở đây $P_{X-Y}(1/1) = 1 - P_{X-Y}(0/1)$ là xác suất của trường hợp GS-A phát bit 1 và GS-B thu bit 0. Giả sử rằng hệ thống là đối xứng, xác suất lỗi tại mỗi HAP là giống nhau, khi đó xác suất lỗi xác định như sau:

$$\begin{aligned}
P_c = & P_0 \left(1 - P_{A-H_1}(1/0)\right) \left(1 - P_{H_i-H_{i+1}}(1/0)\right)^{N_{HAP}-1} \times \left(1 - P_{H_N-B}(1/0)\right) \\
& + P_1 \left(1 - P_{A-H_1}(0/1)\right) \left(1 - P_{H_i-H_{i+1}}(0/1)\right)^{N_{HAP}-1} \times \left(1 - P_{H_N-B}(0/1)\right)
\end{aligned} \tag{3.21}$$

trong đó P_0 và P_1 là xác suất tương ứng bit 0 hoặc bit 1 được truyền từ nút A đến nút B.

Giả sử rằng xác suất truyền bit 1 và bit 0 từ mỗi GS là như nhau, tức là $P_0 = P_1 = 1/2$. Cuối cùng, tỉ lệ lỗi bit BER được xác định $BER = 1 - P_c$.

3.2.3. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Trong phần này, luận án đưa ra kết quả khảo sát lỗi bit của hệ thống OWC đa chặng dựa trên nhiều HAP sử dụng tái tạo, khuếch đại và chuyển tiếp toàn quang với máy thu coherent. Các tham số xem xét bao gồm công suất ngưỡng P_{th} của OHL, khoảng cách trên mặt đất cho liên kết giữa GS-A và GS-B (L), tổng công suất phát của hệ thống (P_t^{Σ}) và số lượng HAP (N_{HAP}). Các thông số khác của hệ thống OWC được cung cấp trong Bảng 3.1.

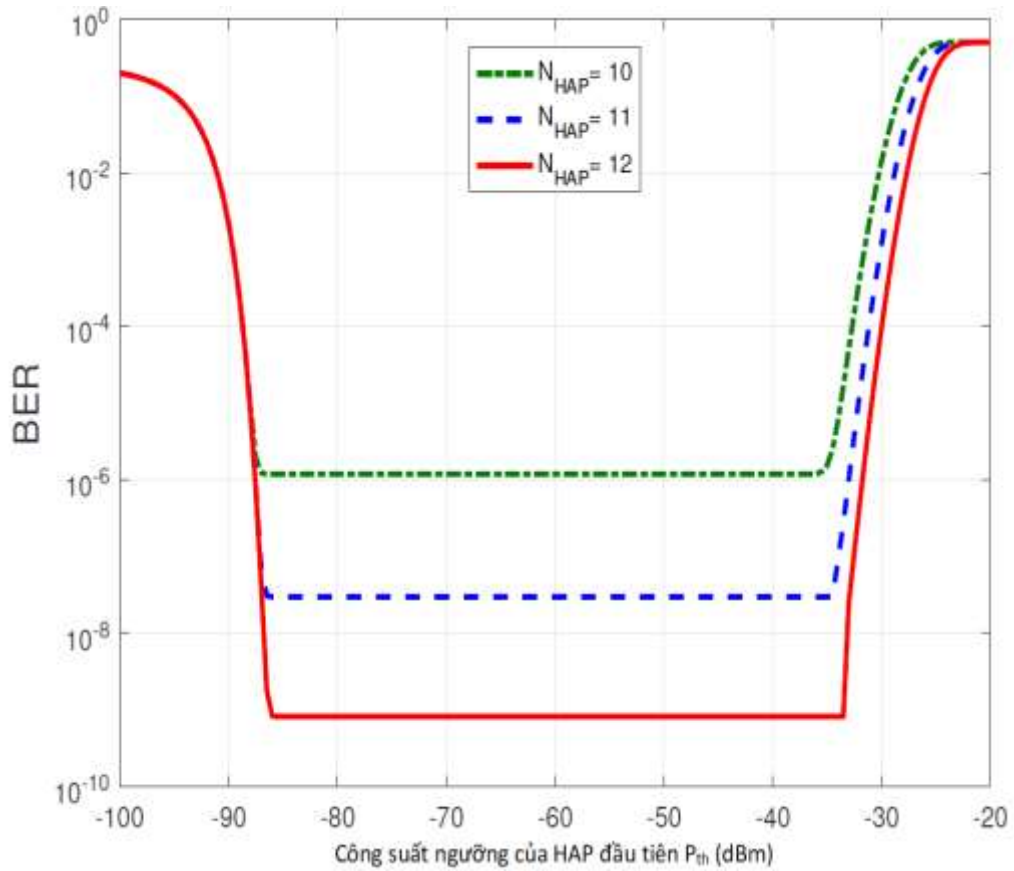
Trong hệ thống đề xuất, việc truyền tín hiệu được gửi từ GS-A đến GS-B thông qua các nút chuyển tiếp N_{HAP} . Do đó, việc đánh giá tác động của công suất ngưỡng OHL là cực kỳ quan trọng bởi vì điều này đảm bảo việc quyết định thu bit chính xác. Điều kiện kênh đầu tiên giữa GS-A và HAP khác với điều kiện kênh giữa các HAP, công suất ngưỡng tại HAP đầu tiên phải khác với công suất ngưỡng tại các HAP khác.

Trong hình 3.2 khảo sát sự thay đổi của hiệu suất BER so với công suất ngưỡng P_{th} của HAP đầu tiên với $P_t^{\Sigma} = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}^{(i)} = -50$ dBm. Ta thấy rằng đường cong BER được chia thành ba đoạn. Trong đoạn đầu tiên, BER giảm khi công suất ngưỡng tăng. Đoạn này tương ứng với dải công suất ngưỡng, trong đó xác suất lỗi phát bit 0 và thu bit 1 chiếm ưu thế. Do đó, sự gia tăng của công suất ngưỡng giúp giảm BER.

Bảng 3.1 Các tham số hệ thống OWC chuyển tiếp nhiều HAP

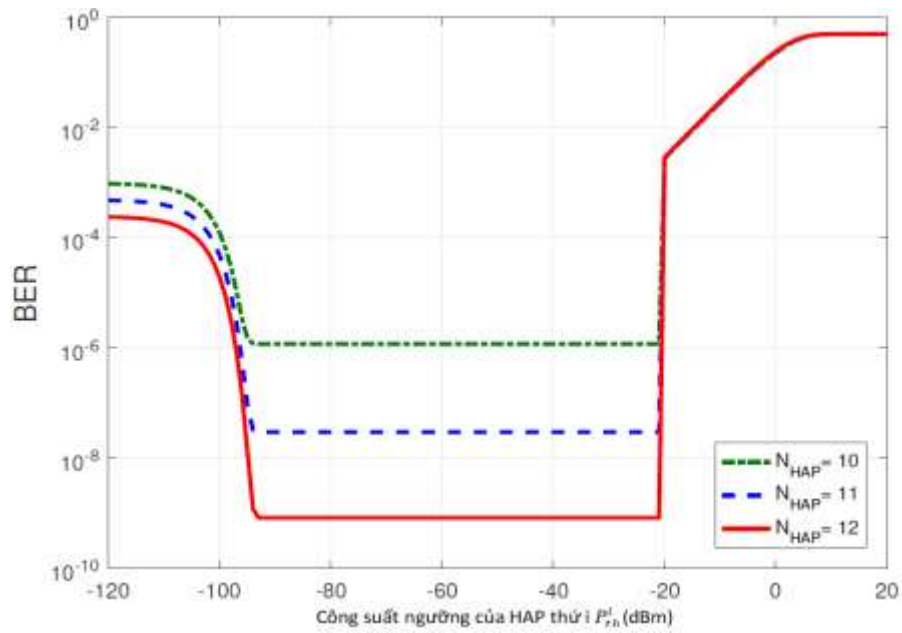
Tham số	Kí hiệu	Giá trị
Tốc độ gió	w	21 m/s
Độ cao HAP	H	20 km
Bước sóng	λ	1550 nm
Hằng số Boltzman	k_B	$1,38 \times 10^{-23}$ W/K/Hz
Độ cao GS	h_o	1 m
Hệ số suy hao	γ	0.4 km^{-1}
Tốc độ bit	B	10 Gbps
Đáp ứng	\mathfrak{R}	0.8 A/W
x ($F(M) = M^x$)	x	0.8
Hệ số nhân	M_A	10
Dòng tối	I_d	3 nA
Điện trở tải	R_L	50 Ω
Nhiệt độ	T	298 K

Đoạn thứ hai là phạm vi không đổi của BER, cũng là giá trị thấp nhất, BER sàn. Công suất ngưỡng tương ứng với đoạn này gọi là các giá trị ngưỡng tối ưu. Đoạn cuối cùng, BER tăng theo công suất ngưỡng. Điều này được giải thích rằng BER bị chi phối bởi xác suất lỗi phát bit 1 và thu bit 0 cho phạm vi giá trị công suất ngưỡng cao. Từ hình này, ta tìm thấy phạm vi tối ưu của các giá trị công suất ngưỡng nên đặt cho HAP đầu tiên để BER chạm sàn. Cụ thể hơn, phạm vi tối ưu của các giá trị công suất ngưỡng là từ -86 dBm đến -35 dBm.



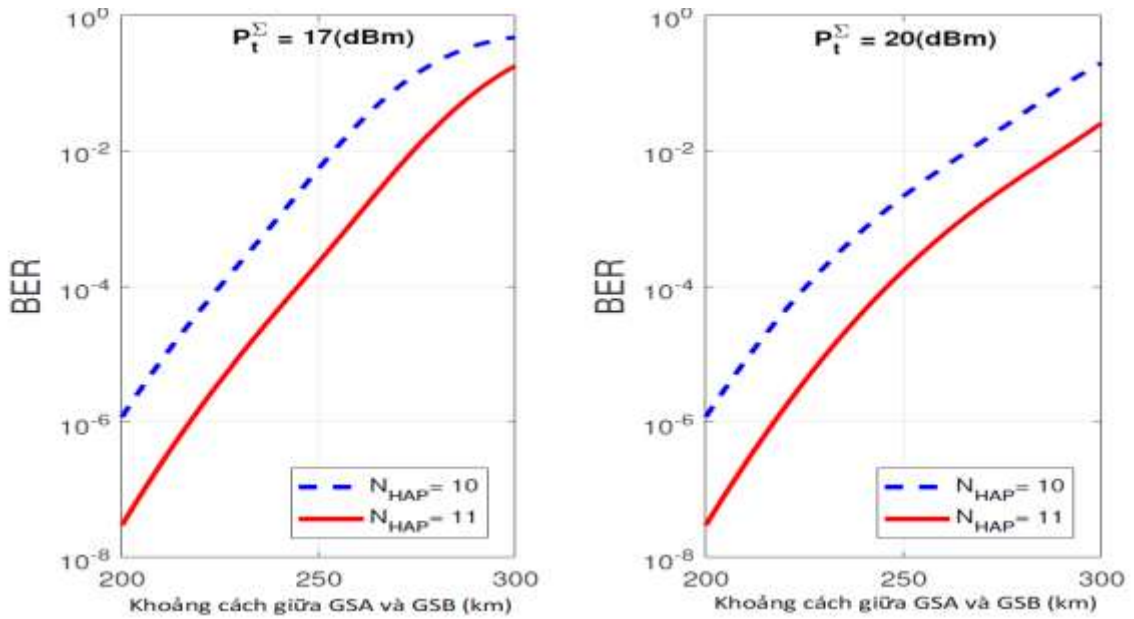
Hình 3.3 BER theo công suất ngưỡng của HAP P_{th} đầu tiên với $P_t^{\Sigma} = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}^{(i)} = -50$ dBm.

Hình 3.4 khảo sát sự thay đổi của BER so với công suất ngưỡng của HAP thứ i ($2 \leq i \leq N_{HAP}$) với $P_t^{\Sigma} = 30$ dBm, $P_{LO} = 0$ dBm, $L = 200$ km, $P_{th}^{(1)} = -50$ dBm. Số lượng HAP thay đổi từ 10 đến 12. Các đường cong BER thu được từ hình này tương tự như hình 3.3. Tuy nhiên, phạm vi giá trị tối ưu của công suất ngưỡng cho HAP thứ i là lớn hơn phạm vi của HAP đầu tiên. Điều này là bởi vì tác động của nhiễu loạn khí quyển đến đường truyền giữa HAP không nhiều bằng đường truyền từ GS-A đến HAP đầu tiên. Khảo sát cũng cho thấy mức sàn BER phụ thuộc vào số lượng HAP, tức là, mức sàn BER giảm khi số lượng HAP tăng lên. Khi $N_{HAP} = 10$, BER sàn là 10^{-6} . Tuy nhiên, BER sàn giảm xuống 10^{-9} khi N_{HAP} tăng lên 12. Điều này là do thực tế khoảng cách hop được rút ngắn và do đó tác động của nhiễu loạn khí quyển được giảm nhẹ.



Hình 3.4 BER so với công suất ngưỡng của HAP thứ i ($2 \leq i \leq N_{HAP}$) với

$$P_t^\Sigma = 30 \text{ dBm}, P_{LO} = 0 \text{ dBm}, L = 200 \text{ km}, P_{th}^{(1)} = -50 \text{ dBm}.$$



Hình 3.5 BER theo tổng khoảng cách truyền giữa GS-A và GS-B với $P_{LO} = 0 \text{ dBm}$,

$$P_{th}^{(1)} = P_{th}^{(i)} = -50 \text{ dBm}.$$

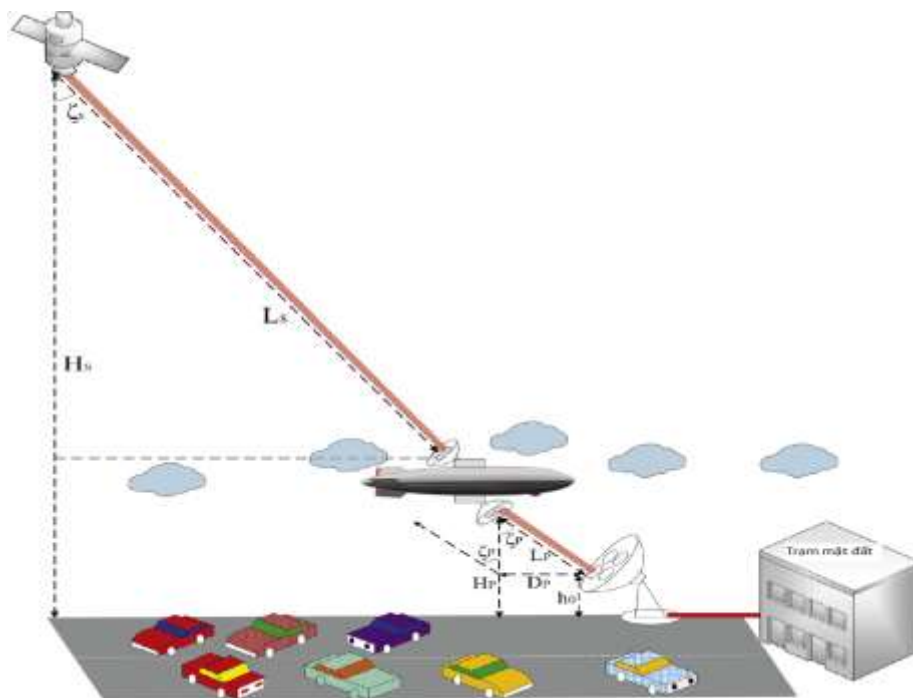
Cuối cùng, hình 3.5 khảo sát hiệu năng BER so với khoảng cách trên mặt đất giữa GS-A và GS-B với $P_{LO} = 0 \text{ dBm}$, $P_{th}^{(1)} = P_{th}^{(i)} = -50 \text{ dBm}$. Rõ ràng BER bị suy

giảm khi L tăng. Trong trường hợp BER được yêu cầu cố định, khoảng cách truyền tăng khi số lượng HAP tăng. Ví dụ, với BER yêu cầu 10^{-6} , khoảng cách truyền tăng từ 200 km đến 217 km khi N_{HAP} tăng từ 10 đến 11. Kết quả cũng cho thấy BER giảm khi tổng công suất truyền tăng.

3.3. Hệ thống OWC vệ tinh-mặt đất chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP

3.3.1. Mô hình thiết kế hệ thống OWC vệ tinh-mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP

Hình 3.6 mô tả sơ đồ khối của hệ thống OWC vệ tinh-mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP, bao gồm ba phần: vệ tinh LEO tại độ cao 610 km so với bề mặt Trái đất đóng vai trò như một máy phát, HAP hoạt động như một nút chuyển tiếp và trạm mặt đất GS. Tín hiệu quang từ vệ tinh LEO được chuyển tiếp trong miền quang tại HAP trước khi được chuyển tiếp đến GS. Để đồng chỉnh HAP với các bộ thu phát, HAP sử dụng thiết bị định hướng, bắt và bám PAT [60].



Hình 3.6 Sơ đồ khối của hệ thống OWC LEO- mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP

Đầu tiên, tại vệ tinh LEO, dữ liệu nhị phân điều chế OOK bằng cách phát một xung quang hoặc không trong thời gian bit. Nếu bit dữ liệu d là “1”, thì laser sẽ

phát một xung quang với công suất phát $P_t^{(S)}$ đến HAP. Mặt khác, sẽ không có xung ánh sáng nào được phát đi nếu d là bit “0”. Tín hiệu quang từ máy phát được tăng cường nhờ sử dụng thấu kính phát trước khi được phát tới HAP thông qua kênh OWC.

Tiếp theo, tại HAP, tín hiệu quang nhận được từ đầu ra của thấu kính thu được tách quang ở bộ giới hạn cứng quang. Công suất đầu ra của OHL là không đổi, ở mức cao khi công suất đầu vào lớn hơn mức công suất ngưỡng P_{th} và thấp hơn cho trường hợp ngược lại. Hoạt động của OHL được biểu diễn bằng mô tả toán học như sau [124]:

$$P_{out}(P_{in}) = \begin{cases} P_{th}, & P_{in} \geq P_{th} \text{ (bit"1")} \\ 0, & P_{th} \geq P_{in} \geq 0 \text{ (bit"0")} \end{cases} \quad (3.24)$$

trong đó P_{in} là công suất đầu vào của OHL và P_{out} là công suất đầu ra của OHL. P_{out} sau đó được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại quang có hệ số khuếch đại $G_A = P_t^{(P)}/P_{th}$, trong đó $P_t^{(P)}$ là công suất phát từ HAP.

Tín hiệu này tiếp tục được đưa đến thấu kính máy phát của HAP rồi phát chuyển tiếp cho GS. Cuối cùng, tại GS, một bộ tách sóng quang APD được sử dụng để chuyển đổi tín hiệu quang thu được thành dòng điện. Sau đó, dòng tách quang này sẽ được so sánh với mức ngưỡng của một mạch quyết định để khôi phục bit nhị phân ban đầu từ vệ tinh LEO. Bit “1” sẽ được quyết định ở đầu ra của mạch quyết định nếu dòng điện lớn hơn mức ngưỡng và ngược lại là bit “0”.

3.3.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

Khi một bit được phát từ vệ tinh LEO, nó sẽ là bit “1” hoặc bit “0” một cách ngẫu nhiên. Tín hiệu thu có thể bị tách sai tại HAP và GS vì ảnh hưởng của nhiễu và nhiễu loạn khí quyển. BER đầu cuối- đầu cuối của hệ thống chuyển tiếp dựa trên HAP được tính dựa trên xác suất lỗi của cả đường truyền LEO-HAP và đường truyền HAP - mặt đất. Để thuận tiện cho việc tính toán, công suất phát từ vệ tinh LEO và HAP được thiết lập bằng nhau $P_t^{(S)} = P_t^{(P)} = P_t$.

a. Hệ thống OWC LEO - mặt đất sử dụng chuyển tiếp OAF dựa trên HAP

Trong chuyển tiếp OAF, chỉ có một bộ khuếch đại tại HAP để khuếch đại tín hiệu từ vệ tinh LEO và chuyển tiếp cho GS. APD tại GS sẽ tách tín hiệu thu tại GS và tạo ra dòng điện cho bit “1” bit “0” được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(M_x \Re P_r^{(G)} h^p + n_1 \right) \\ n_0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

trong đó I_1 và I_0 là dòng điện tương ứng với bit “1” và bit “0”.

Công suất thu được tại GS được tính là

$$P_r^G = P_r^{(P)} G_A G_{TX}^P G_{RT}^G \quad (3.26)$$

trong đó G_A là hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại quang tại HAP. Hệ số khuếch đại của thấu kính phát tại HAP được ký hiệu là G_{TX}^P và G_{RT}^G là hệ số khuếch đại của thấu kính thu tại GS. n_1 và n_0 là nhiễu cộng đối với bit “1” và bit “0”. Các phương sai của n_1 và n_0 được kiểm soát bởi nhiễu nỏ và nhiệt nhiệt.

