

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



**NGHIÊN CỨU CẢI THIỆN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG
THÔNG TIN VÔ TUYẾN SỬ DỤNG KỸ THUẬT
CHUYỂN TIẾP**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2023

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



**NGHIÊN CỨU CẢI THIỆN HIỆU NĂNG HỆ THỐNG
THÔNG TIN VÔ TUYẾN SỬ DỤNG KỸ THUẬT
CHUYỂN TIẾP**

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

MÃ SỐ: 9.52.02.08

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. PGS.TSKH. HOÀNG ĐĂNG HẢI**
- 2. PGS.TS. NGUYỄN CẢNH MINH**

HÀ NỘI – NĂM 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Luận án này là công trình nghiên cứu của bản thân, dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TSKH. Hoàng Đăng Hải và PGS.TS. Nguyễn Cảnh Minh. Các kết quả được trình bày trong Luận án là hoàn toàn trung thực và không xung đột với bất kỳ tác giả nào khác. Những tham khảo trong quá trình nghiên cứu đã được trích dẫn đầy đủ.

Nghiên cứu sinh

Ngô Thế Anh

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành được Luận án này, trước hết, tôi xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến PGS.TSKH. Hoàng Đăng Hải và PGS.TS. Nguyễn Cảnh Minh, 2 Thầy hướng dẫn trực tiếp của tôi, vì những hướng dẫn khoa học, và những định hướng quan trọng vào những thời điểm khó khăn trong quá trình nghiên cứu. Tôi vẫn biết việc học chưa bao giờ là dễ dàng, và thực sự, việc nghiên cứu luôn là một thách thức rất lớn. Chính vì thế, tôi càng trân trọng và biết ơn những quan tâm và động viên kịp thời từ các Thầy, bên cạnh sự hướng dẫn tận tình, đã dành cho tôi để hoàn thành Luận án này. Tôi luôn biết ơn và mãi ghi nhận những tình cảm đó của các Thầy.

Tôi xin được cảm ơn các Giáo sư, Tiến sĩ của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông vì những bài giảng trong các môn học, những nhận xét khoa học chân thành và sâu sắc trong các buổi báo cáo định hướng và tiến độ nghiên cứu, báo cáo chuyên đề và tiểu luận. Tôi cũng xin được cảm ơn những nhận xét và trao đổi khoa học của các phản biện trong các hội thảo và tạp chí chuyên ngành mà tôi đã gửi bài. Mặc dù không được gặp mặt, nhưng những trao đổi chân thành và nghiêm túc của các phản biện đã giúp tôi rất nhiều để hoàn thiện nghiên cứu.

Tôi cũng xin được trân trọng cảm ơn PGS.TS. Lê Nhật Thăng và TS. Lê Thị Hồng Yến, Khoa Đào tạo Sau Đại học, vì những giúp đỡ và hỗ trợ nhiệt tình và chu đáo trong suốt quá trình làm nghiên cứu sinh tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, từ lúc bắt đầu cho đến khi hoàn thành luận án.

Tôi xin được cảm ơn các đồng nghiệp tại Bộ môn Kỹ thuật Viễn thông, Trường Đại học Giao thông Vận tải, và các đồng nghiệp tại Bộ môn Điện – Điện tử, Phân hiệu Trường ĐH GTVT tại Thành phố Hồ Chí Minh vì những chia sẻ công việc trong giai đoạn làm nghiên cứu sinh của tôi.

Tôi xin được cảm ơn TS.Hà Duy Hưng_Trường Đại học Tôn Đức Thắng vì những kết nối và chia sẻ kiến thức về chuyển tiếp trong truyền thông vô tuyến. Đặc biệt là những kết nối của TS. Hưng với PGS.TS. Trần Trung Duy_Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông trong việc giải quyết bài toán chuyển tiếp.

Tôi xin được trân trọng cảm ơn PGS.TS. Trần Trung Duy vì những chia sẻ kiến thức rất sâu sắc trong lĩnh vực chuyển tiếp, với việc cộng tác trong các nghiên cứu. Trong quá trình cộng tác, tôi học hỏi được ở PGS. Duy tinh thần làm việc nghiêm túc, thái độ chân thành, và việc giữ lời hứa. Tôi luôn giữ gìn và biết ơn những điều này.

Tôi xin được cảm ơn tất cả những bạn bè, người quen đã dành cho tôi những động viên, quan tâm trong những khoảnh khắc nhất định của cuộc sống. Những lời động viên dù rất nhỏ, nhưng cũng đã giúp tôi rất nhiều trên con đường hoàn thành Luận án này.

Cuối cùng, tôi xin được cảm ơn Cha-Mẹ, vợ, các con, và các em trong gia đình vì những hy sinh và yêu thương vô điều kiện đã dành cho tôi, cũng như những chia sẻ về những áp lực và khó khăn của tôi trong suốt những năm vừa qua. Tôi nợ gia đình những tình cảm và những lo lắng mà tôi đã mang đến cho họ. Món nợ này, tôi vẫn luôn ghi nhớ và mong sẽ được đền đáp phần nào. Tôi biết ơn tất cả những điều đó.

Nghiên cứu sinh

Ngô Thế Anh

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iv
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	vii
DANH MỤC BẢNG.....	ix
DANH MỤC KÝ HIỆU TOÁN HỌC	x
DANH MỤC VIẾT TẮT	xii
LỜI MỞ ĐẦU	- 1 -
CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN.....	- 11 -
1.1 Tổng quan về hệ thống thông tin vô tuyến.....	- 11 -
1.1.1 Hệ thống thông tin di động	- 11 -
1.1.2 Hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới.....	- 14 -
1.1.3 Chuyển giao cuộc gọi trong thông tin di động.....	- 16 -
1.2 Kỹ thuật chuyển tiếp trong hệ thống thông tin vô tuyến.....	- 17 -
1.2.1 Chuyển tiếp trong thông tin di động	- 17 -
1.2.2 Chuyển tiếp trong hệ thống thông tin vô tuyến đa chặng	- 18 -
1.3 Hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến.....	- 19 -
1.3.1 Khái quát	- 19 -
1.3.2 Duy trì kết nối	- 20 -
1.3.3 Chuyển giao và xác suất chuyển giao cuộc gọi	- 21 -
1.3.4 Xác suất rớt cuộc gọi CDP	- 23 -
1.3.5 Xác suất dừng OP.....	- 28 -
1.3.6 Xác suất chặn IP	- 29 -
1.4 Các nghiên cứu liên quan.....	- 30 -
1.4.1 Nghiên cứu liên quan kỹ thuật chuyển tiếp trong thông tin di động... -	30 -
1.4.2 Nghiên cứu liên quan kỹ thuật chuyển tiếp trong HTTTVT đa chặng-	33 -
1.5 Kết luận Chương 1	- 36 -