Nhiễu nỏ có phân bố Poisson khi quá trình tách photon riêng lẻ được coi là các sự kiện độc lập (đếm photon). Thực tế, nhiễu nỏ thường được tính gần đúng theo thống kê của Gauss. Đối với số lượng photon nhỏ, nhiễu nỏ thường bị chi phối bởi các nguồn nhiễu tín hiệu độc lập khác và cho số lượng photon lớn hơn, định lý giới hạn trung tâm đảm bảo rằng phân bố Poisson tiếp cận Gauss. Nhiễu nhiệt cũng được mô hình hóa theo phân bố Gauss và do đó nhiễu tổng là tổng của nhiễu nỏ và nhiễu nhiệt được mô hình hóa là nhiễu Gauss cộng với trung bình bằng không. Phương sai nhiễu $\sigma_1^{2(AF)}$ và $\sigma_0^{2(AF)}$ đối với nhiễu của bit “1” và bit “0” được xác định như sau:

$$\sigma_1^{2(AF)} = 2qM_A^{2+x} \Re(P_r^{(G)} h^p + P_b^{(P)} G_A G_{TX}^P G_{RT}^G h^p + P_b^{(G)}) \Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} \Delta f \quad (3.27)$$

$$\sigma_0^{2(AF)} = 2qM_A^{2+x} \Re(P_b^{(P)} G_A G_{TX}^P G_{RT}^G h^p + P_b^{(G)}) \Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} \Delta f \quad (3.28)$$

trong đó q là điện tích electron tính bằng Coulomb, M và \Re tương ứng là hệ số nhân và đáp ứng của APD. x là tham số để tính hệ số nhiễu ($F(M_A) = M_A^x$) [73],

k_B là hằng số Boltzmann, T là nhiệt độ tuyệt đối, R_L là điện trở tải và Δf biểu thị băng thông nhiễu hiệu dụng tương đương với tốc độ bit B của hệ thống $P_b^{(P)} = N_0^{(P)} B_0$ và $P_b^{(G)} = N_0^{(G)} B_0$ là công suất ánh sáng nền thu được tại HAP, GS.

Mật độ phổ công suất của ánh sáng nền thu được tại HAP và GS tương ứng như sau:

$$N_0^{(P)} = 2\sigma_{b(P)}^2 G_{RX}^P; N_0^{(G)} = 2\sigma_{b(G)}^2 G_{RX}^G \quad (3.29)$$

$\sigma_{b(P)}^2$ là phương sai của ánh sáng nền thu được tại HAP, $\sigma_{b(G)}^2$ là phương sai của ánh sáng nền thu được tại GS và B_0 là băng thông quang

Xác suất lỗi có điều kiện của đường truyền OWC từ vệ tinh LEO đến GS ($P_e^{(AF)}$) được tối ưu hóa bằng cách đặt mức ngưỡng tối ưu của mạch quyết định như sau:

$$I_D^{(AF)} = \frac{\sigma_0^{(AF)} \mu_1^{AF} + \sigma_1^{(AF)} \mu_0^{AF}}{\sigma_1^{(AF)} + \sigma_0^{(AF)}} \quad (3.30)$$

Với $\mu_1^{AF} = M_A \Re P_r^{(G)} h^p$ và $\mu_0^{AF} = 0$ tương ứng là các phương sai của I_1 và I_0 . Để xác định mức ngưỡng, thông tin trạng thái kênh tức thời (CSI) phải có sẵn tại GS. Trong thực tế, các máy phát thường phát một số ký hiệu dẫn đường dựa vào đó phía thu ước tính trạng thái kênh. Do đó, xác suất lỗi có điều kiện được đưa ra là [57]:

$$P_e^{(AF)} = P_e^{(AF)}(0/1) = P_e^{(AF)}(1/0) = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_{h_a^p}(h_a^p) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma^{(AF)}}{2}} \right) dh_a^p \quad (3.31)$$

trong đó $P_e^{(AF)}(0/1)$ là xác suất có điều kiện của sự kiện vệ tinh LEO phát bit “1” và GS thu bit “0”. $P_e^{(AF)}(1/0)$ là xác suất có điều kiện của sự kiện vệ tinh LEO phát bit “0” và GS thu bit “1”.

Tỉ số tín hiệu trên nhiễu điện SNR được tính như sau:

$$\gamma^{(AF)} = \frac{(\mu_1^{(AF)} - \mu_0^{(AF)})^2}{(\sigma_1^{(AF)} + \sigma_0^{(AF)})^2} = \frac{\mu_1^{2(AF)}}{\sigma_1^{2(AF)} + \sigma_0^{2(AF)} + 2\sigma_0^{(AF)} \sigma_1^{(AF)}} \quad (3.32)$$

Tỷ lệ lỗi bit đầu cuối- đầu cuối của hệ thống OWC LEO-GS dựa trên HAP được xác định như sau:

$$\text{BER}_{e2e}^{(AF)} = P_0 P_e^{(AF)} (1/0) + P_1 P_e^{(AF)} (0/1) \quad (3.33)$$

trong đó P_1 và P_0 tương ứng là xác suất phát bit “1” và bit “0”. Giả sử rằng chúng bằng $\frac{1}{2}$ bởi vì xác suất mà bit “1” và bit “0” xuất hiện là giống nhau. Do đó, tỷ lệ lỗi bit đầu cuối- đầu cuối trở thành:

$$\text{BER}_{e2e}^{(AF)} = \frac{1}{2} P_e^{(AF)} (1/0) + \frac{1}{2} P_e^{(AF)} (0/1) \quad (3.34)$$

b. Hệ thống OWC LEO đến mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP sử dụng ODAF

Đường truyền từ vệ tinh LEO -HAP

Xác suất lỗi của đường truyền LEO-HAP dựa trên mức ngưỡng P_{th} của OHL tại HAP. Xác suất có điều kiện ($P_{S-P}(a/b)$) của sự kiện mà vệ tinh LEO phát bit ”b” và HAP nhận bit “a” với a, b thuộc $\{0, 1\}$ được tính như sau:

$$P_{S-P}(0/1) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{P_r^{(P)} - P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) \quad (3.35)$$

$$P_{S-P}(1/0) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) \quad (3.36)$$

trong đó P_{th} là mức ngưỡng của OHL và $\text{erfc}(x)$ biểu thị hàm bù lỗi được định nghĩa là:

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (3.37)$$

Đường truyền từ HAP- GS

Tại GS, tín hiệu thu được từ HAP được chuyển đổi quang điện nhờ APD. Dòng điện ở đầu ra của APD được biểu thị tương tự như (3.25) với $P_r^{(G)} = P_t^{(P)} G_{TX}^P G_{RX}^G$. Trong trường hợp này, phương sai nhiễu có thể được tính như sau:

$$\sigma_1^{2(DAF)} = 2qM_A^{2+x}\Re(P_r^{(G)}h^p + P_b^{(G)})\Delta f + \frac{4k_B T}{R_L}\Delta f \quad (3.38)$$

$$\sigma_0^{2(DAF)} = 2qM_A^{2+x}\Re P_b^{(G)}\Delta f + \frac{4k_B T}{R_L}\Delta f \quad (3.39)$$

Khi chúng ta đặt mức ngưỡng tối ưu của mạch quyết định là:

$$I_D^{(DAF)} = \frac{\sigma_0^{(DAF)}\mu_1^{DAF} + \sigma_1^{(DAF)}\mu_0^{DAF}}{\sigma_1^{(DAF)} + \sigma_0^{(DAF)}} \quad (3.40)$$

Xác suất lỗi có điều kiện của đường truyền OWC từ HAP đến GS (P_{P-G}) được tối ưu hóa và được tính như sau:

$$P_{P-G} = P_{P-G}(0/1) = P_{P-G}(1/0) = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_{h_a^p}(h_a^p) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma^{(DAF)}}{2}}\right) dh_a^p \quad (3.41)$$

trong đó $P_{P-G}(0/1)$ là xác suất có điều kiện của sự kiện HAP phát bit “1” và GS thu được bit “0” và $P_{P-G}(1/0)$ là xác suất có điều kiện của sự kiện vệ tinh HAP phát bit “0” và GS thu bit “1”.

Tỉ số tín hiệu trên nhiễu điện SNR được tính như sau:

$$\gamma^{(DAF)} = \frac{(\mu_1^{(DAF)} - \mu_0^{(DAF)})^2}{(\sigma_1^{(DAF)} + \sigma_0^{(DAF)})^2} = \frac{\mu_1^{2(DAF)}}{\sigma_1^{2(DAF)} + \sigma_0^{2(DAF)} + 2\sigma_0^{(DAF)}\sigma_1^{(DAF)}} \quad (3.42)$$

Việc đánh giá xác suất lỗi của đường truyền HAP – GS sẽ phức tạp vì các thành phần căn bậc hai có thể được tạo bởi thành phần thứ ba trong mẫu số của công thức (3.42). Do đó, để phân tích BER giới hạn, luận án sử dụng giới hạn dưới (γ_1) và giới hạn trên (γ_2) cho $\gamma^{(DAF)}$ là $\gamma_1 \leq \gamma^{(DAF)} \leq \gamma_2$, trong đó:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_1^{2(DAF)}}{3\sigma_1^{2(DAF)} + \sigma_0^{2(DAF)}} \quad \text{và} \quad \gamma_2 = \frac{\mu_1^{2(DAF)}}{\sigma_1^{2(DAF)} + 3\sigma_0^{2(DAF)}} \quad (3.43)$$

Vì thế xác suất lỗi của đường truyền HAP-GS được giới hạn như sau:

$$P_{P-G}(\gamma_2) \leq P_{P-G} \leq P_{P-G}(\gamma_1) \quad (3.44)$$

Bằng cách thay các công thức (3.38) và (3.39) vào công thức (3.42), ta có được:

$$\gamma_1 = \frac{(M_A \Re(P_r^{(G)} h_l^p))^2 (h_l^p)^2}{6qM_A^{2+x} \Re P_r^{(G)} h_l^p \Delta f h_a^p + 8q \Re P_b^{(G)} \Delta f + \frac{16k_B T}{R_L} \Delta f} = \frac{A_1 (h_l^p)^2}{B_1 h_a^p + C_1} \quad (3.45)$$

$$\gamma_2 = \frac{(M_x \Re(P_r^{(G)} h_l^p))^2 (h_l^p)^2}{2qM_A^{2+x} \Re P_r^{(G)} h_l^p \Delta f h_a^p + 8q \Re P_b^{(G)} \Delta f + \frac{16k_B T}{R_L} \Delta f} = \frac{A_2 (h_a^p)^2}{B_2 h_a^p + C_2} \quad (3.46)$$

$$\gamma_v = \frac{A_v (h_a^p)^2}{B_v h_a^p + C_v} \quad (3.47)$$

Với $v \in \{1,2\}$. Dựa trên biểu thức dạng gần đúng cho P_{P-G} trong trường hợp hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang đơn hướng, P_{P-G} được tính theo công thức (3.48):

$$\begin{aligned}
P_{P-G}(\gamma_v) &\approx \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\beta-1-m}{2}, \frac{n+\beta+1+m}{2} \right) \right. \\
&+ \frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\alpha-1-m}{2}, \frac{n+\alpha+1+m}{2} \right) \\
&+ \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+2+m}{2} \right) \\
&+ \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+2+m}{2} \right) \\
&+ \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+m}{2} \right) \\
&+ \left. \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+m}{2} \right) \right] \\
&+ \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\beta-1-m}{2}, \frac{n+\beta+1+m}{2} \right) \right. \\
&+ \frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\alpha-1-m}{2}, \frac{n+\alpha+1+m}{2} \right) \\
&+ \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+2+m}{2} \right) \\
&+ \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+2+m}{2} \right) \\
&+ \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+m}{2} \right) \\
&+ \left. \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+m}{2} \right) \right] \tag{3.48}
\end{aligned}$$

trong đó

$$\psi_v(\alpha, \beta) = a_n(\alpha, \beta) \frac{1}{2(A_v)^{n+\beta+1}} \binom{n+\beta-1}{m} B h_v^m (4A_v C_v)^{\frac{n+\beta-1-m}{2}} \tag{3.49}$$

và

$$a_n(\alpha, \beta) \triangleq \frac{\pi(\alpha\beta)^{n+\beta}}{\sin[\pi(\alpha-\beta)]\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(n-\alpha+\beta+1)n!} \tag{3.50}$$

và

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_v(p, v, q) = \frac{\pi^2}{p^q \Gamma(v) \sin[\pi(q-v)]} & \left[\left(\frac{p}{z}\right)^v \frac{L_{-v}^{v-q}\left(\frac{p}{z}\right)}{\sin(\pi v) \Gamma(1-q)} \right. \\ & \left. - \left(\frac{p}{z}\right)^q \frac{L_{-q}^{q-v}\left(\frac{p}{z}\right)}{\sin(\pi q) \Gamma(1-v)} \right] \end{aligned} \quad (3.51)$$

Với $L_v^q(p)$ là hàm đa thức Laguerre với $v \neq \pm 1, \pm 2, \dots$ và $\text{Re } q > 0, \text{Re } p > 0, \text{Re } z > 0$ và $z = \frac{B_v^2}{4A_v C_v}$

BER đầu cuối- đầu cuối

Xác suất mà vệ tinh LEO phát d và GS nhận đúng d, được kí hiệu là P_C được tính như sau:

$$\begin{aligned} P_C &= P_0 P_{S-P}(0/0) P_{P-G}(0/0) + P_1 P_{S-P}(1/1) P_{P-G}(1/1) \\ &+ P_0 P_{S-P}(1/0) P_{P-G}(0/1) + P_1 P_{S-P}(0/1) P_{P-G}(1/0) \\ &= P_0 [1 - P_{S-P}(1/0)] [1 - P_{P-G}(1/0)] \\ &+ P_1 [1 - P_{S-P}(0/1)] [1 - P_{P-G}(0/1)] \\ &+ P_0 P_{S-P}(1/0) P_{P-G}(0/1) + P_1 P_{S-P}(0/1) P_{P-G}(1/0) \end{aligned} \quad (3.52)$$

trong đó P_1 và P_0 tương ứng là xác suất phát bit “1” và bit “0”. Giả sử rằng chúng bằng 1/2 bởi vì xác suất mà bit “1” và bit “0” xuất hiện là giống nhau. Do đó, công thức (3.51) trở thành

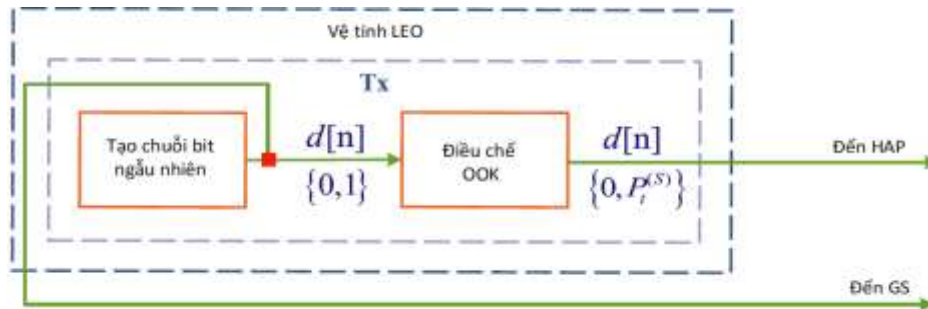
$$\begin{aligned} P_C &= \frac{1}{2} [1 - P_{S-P}(1/0)] [1 - P_{P-G}(1/0)] \\ &+ \frac{1}{2} [1 - P_{S-P}(0/1)] [1 - P_{P-G}(0/1)] \\ &+ \frac{1}{2} P_{S-P}(1/0) P_{P-G}(0/1) + \frac{1}{2} P_{S-P}(0/1) P_{P-G}(1/0) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Công thức BER đầu cuối- đầu cuối được tính như sau:

$$\begin{aligned} \text{BER}_{e2e}^{(DAF)} \leq & 1 - \frac{1}{2}[1 - P_{S-P}(1/0)][1 - P_{P-G}(\gamma_1)] \\ & - \frac{1}{2}[1 - P_{S-P}(0/1)][1 - P_{P-G}(\gamma_1)] \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{2}P_{S-P}(1/0)P_{P-G}(0/1) - \frac{1}{2}P_{S-P}(0/1)P_{P-G}(1/0) \\ \text{BER}_{e2e}^{(DAF)} \leq & 1 - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) \right] [1 - P_{P-G}(\gamma)] \\ & - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{P_r^{(P)} - P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) \right] [1 - P_{P-G}(\gamma)] \\ & - \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) P_{P-G}(\gamma) \\ & - \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\frac{P_r^{(P)} - P_{th}}{\sqrt{N_0^{(P)}}} \right) P_{P-G}(\gamma) \end{aligned} \quad (3.55)$$

3.3.3. Mô hình mô phỏng hệ thống

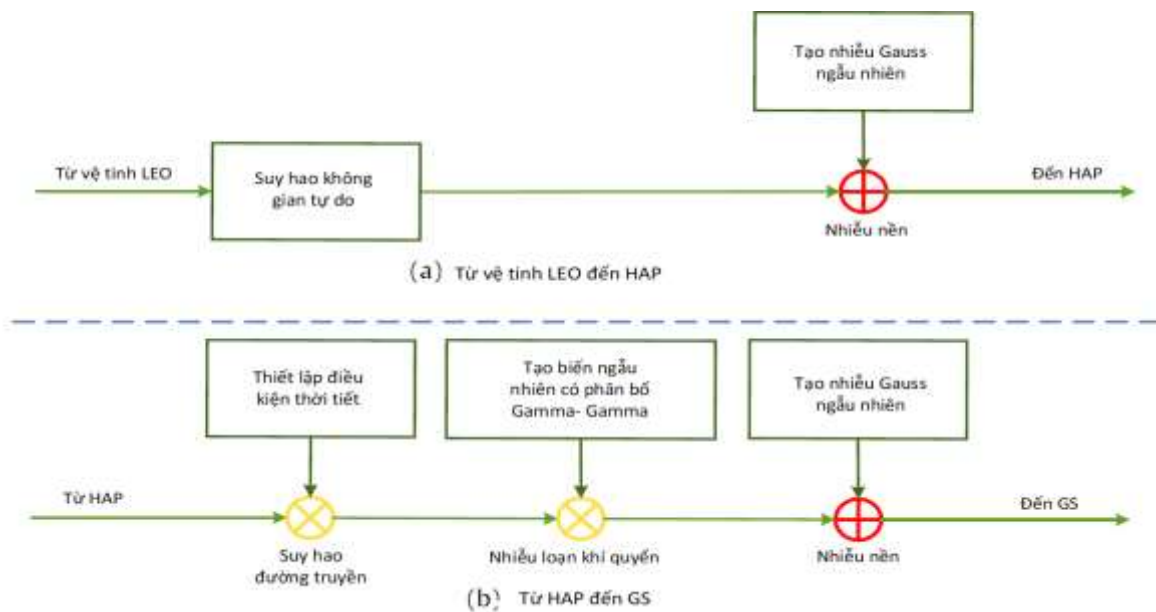


Hình 3.7 Mô hình mô phỏng của vệ tinh LEO

Hình 3.7 là mô hình mô phỏng của vệ tinh LEO. Trước tiên, một chuỗi bit $d[n]$ được tạo bởi khối tạo chuỗi bit ngẫu nhiên. Sau đó, chuỗi bit được điều chế

bằng bộ điều chế OOK, trong đó $d[n]$ được chuyển đổi thành một tập hợp các giá trị $P_t^{(S)}$ tương ứng cho bit '1' và bit '0'. Tiếp theo, $d[n]$ được phát tới HAP thông qua kênh OWC sau khi được nhân với hệ số khuếch đại của thấu kính máy phát của vệ tinh LEO.

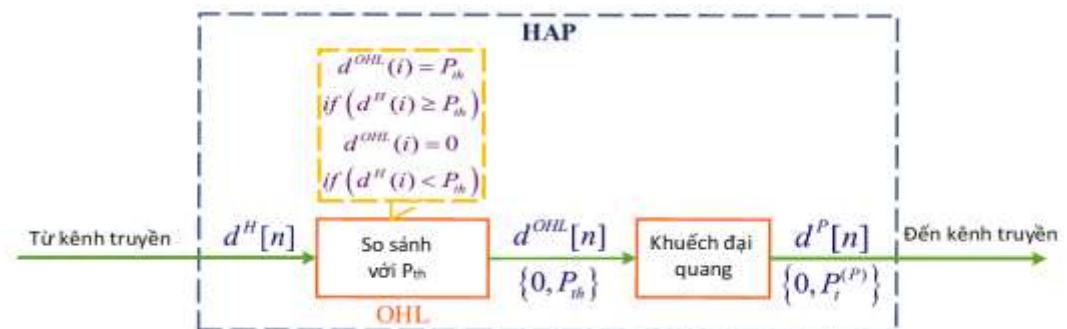
Hình 3.8 (a) cho thấy mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ vệ tinh LEO đến HAP. Tín hiệu máy phát $d[n]$ từ vệ tinh LEO được đưa vào khối suy hao không gian tự do và sau đó được cộng với nhiễu nền từ khối tạo nhiễu Gauss ngẫu nhiên.



Hình 3.8a. Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ vệ tinh LEO đến HAP

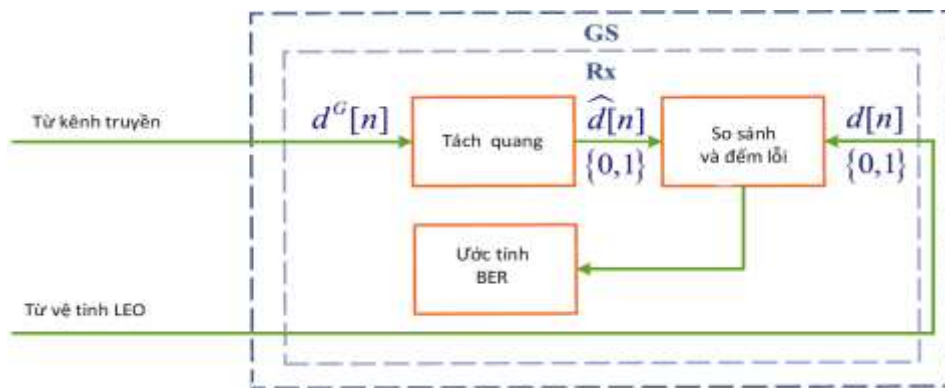
b. Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC từ HAP- GS

Mô hình mô phỏng M-C cho HAP được thể hiện trong Hình 3.9.



Hình 3.9. Mô hình mô phỏng HAP

Sau khi tín hiệu thu được khuếch đại nhờ thấu kính thu, dữ liệu từ vệ tinh LEO ($d_{[n]}^H$) được so sánh với công suất ngưỡng P_{th} của OHL để xác định $d_{[n]}^{OHL}$. Tại bộ khuếch đại quang, $d_{[n]}^{OHL}$ được khuếch đại trở thành $d^P[n]$ và sau đó được phát đến GS với công suất phát $P_t^{(P)}$ nhân với hệ số khuếch đại của thấu kính TX của HAP thông qua kênh OWC giữa HAP và GS được mô tả trong hình 3.8(b). Đầu tiên, dữ liệu được nhân với hệ số suy hao và hệ số nhiễu loạn khí quyển được tạo ra do khối thiết lập điều kiện thời tiết và khối tạo biến ngẫu nhiên có phân bố Gamma-Gamma. Tiếp theo, dữ liệu được cộng với nhiễu nền được tạo ra bởi khối tạo các biến ngẫu nhiên trước khi được phát đến GS. Cuối cùng, trong hình 3.10, dữ liệu thu được tại GS được chuyển đổi quang điện tạo thành chuỗi bit nhị phân nhờ một bộ tách quang. Dữ liệu $d[n]$ được so sánh với dữ liệu gốc $d[n]$ từ vệ tinh LEO tới và tính BER bằng cách đếm số bit lỗi trong tổng số bit của $d[n]$.



Hình 3.10 Mô hình mô phỏng M-C cho GS

Áp dụng cho truyền hình ảnh

Mô phỏng truyền hình ảnh từ vệ tinh LEO đến GS có thể được thực hiện theo các bước sau:

Bước 1: Hình ảnh gốc được chuyển đổi thành chuỗi dữ liệu bit. Sau đó được điều chế bởi bộ điều chế OOK và phát đến HAP.

Bước 2: Tín hiệu thu được tại HAP được tách bởi OHL và khuếch đại bởi bộ khuếch đại quang. Tiếp theo, tín hiệu được phát cho GS.

Bước 3: Tại GS, dòng quang được chuyển đổi quang điện nhờ APD. Sau đó, một mạch quyết định sẽ so sánh dòng quang điện với mức ngưỡng để quyết định bit “1” hoặc bit “0”.

Bước 4: Hình ảnh phát đi được xây dựng lại từ bit được tách và so sánh với hình ảnh gốc để ước tính BER như sau [46]

$$BER = \frac{\sum_{mnq} [(x_{mn})_q]_2 \oplus [(y_{mn})_q]_2}{M_p \times N_p \times p} \quad (3.56)$$

$$m=1 \dots M_p, n=1 \dots N_p, q=1 \dots p$$

Trong đó x_{mn} là pixel của ảnh gốc, y_{mn} là pixel của hình ảnh được xây dựng lại, p là số bit của một pixel, \oplus là phép toán XOR và $M_p \times N_p$ là kích thước của ảnh.

3.3.4. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

Các tham số hệ thống được cho trong Bảng 3.2. Mô phỏng M-C được thể hiện trong các hình để so sánh với các kết quả lý thuyết

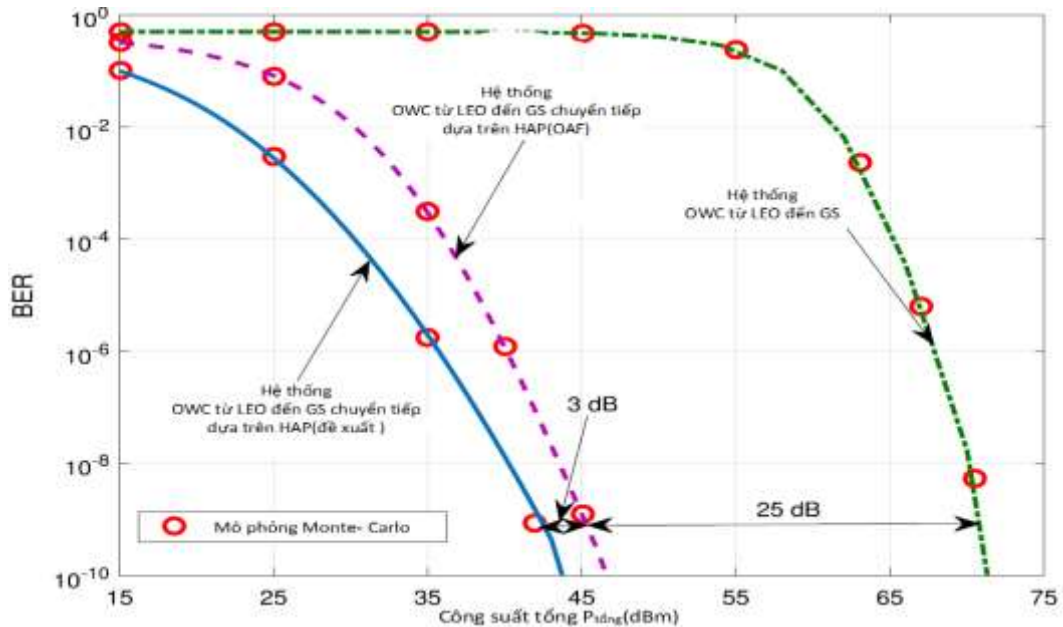
Bảng 3.2 Các tham số mô phỏng hệ thống truyền dẫn LEO- GS sử dụng chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP

Tham số	Kí hiệu	Giá trị
Kênh OWC		
Tốc độ gió	w	21m/s
Nhiều nền		
Vệ tinh- HAP	$\sigma_{b(P)}^2$	$4.435 \times 10^{-28} \text{ A}^2/\text{Hz}$
Vệ tinh- GS	$\sigma_{b(SG)}^2$	$7.7 \times 10^{-27} \text{ A}^2/\text{Hz}$
HAP- GS	$\sigma_{b(G)}^2$	$1.445 \times 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$
Hệ số suy hao	γ	0.4 km^{-1}

Bảng 3.2 Các tham số mô phỏng hệ thống truyền dẫn (tiếp)

Băng thông quang	B_0	125GHz
Vệ tinh LEO		
Bước sóng	λ	1550nm
Độ cao vệ tinh LEO	H_S	610km
Góc thiên đỉnh	ζ_S	50°
Hệ số khuếch đại thấu kính phát	G_{TX}^S	106dB
Tốc độ bit	B	10Gbps
Hạ tầng trên cao HAP		
Bước sóng	λ	1550nm
Độ cao HAP	H_P	20 km
Góc thiên đỉnh	ζ_P	50°
Hệ số khuếch đại thấu kính phát	G_{TX}^P	5dB
Hệ số khuếch đại thấu kính thu	G_{RX}^P	100dB
Tốc độ bit	B	10Gbps
GS		
Độ cao GS	h_0	1 m
Hệ số khuếch đại thấu kính thu	G_{RX}^G	10dB
Hệ số nhân quang thác	M_A	10
Đáp ứng	\mathcal{R}	0.8A/W
x (F(M)= M ^x)	x	0.8
Điện trở tải	R_L	50Ω

Trong hình 3.11, đã đưa ra các ưu điểm của hệ thống chuyển tiếp dựa trên ODAF so với hệ thống chuyển tiếp dựa trên OAF và hệ thống OWC LEO – mặt đất không dùng HAP.

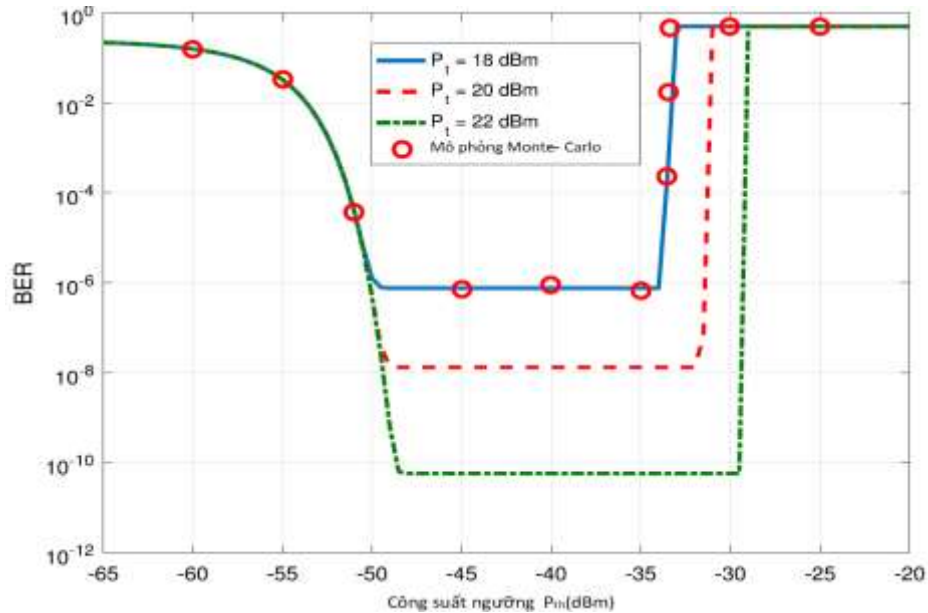


Hình 3.11 BER theo công suất phát của hệ thống OWC LEO – mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP so với hệ thống OWC LEO – mặt đất thông thường

Các ràng buộc để so sánh như sau:

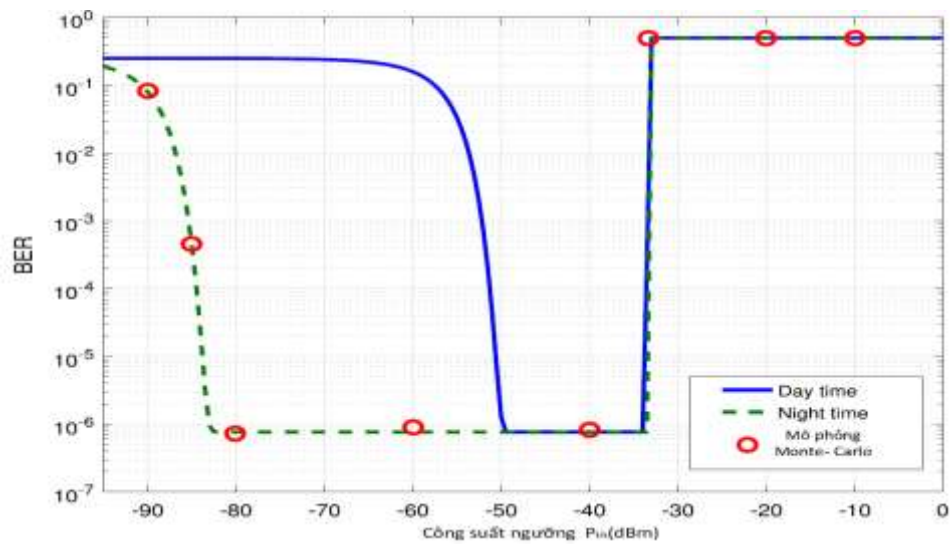
Trong hệ thống thông thường không sử dụng chuyển tiếp dựa trên HAP, công suất phát từ vệ tinh LEO đến GS được thiết lập cùng giá trị với công suất phát tổng P_{total} từ vệ tinh LEO và HAP trong hệ thống đề xuất và hệ thống chuyển tiếp dựa trên OAF. Hơn nữa, hệ số khuếch đại tổng của thấu kính là giống nhau với cả hai hệ thống chuyển tiếp. Do sự tích lũy nhiễu, để đạt được $BER = 10^{-9}$, P_{total} của hệ thống chuyển tiếp dựa trên HAP cần tăng 3 dB so với hệ thống đề xuất. Trong khi đó, mặc dù hệ số khuếch đại thấu kính của vệ tinh LEO và hệ số khuếch đại thấu kính thu RX tại GS tương ứng tăng đến 116 dB và 121 dB, công suất phát từ vệ tinh LEO đến GS trong hệ thống cần tăng gần 28 dB so với tổng công suất trong hệ thống đề xuất. Nhược điểm của hệ thống LEO đến mặt đất thông thường so với hệ thống chuyển tiếp dựa trên HAP được thấy rõ.

Hình 3.12 khảo sát hiệu năng BER theo công suất ngưỡng P_{th} của OHL với các giá trị khác nhau của P_t . Công suất phát từ vệ tinh LEO và HAP là 18 dBm, 20 dBm và 22 dBm. Ở giữa của hình vẽ này, tồn tại khoảng ngưỡng tối ưu của P_{th} nơi có tỉ lệ lỗi bit BER nhỏ nhất (BER sàn). Ví dụ, khi P_t bằng 20 dBm, công suất ngưỡng tối ưu P_{th} là -49 dBm đến -32 dBm. Khi P_t tăng, dải công suất ngưỡng tối ưu được mở rộng và BER sàn giảm. Điều này là do thực tế xác suất lỗi của đường truyền từ LEO- HAP quyết định độ lớn của khoảng tối ưu, mà xác suất lỗi có thể không thay đổi trong khi P_{th} và P_t tăng đồng thời với cùng tốc độ. Nói cách khác, BER sàn được điều khiển bởi xác suất lỗi của đường truyền từ HAP- mặt đất, xác suất chỉ phụ thuộc vào P_t và giảm khi P_t tăng.



Hình 3.12 BER theo công suất ngưỡng với các công suất phát khác nhau từ vệ tinh, HAP

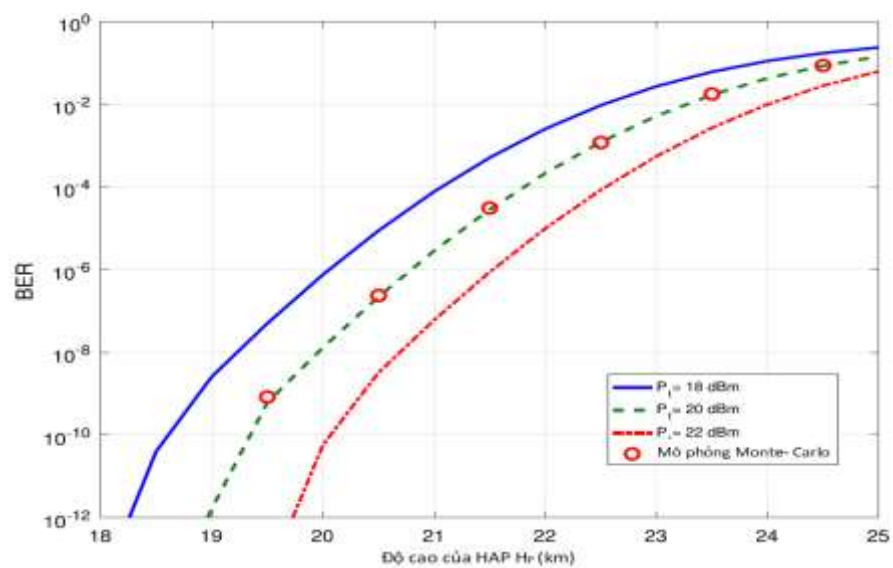
Trong hình 3.13, hiệu năng hệ thống đề xuất được khảo sát với tỉ lệ lỗi bit và công suất ngưỡng P_{th} với các giá trị mật độ phổ công suất nhiễu nền khác nhau trong thời gian cả ngày và đêm dựa trên các giá trị thực tế được đưa ra trong [45] với $P_t = 18$ dBm. $\sigma_{b(P)}^2$ là $4,435 \times 10^{-28} \text{ A}^2/\text{Hz}$ và $\sigma_{b(G)}^2$ là $1,445 \times 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$ vào ban ngày. Vào ban đêm, $\sigma_{b(P)}^2$ giảm xuống còn $1,024 \times 10^{-34} \text{ A}^2/\text{Hz}$ và $\sigma_{b(G)}^2$ chỉ còn $1,783 \times 10^{-33} \text{ A}^2/\text{Hz}$ do không có ánh sáng mặt trời.



Hình 3.13 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các giá trị mật độ phổ công suất nhiều nền khác nhau

Từ hình này có thể thấy rằng vùng tối ưu của P_{th} được mở rộng sang bên trái khi hệ thống đề xuất hoạt động vào ban đêm. Điều này có thể xảy ra do nhiều nền thấp hơn dẫn đến giảm $P_S - P(1|0)$, nó điều chỉnh đường cong xuống của đặc tính BER.

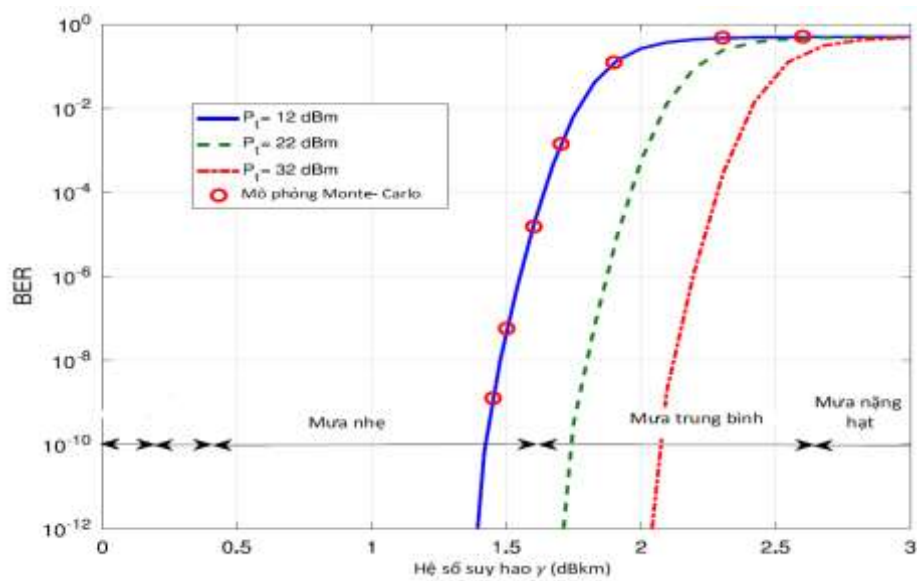
Hình 3.14 khảo sát hiệu năng BER là hàm của độ cao H_P của HAP với công suất phát $P_t = 18$ dBm, 20 dBm và 22 dBm.



Hình 3.14 BER theo độ cao H_P của HAP

Trong trường hợp công suất phát cố định, BER sẽ bị suy giảm khi H_P tăng. Ví dụ: tại $P_t = 20$ dBm, BER sẽ giảm từ 10^{-8} đến 10^{-4} khi H_P tăng gần 2 km. Dựa trên hình vẽ này, có thể xác định chiều cao tối đa của HAP để đạt được BER yêu cầu. Ví dụ: khi $P_t = 22$ dBm và $BER = 10^{-9}$, chiều cao tối đa của HAP phải là gần 20,5 km.