CHƯƠNG 2 GIẢI PHÁP DUY TRÌ VÀ CẢI THIỆN CHẤT LƯỢNG KẾT NỐI TRONG HỆ THỐNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN SỬ DỤNG TRẠM CHUYỂN TIẾP	- 37 -
2.1 Giải pháp sử dụng trạm chuyển tiếp để duy trì kết nối	- 37 -
2.1.1 Mô hình các trạm chuyển tiếp kênh	- 37 -
2.1.2 Chuyển tiếp kênh tĩnh SCRS	- 38 -
2.1.3 Chuyển tiếp kênh chuyển giao HCRS.....	- 39 -
2.2 Duy trì kết nối với kỹ thuật chuyển tiếp kênh.....	- 40 -
2.2.1 Duy trì kết nối khi các trạm gốc không dự trữ kênh để chuyển giao..	- 40 -
2.2.2 Duy trì kết nối trong vùng lưu lượng cao.....	- 41 -
2.2.3 Duy trì kết nối khi các trạm gốc dự trữ một kênh để chuyển giao.....	- 43 -
2.3 Kết quả mô phỏng	- 47 -
2.3.1 Mô hình và kết quả mô phỏng với 3 trạm gốc không dự trữ kênh	- 47 -
2.3.2 Mô hình và kết quả mô phỏng với vùng mạng nhiều trạm gốc	- 53 -
2.3.3 Kết quả mô phỏng với các trạm gốc dự trữ một kênh	- 58 -
2.3.4 Xác suất chuyển giao cuộc gọi.....	- 59 -
2.4 Một số nhận xét.....	- 62 -
2.5 Kết luận Chương 2	- 64 -
CHƯƠNG 3 TÍNH TOÁN XÁC SUẤT DỪNG VÀ XÁC SUẤT CHẶN TOÀN CHẶNG ĐỂ BẢO ĐẢM DUY TRÌ KẾT NỐI TRONG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP ĐA CHẶNG.....	- 65 -
3.1 Mô hình và phương thức tính toán OP và IP cho HTTTVT chuyển tiếp đa chặng	- 66 -
3.1.1 Mô hình HTTTVT chuyển tiếp đa chặng.....	- 66 -
3.1.2 Phương thức tính toán OP và IP toàn chặng trong WSN MH LEACH.....	- 70 -
3.1.2.1 Tính toán OP	- 70 -
3.1.2.2 Tính toán IP	- 71 -
3.1.3 Kết quả mô phỏng của WSN MH LEACH.....	- 72 -
3.2 Mô hình và phương thức tính toán OP và IP cho mạng LEACH MIMO đa chặng	- 75 -
3.2.1 Mô hình mạng LEACH MIMO đa chặng	- 75 -
3.2.2 Lựa chọn an ten và nút gây nhiễu	- 77 -

3.2.3 Lựa chọn an ten phát và tổ hợp gây nhiễu	- 78 -
3.2.4 Tính toán xác suất dừng OP và xác suất chặn IP toàn chặng trong mô hình MH LEACH MIMO	- 80 -
3.2.5 Kết quả mô phỏng của MH LEACH MIMO	- 86 -
3.3 Một số nhận xét	- 94 -
3.4 Kết luận Chương 3	- 95 -
KẾT LUẬN	- 96 -
DANH MỤC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	- 100 -
TÀI LIỆU THAM KHẢO	- 101 -
PHỤ LỤC	- 114 -
PL1. Thiết lập tọa độ cho mô hình 3 BS và 13 RS	- 114 -
PL2. Khởi tạo vị trí và tham số cuộc gọi cho tất cả các MU trong mạng	- 114 -
PL3. Cập nhật trạng thái mạng	- 114 -
PL4. Tính thời gian di chuyển ra ngoài BS và RS	- 115 -
PL5. Vị trí hiện thời của các MU khi xảy ra sự kiện kết thúc cuộc gọi hoặc chuyển giao	- 115 -
PL6. HCRS	- 116 -
PL7. Thiết lập tọa độ mô hình 7 BS và 24 RS	- 117 -
PL8. Tính P_h	- 117 -
PL9. Các tính toán trung gian cho IP	- 118 -
PL9.1. Tính công thức (3.23)	- 118 -
PL9.2. Tính công thức (3.56)	- 119 -