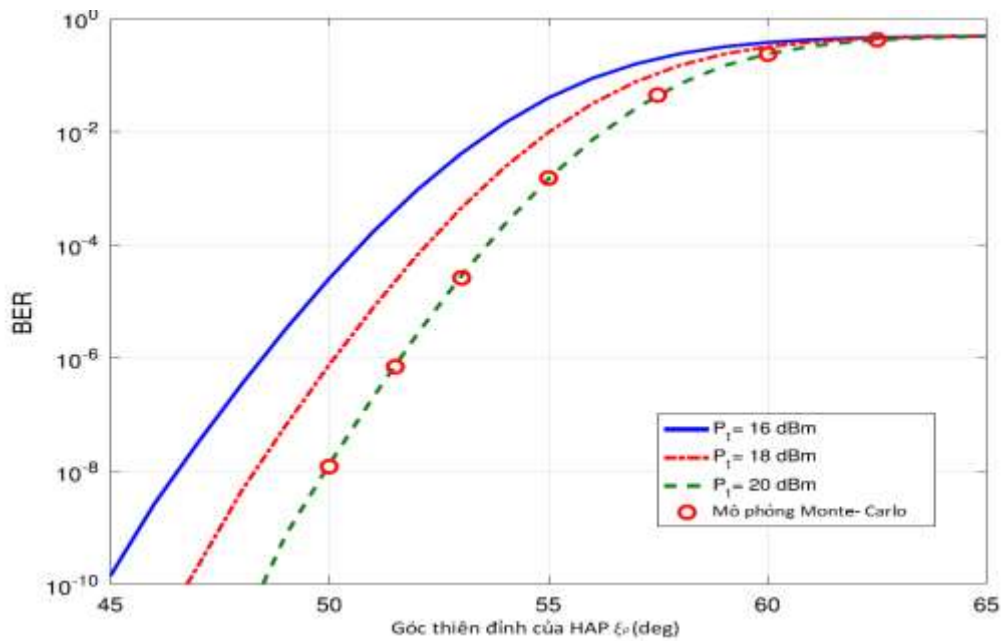
Hình 3.15 khảo sát sự thay đổi của hiệu năng BER với các hệ số suy hao khác nhau khi xem xét công suất phát P_t khác nhau.



Hình 3.15 BER theo các hệ số suy hao khác nhau.

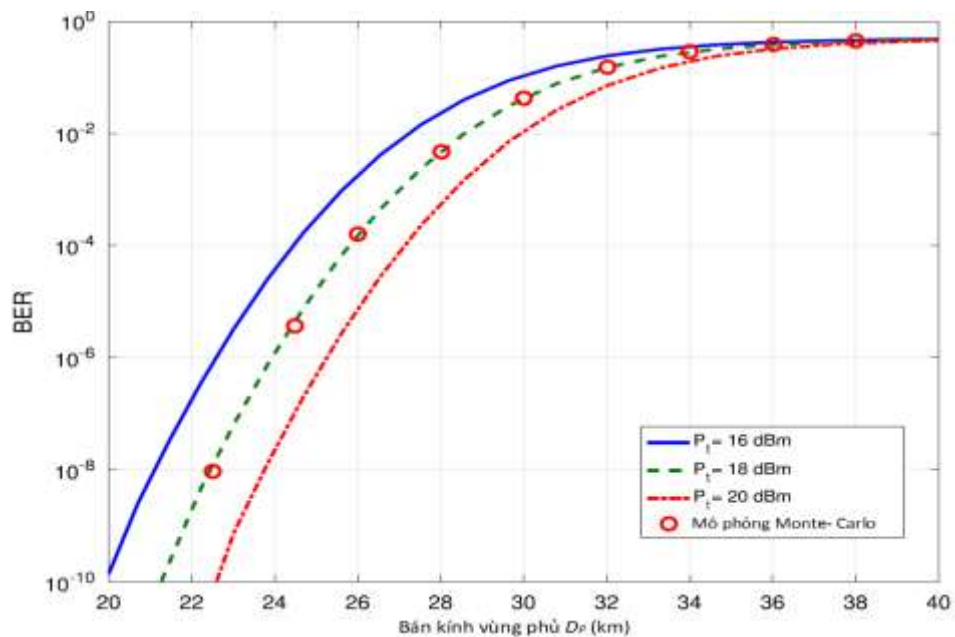
Hiệu năng của hệ thống đề xuất có thể bị ảnh hưởng bởi các điều kiện thời tiết khác nhau, được thể hiện thông qua các hệ số suy hao. Khi P_t bằng 12 dBm, hệ thống đề xuất có thể hoạt động tốt dưới điều kiện sương mù rất nhẹ hoặc điều kiện mưa nhẹ (hệ số suy hao từ 0,25 đến 1,54 dB/km). Tuy nhiên, hiệu năng BER của hệ thống giảm xuống dưới các điều kiện sương mù hoặc mưa trung bình khi hệ số suy hao suy từ 1,54 đến 2,68 dB/km. Rõ ràng, tăng P_t sẽ cải thiện hiệu năng BER để giúp hệ thống hoạt động trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt hơn.

Hình 3.16 khảo sát hiệu năng BER theo các góc thiên đỉnh ζ_P khác nhau khi P_t là 16 dBm, 18 dBm và 20 dBm. Tại BER và H_P xác định, góc thiên đỉnh của HAP có thể được mở rộng khi P_t tăng. Chẳng hạn, tại BER từ 10^{-9} , ζ_P tăng từ $45,68^\circ$ đến $49,11^\circ$ với P_t tăng từ 16 dBm đến 20 dBm.



Hình 3.16 BER theo các góc thiên đỉnh khác nhau

Hình 3.17 khảo sát hiệu năng BER theo bán kính vùng phủ (D_P), D_P được tính là $D_P = (H_P - h_0)\tan(\xi_P)$. GS có thể được đặt tại bất kỳ vị trí nào trong vùng phủ sóng trong khi vẫn duy trì BER nhỏ hơn mức ngưỡng cụ thể. Khi P_t tăng, bán kính vùng phủ D_P cũng tăng do đó dễ dàng hơn để tìm vị trí của GS để đạt được BER yêu cầu.



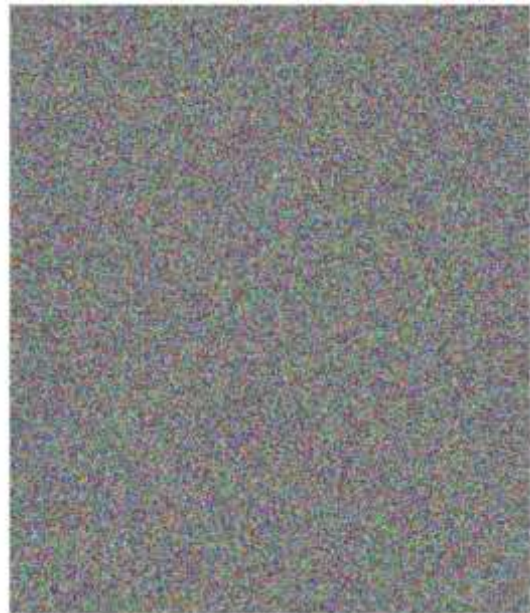
Hình 3.17 Hiệu năng BER theo bán kính vùng phủ (D_P).

Kết quả chất lượng hình ảnh

Luận án sử dụng hình ảnh của một vụ cháy rừng được vệ tinh Landsat 8 LEO của NASA chụp lại (hình 3.18 [103]) làm hình ảnh gốc để mô phỏng. Hình 3.19 - 3.22 có được bằng mô phỏng M-C với các tham số hệ thống thể hiện trong bảng 3.2. Hình 3.19 và 3.21 cho thấy hình ảnh khôi phục được truyền bởi hệ thống thông thường mà không cần chuyển tiếp trong khi hình 3.20 và 3.22 là hình ảnh được xây dựng lại trong hệ thống đề xuất. Sự cải thiện hiệu năng của hệ thống đề xuất so với hệ thống OWC LEO - mặt đất thông thường có thể được nhìn thấy rõ ràng trong những hình ảnh này.



Hình 3.18 Hình ảnh gốc để mô phỏng.

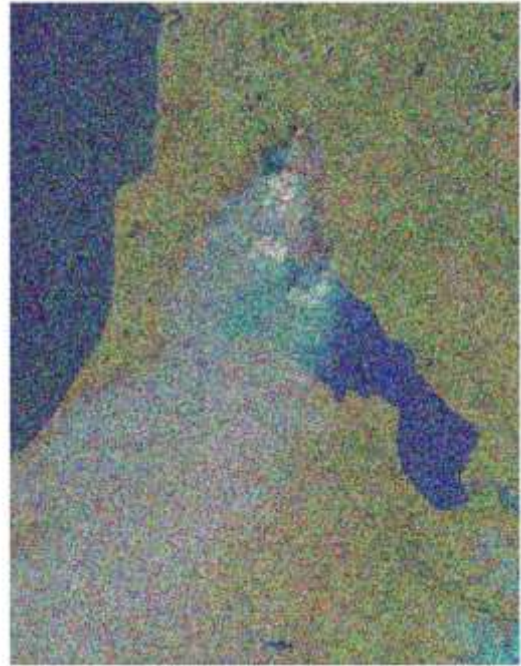


Hình 3.19 Hình ảnh khôi phục được truyền bởi hệ thống thông thường với công suất phát là 35 dBm.

Với tổng công suất phát là 35 dBm, hình ảnh nhận được tại GS (xem hình 3.19) trong hệ thống thông thường không thể nhìn thấy do BER cao 0,4970 làm cho hầu hết tất cả các pixel là lỗi. Ngược lại, hình ảnh được khôi phục trong hệ thống đề xuất thể hiện trong hình 3.20 vẫn có thể được nhận ra nhờ sử dụng chuyển tiếp toàn quang ODAF dựa trên HAP.



Hình 3.20 Hình ảnh được xây dựng lại trong hệ thống đề xuất với công suất phát là 35 dBm.



Hình 3.21 Hình ảnh được khôi phục với hệ thống thông thường khi công suất phát tăng lên đến 55 dBm.



Hình 3.22 Hình ảnh được xây dựng lại trong hệ thống đề xuất khi công suất phát tăng lên đến 55 dBm.

Trong hệ thống thông thường, khi công suất phát tăng lên đến 55 dBm, chất lượng hình ảnh được khôi phục như trong hình 3.21 có cải thiện một chút, tuy nhiên, vẫn rất khó nhìn thấy các đối tượng trong hình ảnh này. Trong hệ thống đề xuất, hình ảnh được khôi phục lại không có lỗi, hình ảnh với chất lượng cao có thể thu được như trong hình 3.22.

3.4. Kết luận chương 3

Nội dung chương 3 đã trình bày các đóng góp của luận án trong việc đề xuất hệ thống truyền thông OWC chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP. Mô hình đầu tiên đề xuất trong chương là mạng truyền dẫn quang đa chặng dựa trên HAP chuyển tiếp toàn quang và tách sóng Coherent. Chuyển tiếp toàn quang giúp đơn giản kiến trúc, giảm công suất tiêu thụ của HAP, máy thu Coherent giúp tăng độ nhạy của máy thu. Ngoài ra, việc sử dụng chuyển tiếp đa chặng dựa trên HAP giúp tăng được khoảng cách truyền dẫn. Mô hình thứ hai là hệ thống OWC LEO đến mặt đất chuyển tiếp dựa trên HAP. Chương 3 cũng đã khảo sát hiệu năng BER theo các thông số hệ thống khác nhau bao gồm: công suất ngưỡng của các OHL, hệ số suy hao, góc thiên đỉnh và khoảng cách truyền dẫn. Tính khả thi của hệ thống đề xuất đã được chứng minh qua các kết quả BER thấp và tốc độ dữ liệu cao (lên đến 10 Gb/s). Các giải pháp toàn quang này được ứng dụng trong trường hợp yêu cầu tốc độ xử lý cao, tuy nhiên chi phí sẽ cao hơn so với xử lý trong miền điện.

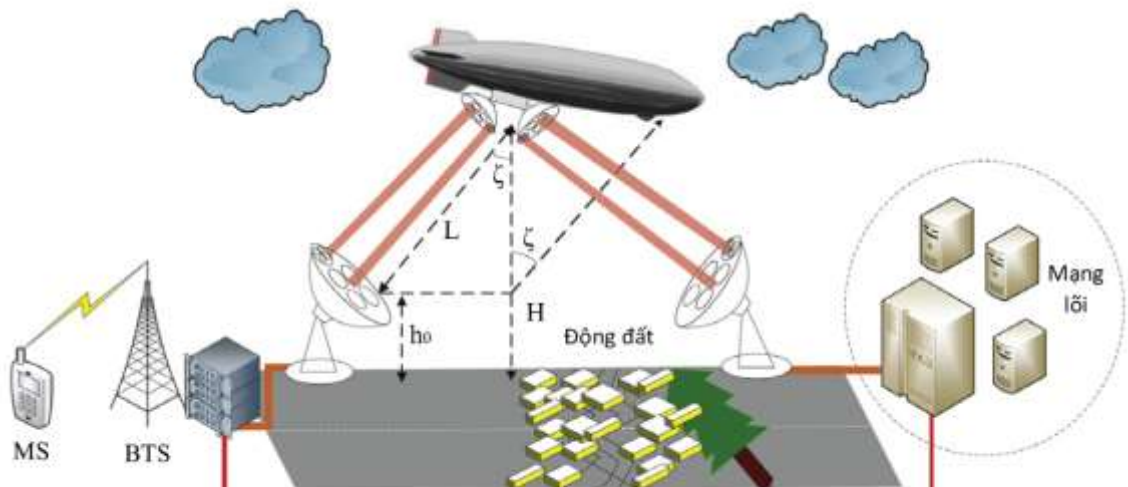
CHƯƠNG 4: CHUYỂN TIẾP TOÀN QUANG SONG HƯỚNG DỰA TRÊN HAP CHO HỆ THỐNG OWC

Tóm tắt: Nội dung chương trình bày về hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP. Đề xuất mô hình thiết kế của hệ thống OWC chuyển tiếp toàn quang song hướng với kiến trúc gồm HAP và hai GS dựa trên kỹ thuật chuyển tiếp ORF. Xây dựng mô hình giải tích và biểu thức dạng tường minh cho BER của hệ thống đề xuất trên kênh nhiễu loạn khí quyển được mô hình hóa bởi phân bố Gamma Gamma. Từ đó, đánh giá hiệu năng BER với các thông số hệ thống khác nhau bao gồm công suất ngưỡng của OHL, hệ số suy hao, góc thiên đỉnh và khoảng cách giữa các GS. Kết quả nghiên cứu chương 4 đã được công bố trong 01 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế ISI [J3].

4.1. Đặt vấn đề

Thông thường, sợi quang được sử dụng cho các mạng backhaul băng thông rộng [39], cung cấp các kết nối tốc độ dữ liệu cao giữa các trạm thu phát BTS và mạng lõi (CN) của các mạng di động thế hệ tiếp theo. Tuy nhiên, nếu xảy ra các thảm họa như động đất, lũ lụt, sợi quang có thể bị đứt và thông tin liên lạc sẽ bị gián đoạn. Việc hàn nối, sửa chữa các sợi bị hỏng khi có nhiều vật cản từ các tòa nhà bị sập, cây cối, v.v ... sẽ rất khó khăn và mất thời gian. Do đó, để đối phó với những tình huống khó khăn này và kế thừa những lợi thế của chuyển tiếp ORF, luận án đề xuất mạng quang không dây OWC chuyển tiếp song hướng toàn quang băng thông rộng dựa trên HAP cho mạng lưới backhaul, nơi hai GS nằm gần trạm gốc BTS và CN đóng vai trò trong việc truyền tín hiệu từ BTS đến CN thông qua HAP và ngược lại. Mô hình của OWC chuyển tiếp song hướng cho truyền dẫn băng rộng dựa trên HAP như trong hình 4.1.

Việc sử dụng chuyển tiếp đơn hướng không thể đáp ứng nhu cầu trao đổi dữ liệu như trong các mạng truyền thông. Nhược điểm của chuyển tiếp đơn hướng đã được phân tích trong [20]. Chuyển tiếp song hướng có thể sử dụng thông lượng và phổ một cách hiệu quả đã được xem xét trong [108,109].



Hình 4.1 Hệ thống OWC chuyển tiếp song hướng cho truyền dẫn băng rộng dựa trên HAP.

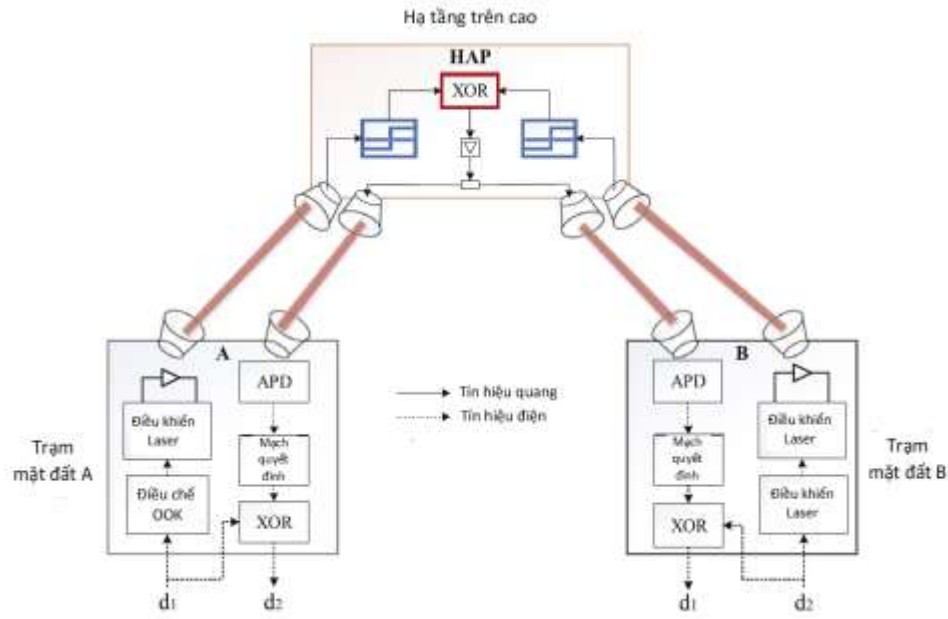
Dữ liệu được trao đổi giữa hai GS được chuyển tiếp qua HAP có vai trò như một nút chuyển tiếp toàn quang. Tại HAP sử dụng bộ giới hạn cứng quang và bộ khuếch đại quang. Ngoài ra, tại HAP còn áp dụng sơ đồ mã hóa mạng bằng cách sử dụng cổng XOR quang và một cổng XOR điện ở mỗi GS để thực hiện truyền dẫn song hướng.

Trong nghiên cứu [94], đã thực hiện chuyển tiếp song hướng dựa trên các cổng XOR toàn quang cho hệ thống OWC mặt đất. Tuy nhiên trong đó, nút chuyển tiếp được đặt tại mặt đất. Do đó, mô hình kênh được sử dụng trong [94] không áp dụng được với hệ thống OWC dựa trên HAP. Ngoài ra, trong [94] cũng chưa tính đến ảnh hưởng lớp vật lý như nhiễu máy thu. Do đó, luận án đề xuất hệ thống song hướng dựa trên HAP, khảo sát hiệu năng BER có tính đến nhiễu loạn khí quyển và nhiễu của máy thu.

4.2. Hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP

4.2.1. Mô hình hệ thống

Sơ đồ khối của hệ thống đề xuất bao gồm hai GS (trạm A và trạm B) và trạm chuyển tiếp được đặt trên HAP như trong hình 4.2.



Hình 4.2 Sơ đồ khối của hệ thống

Để đơn giản, luận án coi HAP là nút chuyển tiếp. Để tái tạo tín hiệu chuyển tiếp song hướng trong miền quang, luận án sử dụng hai bộ hạn chế quang OHL tại nút chuyển tiếp. Trong pha đầu tiên, tại nút A, dữ liệu đầu vào (d_1) được điều chế cường độ với sóng mang quang bằng cách sử dụng điều chế OOK. Laser diode sẽ phát xung quang với công suất trung bình $P_t^{(A)}$ đến HAP thông qua đường lên OWC nếu d_1 là bit “1”. Mặt khác, không có ánh sáng nào được phát đi nếu d_1 là bit 0. Đồng thời, một quá trình tương tự được thực hiện với dữ liệu đầu vào (d_2) tại nút B, có công suất phát trung bình là $P_t^{(B)}$. Tại HAP, dữ liệu thu được d_1 và d_2 được đưa tới hai bộ OHL tương ứng để quyết định xem bit nhận được là “1” hay “0”. Các tín hiệu từ đầu ra của hai bộ OHL sẽ được đưa đến cổng XOR quang để tạo tín hiệu d , được xác định theo công thức:

$$d = d_1 \oplus d_2, \quad (4.1)$$

trong đó \oplus là phép toán XOR. Sau đó d được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại quang và phát lại cho nút A và nút B thông qua đường xuống OWC với công suất phát từ HAP là $P_t^{(P)}$.