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1. Sơ đồ kiến trúc HTTTVT đa chặng thể hệ mới (tham khảo từ [3]).....	- 3 -
Hình 1.1 Mô hình hệ thống thông tin di động.....	- 12 -
Hình 1.2 Hệ thống thông tin vô tuyến thể hệ mới.....	- 14 -
Hình 1.3 Bảo đảm kết nối vật lý cho cuộc gọi chuyển giao	- 16 -
Hình 1.4 Chuyển tiếp trong thông tin di động	- 18 -
Hình 1.5 Mô hình chuyển tiếp trong HTTTVT đa chặng	- 19 -
Hình 1.6 Mô hình tính toán xác suất chuyển giao P_h của MU trong BS	- 21 -
Hình 1.7 GoS với thời gian chiếm kênh 2 phút và 2.5 phút	- 25 -
Hình 1.8 GoS với thời gian chiếm kênh 3 phút và 5 phút.....	- 26 -
Hình 1.9 GoS với thời gian chiếm kênh 10 phút và 15 phút	- 26 -
Hình 1.10 GoS với thời gian chiếm kênh 20 phút và 25 phút	- 26 -
Hình 1.11 GoS với thời gian chiếm kênh 30 phút	- 27 -
Hình 1.12 Mô hình truyền thông 2 chặng	- 28 -
Hình 2.1 Mô hình chuyển tiếp kênh CRS	- 38 -
Hình 2.2 Các khả năng chuyển giao trong mô hình 1 kênh dự trữ	- 44 -
Hình 2.3 Xác suất chuyển giao thành công của HCRS có và không dự trữ kênh-	46 -
Hình 2.4 Mô hình mô phỏng vùng mạng 3 BS sử dụng HCRS [J.04].....	- 47 -
Hình 2.5 Lưu đồ thuật toán của chương trình mô phỏng.....	- 50 -
Hình 2.6 Mô hình nghẽn cục bộ trong vùng 7 BS và 24 RS.....	- 54 -
Hình 2.7 P_{hs} với các vận tốc 1m/s và 5m/s.....	- 55 -
Hình 2.8 P_{hs} với thời gian đàm thoại trung bình 120s.....	- 55 -
Hình 2.9 P_{hs} với thời gian đàm thoại trung bình 150s.....	- 56 -
Hình 2.10 P_{hs} với thời gian đàm thoại trung bình 180s.....	- 56 -
Hình 2.11 Xác suất chuyển giao thành công P_{hs} (%) với $N_C = 5$ và $N_C = 10$	- 57 -
Hình 2.12 Xác suất chuyển giao thành công P_{hs} (%) với $N_C = 15$ và $N_C = 20$	- 57 -
Hình 2.13 Xác suất chuyển giao thành công P_{hs} (%) với $N_C = 25$ và $N_C = 30$	- 57 -
Hình 2.14 Xác suất chuyển giao thành công HCRS-ORC 19 BS.....	- 58 -
Hình 2.15 Xác suất chuyển giao P_h với $R = 1500m$, có và không có HCRS.....	- 60 -

Hình 2.16 So sánh tỉ lệ chuyển giao P_h giữa lý thuyết và mô phỏng với $R = 1500m...$	- 60 -
Hình 2.17 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $N_C = 5$ và $N_C = 10$	- 62 -
Hình 2.18 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $N_C = 15$ và $N_C = 20$	- 62 -
Hình 2.19 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $N_C = 25$ và $N_C = 30$	- 62 -
Hình 3.1 Mô hình hệ thống MH LEACH EH-CJ [C.01]	- 67 -
Hình 3.2 Mối quan hệ giữa OP và IP với SNR.....	- 73 -
Hình 3.3 Mối quan hệ giữa OP và IP với số chặng.....	- 73 -
Hình 3.4 Mối quan hệ giữa IP và OP khi $M=4$, với các thời gian EH khác nhau	- 74 -
Hình 3.5 Mối quan hệ giữa OP và IP với $M=3$ và phần cứng không hoàn hảo...	- 74 -
Hình 3.6 Mô hình MH LEACH MIMO EH-CJ [J.01].....	- 75 -
Hình 3.7 $OP(\Delta)$ với $M=4, N_T=2, N_E=3, K=4, \alpha = 0.1, \mu_D^2 = 0.05$	- 87 -
Hình 3.8 $IP(\Delta)$ với $M=4, N_T=2, N_E=3, K=4, \alpha = 0.1, \mu_E^2 = 0.05$	- 87 -
Hình 3.9 Quan hệ OP và số chặng M với số lượng ăng ten khác nhau tại CH....	- 88 -
Hình 3.10 Quan hệ IP và số chặng M với số lượng ăng ten khác nhau tại CH ...	- 89 -
Hình 3.11 Ảnh hưởng của nhiều phần cứng lên OP	- 90 -
Hình 3.12 Ảnh hưởng của nhiều phần cứng lên IP	- 90 -
Hình 3.13 Mối quan hệ giữa IP và số nút trong cụm	- 91 -
Hình 3.14 Mối quan hệ giữa OP và IP với số nút trong cụm.....	- 92 -
Hình 3.15 Mối quan hệ giữa OP và IP với số chặng.....	- 92 -

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2.1	Xác suất chuyển giao thành công khi áp dụng HCRS	- 42 -
Bảng 2.2	Tham số mô phỏng HCRS cho các cuộc gọi số liệu thời gian thực	- 48 -
Bảng 2.3	P_{hs} (%) với $v = 1\text{m/s}$, $N_C = 5$, và $N_C = 10$	- 51 -
Bảng 2.4	P_{hs} (%) với $v = 1\text{m/s}$, $N_C = 15$, và $N_C = 20$	- 52 -
Bảng 2.5	P_{hs} (%) với $v = 1\text{m/s}$, $N_C = 25$, và $N_C = 30$	- 52 -
Bảng 2.6	P_{hs} (%) với $v = 5\text{m/s}$, $N_C = 5$, và $N_C = 10$	- 52 -
Bảng 2.7	P_{hs} (%) với $v = 5\text{m/s}$, $N_C = 15$, và $N_C = 20$	- 52 -
Bảng 2.8	P_{hs} (%) với $v = 5\text{m/s}$, $N_C = 25$, và $N_C = 30$	- 53 -
Bảng 2.9	Các tham số mô phỏng cho cuộc gọi thoại trong mô hình 7 BS	- 54 -
Bảng 2.10	Các tham số mô phỏng cho cuộc gọi số liệu thời gian thực	- 56 -
Bảng 2.11	Các tham số mô phỏng cho mô hình với các trạm gốc dự trữ 1 kênh-	- 58 -
Bảng 2.10	Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $v = [1\text{m/s}, 5\text{m/s}]$	- 61 -
Bảng 2.11	Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $v = [10\text{m/s}, 15\text{m/s}, 20\text{m/s}]$	- 61 -