Trong pha thứ hai, tại mỗi GS (nút A hoặc B), một photodiode quang thác APD được sử dụng để chuyển đổi tín hiệu quang nhận được từ HAP thành tín hiệu điện. Mạch quyết định dựa trên tách sóng ngưỡng, được sử dụng để quyết định bit nhận được là “1” hay “0”. Cụ thể, nếu dòng quang điện nhỏ hơn mức ngưỡng, mạch quyết định sẽ quyết định về bit “0”. Ngược lại, bit “1” sẽ được tách. Sau đó, tín hiệu điện từ đầu ra của mạch quyết định được đưa vào cổng XOR điện thực hiện phép tính XOR với tín hiệu được phát đi từ nút này trong pha đầu tiên để khôi phục tín hiệu được phát từ nút còn lại. Cụ thể hơn, nút A (hoặc B) thực hiện lấy d_2 (hoặc d_1) từ d sử dụng dữ liệu d_1 (hoặc d_2) như sau:

Nút A:

$$d_1 \oplus d = d_1 \oplus (d_1 \oplus d_2) = (d_1 \oplus d_1) \oplus d_2 = d_2, \quad (4.2)$$

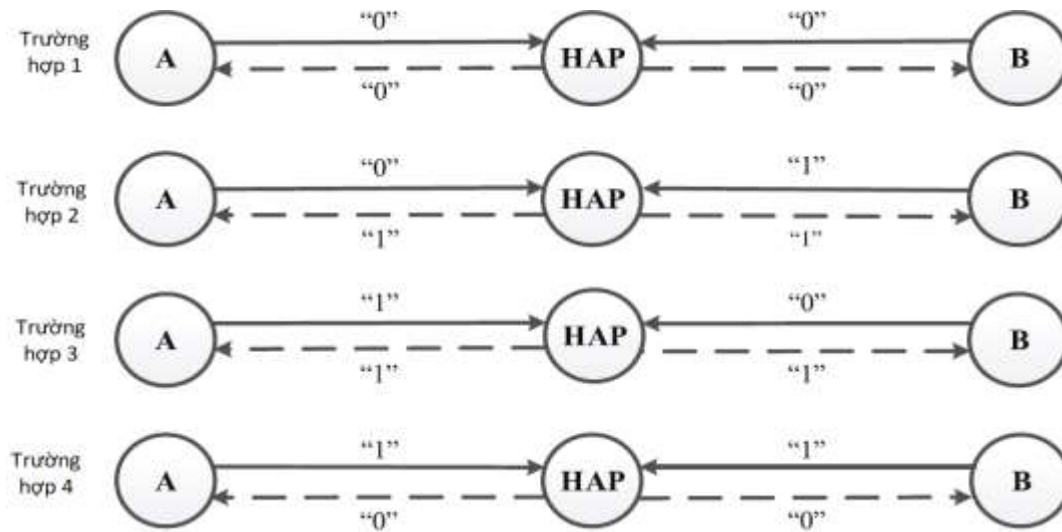
Nút B:

$$d_2 \oplus d = d_2 \oplus (d_2 \oplus d_1) = (d_2 \oplus d_2) \oplus d_1 = d_1, \quad (4.3)$$

Tuy nhiên, trong một đường truyền OWC, không chỉ có tín hiệu mong muốn từ máy phát mà còn có phát xạ nền không mong muốn (hoặc nhiễu nền), có nguồn gốc từ ánh sáng mặt trời chiếu trực tiếp, tán xạ, phát xạ. Điều này làm giảm chất lượng tín hiệu. Nhiễu nền được mô hình hóa là nhiễu Gauss cộng với trị trung bình bằng 0 và phương sai $\sigma_b^2 = \frac{N_b}{2}$ trong đó $N_b = \frac{P_b}{B_0}$ là mật độ phổ công suất phát xạ nền, P_b là công suất ánh sáng nền trung bình thu được ở cả HAP và GS và B_0 là băng thông quang. N_b có giá trị $2,89 \times 10^{-25}$ W / Hz tại bước sóng 1550 nm [81]. Thành phần nhiễu cũng có thể được tạo ra từ OHL và cổng XOR quang. Tuy nhiên, các thành phần nhiễu này có thể được bỏ qua khi OHL và cổng XOR quang có tỷ lệ phân biệt cao. Ngoài ra, ánh sáng nền là thành phần nhiễu chính trong các hệ thống OWC [90], do đó ảnh hưởng của nhiễu bộ khuếch đại được bỏ qua trong nghiên cứu này.

4.2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

Trong tuyến OWC đường lên, OHL tại HAP có thể quyết định sai giữa bit “1” và bit “0”, do ảnh hưởng của nhiễu nên do đó xảy ra lỗi. Tương tự, tại các GS (nút A và nút B), tác động của nhiễu nỏ APD và nhiễu nhiệt đến tín hiệu thu được có thể gây ra lỗi khi tín hiệu đi qua mạch quyết định để xác định bit “1” hoặc bit “0”. Tất cả các trường hợp có thể xảy ra trong khi trao đổi dữ liệu nhị phân giữa nút A và nút B được hiển thị trong hình 4.3 và giải thích như sau:



Hình 4.3 Bốn trường hợp xảy ra khi phát 2 bit từ 2 GS

Trường hợp 1: Bit “0” được phát đến HAP bởi cả hai GS (tức là, nút A và nút B) trong pha đầu tiên. Trong giai đoạn thứ hai, HAP phát quang bá bit “0” đã được tính toán bởi bộ XOR, quay lại cả hai GS.

Trường hợp 2 và 3: HAP nhận được bit “1”, từ một nút (A hoặc B) và bit “0” từ nút còn lại. Tiếp theo, bit “1” nhận được sau khi thực hiện XOR và HAP phát quang bá bit “1” cho nút A và nút B.

Trường hợp 4: Cả nút A và nút B phát bit “1” cho HAP. Sau khi đã thực hiện phép tính XOR. Bit “0” được HAP phát quang bá lại cho cả hai nút.

Để làm rõ ảnh hưởng của từng đường truyền OWC, luận án sẽ phân tích xác suất lỗi đối với đường lên OWC từ mặt đất đến HAP và sau đó cho đường xuống OWC từ HAP đến mặt đất riêng biệt như sau:

a. Đường lên từ mặt đất đến HAP

Đường truyền OWC được sử dụng để truyền dữ liệu từ nút A và nút B đến HAP. Xác suất lỗi của đường lên OWC chỉ phụ thuộc vào mức ngưỡng P_{th} của OHL. Giả sử rằng hệ thống đề xuất là đối xứng, tức là, cùng một công suất phát trung bình được ký hiệu là $P_t^{(X)} = P_t^{(A)} = P_t^{(B)}$ được truyền từ mỗi GS.

Xác suất có điều kiện $P_{X-P}(a/b)$ là xác suất của sự kiện mà nút X (tức là nút A hoặc nút B) phát bit “b” và HAP nhận bit “a” với $a, b \in \{0, 1\}$, được tính như sau:

$$P_{X-P}(0|1) = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_{h_a}(h_a) \operatorname{erfc} \left(\frac{P_t^{(X)} h_a h_l - P_{th}}{\sqrt{2\sigma_b^2}} \right) dh_a \quad (4.4)$$

$$P_{X-P}(1|0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{2\sigma_b^2}} \right) \quad (4.5)$$

trong đó P_{th} là công suất ngưỡng của OHL, σ_b^2 là phương sai của nhiễu nền và $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ là hàm bù lỗi.

$P_{X-P}(0/1)$ được biểu diễn bằng biểu thức dạng tường minh như sau [57]:

$$P_{X-P}(0/1) \approx \frac{1}{2} (M_1 + M_2) \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Với } M_1 \approx & \frac{e^{-\frac{(P_{th})^2}{2\sigma_b^2}} \times 2^{\alpha+\beta-3}}{3\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{1}{\kappa!} \left(\frac{4P_t^{(X)} P_{th} h_l}{\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^\kappa \\ & \times G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{8(P_t^{(X)} h_l)^2}{(\alpha\beta)^2 \sigma_b^2} \middle| \frac{1-\kappa-\alpha}{2}, \frac{2-\kappa-\alpha}{2}, \frac{1-\kappa-\beta}{2}, \frac{2-\kappa-\beta}{2} \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$M_2 \approx \frac{e^{-\frac{2(P_{th})^2}{3\sigma_b^2}} \times 2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{t=0}^{\infty} \frac{1}{t!} \left(\frac{16P_t^{(X)}P_{th}h_l}{3\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^t \times G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{32(P_t^{(X)}h_l)^2}{3(\alpha\beta)^2\sigma_b^2} \left| \begin{matrix} 1-t-\alpha, 2-t-\alpha, 1-t-\beta, 2-t-\beta \\ 2, 2, 2, 2 \\ 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (4.8)$$

b. Đường xuống từ HAP đến GS

Không giống như cách tính xác suất lỗi đối với đường lên từ trạm mặt đất đến HAP, với đường xuống OWC từ HAP đến GS, chúng ta cần xem xét không chỉ có nhiễu nền mà còn có nhiễu n_o APD và nhiễu nhiệt được tạo ra từ bộ thu. Hơn nữa, mức ngưỡng của mạch quyết định cũng ảnh hưởng đến việc quyết định bit “1” hoặc bit “0” trong miền điện.

Dòng điện ở đầu ra của APD được xác định theo công thức sau:

$$I_1 = M_A \mathfrak{R} P_t^{(P)} h_l h_a + n_1 \quad (4.9)$$

$$I_0 = n_0 \quad (4.10)$$

trong đó I_1 và I_0 là dòng quang điện tương ứng với bit “1” và bit “0”, dòng nhiễu tương ứng là n_1 và n_0 , $P_t^{(P)}$ là công suất phát từ HAP đến GS.

Các thành phần nhiễu của máy thu được mô hình hóa như nhiễu Gauss với giá trị trung bình bằng 0 bao gồm nhiễu n_o và nhiễu nhiệt. Tuy nhiên, nhiễu n_o được gây ra bởi cả tín hiệu mong muốn và bức xạ nền, chiếm ưu thế hơn nhiễu nhiệt vì vượt quá nhiễu tạo ra bên trong APD. Phương sai nhiễu σ_1^2 (của n_1) và σ_0^2 (của n_0) được biểu diễn tương ứng như sau:

$$\sigma_1^2 = 2qM_A^{2+x} \mathfrak{R} (P_t^{(P)} h_a h_l + P_b) \Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} \Delta f \quad (4.11)$$

$$\sigma_0^2 = 2qM_A^{2+x} \mathfrak{R} P_b \Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} \Delta f \quad (4.12)$$

trong đó q là điện tích của electron, M_A là hệ số nhân của APD, \mathfrak{R} là đáp ứng của APD, k_B là hằng số Boltzmann, T là nhiệt độ tuyệt đối, và R_L là điện trở tải. Δf là băng thông điện và giả sử rằng $\Delta f = B$, trong đó B là tốc độ bit của hệ thống. Bằng cách đặt mức ngưỡng tối ưu của mạch quyết định $I_D = \frac{\sigma_1 \mu_1 + \sigma_0 \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$ với $\mu_1 = M_A \mathfrak{R} P_t^{(P)} h_a h_l$ và $\mu_0 = 0$ là trị trung bình của I_1 và I_0 xác suất lỗi có điều kiện của đường xuống OWC P_{P-X} được tối thiểu hóa và được xác định như sau [57]:

$$P_{P-X} = P_{P-X}(0/1) = P_{P-X}(1/0) = \frac{1}{2} \int_0^\infty f_{h_a}(h_a) \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) dh_a \quad (4.13)$$

trong đó $P_{P-X}(a/b)$ là xác suất có điều kiện của sự kiện HAP phát bit “b” và nút X(A hoặc B) nhận bit “a” với $a, b \in \{0, 1\}$ và $Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$, γ là tỉ số SNR điện tức thời, bằng bình phương của Q và được biểu thị bằng:

$$\gamma = \frac{(\mu_1 - \mu_0)^2}{(\sigma_1 + \sigma_0)^2} = \frac{\mu_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_0^2 + 2\sigma_1\sigma_0} \quad (4.14)$$

Các thành phần bình phương, được tạo ra bởi thành phần thứ ba trong mẫu số ở công thức (4.14), rất phức tạp để đánh giá xác suất lỗi của đường xuống OWC. Do đó, các giới hạn dưới γ_1 và giới hạn trên γ_2 của γ được dùng để làm các ràng buộc để phân tích BER, $\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2$, trong đó $\gamma_1 = \frac{\mu_1^2}{3\sigma_1^2 + \sigma_0^2}$ và $\gamma_2 = \frac{\mu_1^2}{\sigma_1^2 + 3\sigma_0^2}$.

Xác suất lỗi của đường xuống OWC được giới hạn như sau:

$$P_{P-X}(\gamma_1) \leq P_{P-X} \leq P_{P-X}(\gamma_2) \quad (4.15)$$

Do đó, thay thế công thức (4.11) và công thức (4.12) vào công thức (4.14) ta được kết quả như sau:

$$\gamma_1 = \frac{A_1(h_a)^2}{B_1 h_a + C_1} = \frac{(M_A \mathfrak{R} P_t^{(P)} h_l)^2 (h_a)^2}{6q M_A^{2+x} \mathfrak{R} P_t^{(P)} h_l \Delta f h_a + 8q \mathfrak{R} P_b \Delta f + \frac{16k_B T}{R_L} \Delta f} \quad (4.16)$$

$$\gamma_2 = \frac{A_2(h_a)^2}{B_2 h_a + C_2} = \frac{(M_A \Re P_t^{(P)} h_l)^2 (h_a)^2}{2qM_A^{2+x} \Re h_l \Delta f h_a + 8q \Re P_b \Delta f + \frac{16k_B T}{R_L} \Delta f} \quad (4.17)$$

Với công thức (4.16) và (4.17) có dạng chung là:

$$\gamma_v = \frac{A_v (h_a)^2}{B_v h_a + C_v} \quad (4.18)$$

Với $v \in \{1, 2\}$

Trong chương 3 luận án đã xây dựng biểu thức dạng tường minh cho P_{P-X} trong trường hợp các hệ thống OWC chuyển tiếp đơn hướng toàn quang [67]. Theo một cách tiếp cận tương tự [111], biểu thức dạng tường minh cho P_{P-X} được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} P_{P-X}(\gamma_v) \approx & \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\beta-1-m}{2}, \frac{n+\beta+1+m}{2} \right) \right. \\ & + \frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_n \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\alpha-1-m}{2}, \frac{n+\alpha+1+m}{2} \right) \\ & + \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+2+m}{2} \right) \\ & + \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+2+m}{2} \right) \\ & + \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+m}{2} \right) \\ & \left. + \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{1}{2}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+m}{2} \right) \right] \\ & + \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\beta-1-m}{2}, \frac{n+\beta+1+m}{2} \right) \right. \\ & + \frac{B_v}{2A_v} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\alpha-1-m}{2}, \frac{n+\alpha+1+m}{2} \right) \\ & + \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+2+m}{2} \right) \\ & + \frac{B_v^2}{4A_v \sqrt{A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+2+m}{2} \right) \\ & + \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\alpha, \beta) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\beta-2-m}{2}, \frac{n+\beta+m}{2} \right) \\ & \left. + \frac{C_v}{\sqrt{4A_v C_v}} \psi_v(\beta, \alpha) \Xi_v \left(\frac{2}{3}, -\frac{n+\alpha-2-m}{2}, \frac{n+\alpha+m}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.19)$$

ở đây

$$\begin{aligned} & \psi_v(\alpha, \beta) \\ &= a_n(\alpha, \beta) \frac{1}{2(A_v)^{n+\beta+1}} \binom{n+\beta-1}{m} B h_v^m (4A_v C_v)^{\frac{n+\beta-1-m}{2}} \end{aligned} \quad (4.20)$$

và

$$a_n(\alpha, \beta) \triangleq \frac{\pi(\alpha\beta)^{n+\beta}}{\sin[\pi(\alpha-\beta)]\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\Gamma(n-\alpha+\beta+1)n!} \quad (4.21)$$

và

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_v(p, v, q) = & \frac{\pi^2}{p^q \Gamma(v) \sin[\pi(q-v)]} \left[\left(\frac{p}{z}\right)^v \frac{L_{-v}^{v-q}\left(\frac{p}{z}\right)}{\sin(\pi v)\Gamma(1-q)} \right. \\ & \left. - \left(\frac{p}{z}\right)^q \frac{L_{-q}^{q-v}\left(\frac{p}{z}\right)}{\sin(\pi q)\Gamma(1-v)} \right] \end{aligned} \quad (4.22)$$

Với $L_v^q(p)$ là hàm Laguerre với $v \neq \pm 1, \pm 2, \dots$ và $\text{Re } q > 0, \text{Re } p > 0, \text{Re } z > 0$ và $z = \frac{B_v^2}{4A_v C_v}$

c. BER đầu cuối- đầu cuối

Phần này trình bày một phương pháp để tính toán lỗi bit đầu cuối- đầu cuối (BER_{e2e}) được xác định tại nút A hoặc nút B. Giả sử rằng hệ thống song hướng, BER_{e2e} tại nút A và nút B được xác định theo cách tương tự và xác suất lỗi của mỗi hướng truyền là như nhau.

Đầu tiên, giả sử rằng P_c là xác suất mà d_1 được phát tại nút A và d_1 được nhận chính xác tại B.

Do đó, P_c xác định như sau:

$$\begin{aligned}
P_c &= P_{00}P_{A-P}(0|0)P_{B-P}(0|0)P_{P-B}(0|0) \\
&+ P_{01}P_{A-P}(0|0)P_{B-P}(1|1)P_{P-B}(1|1) \\
&+ P_{10}P_{A-P}(1|1)P_{B-P}(0|0)P_{P-B}(1|1) \\
&+ P_{11}P_{A-P}(1|1)P_{B-P}(1|1)P_{P-B}(0|0) \\
&= P_{00}[1 - P_{A-P}(1|0)][1 - P_{B-P}(1|0)] \\
&\times [1 - P_{P-B}(1|0)] \\
&+ P_{01}[1 - P_{A-P}(1|0)][1 - P_{B-P}(0|1)] \\
&\times [1 - P_{P-B}(0|1)] \\
&+ P_{10}[1 - P_{A-P}(0|1)][1 - P_{B-P}(1|0)] \\
&\times [1 - P_{P-B}(0|1)] \\
&+ P_{11}[1 - P_{A-P}(0|1)][1 - P_{B-P}(0|1)] \\
&\times [1 - P_{P-B}(1|0)]
\end{aligned} \tag{4.23}$$

ở đây P_{ab} là xác suất mà d_1 là bit “a” và d_2 là bit “b” với $a, b \in \{0, 1\}$.

Để đơn giản, xác suất phát bit “1” và “0” của mỗi trạm mặt đất là bằng nhau.