DANH MỤC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
$N_C, N_n, N_h, N_{cc}, N_r$	Các giá trị dung lượng của BS, dành cho cuộc gọi mới, cuộc gọi chuyển giao, dùng chung, và dự trữ tương ứng
T_n, T_h	Các giá trị lưu lượng cuộc gọi mới, cuộc gọi chuyển giao tương ứng
λ, μ	Tốc độ cuộc gọi đến và tốc độ kết thúc cuộc gọi
P_h	Xác suất chuyển giao cuộc gọi
P_{hs}	Xác suất chuyển giao thành công
C_D	Dung lượng từ đầu đến cuối của kênh dữ liệu.
C_E	Dung lượng từ đầu đến cuối của kênh nghe lén.
C_{th}	Tốc độ truyền mong muốn tại máy thu.
$C_b^a (b \geq a)$	Hệ số nhị thức.
$f_x(x)$	Hàm mật độ xác suất của biến ngẫu nhiên X.
$F_x(x)$	Hàm phân bố tích lũy của biến ngẫu nhiên X..
N_T, N_E	Số ăng-ten tại nút chủ cụm và nút nghe lén (E).
Q_n	Năng lượng được thu nhập bởi nút T_N , với $n = 0, 1, \dots, N-1$
P_n	Công suất phát của một nút
$y_{D,n}[u]$	Tín hiệu thu tại nút đích.
$\exp(x)$	e^x

\log	Logarit cơ số 2.
τ	Tổng thời gian truyền mỗi gói mã hóa từ nguồn đến đích.
$\alpha\tau(0 \leq \alpha \leq 1)$	Khoảng thời gian thu hoạch năng lượng.
$(1-\alpha)\tau$	Khoảng thời gian truyền dữ liệu.
β	hệ số suy hao hàm mũ.
$\eta_{t,x}, \eta_{r,y}$	Nhiều do phản cứng không lý tưởng tại nút X và Y.
η_Y	Tạp âm Gauss tại nút Y.
γ_{th}	Ngưỡng dừng tại máy thu.
$\lambda_{x,y}$	Tham số độ lợi kênh truyền giữa 1 nút X và Y.
$\varepsilon\{\cdot\}$	Toán tử kỳ vọng.
$K_{x,y}^2$	Tổng mức suy giảm phản cứng giữa 2 nút X và Y.
$d_{x,y}$	Khoảng cách Euclid giữa 2 nút X và Y.
$h_{x,y}$	Hệ số pha đỉnh của kênh truyền từ X đến Y.
$\gamma_{x,y}$	Độ lợi kênh truyền giữa 2 nút X và Y, với $\gamma_{x,y} = h_{x,y} ^2$
$\psi_{x,y}$	SINR tức thời giữa 2 nút X và Y.

DANH MỤC VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nghĩa tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
3GPP	3 rd Generation Partnership Project	Dự án nhóm đối tác thế hệ thứ 3
4G	4 th Generation	Thế hệ thứ 4
5G	5 th Generation	Thế hệ thứ 5
6G	6 th Generation	Thế hệ thứ 6
AA-AJ	All Antenna-All Jammer	Tất cả ăng ten-Tất cả (nút) gây nhiễu
AF	Amplify and Forward	Khuếch đại và chuyển tiếp
AN	Artificial Noise	Nhiều nhân tạo
ARS	Ad-hoc Relay Station	Trạm chuyển tiếp tùy biến
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Nhiều trắng Gauss cộng tính
BA-BJ	Best Antenna-Best Jammer	Ăng ten tốt nhất-(Nút) gây nhiễu tốt nhất
BS	Base Station	Trạm gốc
CBP	Call Blocking Probability	Xác suất chặn cuộc gọi
CDF	Cumulative Distribution Function	Hàm phân bố tích lũy
CDP	Call Dropping Probability	Xác suất rớt cuộc gọi
CH	Cluster Head	(nút) Chủ cụm
CJ	Cooperative Jamming	Gây nhiễu hợp tác
CN	Core Network	Mạng lõi
CRS	Channel Relaying Strategy	Kỹ thuật chuyển tiếp kênh
DF	Decode and Forward	Giải mã và chuyển tiếp
EH	Energy Harvesting	Thu hoạch năng lượng
FD	Full Duplex	(truyền dẫn) Song công
GoS	Grade of Service	Cấp độ dịch vụ
GSMA	Global System for Mobile communications Association	Hiệp hội thông tin di động toàn cầu

HCRS	Handover Channel Relaying Strategy	Kỹ thuật chuyển tiếp kênh chuyển giao
HD	Half Duplex	(truyền dẫn) Bán song công
HO	Hand Over	Chuyển giao
HOF	Hand Over Fail	Thất bại chuyển giao
HI	Hardware Imperfect	Phần cứng không hoàn hảo
HTTTVT	---	Hệ thống thông tin vô tuyến
ICAR	Integrated Cellular and Ad-hoc Relay stations	Tích hợp di động và các trạm chuyển tiếp tùy biến
IP	Intercept Probability	Xác suất chặn
ISM	Industrial Scientific Medical band	(băng tần dành cho) Công nghiệp Khoa học Y tế
ITU	International Telecommunications Union	Liên minh Viễn thông Quốc tế
LEACH	Low-Energy Adaptive Cluster Hierachy	(giao thức định tuyến) Phân cấp thích nghi theo cụm năng lượng thấp
MH	Multi-Hop	Đa chặng
MIMO	Multiple Input Mutiplt Output	(hệ ăng ten) Nhiều đầu vào – nhiều đầu ra
MRC	Maximal Ratio Combining	Việc kết hợp tỉ lệ lớn nhất
MU	Mobile User	Người sử dụng di động
MTC	Machine Type Communications	Truyền thông kiểu máy
mMTC	Massive MTC	Truyền thông kiểu máy dày đặc
OP	Outage Probability	Xác suất dừng
PDF	Probability Density Function	Hàm mật độ xác suất
PLS	Physical Layer Security	Bảo mật lớp vật lý
RA-AJ	Random Antenna-All Jammer	Ăng ten ngẫu nhiên-tất cả (nút) gây nhiễu
RAN	Radio Access Network	Mạng truy nhập vô tuyến
RF-EH	Radio Frequency Energy Havesting	Thu hoạch năng lượng tần số vô tuyến

RS	Relay Station	Trạm chuyển tiếp
S-BS	Source Base Station	Trạm gốc nguồn
SC	Selection Combining	Việc kết hợp (các) lựa chọn
SCRS	Static Channel Relaying Strategy	Kỹ thuật chuyển tiếp kênh tĩnh
SIM	Subscriber Identity Module	Module nhận dạng thuê bao
SN	Sensor Node	Nút cảm biến
SNR	Signal to Noise Ratio	Tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu
TAS	Transmit Antenna Selection	Việc lựa chọn ăng ten phát
T-BS	Target Base Station	Trạm gốc mục tiêu
TCH	Traffic CHannel	Kênh lưu lượng
TS	Time Slot	Khe thời gian
UE	User Equipment	Thiết bị người sử dụng
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications	Truyền thông độ trễ thấp và độ tin cậy rất cao
WSN	Wireless Sensor Network	Mạng cảm biến không dây

LỜI MỞ ĐẦU

I. Lý do chọn đề tài

Các hệ thống thông tin vô tuyến (HTTTVT) đã và đang được phát triển với tốc độ nhanh chóng cả về số lượng hệ thống, số người dùng, thiết bị và số lượng kết nối. Chúng cho phép người dùng, các thiết bị, máy móc kết nối với Internet mọi lúc, mọi nơi và tạo khả năng hỗ trợ đa dạng ứng dụng trong mọi lĩnh vực của đời sống. Tính đến cuối năm 2021, số lượng thuê bao di động toàn cầu đã là 5.3 tỉ (chiếm 67% dân số toàn cầu) với số lượng kết nối thông qua mô đun nhận dạng thuê bao là 8.3 tỉ, và số lượng các kết nối IoT là 15.1 tỉ [25].

Số lượng lớn người dùng, thiết bị và kết nối cùng với lưu lượng ngày càng gia tăng, bao gồm cả lưu lượng thoại, lưu lượng Internet và lưu lượng truyền thông kiểu máy MTC (Machine Type Communications), đang đặt ra nhiều thách thức kỹ thuật mới đối với các HTTTVT, trong đó điển hình là vấn đề bảo đảm hiệu năng, cụ thể là chất lượng kết nối của HTTTVT [1-2].

Hiệu năng là vấn đề rất rộng đã được chỉ ra trong các tiêu chuẩn viễn thông quốc tế, điển hình như: chất lượng dịch vụ, duy trì kết nối [35-36], độ sẵn sàng dịch vụ, tỉ lệ thất bại cuộc gọi (liên quan cuộc gọi mới), tỉ lệ rớt cuộc gọi chuyển giao, tỉ lệ mất gói, độ trễ đầu cuối, tỉ lệ lỗi bit, v.v. [37-38, 110] cũng như được nêu trong nhiều công trình nghiên cứu, điển hình như [26-28, 34-35]. Đặc biệt, tổ chức Liên minh Viễn thông Quốc tế ITU-T đã ban hành một tiêu chuẩn ITU-T Y.2225 năm 2018 [36] về yêu cầu duy trì kết nối trong ngữ cảnh HTTTVT thế hệ mới gồm sự kết hợp giữa mạng di động, mạng không dây và Internet vạn vật IoT (Internet of Things). Trong tiêu chuẩn này, ITU-T đã chỉ ra yêu cầu duy trì kết nối bao gồm bảo đảm chuyển giao HO (Handover), chống gián đoạn và bảo đảm an toàn kết nối [36]. Đây được coi là những tiêu chí bao trùm nhất về hiệu năng mà các HTTTVT cần đạt được.

Chuyển giao HO cần thiết khi một thiết bị di động UE (User Equipment) di chuyển vượt ra ngoài vùng phủ sóng của một trạm gốc BS (Base Station) đang phục vụ nó, hoặc khi có vật cản che chắn nó với trạm gốc, hoặc khi thiết bị UE bị suy hao

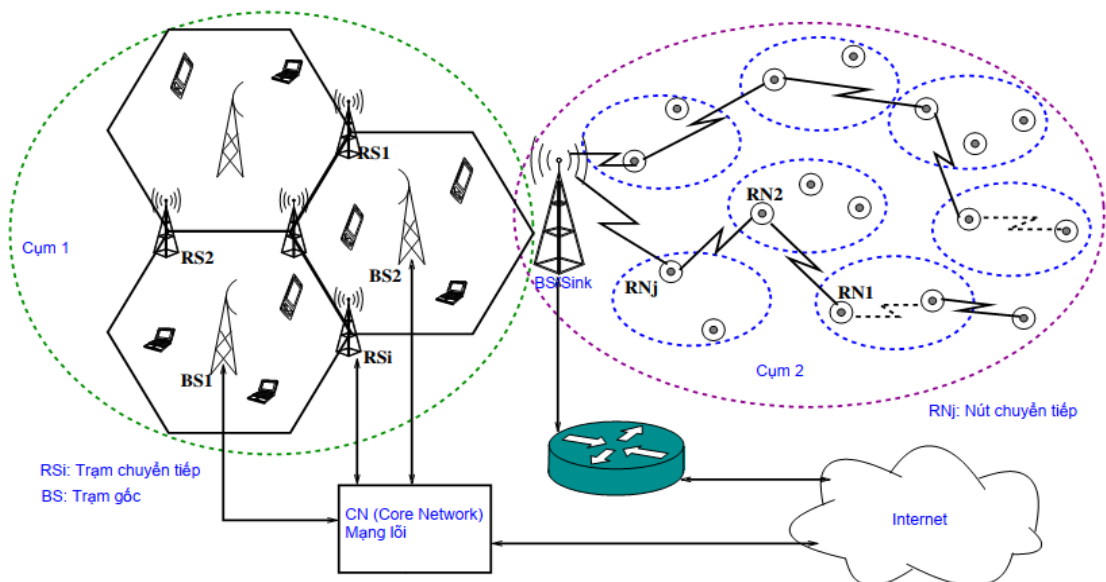
tín hiệu do fading hay nhiễu kênh vô tuyến [3-7]. Nếu BS nơi MU di chuyển đến mà không có đủ kênh thuê bao (không đủ tài nguyên vô tuyến) để đáp ứng, cuộc gọi HO của MU sẽ bị rớt (dropped). Xác suất rớt cuộc gọi CDP (Call Dropping Probability) được coi là chỉ số hiệu năng quan trọng nhất đối với các HTTTVT trong việc bảo đảm khả năng thành công cho các cuộc gọi có chuyển giao [8, 5, 34-36, 2, 9-10]. Kỹ thuật chuyển tiếp (Relay Techniques) thường được sử dụng để cải thiện chất lượng kết nối khi chuyển giao trong các HTTTVT. Các trạm chuyển tiếp RS (Relay Station) hay các nút chuyển tiếp RN (Relay Node) cung cấp chức năng hỗ trợ chuyển giao kết nối từ trạm nguồn S (Source) đến trạm đích D (Destination), nghĩa là giữa các trạm gốc BS [26, 33, 54, 119, 124, 121, 127], hoặc chúng là các nút trung gian chuyển tiếp lưu lượng trong mô hình truyền thông vô tuyến đa chặng MH (Multi-Hop) thường được áp dụng trong các MTC (Machine Type Communications) [29-31, 3, 21-22, 6].