Vì thế, P xác định như sau:

$$P_{00} = P_{01} = P_{10} = P_{11} = \frac{1}{4} \tag{4.24}$$

Do đó, công thức (4.23) được viết lại thành:

$$\begin{aligned}
P_C &= \frac{1}{4}[1 - P_{X-P}(1|0)]^2[1 - P_{P-X}] \\
&+ \frac{1}{4}[1 - P_{X-P}(1|0)][1 - P_{X-P}(0|1)][1 - P_{P-X}] \\
&+ \frac{1}{4}[1 - P_{X-P}(0|1)][1 - P_{X-P}(1|0)][1 - P_{P-X}] \\
&+ \frac{1}{4}[1 - P_{X-P}(0|1)]^2[1 - P_{P-X}]
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Dựa vào công thức (4.15) và công thức (4.25) BER đầu cuối- đầu cuối bằng $(1 - P_C)$ được tính như sau:

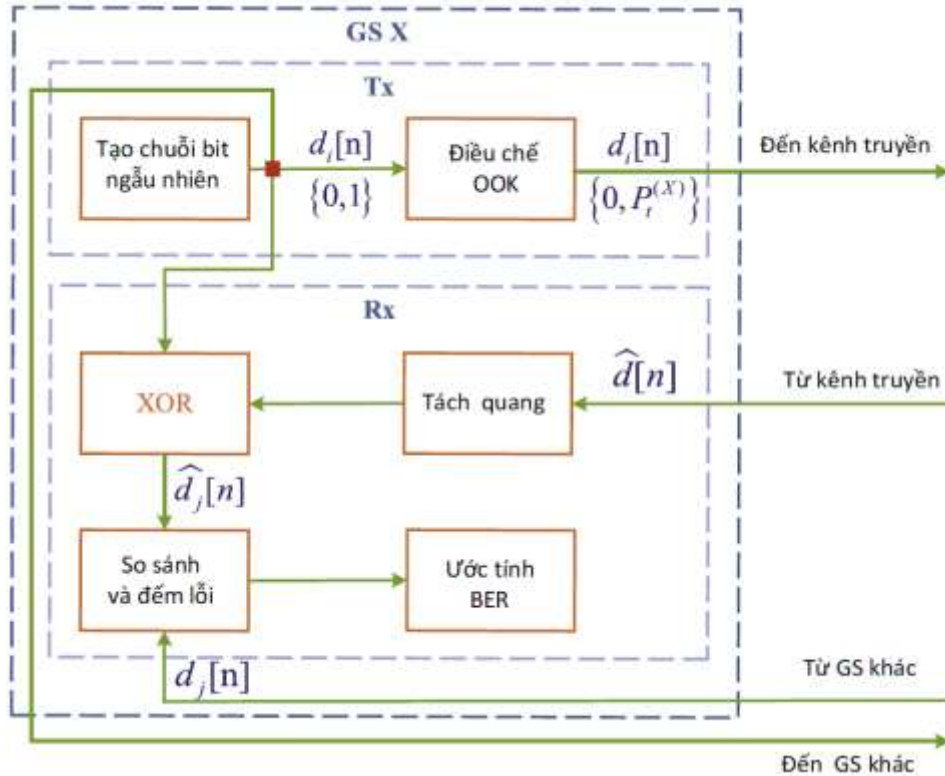
$$\begin{aligned}
\text{BER}_{e2e} \leq 1 - & \left[\frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(1/0)]^2 [1 - P_{X-P}(\gamma_1)] \right. \\
& + \frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(1/0)] [1 - P_{X-P}(0/1)] [1 - P_{P-X}(\gamma_1)] \\
& + \frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(0/1)] [1 - P_{X-P}(1/0)] [1 - P_{P-X}(\gamma_1)] \\
& \left. + \frac{1}{4} [1 - P_{X-P}(0/1)]^2 [1 - P_{P-X}(\gamma_1)] \right] \quad (4.26)
\end{aligned}$$

Công thức dạng tường minh cho BER đầu cuối- đầu cuối có thể dựa trên công thức dạng tường minh của $P_{X-P}(\cdot)$ và $P_{P-X}(\cdot)$ như công thức (4.27):

$$\begin{aligned}
\text{BER}_{e2e} \approx & 1 - \frac{1}{4} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{2\sigma_b^2}} \right) \right]^2 [1 - P_{P-X}(\gamma)] \\
& - \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{P_{th}}{\sqrt{2\sigma_b^2}} \right) \right] \\
& \times \left[1 - \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{(P_{th})^2}{2\sigma_b^2}} \times 2^{\alpha+\beta-3}}{3\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{1}{\kappa!} \left(\frac{4P_t^{(X)} P_{th} h_l}{\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^\kappa \right. \\
& \times G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{8(P_t^{(X)} h_l)^2}{(\alpha\beta)^2 \sigma_b^2} \left| \begin{matrix} 1-\kappa-\alpha, 2-\kappa-\alpha, 1-\kappa-\beta, 2-\kappa-\beta \\ 2, 2, 2, 2 \\ 0 \end{matrix} \right. \right] \\
& - \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{(P_{th})^2}{3\sigma_b^2}} \times 2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \left(\frac{16P_t^{(X)} P_{th} h_l}{3\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^i \\
& \times G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{32(P_t^{(X)} h_l)^2}{3(\alpha\beta)^2 \sigma_b^2} \left| \begin{matrix} 1-i-\alpha, 2-i-\alpha, 1-i-\beta, 2-i-\beta \\ 2, 2, 2, 2 \\ 0 \end{matrix} \right. \right] \\
& \times [1 - P_{P-X}(\gamma)] - \frac{1}{4} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{(P_{th})^2}{2\sigma_b^2}} \times 2^{\alpha+\beta-3}}{3\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{1}{\kappa!} \left(\frac{4P_t^{(X)} P_{th} h_l}{\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^\kappa \right. \\
& \times G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{8(P_t^{(X)} h_l)^2}{(\alpha\beta)^2 \sigma_b^2} \left| \begin{matrix} 1-\kappa-\alpha, 2-\kappa-\alpha, 1-\kappa-\beta, 2-\kappa-\beta \\ 2, 2, 2, 2 \\ 0 \end{matrix} \right. \right] \\
& - \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{(P_{th})^2}{3\sigma_b^2}} \times 2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \left(\frac{16P_t^{(X)} P_{th} h_l}{3\alpha\beta\sigma_b^2} \right)^i \\
& \times G_{4,1}^{1,4} \left[\frac{32(P_t^{(X)} h_l)^2}{3(\alpha\beta)^2 \sigma_b^2} \left| \begin{matrix} 1-i-\alpha, 2-i-\alpha, 1-i-\beta, 2-i-\beta \\ 2, 2, 2, 2 \\ 0 \end{matrix} \right. \right] \\
& \left. \times [1 - P_{P-X}(\gamma)]. \quad (4.27)
\end{aligned}$$

4.2.3. Mô hình mô phỏng hệ thống

Trong phần này, hình 4.4- 4.6 minh họa sơ đồ khối mô hình mô phỏng Monte Carlo (M-C).



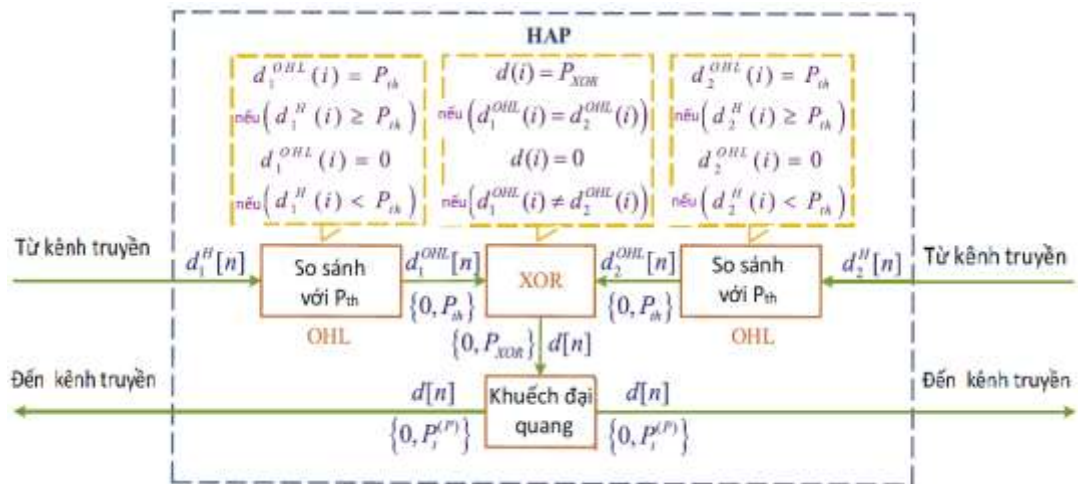
Hình 4.4 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho GS.

Quá trình mô phỏng M-C cũng được cung cấp chi tiết trong hình 4.4 minh họa mô hình mô phỏng của GS X ($X \in \{A, B\}$). Trong pha đầu tiên, một chuỗi bit ngẫu nhiên $d_i[n]$ ($i = 1$ hoặc 2) được tạo bởi bộ tạo chuỗi bit ngẫu nhiên. Sau đó, nó được điều chế bằng cách sử dụng bộ điều chế OOK để tạo thành tập hợp các giá trị $P_t^{(X)}$ và 0 tương ứng cho bit “1” cho bit “0”. Tiếp theo, $d_i[n]$ sẽ được phát tới HAP thông qua kênh truyền OWC.



Hình 4.5 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho kênh OWC

Mô hình mô phỏng M-C cho kênh OWC được minh họa trong hình 4.5. Tín hiệu phát từ một GS ($d_i[n]$) hoặc HAP ($d[n]$) được ghép với suy hao đường truyền và hệ số nhiễu loạn khí quyển tương ứng do khối *Thiết lập Điều kiện thời tiết* và khối *Tạo Biến ngẫu nhiên* theo phân bố Gamma-Gamma tạo ra. Sau đó, nhiễu nền được tạo từ khối *Tạo Biến ngẫu nhiên Gauss* được cộng thêm vào.



Hình 4.6 Mô hình mô phỏng Monte-Carlo cho HAP.

Hình 4.6 mô tả mô hình mô phỏng M-C cho HAP. Khi dữ liệu từ nút A và nút B được thu tại HAP (tức là, $d_1^H[n]$ và $d_2^H[n]$), chúng được so sánh với công suất

ngưỡng P_t của OHL để quyết định $d_1^{\text{OHL}}[n]$ và $d_2^{\text{OHL}}[n]$. Tại cổng XOR quang, $d_1^{\text{OHL}}[n]$ và $d_2^{\text{OHL}}[n]$ sẽ được XOR để tạo thành $d[n]$, trong đó k_{th} của $d[n]$, tức là $d(k)$ có giá trị là P_{XOR} nếu $d_1^{\text{OHL}}[k]$ bằng với $d_2^{\text{OHL}}[k]$ ngược lại bằng 0. Tiếp theo, $d[n]$ được khuếch đại bởi bộ khuếch đại quang trước khi được phát lại cho Nút A và Nút B với công suất phát của $P_t^{(P)}$ trong pha thứ hai.

Cuối cùng, tại mỗi GS, tín hiệu thu được từ HAP $\hat{d}[n]$ được tách để quyết định bit “1” hoặc bit “0” nhờ bộ tách sóng và b sau đó được XOR với dữ liệu mà GS đã phát trong pha đầu tiên pha ($d_i[n]$) để khôi phục dữ liệu đã được phát từ GS khác ($d_j[n]$ với $j = 2$ hoặc 1). Dữ liệu được khôi phục $\hat{d}_j[n]$ được so sánh vào dữ liệu gốc $d_j[n]$ để tìm các bit lỗi và BER được ước tính bằng cách chia số bit lỗi cho tổng số bit được phát đi.

4.2.4. Kết quả khảo sát hiệu năng hệ thống

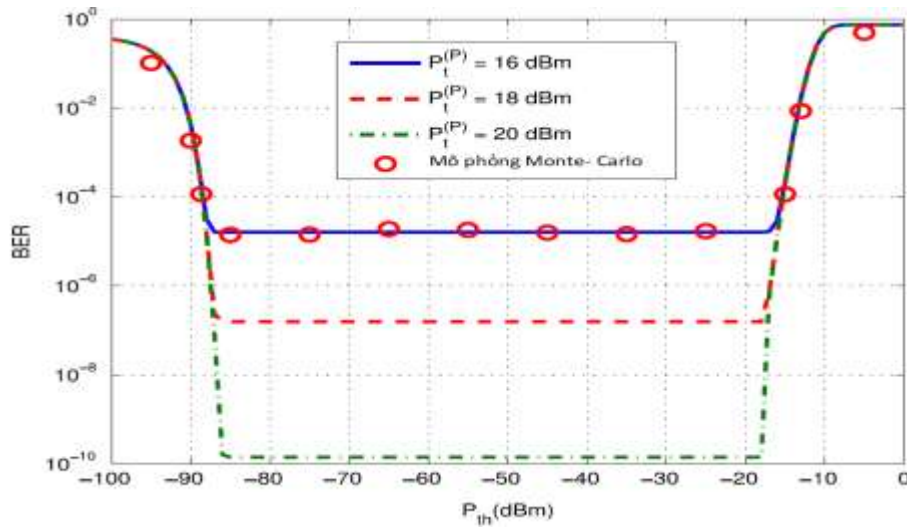
Trong phần này, luận án trình bày các kết quả số từ các biểu thức dạng tường minh của BER từ đầu cuối đến đầu cuối theo công thức (4.19) và công thức (4.27) với các tham số hệ thống trong bảng 4.1.

Bảng 4.1 Các thông số và hằng số hệ thống

Tham số	Kí hiệu	Giá trị
Tốc độ gió	w	21m/s
Độ cao HAP	H	20km
Bước sóng	λ	1550nm
Góc thiên đỉnh	ξ	$\pi/6$
Độ cao GS	h_o	1m
Hệ số suy hao	γ	0.4km^{-1}
Tốc độ bit	B	10Gbps
Đáp ứng	\mathfrak{R}	0.8A/W
x ($F(M)= M^x$)	x	0.8
Điện trở tải	R_L	50 Ω
Nhiệt độ	T	298K

Những kết quả này cho phép luận án khảo sát hiệu năng BER của hệ thống đề xuất so với công suất ngưỡng của OHL, hệ số suy hao, góc thiên đỉnh và khoảng cách giữa hai GS L_{A-B} . Kết quả này cũng được chứng minh bằng cách sử dụng mô phỏng M-C.

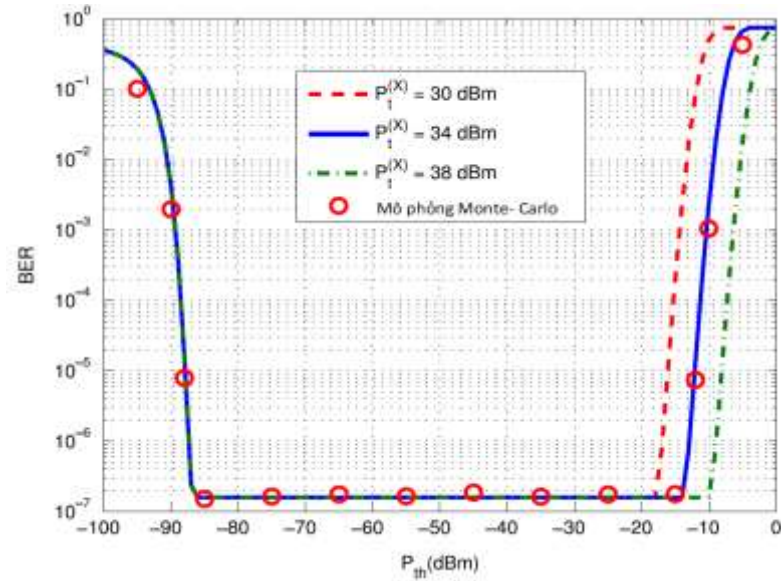
Trong hình 4.7, hiệu năng BER được khảo sát theo công suất ngưỡng với $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W và $P_t^{(X)} = 30$ dBm.



Hình 4.7 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các giá trị khác nhau của công suất phát từ HAP và $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t^{(X)} = 30$ dBm.

Các giá trị của công suất phát từ HAP là 16 dBm, 18 dBm và 20 dBm. Sự tồn tại của các vùng tối ưu của công suất ngưỡng P_{th} khi BER có giá trị tối thiểu, có thể được nhận ra dễ dàng cho các công suất khác nhau. Ví dụ: khi $P_t^{(P)} = 20$ dBm, ngưỡng công suất tối ưu có thể là một trong những giá trị trong khoảng từ -86 dBm đến -18 dBm. Nếu chúng ta giảm $P_t^{(P)}$, hiệu năng BER mức ngưỡng tối ưu sẽ giảm, tuy nhiên, các đường cong xuống và đường cong lên của BER với $P_t^{(P)}$ khác nhau bị chồng lên nhau. Hiện tượng này xảy ra vì sự tăng của $P_t^{(P)}$ chỉ ảnh hưởng đến xác suất lỗi của các đường xuống và không có ảnh hưởng đến xác suất lỗi của đường lên dẫn đến BER sàn và bị chi phối bởi P_{th} tại HAP.

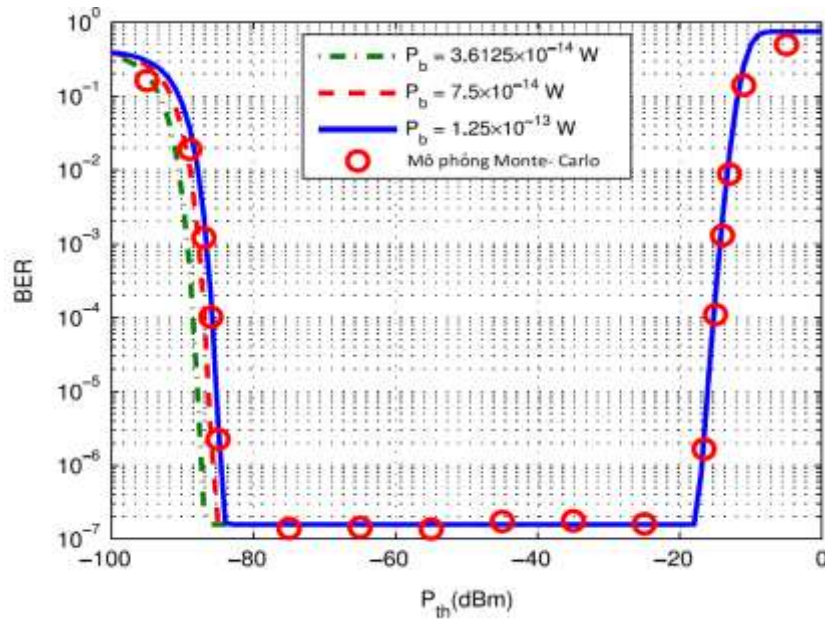
Tiếp theo, hình 4.8 mô tả hiệu năng BER theo công suất ngưỡng P_{th} với $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W và $P_t^{(P)} = 18$ dBm. Các công suất phát từ trạm X (A hoặc B) lần lượt là 30 dBm, 34 dBm và 38 dBm. Nếu $P_t^{(X)} = 34$ dBm, vùng tối ưu của công suất ngưỡng từ -86 dBm đến -14 dBm.



Hình 4.8 BER theo công suất ngưỡng P_{th} với các công suất phát khác nhau từ GS và $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t^{(P)} = 18$ dBm.

Trong trường hợp P_{th} có giá trị thấp sự chiếm ưu thế của $P_{X-P}(1/0)$ so với $P_{X-P}(0/1)$ được biểu thị bằng đường cong BER phía trái đi xuống. Mặt khác, đường cong BER phía bên phải đi lên là do sự chiếm ưu thế của $P_{X-P}(0/1)$ so với $P_{X-P}(1/0)$, được điều chỉnh bởi $P_t^{(X)}$. Do đó, có thể thấy rõ sự mở rộng của vùng tối ưu sang bên phải khi $P_t^{(X)}$ được tăng lên.

Hình 4.9 mô tả hiệu năng BER so với công suất ngưỡng P_{th} với $P_t^{(P)} = 18$ dBm và $P_t^{(X)} = 30$ dBm. P_b lần lượt là $3,6125 \times 10^{-14}$ W, $7,5 \times 10^{-14}$ W và $1,25 \times 10^{-13}$ W.



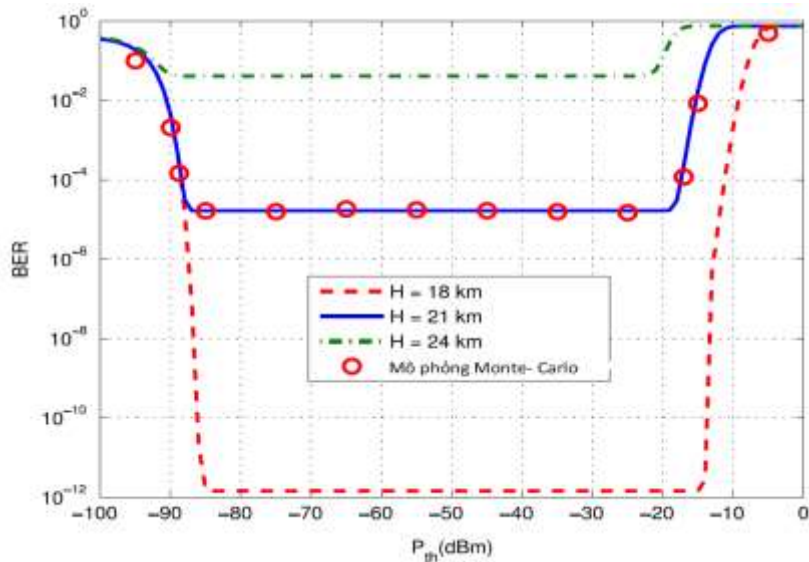
Hình 4.9 Hiệu năng BER theo công suất ngưỡng P_{th} với $P_t^{(P)} = 18 \text{ dBm}$ và $P_t^{(X)} = 30 \text{ dBm}$.

Khoảng tối ưu của P_{th} là từ -84 dBm đến -18 dBm khi $P_b = 7.5 \times 10^{-14} \text{ W}$. Khoảng tối ưu của công suất ngưỡng sẽ bị thu hẹp nếu P_b tăng vì bit “0” có thể bị phát hiện nhầm thành bit “1” dưới ảnh hưởng của nhiễu nền. Do đó, khi tăng P_b , chúng ta cần tăng P_{th} của OHL.

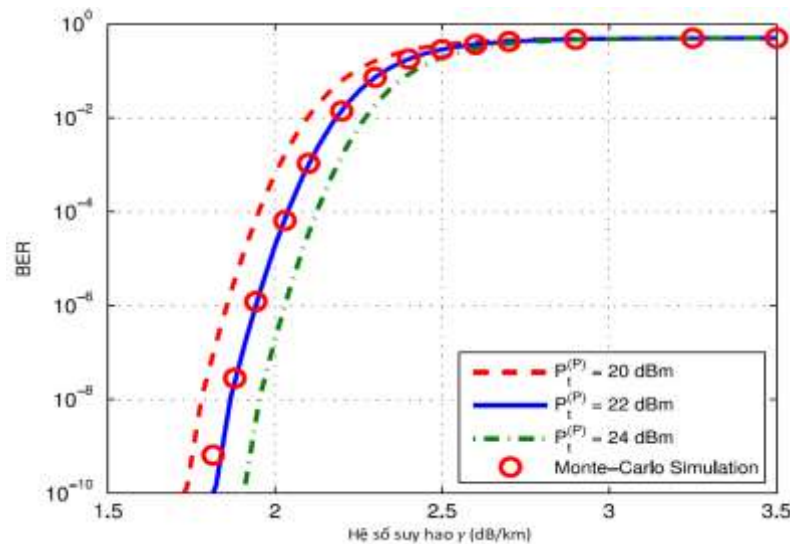
Hình 4.10 cho thấy một biểu đồ hiệu năng BER theo công suất ngưỡng với các độ cao khác nhau của HAP. Các tham số khác là $P_b = 3.6125 \times 10^{-14} \text{ W}$, $P_t^{(P)} = 18 \text{ dBm}$ và $P_t^{(X)} = 30 \text{ dBm}$. Đầu tiên, tại độ cao thấp, ví dụ: $H = 18 \text{ km}$, tín hiệu quang không bị ảnh hưởng quá nhiều bởi suy hao đường truyền và nhiễu loạn khí quyển do đó hệ thống có mức BER thấp. Nếu chúng ta tăng độ cao của HAP, công suất thu được tại HAP và các GS sẽ giảm. Do đó, xác suất lỗi mà bit “1” được phát tại một nút và bit “0” thu được tại nút còn lại sẽ tăng. Kết quả là, không chỉ BER sần tăng mà khoảng tối ưu của P_{th} còn nhỏ lại.