Một mặt khác, chức năng duy trì kết nối có thể bị can thiệp (chủ quan, khách quan), gây nhiều cản trở hoạt động chuyển tiếp, đặc biệt là đối với các trạm chuyển tiếp vô tuyến trợ giúp cho các hoạt động chuyển giao cuộc gọi [11-17]. Xác suất dừng OP (Outage Probability) và xác suất chặn IP (Intercept Probability) cũng được xác định là các chỉ số hiệu năng quan trọng đối với các HTTTVT, đặc biệt đối với các HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp [12, 15-16, 18-20]. Xác suất chặn IP là xác suất mà hệ thống ngăn chặn được khả năng can thiệp gây nhiễu dẫn đến nguy cơ gián đoạn kết nối [61-62, 65]. Xác suất dừng OP là xác suất mà hệ thống sẽ dừng (không thể duy trì tiếp kết nối) khi tín hiệu bị suy giảm nhỏ hơn một mức ngưỡng cho phép của hệ thống [63-64, 66].

Như phân tích ở trên có thể thấy, vấn đề duy trì kết nối (chuyển giao cuộc gọi thành công, chống gây nhiễu cản trở làm gián đoạn kết nối) được tham chiếu đến các tiêu chí hiệu năng về CDP (Call Dropping Probability), OP (Outage Probability) và IP (Intercept Probability). Đây là vấn đề đang rất được cộng đồng nghiên cứu quan tâm trong ngữ cảnh các HTTTVT thế hệ mới và là trọng tâm nghiên cứu của luận án này.

II. Định hướng nghiên cứu

Các HTTTVT thế hệ mới thường bao gồm nhiều chặng kết nối như mô tả trong các tiêu chuẩn viễn thông quốc tế, điển hình như tiêu chuẩn ITU-T/Y3104 [11], ITU-T/Y.2255 [36] cũng như các nghiên cứu như [18, 20-21, 2-3, 13, 23-24, 6]. Hình 1 được tham khảo từ tài liệu [3] về kiến trúc mạng đa chặng của HTTTVT thế hệ mới (5G) có sự kết hợp hỗn hợp giữa các cụm mạng thông tin vô tuyến dạng tổ ong (cellular) và cụm HTTTVT kết nối IoT. Các trạm chuyển tiếp RS (ký hiệu là RS_i) có chức năng chuyển tiếp các kênh lưu lượng TCH (Traffic Channel) giữa các trạm gốc BS (xem cụm 1) và các nút chuyển tiếp RN (ký hiệu là RN_j) thực hiện chuyển tiếp lưu lượng qua các nút trung gian trong cụm 2.



Hình 1. Sơ đồ kiến trúc HTTTVT đa chặng thế hệ mới (tham khảo từ [3])

Trong khuôn khổ luận án này, duy trì kết nối xuyên suốt từ đầu cuối tới đầu cuối trong HTTTVT đa chặng như mô tả trên Hình 1 đặt ra hai trọng tâm nghiên cứu: nghiên cứu kỹ thuật chuyển tiếp trong chuyển giao cuộc gọi ở cụm 1 nhằm cải thiện chỉ số hiệu năng về xác suất rớt cuộc gọi CDP và nghiên cứu kỹ thuật chuyển tiếp lưu lượng qua các nút trung gian trong cụm 2 nhằm chống gây nhiễu tác động làm gián đoạn kết nối để đạt mục tiêu cải thiện các chỉ số hiệu năng về xác suất dừng OP và xác suất chặn IP.

Các trạm chuyển tiếp đã được khuyến nghị trong các tiêu chuẩn viễn thông quốc tế cho các HTTTVT thế hệ mới, điển hình như các tiêu chuẩn ITU-T/Y.2255 [36], tiêu chuẩn ITU-T/Y3104 [11], [111]. Khá nhiều nghiên cứu trong một số năm qua cũng đã đề cập đến việc sử dụng các trạm chuyển tiếp cho các HTTTVT thế hệ mới, điển hình như: sử dụng RS chủ yếu cho chuyển giao cuộc gọi thoại [32-34], sử dụng kiến trúc RS với chức năng chuyển tiếp đơn giản các kênh lưu lượng TCH [46-47, 53], xem xét vấn đề cải thiện chuyển giao trong 4G/LTE với RS [54, 115, 121], kết hợp RS với tái sử dụng tần số và quản lý di động [104, 120, 122], nghiên cứu kỹ thuật chuyển giao trong HTTTVT kết hợp giữa 4G/5G và IoT [101, 95, 124]. Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng đã chỉ ra những vấn đề tồn tại cần giải quyết liên quan đến chuyển giao và duy trì kết nối, đặc biệt trong HTTTVT thuộc cụm 1 (xem Hình 1). Có thể thấy hai vấn đề nổi bật từ các nghiên cứu liên quan như sau:

- 1) Vai trò của các trạm chuyển tiếp RS chưa được tận dụng hiệu quả nhằm cải thiện tiêu chí hiệu năng duy trì kết nối thông qua chỉ số hiệu năng CDP. Giải pháp dự trữ kênh để cải thiện CDP khi chuyển giao thay vì tận dụng các trạm RS được đề xuất trong [115, 118]. Giải pháp này có thể dẫn đến lãng phí tài nguyên vô tuyến. Các nghiên cứu [40-42, 119, 121] đề xuất tính toán tỉ lệ chuyển giao nhằm đáp ứng CDP. Tuy nhiên cách tính toán CDP thường khá phức tạp không phản ánh đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến CDP và chủ yếu vẫn tập trung vào xác suất chuyển giao thất bại chứ không nhằm vào mục tiêu chính là CDP. Tương tự, nhiều nghiên cứu chỉ tập trung vào cải thiện tỉ lệ chuyển giao thất bại như [46] hay tỉ lệ chuyển giao thành công [122-123, 127], song không đề cập đến vấn đề tận dụng các trạm chuyển tiếp. Một số nghiên cứu [50, 56-57, 125] đề xuất RS song sử dụng kỹ thuật mượn kênh theo phương pháp truyền thống của tác giả Rappaport [126], dẫn đến khả năng tăng tỉ lệ chuyển giao nội vùng, rất khó tài sắp xếp lại kênh vô tuyến trong trạm gốc BS cũng như khá phức tạp trong tính toán vùng phủ sóng, số lượng trạm chuyển tiếp.

2) Vấn đề khai thác các trạm chuyển tiếp RS trong điều kiện lưu lượng cao ở một vùng mạng cục bộ (điều kiện xấu nhất – worst case) khi có nguy cơ nghẽn cục bộ nghiêm trọng xảy ra vẫn chưa được xem xét giải quyết cụ thể. Khá nhiều nghiên cứu mới chỉ dừng ở việc cải thiện chất lượng kết nối trong trạm gốc BS hoặc mở rộng vùng phục vụ của BS [32, 45, 48, 51-52, 54]. Các tác giả [46, 125] đạt được hiệu quả cải thiện đáng kể xác suất chuyển giao thành công, song mới chỉ dừng ở việc tính toán với lưu lượng bình thường, chưa đề cập các trạm chuyển tiếp trong tính toán CDP khi tất cả các trạm trong một vùng mạng đều bận. Tương tự, tài liệu [122, 120, 124] chỉ tập trung vào nâng cao xác suất chuyển giao thành công trong điều kiện lưu lượng bình thường.

Như vậy, các câu hỏi nghiên cứu có thể đặt ra là: Có thể ước lượng tỉ lệ chuyển giao theo mô hình đơn giản hơn mà vẫn bảo đảm được tính toán CDP để duy trì chất lượng kết nối hay không? Có thể xem xét số lượng kết nối đáp ứng yêu cầu chuyển giao cho MU và tận dụng hiệu quả hoạt động của các trạm RS để hỗ trợ chuyển giao trong điều kiện lưu lượng cao (nghĩa là khi tất cả các kết nối trong các trạm gốc BS ở một vùng nhất định đều đang bị chiếm dụng) hay không?

Giải pháp tận dụng hiệu quả các trạm chuyển tiếp RS và tính toán CDP trong điều kiện lưu lượng cao ở các vùng mạng cục bộ có nguy cơ nghẽn cục bộ nghiêm trọng và không có đủ dự trữ kênh tại các trạm gốc BS cho các cuộc gọi chuyển giao, đặc biệt là cho các cuộc gọi số liệu thời gian thực trong các HTTT VT thế hệ sau (4G và beyond) đang là vấn đề chưa được quan tâm nhiều trong các nghiên cứu tới nay, và đó là một trọng tâm nghiên cứu của luận án này.

Liên quan đến chuyển tiếp lưu lượng và duy trì kết nối trong HTTT VT ở cụm 2 (xem Hình 1), qua khảo sát các nghiên cứu liên quan có thể thấy một vấn đề nổi bật như sau. Vẫn chưa có nghiên cứu nào đưa ra một biểu thức tính toán tường minh cho các giá trị OP và IP đa chặng cũng như mối quan hệ giữa chúng mà có xem xét đầy đủ các tham số liên quan trong điều kiện tỉ số tín hiệu trên nhiễu ở mức cao. Các tham số như: lựa chọn nút gây nhiễu, số lượng ăng ten, mô hình truyền thông, ảnh hưởng của phân cứng không hoàn hảo, mô hình kênh Fading vẫn chưa được xem xét tổng

hợp trong tính toán OP và IP. Trong các nghiên cứu hiện có, xác suất OP và IP được tính toán trong kiến trúc HTTTVT đa chặng có kết hợp mạng vô tuyến dạng tổ ong (Cellular) như ở cụm 1 (Hình 1) kết hợp với mạng không dây (điển hình là mạng WSN) như ở cụm 2 (Hình 1) [53, 81-82, 76, 63, 128, 14, 19-20, 12, 16-17]. Đa số nghiên cứu lựa chọn tính toán OP và IP cho các HTTTVT đa chặng dựa trên mô hình mạng cảm biến không dây WSN (Wireless Sensor Networks) [95-97, 101] do WSN được coi là nền tảng cho IoT trong các HTTTVT thế hệ mới như đã chỉ ra trong tiêu chuẩn viễn thông quốc tế ITU-T. Y3104 [11]. Kỹ thuật chuyển tiếp phổ biến nhất trong mạng không dây kiểu WSN là sử dụng giao thức LEACH [87-88]. Các nghiên cứu [29, 66] chủ yếu tập trung vào mô hình chuyển tiếp; nghiên cứu [63] đề xuất lựa chọn an-ten, số nút và vị trí nút chuyển tiếp. Các giải pháp cải thiện OP cho HTTTVT theo mô hình đa chặng MH (Multi-Hops) được đề cập trong [58, 128]. Nhiều suy hao kênh truyền được xem xét trong [66, 69]. Các tài liệu [61-63] đề cập giải pháp cải thiện OP và IP dựa trên cơ chế tối ưu hóa chặng và cơ chế truyền dẫn đa chặng theo hình thức đơn công và song công. Các tác giả trong [76-79, 69] xem xét ảnh hưởng của thiết bị phần cứng không hoàn hảo đến chỉ số hiệu năng IP của HTTTVT. Vấn đề gây nhiễu và hợp tác gây nhiễu được đề cập trong [30, 67, 99, 69, 71, 75, 82, 129]. Việc lựa chọn nút chuyển tiếp và nút gây nhiễu được xem xét trong [71, 82] để tính toán IP cho các HTTTVT chuyển tiếp gồm hai chặng. Mối quan hệ giữa OP và IP được xem xét trong các tài liệu [129, 74] trong mạng chuyển tiếp hai chặng dưới điều kiện ước lượng thông tin trạng thái kênh không hoàn hảo.