Điều đáng chú ý là công suất ngưỡng P_{th} chi phối bởi xác suất lỗi của đường lên từ mặt đất đến HAP (P_{X-P}). Do đó, trong khoảng tối ưu của P_{th} , xác suất lỗi của đường lên từ mặt đất đến HAP (P_{X-P}) là tối thiểu và BER bị chi phối bởi xác suất

lỗi của đường xuống HAP - mặt đất (P_{P-X}). Do P_{X-P} là độc lập với P_{th} BER là hằng số trong một phạm vi rộng của P_{th} . Độ rộng của BER sản phụ thuộc vào giá trị của công suất phát từ GS và công suất nhiễu nền như trong hình 4.7 và 4.9 trong khi mức của nó được điều khiển bởi công suất phát từ HAP và độ cao của HAP như chỉ ra tương ứng trong hình 4.8 và 4.11.



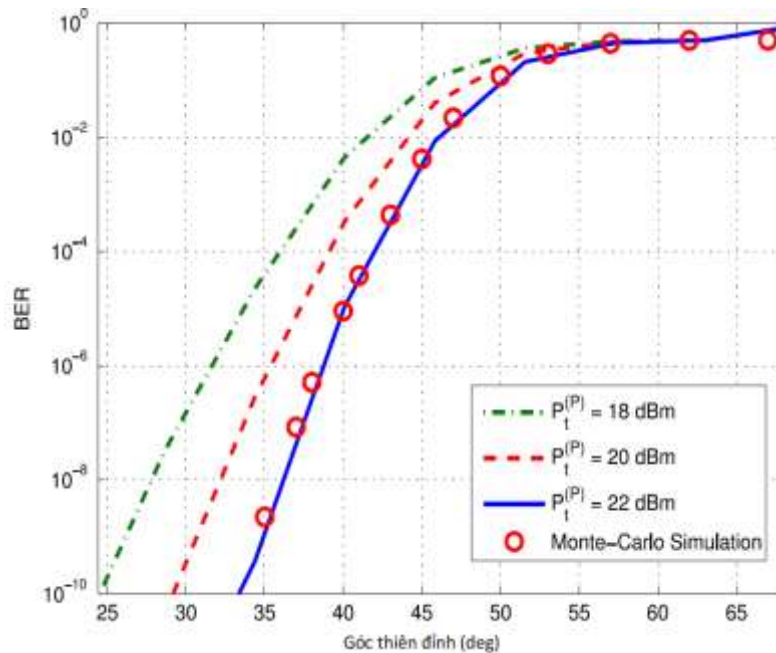
Hình 4.10 Hiệu năng BER theo công suất ngưỡng với các độ cao khác nhau của HAP



Hình 4.11 BER theo hệ số suy hao γ cho các công suất phát từ HAP khác nhau;

$P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W và $P_t(X) = 30$ dBm.

Trong hình 4.11, khảo sát sự phụ thuộc của BER vào hệ số suy hao γ với các điều kiện nhiễu loạn khác nhau. Hình 4.12 đưa ra mối quan hệ giữa hiệu năng BER với góc thiên đỉnh ζ cho các giá trị khác nhau của công suất phát từ HAP với $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W, $P_t^{(X)} = 30$ dBm. Hình vẽ chỉ ra rằng BER sẽ bị suy giảm khi góc thiên đỉnh tăng. Điều này là do khoảng cách truyền dẫn tăng khi ta cố định độ cao của HAP và tăng góc thiên đỉnh. Sự giảm dần của $P_t^{(P)}$ cũng ảnh hưởng đến hiệu năng BER. Ví dụ, tại $\zeta = 40^\circ$, BER khoảng 10^{-5} với $P_t^{(P)} = 22$ dBm nhưng BER chỉ khoảng $10^{-3,5}$ với $P_t^{(P)} = 20$ dBm.

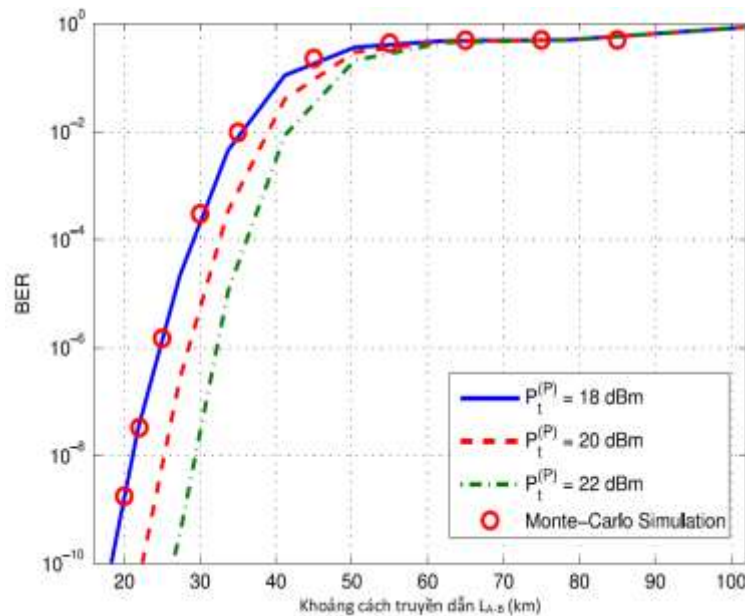


Hình 4.12 BER theo góc thiên đỉnh ζ với các giá trị khác nhau của công suất phát từ HAP và $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t^{(X)} = 30$ dBm.

Công suất phát từ HAP $P_t^{(P)}$ được đặt bằng 20 dBm, 22 dBm và 24 dBm trong khi $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W và $P_t^{(X)} = 30$ dBm. Phạm vi của hệ số suy hao tương ứng với các điều kiện khí quyển khác nhau từ trời trong đến sương mù nhẹ (tức là 3,5dB/km). Hình vẽ cho thấy, để đảm bảo BER thấp hơn 10^{-3} , hệ số suy hao tối đa phải nhỏ hơn 2,2dB/km, tương ứng với điều kiện mưa ít. Để khắc phục các điều kiện khí quyển như sương mù dày với hệ số suy hao là

75 dB/km, công suất phát từ HAP và GS cần phải tăng để bù lại phần công suất suy hao.

Cuối cùng, hình 4.13 mô tả sự thay đổi của hiệu năng BER theo khoảng cách giữa nút A và nút B (được biểu thị là $L_{A-B} = 2(H - h_0) \tan(\xi)$).



Hình 4.13 BER theo khoảng cách trực tiếp L_{A-B} với công suất phát từ HAP khác nhau; $P_{th} = -55$ dBm, $P_b = 3,6125 \times 10^{-14}$ W; $P_t^{(X)} = 30$ dBm.

Khi $P_t^{(P)}$ tăng, khoảng cách truyền tương ứng với một giá trị BER cụ thể tăng. Ví dụ: tại BER của 10^{-6} , nếu $P_t^{(P)}$ tăng 2 dBm (từ 18 dBm đến 20 dBm) quãng đường truyền sẽ được tăng lên khoảng 3,76 km (từ 24,75 km đến 28,51 km).

4.3. Kết luận chương 4

Nội dung chương 4 đã trình bày các đóng góp của luận án trong việc đề xuất hệ thống truyền thông OWC chuyển tiếp song hướng sử dụng mã hóa mạng cho mạng backhaul băng rộng dựa trên HAP. So với các nghiên cứu trước đây chỉ là các hệ thống OWC trên mặt đất, tách sóng trực tiếp và chỉ xét đơn giản nhiễu loạn khí quyển chưa tính đến nhiễu tại máy thu. Với đề xuất của luận án đã giúp đơn giản hóa cấu trúc của trạm HAP, tiết kiệm được điện năng tiêu thụ cho HAP và cũng đã xét được toàn bộ các ảnh hưởng của đường truyền cũng như nhiễu tại máy thu. Tuy

nhiên so với chuyển tiếp điện thì giải pháp chuyển tiếp quang sẽ có chi phí cao. Trong chương cũng xây dựng biểu thức tính BER đầu cuối – đầu cuối cho kết nối từ hai GS đến HAP qua kênh nhiễu loạn Gamma-Gamma. Tính khả thi của hệ thống đề xuất đã được chứng minh qua các kết quả BER thấp và tốc độ dữ liệu cao (lên đến 10 Gb/s). Khảo sát hiệu năng BER theo các thông số hệ thống khác nhau bao gồm: công suất ngưỡng của các OHL, hệ số suy hao, góc thiên đỉnh và khoảng cách truyền dẫn. Các kết quả tính toán số và kết quả mô phỏng này đã cung cấp các thông tin hữu ích cho việc thiết kế hệ thống như việc lựa chọn dải tối ưu của công suất ngưỡng, độ cao của HAP, góc thiên đỉnh và khoảng cách trực tiếp giữa hai nút GS.

KẾT LUẬN

Nội dung luận án đã đạt được mục tiêu đề ra là nghiên cứu giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp tín hiệu quang dựa trên hạ tầng trên cao HAP. Toàn bộ các kiến thức nền tảng và các kết quả nghiên cứu đã được trình bày chi tiết trong luận án với bố cục gồm bốn chương như sau: Chương 1 trình bày tổng quan về vấn đề nghiên cứu, Chương 2 hệ thống truyền dẫn quang dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O, Chương 3 trình bày giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP, Chương 4 đề xuất giải pháp truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP. Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành ba nhóm như sau:

1. Đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng truyền dẫn quang dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O

Luận án đề xuất sử dụng kết hợp kỹ thuật chuyển tiếp điện với phân tập không gian, điều chế PPM, và tách sóng coherent để cải thiện hiệu năng hệ thống. Các nghiên cứu trước đây thường chỉ nghiên cứu hiệu năng của các hệ thống OWC chuyển tiếp dựa trên HAP sử dụng điều chế OOK, điều chế cường độ tách sóng trực tiếp IM/DD nên cho hiệu năng thấp hơn. Việc kết hợp đồng thời nhiều giải pháp đem lại mức độ cải thiện hiệu năng tốt hơn, phát huy được ưu điểm đồng thời khắc phục được các hạn chế của mỗi kỹ thuật khi được sử dụng riêng rẽ.

2. Đề xuất mô hình thiết kế và xây dựng mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP.

Để cải thiện hiệu năng của hệ thống truyền dẫn quang dựa trên HAP việc thực hiện chuyển tiếp toàn quang tại HAP mang lại nhiều lợi ích: nâng cao tốc độ truyền dẫn và xử lý tín hiệu, giảm độ phức tạp và công suất tiêu thụ tại HAP. Luận án đã đề xuất hai hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP.

Thứ nhất là hệ thống truyền dẫn quang đa chặng dựa trên nhiều HAP chuyển tiếp toàn quang và tách sóng coherent. Chuyển tiếp toàn quang dựa trên thiết bị tách

quang- khuếch đại- và chuyển tiếp ODAF giúp đơn giản hóa kiến trúc của HAP. Ngoài ra máy thu tách sóng kết hợp giúp cải thiện độ nhạy của hệ thống. Truyền dẫn đa chặng giúp tăng khoảng cách truyền dẫn giữa hai trạm mặt đất.

Thứ hai là hệ thống truyền dẫn vệ tinh- mặt đất với HAP chuyển tiếp toàn quang. Luận án đã đề xuất được giải pháp chuyển tiếp toàn quang dựa trên HAP để cải thiện hiệu năng hệ thống OWC từ vệ tinh LEO đến mặt đất. Xây dựng được mô hình giải tích cho BER đầu cuối – đầu cuối của hệ thống dưới ảnh hưởng của nhiễu loạn khí quyển và nhiễu tại máy thu. Ngoài ra còn thực hiện kiểm chứng các kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng Monte- Carlo. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu năng BER của hệ thống đề xuất được cải thiện nhiều so với hệ thống vệ tinh LEO-mặt đất thông thường không có chuyển tiếp. Hình ảnh truyền từ vệ tinh LEO về trạm mặt đất cũng có chất lượng hình ảnh tốt với mô hình hệ thống đề xuất trong luận án.

3. Đề xuất mô hình thiết kế và xây dựng mô hình giải tích đánh giá hiệu năng hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang đơn hướng dựa trên HAP.

Khác với các nghiên cứu trước đây về HAP chỉ là hệ thống đơn hướng, luận án đã đề xuất được hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang song hướng dựa trên HAP. Luận án đã đề xuất:

Mô hình kiến trúc và cơ chế chuyển tiếp toàn quang song hướng tại HAP sử dụng bộ giới hạn cứng quang và cổng XOR quang. Các cổng XOR điện tại trạm GS khôi phục tín hiệu thu mong muốn.

Xây dựng biểu thức dạng tường minh cho BER của hệ thống đề xuất trên kênh nhiễu loạn được mô hình hóa bởi phân bố Gamma- Gamma. Các kết quả nghiên cứu lý thuyết cũng được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte- Carlo. Tính khả thi của hệ thống đã được chứng minh qua các kết quả về hiệu năng BER đạt được.

Đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng truyền dẫn quang dựa trên HAP với chuyển tiếp O/E/O ở đề xuất 1 được sử dụng trong các trường hợp chỉ cần tốc độ xử lý hạn chế và có thể sử dụng các phần tử xử lý tín hiệu điện sẵn có với chi phí thấp. Trong khi đó, các đề xuất thiết kế hệ thống truyền dẫn và chuyển tiếp toàn quang đơn hướng, song hướng dựa trên HAP ở đề xuất 2 và 3 có thể ứng dụng trong các trường hợp yêu cầu tốc độ xử lý cao tuy nhiên sẽ có chi phí và độ phức tạp cao hơn.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án sẽ tập trung vào giải pháp truyền dẫn tín hiệu quang không dây dựa trên các thiết bị bay tầm thấp LAP, là các máy bay không người lái hoặc khinh khí cầu nằm trong tầng đối lưu. Cũng giống như HAP, LAP kết hợp được các ưu điểm của truyền thông vệ tinh và truyền thông mặt đất tuy nhiên LAP lại dễ triển khai hơn HAP. Nghiên cứu các giải pháp nâng cao hiệu năng của mạng truyền thông quang không dây sử dụng thiết bị bay này để giảm ảnh hưởng của thảm họa ở những khu vực bị cô lập.

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

BÀI BÁO KHOA HỌC

- [J1] "Performance Enhancement of HAP-based Relaying M-PPM FSO System using Spatial Diversity and Heterodyne Detection Receiver" *Journal of Optical Communications*, vol. 42, no.1, pp. 111-120, 2021.
- [J2] "Performance Enhancement of LEO-to-Ground FSO Systems using All-optical HAP-based Relaying," *Physical Communication*, vol. 31, pp. 218-229, Dec. 2018.
- [J3] "All-Optical Two-Way Relaying Free-Space Optical Communications for HAP-based Broadband Backhaul Networks," *Optics Communications*, vol. 410, pp. 277-286, Mar. 2018.

HỘI NGHỊ KHOA HỌC

- [C1] "HAP-based FSO System using All-Optical Detect-Amplify-and-Forward Relaying and Coherent Detection Receiver" In the Proc. of the fourth IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2017), Hanoi, Vietnam, Nov. 2017, pp. 144-149.
- [C2] "HAP-based Multi-hop FSO Systems Using All-Optical Relaying and Coherent Receiver" In the Proc. of the sixth IEEE/NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS 2019), Hanoi, Vietnam, Dec. 2019.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Thị Thu Hiền, Nghiên cứu giải pháp thiết kế và đánh giá hiệu năng mã kênh cho hệ thống thông tin HAP, luận án TS 2019
- [2] Nguyễn Văn Tuấn, Nguyễn Ngọc Dương, Phan Vĩnh Vương – Nâng cao chất lượng tuyến thông tin quang không dây trong điều kiện khí hậu Việt Nam, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, Số 5 (54), trang 78, 2012.
- [3] Phạm Đình Chung, Nghiên cứu các công nghệ vô tuyến thế hệ mới và khả năng ứng dụng tại Việt Nam, Đề tài NCKH Bộ Thông tin – Truyền thông, Mã số 64-11-KHKT-RD, 2011.
- [4] Phạm Thị Thúy Hiền, Nghiên cứu giải pháp cải thiện hiệu năng hệ thống truyền thông quang không dây, luận án TS 2015
- [5] A. Ghasemi, A. Abedi, and F. Ghasemi, Propagation Engineering in Wireless Communications. Springer, 2012.
- [6] Agrawal GP, Fiber optic communication system, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [7] Akbar H, Iskandar. BER performance analysis of APD-based FSO system for optical inter-HAPS link. in the Proc. of 2015 1st International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Manado, 2015:1–5.
- [8] Akbar H, Iskandar. Outage probability analysis for optical inter-platform HAPS-Link over log normal turbulence channels. in the Proc. of 2015 9th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), Bandung, 2015:1–4.
- [9] A. Khatoon, W. Cowley, and N. Letzepis, “Capacity of adaptive freespace optical channel using bidirectional links,” Proc. SPIE, Laser Comm. and Prop. thro. the Atmosph. and Oceans, vol. 8517, 2012.

- [10] A. Leven, "Coherent receivers: Principles and real-time implementation," in Proc. Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC 2009), pp. 1–27, Paper 6.6.3.
- [11] A. Majumdar and J. Ricklin, *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*, vol. 2. Springer, 2008.
- [12] A. Saleh, "An investigation of laser wave depolarization due to atmospheric transmission," *IEEE J. Quan. Elec.*, vol. 3, no. 11, pp. 540–543, 1967.
- [13] A. Vavoulas, H. G. Sandalidis, and D. Varoutas, "Weather effects on FSO network connectivity," *J. Opt. Comm. and Net.*, vol. 4, no. 10, pp. 734–740, 2012.
- [14] A. Viswanath, H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, "Evaluation of performance of ground to satellite free space optical link under turbulence conditions for different intensity modulation schemes," *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. and Atmosph. Prop. (XXVI)*, vol. 8971, 2014.
- [15] A. Z. Suriza, I. M. Rafiqul, A. K. Wajdi, and A. W. Naji, "Proposed parameters of specific rain attenuation prediction for free space optics link operating in tropical region," *J. of Atmosp. and Solar-Terres. Phys.*, vol. 94, pp. 93–99, 2013.
- [16] A. Biswas, "Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results," *Proc. SPIE Free-Space Laser Commun. Technol. XVII*, vol. 5712, pp. 205–216, 2005.
- [17] B. Flecker, M. Gebhart, E. Leitgeb, S. S. Muhammad, and C. Chlestil, "Results of attenuation measurements for optical wireless channels under dense fog conditions regarding different wavelengths," *Proc. SPIE, Atmospheric Opt. Model., Measure., and Simula. II*, vol. 6303, 2006.

- [18] B. He and R. Schober, "Bit-Interleaved Coded Modulation for Hybrid RF/FSO Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, pp. 3753–3763, Dec. 2009.
- [19] B. Moision and J. Hamkins, "Deep-space optical communications downlink budget: Modulation and coding," IPN Progress Report 42-154, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2003.
- [20] B. N. Le, *Optical fiber communications systems with MATLAB and Simulink models*. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [21] B. Zhang, C. Malouin, and T. Schmidt, "Design of coherent receiver optical front end for unamplified applications," *Opt. Express*, vol. 20, iss. 3, 3225–3234, Jan. 2012.
- [22] C. Abou-Rjeily and Z. Noun, "Impact of Inter-Relay Co-Operation on the Performance of FSO Systems With Any Number of Relays," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 3796–3809, June 2016.
- [23] C. Fortuna, A. Vilhar, J. Horwath, and M. Mohorcic, "Wavelength requirements in optical transport networks based on high altitude platforms," in *Proc. Symp. Commun. Syst., Netw. Digit. Signal Process.*, 2008, pp. 87–91.
- [24] Chatzidiamantis ND, Karagiannidis GK. On the distribution of the sum of Gamma-Gamma variates and applications in RF and optical wireless communications. *IEEE Trans. Commun.* 2011;59:1298–1308.
- [25] C. Higgs, H. Barclay, D. Murphy, and C. A. Primmerman, "Multibeam illumination," *J. Lincoln Lab.*, vol. 11, pp. 8–22, 1998.
- [26] C. K. Datsikas, K. P. Peppas, N. C. Sagias, and G. S. Tombras, "Serial Free-Space Optical Relaying Communications Over Gamma-Gamma

- Atmospheric Turbulence Channels,” *IEEE/OSA J. Optical Commun. and Networking*, vol. 2, no. 8, pp. 576–586, Aug. 2010.
- [27] C. Liu, Y. Yao, J. Tian, Y. Yuan, Y. Zhao, and B. Yu, “Packet error rate analysis of DPIM for free-space optical links with turbulence and pointing errors,” *Chinese Opt. Lett.*, vol. 12, pp. S10101–11–5, 2014.
- [28] C. N. Georghiades, “Modulation and coding for throughput efficient optical free-space links,” Tech Report: nasa-cr-193079, Texas A & M University, 1993.
- [29] COST297. (2010, Jan.). HAPCOS High Altitude Platforms for Communications and Other Services. Available: <http://www.hapcos.org>
- [30] Davis CC, Smolyaninov I. The effect of atmospheric turbulence on bit-error-rate in an on-off keyed optical wireless system. *Proc SPIE Free-Space Laser Commun. Laser Imaging*. 1997;4489:126–137.
- [31] D. Giggenbach, B. Epple, J. Horwath, and F. Moll, “Optical satellite downlinks to optical ground stations and high altitude platforms,” in *Proc. IST Mobile Wireless Commun. Summit*, 2007, pp. 1–4.
- [32] D. Giggenbach, R. Purvinskis, M. Werner, and M. Holzbock, “Stratospheric optical interplatform links for high altitude platforms,” presented at the 20th AIAA Int. Commun. Satellite Syst. Conf. Exhib., Montreal, QB, Canada, 2002.
- [33] D. N. Liu, M. P. Fitz, and X. Chen, “Adaptive coded modulation in low earth orbit satellite communication system,” Tech Report- US patent- US 13/800,127, Northrop Grumman Systems Corporation, 2014.
- [34] D. Shiu and J. M. Kah, “Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 47, no. 8, pp. 1201–1210, 1999.

- [35] D. Zwillinger, "Differential PPM has a higher throughput than PPM for the bandlimited and average power limited optical channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 34, pp. 1269–1273, 1988.
- [36] Dong Y, Liu H, Luo Z, Li Y, Jin G. Principle demonstration of fine pointing control system for inter-satellite laser communication. *Sci China Technol Sci.* 2015;58:449–453.
- [37] E. Bayaki, D.S. Michalopoulos, R. Schober, EDFA-based all-optical relaying in free-space optical systems, *IEEE Trans. Commun.* 60 (12) (2012) 3797–3807.
- [38] E. Katimertzoglou, D. Vouyioukas, P. Veltsistas, and P. Constantinou, "Optical interplatform link scenarios for 20 km altitude," in *Proc. 16th IST Mobile Wireless Commun. Summit, 2007*, pp. 1–5.
- [39] E. Metsala, J. Salmelin, *Mobile Backhaul*, Wiley, Chichester, U.K., 2012.
- [40] E. S. Oh, J. C. Ricklin, G. C. Gilbreath, N. J. Vallesterro, and F. D. Eaton, "Optical turbulence model for laser propagation and imaging applications," *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. and Active Laser Illumina. III*, vol. 5160, pp. 25–32, 2004.
- [41] F. De Rango, M. Tropea, A. Provato, A. F. Santamaria, and S. Marano, "Multiple metrics aware ant routing over HAP mesh networks," in *Proc. Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (CCECE 2008)*, pp. 1675–1678
- [42] F. Fidler, "Optical backhaul links between HAPs and satellites in the multi-Gigabit regime," in *Proc. Globecom Workshop Collection, 2008*, pp. 1–5.
- [43] F. Fidler, J. Grosinger, and W. R. Leeb, "Sensitivity of balanced receivers for polarization shift keying in free-space optical communications," *Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC 2009)*, pp. 1–2, Paper 9.6.2.

- [44] F. Fidler, M. Knapek, J. Horwath, and W. R. Leeb, "Optical communications for high-altitude platforms," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1058–1070, Sept.-Oct. 2010.
- [45] F. Fidler, *Optical Communications from High Altitude Platforms (Dissertation)*, Inst. Commun. Radio-Frequency Eng. Vienna Univ. Technol, Vienna, Austria, 2007 .
- [46] F. Fidler. (2007, Sep.). *Optical Communications from High Altitude Platforms (Dissertation)*, Inst. Commun. Radio-Frequency Eng., Vienna Univ. Technol., Vienna, Austria. Available: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_112010.pdf
- [47] Fidler F, Knapek M, Horwath J, Leeb WR. Optical communications for high-altitude platforms. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*. 2010;16:1058–1070.
- [48] F. Nadeem, T. Javornik, E. Leitgeb, V. Kvicera, and G. Kandus, "Continental fog attenuation empirical relationship from measured visibility data," *J. Radioeng*, vol. 19, no. 4, pp. 596–600, 2010.
- [49] F. Xu, M. Ali Khalighi, P. Causse, and S. Bourennane, "Performance of coded time-diversity free-space optical links," *IEEE 24th Biennial Symp. on Comm.*, pp. 146–149, 2008.
- [50] F. Moll and M. Knapek, "Wavelength selection criteria and link availability due to cloud coverage statistics and attenuation affecting satellite, aerial, and downlink scenarios," *SPIE Free-Space Laser Commun. VII*, vol. 6709, pp. 670916-1–670916-12, 2007.
- [51] G. Avdikos, G. Papadakis, and N. Dimitriou, "Overview of the application of high altitude platform (HAP) systems in future telecommunication networks," in *Proc. 10th Signal Process. Space Commun.*, 2008, pp. 1–6.

- [52] G. C. Valley, "Isoplanatic degradation of tilt correction and short-term imaging systems," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 4, pp. 574–577, February 1980.
- [53] G. M. Djuknic, J. Freidenfelds and Y. Okunev, "Establishing wireless communications services via high-altitude aeronautical platforms: a concept whose time has come?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp. 128-135, Sep 1997.
- [54] G. P. Agrawal, *Fiber Optic Communication System*, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [55] Grace, D., & Mohorcic, M. (2011). *Broadband communications via high altitude platforms*. Chichester (West Sussex): Wiley.
- [56] G. W. Jull, A. Lillemark and R. M. Turner, SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) telecommunications missions and systems, *IEEE Global Telecommunications Conference*, New Orleans, LA, USA, December 1985.
- [57] G.P. Agrawal, *Fiber Optic Communication System*, third ed., Wiley, New York, NY, USA, 2002.
- [58] H. Hemmati, *Deep Space Optical Communication*. John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [59] H. Hemmati, *Near-Earth Laser Communications*. BocaRaton, FL: CRC Press, 2009.
- [60] H. Kaushal, *Free Space Optical Communication*, Springer, 2017.
- [61] H. Kaushal, V. Kumar, A. Dutta, H. Aennam, H. Aennam, V. Jain, S. Kar, and J. Joseph, "Experimental study on beam wander under varying atmospheric turbulence conditions," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 23, no. 22, pp. 1691–1693, 2011. pp. 339–354, 1967.

- [62] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Proc. IEEE*, vol. 54, no. 10, pp. 1312–1329, Oct. 1966.
- [63] H. Willebrand and B. S. Ghuman, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Sams Publishing, 2002.
- [64] Ha Duyen Trung, Do Trong Tuan, Anh T. Pham, "Pointing error effects on performance of free-space optical communication systems using SC-QAM signals over atmospheric turbulence channels," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 68, iss. 9, pp. 869-876, September 2014.
- [65] I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, "Comparison of laser beam propagation at 785 and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," *Proc. SPIE, Opt. Wireless Comm. III*, vol. 4214, 2001.
- [66] J. A. Anguita, I. V. Djordjevic, M. A. Neifeld, and B. V. Vasic, "Shannon Capacities and Error-Correction Codes for Optical Atmospheric Turbulent Channels," *Journal of Optical Networking*, vol. 4, pp. 586–601, 2005.
- [67] J. Horwath, N. Perlot, M. Knappek, and F. Moll, "Experimental verification of optical backhaul links for high-altitude platform networks: Atmospheric turbulence and downlink availability," *Int. J. Satellite Commun. Netw.*, vol. 25, no. 5, pp. 501–528, 2007.
- [68] J. Horwath and C. Fuchs, "Aircraft to ground unidirectional laser-comm. terminal for high resolution sensors," *Proc. SPIE*, vol. 7199, pp. 7199-1–7199-8, 2009.
- [69] J. Horwath, M. Knappek, B. Epple, M. Brechtelsbauer, and B. Wilkerson, "Broadband backhaul communication for stratospheric platforms: The stratospheric optical payload experiment (STROPEX)," *Proc. SPIE*, vol. 6304, pp. 63041N-1–63041N-12, 2006.

- [70] J. M. Senior, *Optical fiber communications: principles and practice*. Harlow: Prentice Hall, 2009.
- [71] *J. Optical Communications and Networking*, vol. 2, no. 12, pp. 1087–1094, Dec. 2010.
- [72] J. Park, E. Lee, and G. Yoon, “Average bit-error rate of the Alamouti scheme in gamma-gamma fading channels,” *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 269–271, 2011.
- [73] J. Senior, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, Financial Times/Prentice Hall, 2009.
- [74] J. Y. Wang, J. B. Wang, M. Chen, and X. Song, “Performance analysis for free-space optical communications using parallel all-optical relays over composite channels,” *IET Communications*, vol. 8, no. 9, pp. 1437–1446, June 2014.
- [75] Jin-Yuan Wang, et al. Free-space optical communications using all-optical relays over weak turbulence channels with pointing errors, in: 2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Hangzhou, 2013, pp. 1–6.
- [76] K. Li, J. Ma, A. Belmonte, L. Tan, and S. Yu, “Performance analysis of satellite-to-ground downlink optical communications with spatial diversity over gamma-gamma atmospheric turbulence,” *Opt. Eng.*, vol. 54, no. 12, 2015.
- [77] Kaushal H, Kaddoum G. Optical Communication in space: challenges and mitigation techniques. *IEEE Commun Surv Tutor* 2017;19:57–96.
- [78] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE, 2005.

- [79] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, *Laser Beam Scintillation with Applications*. SPIE Press, 2001.
- [80] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, and R. L. Phillips, “Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagation through turbulence media,” *Opt. Eng.*, vol. 40, no. 8, pp. 1554–1562, 2001.
- [81] M. Antonini, S. Betti, V. Carrozzo, E. Duca, and M. Ruggieri, “Feasibility analysis of a HAP-LEO optical link for data relay purposes,” presented at the *Aerosp. Conf., Big Sky, MT*, 2006.
- [82] M. Czaputa, T. Javornik, E. Leitgeb, and G. Kandung et al., “Investigation of punctured LDPC codes and time-diversity on free-space optical links,” in *Int. Conf. Telecomm.*, 2011.
- [83] M. Jeganathan, M. Toyoshima, K. E. Wilson, and J. R. Lesh, “Data analysis result from GOLD experiments,” *Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. Tech. IX*, vol. 2990, pp. 70–81, 1998.
- [84] M. K. Simon and V. A. Vilnrotter, “Alamouti-type space time coding for free space optical communication with direct detection,” *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol. 50, no. 8, pp. 1293–1300, 2002.
- [85] M. K. Simon and V. A. Vilnrotter, “Multi-pulse-position-modulation signaling for optical communication with direct detection,” *Tech Report: IPN Progress Report 42-155*, Jet Propulsion Laboratory, California, 2003.
- [86] M. Knapek, J. Horwath, F. Moll, B. Epple, N. Courville, H. Bischl, and D. Giggenbach, “Optical high-capacity satellite downlinks via high altitude platform relays,” in *Proc. SPIE Free-Space Laser Commun. VII*, vol. 6709, pp. 6709E-1–6709E-12, 2007.
- [87] M. Niu, *Coherent optical wireless communications over atmospheric turbulence channels*. PhD thesis, University of British Columbia, 2012.

- [88] M. Q. Vu, H. T. T. Pham, T. A. Pham and N. T. Dang, "All-optical two way relaying dual-hop FSO systems using network coding over atmospheric turbulence channel, 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hanoi, 2016, pp. 350–355.
- [89] M. R. G. Talavera, A. Comeron, A. Alonso, A. Rodriguez, and Z. Sodnik et al., "Ground-to-satellite bidirectional laser links for validation of atmospheric turbulence model," Proc. SPIE Free-Space Laser Commu. and Active Laser Illumin. III, vol. 5160, 2004.
- [90] M. Razavi, J.H. Shapiro, Wireless optical communications via diversity reception and optical preamplification, IEEE Trans. Wirel. Commun. 4 (3) (2005) 975–983.
- [91] M. Uysal, J. Li, and M. Yu, "Error Rate Performance Analysis of Coded Free-Space Optical Links over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channels," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, pp. 1229–1233, Jun. 2006.
- [92] M. Uysal, M. Navidpour, and J. Li, "Error Rate Performance of Coded Free-Space Optical Links Over Strong Turbulence Channels," IEEE Communication Letters, vol. 8, pp. 635–637, Oct. 2004.
- [93] M.A.Al-Habash, L. Andrews, and R. Phillips, "Mathematical Model for the Irradiance Probability Density Function of a Laser Beam Propagating Through Turbulent Media," Optical Engineering, vol. 40, pp. 1554–1562, Aug. 2001
- [94] M.Q.Vu, H.T.T. Pham, T.A. Pham, N.T. Dang, All-optical two-way relaying dualhop FSO systems using network coding over atmospheric turbulence channel, in the Proc. 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Hanoi, 2016, pp. 350–355.

- [95] Markus Knapek, Joachim Horwath, Florian Moll, Bernd Epple, Nicolas Courville, Hermann Bischl, Dirk Giggenbach, Optical high-capacity satellite downlinks via high-altitude platform relays, in :Proc. SPIE 6709, Free-Space Laser Communications VII, 67090E (25 September 2007)
- [96] M. Sharma, D. Chadha, V. Chandra, High-altitude platform for free-space optical communication: Performance evaluation and reliability analysis, *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Networking* 8 (8) (2016) 600–609.
- [97] Le BN, Optical fiber communications systems with MATLAB and Simulink models. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [98] N. Letzepis and A. Guilléni Fàbregas, “Outage probability of the Gaussian MIMO free-space optical channel with PPM,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 57, no. 12, pp. 3682–3690, 2009.
- [99] N. Perlot, E. Duca, J. Horwath, D. Giggenbach, and E. Leitgeb, “System requirements for optical HAP-satellite links,” in *Proc. Symp. Commun. Syst., Netw. Digit. Signal Process.*, 2008, pp. 72–76.
- [100] N. W. Spellmeyer, D. O. Caplan, B. S. Robinson, D. Sandberg, M. L. Stevens, M. M. Willis, D. V. Gapontsev, N. S. Platonov, and A. Yusim, “A high-efficiency Ytterbium-doped fiber amplifier designed for interplanetary laser communications,” in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC 2007)*, pp. 1–3, Paper OMF2.
- [101] N.A.M. Nor, et al. 10 Gbps all-optical relay-assisted FSO system over a turbulence channel, in: 2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), Istanbul, 2015, pp. 69–72.
- [102] N.A.M. Nor, et al., Experimental investigation of all-optical relay-assisted 10 Gb/s FSO link over the atmospheric turbulence channel, *J. Lightwave Technol.* 35 (1) (2017) 45–53.

- [103] NASA Earth Observatory, NASA Captures Crazy Images Of A Huge Alaskan Forest Fire From Space, Business Insider, May 2014. Available: <http://www.businessinsider.com/images-of-huge-alaskan-forest-fire-2014-5>.
- [104] Navidpour SM, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity. *IEEE Trans Wireless Comm.* 2007;6:2813–2819.
- [105] P. D. Stroud, “Statistics of intermediate duration averages of atmospheric scintillation,” *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 543–548, 1996.
- [106] P. Gopal, V. K. Jain, and S. Kar, “Performance analysis of ground to satellite FSO system with DAPPM scheme in weak atmospheric turbulence,” in *Int. Conf. on Fiber Optics and Photon. (OSA)*, 2012.
- [107] P. J. Winzer and R. J. Essiambre, “Advanced optical modulation formats,” *Proc. IEEE*, vol. 94, no. 5, pp. 952–985, May 2006.
- [108] P. Puri, P. Garg, M. Aggarwal, Analysis of spectrally efficient two-way relay assisted free space optical systems in atmospheric turbulence with path loss. *2016 Int. J. Commun. Syst.*, 29, pp. 99–112.
- [109] P. Puri, P. Garg, M. Aggarwal, P.K. Sharma, Multiple user pair scheduling in TWRFSO systems in presence of building sway, in the *Proc. of the 2014 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*, Bangalore, 2014, pp. 1–5.
- [110] P. W. Kruse, L. D. McGlauchlin, and R. B. McQuistan, *Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection*. Wiley, 1962.

- [111] P.V. Trinh, N.T. Dang, A.T. Pham, All-optical relaying FSO systems using EDFA combined with optical hard-limiter over atmospheric turbulence channels, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* 33 (19) (2015) 4132–4144.
- [112] R. G. Lipes, “Pulse position modulation coding as near-optimum utilization of photon counting channel with bandwidth and power constraints,” DSN Progress Report, NASA, USA, 1980.
- [113] R. K. Crane and P. C. Robinson, “ACTS propagation experiment: Rain-rate distribution observations and prediction model comparisons,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 6, pp. 946–958, 1997.
- [114] R. Lange, F. Heine, H. Kämpfner, and R. Meyer, “High data rate optical inter-satellite links,” presented at the Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC 2009), Vienna, Austria, Paper 10.6.1.
- [115] R. M. Gagliardi and S. Karp, “M-ary Poisson detection and optical communications,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 17, no. 2, pp. 208–216, 1969.
- [116] R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications*. John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [117] S. Aghajanzadeh and M. Uysal, “Diversity-multiplexing trade-off in coherent free-space optical systems with multiple receivers,” *IEEE/OSA*
- [118] S. Betti, E. Duca, and I. Toselli, “HAP-GEO optical links: Performance analysis under weak turbulence conditions,” in *Proc. Symp. Commun. Syst., Netw. Digit. Signal Process.*, 2008, pp. 77–81.
- [119] S. Betti, V. Carrozzo and E. Duca, “Over-stratospheric-altitude optical free space links: system performance evaluation,” 2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks, Rome, 2007, pp. 170–173.

- [120] Sharma M, Chadha D, Chandra V. High-altitude platform for free-space optical communication: Performance evaluation and reliability analysis. *IEEE/OSA J. Optical Commun Netw.* 2016;8:600–609.
- [121] S. Kazemlou, S. Hranilovic, S. Kumar, All-optical multihop free-space optical communication systems, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* 29 (18) (2011) 2663–2669.
- [122] T. C. Tozer and D. Grace, "High-altitude platforms for wireless communications," *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 127-137, Jun 2001.
- [123] S. Tiwari, V. K. Jain, and S. Kar, "Performance evaluation of different pulse position modulation schemes in atmospheric turbulence channel for ground-to-satellite optical communication," in *Int. Conf. Opt. Engg*, (Belgaum), 2012.
- [124] T. Ohtsuki, I. Sasase, S. Mori, Effects of hard-limiter and error correction coding on performance of direct-detection optical CDMA systems with PPM signaling, *Communications*, in: 1995. ICC '95 Seattle, 'Gateway to Globalization', 1995 IEEE International Conference on, Seattle, WA, vol. 3, 1995, pp. 1307–1311.
- [125] Tosovsky P, Dordova L. Free space optical channel parameters estimation for high altitude platform system. in the Proc. of the 2008 14th Conference on Microwave Techniques, Prague, 2008:1–5
- [126] V. Cazaubiel, G. Planche, V. Chorvalli, L. Le Hors, B. Roy, E. Giraud, L. Vaillon, F. Carrée, and E. Decourbey, "LOLA: A 40.000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite," presented at the 6th Int. Conf. Space Opt., Noordwijk, The Netherlands, 2006.
- [127] V. W. S. Chan, "Free-Space Optical Communications," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4750–4762, Dec. 2006.

- [128] W. K. Pratt, *Laser Communication Systems*, 1st ed. New York: Wiley, 1969
- [129] Weichel H. *Laser beam propagation in the atmosphere*. Bellingham, WA: SPIE, 1990.
- [130] Wen K, Zhao Y, Gao J, Zhang S, Tu J. Design of a coherent receiver based on InAs electron avalanche photodiode for free-space optical communications. *IEEE Trans Electron Devices*. 2015;62:1932–1938.
- [131] Wilson SG, Brandt-Pearce M, Cao Q, Leveque JH. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM. *IEEE Trans Commun*. 2005;53:1402–1412.
- [132] Z. Mostaani, M. Uysal, Relay selection in FSO systems with all-optical relaying over Gamma-Gamma turbulence channels, in: 2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU, Trabzon, 2014, pp. 710– 713.