Từ kết quả khảo sát các công trình nghiên cứu liên quan vấn đề chuyển tiếp lưu lượng và duy trì kết nối trong HTTTVT với các chỉ số hiệu năng OP và IP đã nêu trên, có thể nhận thấy vấn đề sau. Nghiên cứu phương thức tính toán các giá trị OP và IP và mối quan hệ giữa chúng cho các HTTTVT chuyển tiếp đa chặng trong điều kiện có xem xét đầy đủ các tham số liên quan cần thiết và điều kiện tỉ số tín hiệu nhiễu ở mức cao (nghĩa là khi có tác nhân gây nhiễu cản trở, gây nguy cơ gián đoạn kết nối) đang là một yêu cầu thực tiễn. Đây là trọng tâm nghiên cứu thứ hai của luận án này.

Khảo sát các nghiên cứu liên quan cũng cho thấy, nhiều tác giả nghiên cứu OP và IP trong ngữ cảnh an toàn bảo mật lớp vật lý, hoặc kỹ thuật thu hoạch năng lượng cho nút mạng vô tuyến. Tuy nhiên, nghiên cứu về OP và IP trong luận án này chỉ đề cập đến vấn đề nhiễu gây ra cản trở duy trì kết nối nhằm bảo đảm tiêu chí hiệu năng về chất lượng duy trì kết nối mà không đề cập sâu vào an toàn bảo mật thông tin lớp vật lý cũng như thu hoạch năng lượng vì đây là những lĩnh vực rất rộng.

III. Mục tiêu nghiên cứu

Luận án đặt ra hai mục tiêu sau để nghiên cứu vấn đề duy trì và cải thiện chất lượng kết nối có liên quan đến kỹ thuật chuyển tiếp trong chuyển giao cuộc gọi, vấn đề chống nhiễu can thiệp làm gián đoạn kết nối với trọng tâm là các chỉ tiêu hiệu năng về CDP, OP và IP trong điều kiện lưu lượng cao cục bộ nghiêm trọng và tỉ lệ nhiễu cao của HTTTVT thế hệ mới.

Các mục tiêu cụ thể gồm:

- Nghiên cứu giải pháp tận dụng hiệu quả các trạm chuyển tiếp RS để hỗ trợ chuyển giao thành công các cuộc gọi, bao gồm cả cuộc gọi thoại và cuộc gọi số liệu thời gian thực, và tính toán CDP trong điều kiện lưu lượng cục bộ cao nghiêm trọng của các HTTTVT thế hệ mới.
- Nghiên cứu phương thức tính toán tường minh tiêu chí hiệu năng bảo đảm duy trì kết nối không bị gián đoạn với các giá trị OP và IP toàn chặng trong điều kiện xem xét đầy đủ các tham số liên quan và tỉ lệ tín hiệu nhiễu ở mức cao

IV. Phạm vi nghiên cứu

- HTTTVT có sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp trong chuyển giao cuộc gọi thoại và số liệu thời gian thực trong các vùng có lưu lượng rất cao. Điều kiện lưu lượng rất cao được đặt ra khi tất cả các kết nối vô tuyến trong các trạm gốc trong một khu vực nhất định của hệ thống đều đang bị chiếm dụng, làm cho các cuộc gọi chuyển giao trong vùng này có khả năng bị thất bại rất cao.
- Tiêu chí hiệu năng duy trì và cải thiện chất lượng kết nối trong hoạt động chuyển giao tập trung vào chỉ số CDP.

- Tiêu chí hiệu năng duy trì và cải thiện chất lượng kết nối liên quan đến chống nhiễu can thiệp làm gián đoạn kết nối tập trung vào chỉ số OP và IP toàn chặng. Phân vùng HTTT VT được xem xét là cụm mạng không dây, được mô hình với trường hợp sử dụng mạng WSN với giao thức LEACH. Tác nhân gây nhiễu làm gián đoạn kết nối được mô hình hóa với trường hợp sử dụng kỹ thuật thu hoạch năng lượng và gây nhiễu qua kênh vô tuyến trong điều kiện phân cứng không hoàn hảo, mô hình kênh pha đỉnh Rayleigh, các nút chuyển tiếp đơn ăng ten và đa ăng ten.

V. Đối tượng nghiên cứu

- HTTT VT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp.
- Các tiêu chí hiệu năng về duy trì chất lượng kết nối, cụ thể là các chỉ số xác suất rớt cuộc gọi CDP trong các vùng lưu lượng rất cao của các hệ thống thông tin di động sử dụng trạm chuyển tiếp và xác suất dừng OP, xác suất chặn IP toàn chặng trong hệ thống vô tuyến chuyển tiếp xét trong trường hợp sử dụng mô hình mạng không dây.

VI. Phương pháp nghiên cứu

- Khảo sát các nghiên cứu liên quan để phân tích, đánh giá, so sánh.
- Phân tích lý thuyết dựa vào các công cụ toán học.
- Xây dựng các chương trình mô phỏng bằng phần mềm Matlab để mô hình hóa hoạt động của các hệ thống nhằm chứng minh và đối chiếu với các phân tích lý thuyết.

VII. Những đóng góp của luận án

Luận án tập trung vào hai đóng góp chính được tóm tắt như sau đây.

- Đề xuất giải pháp tận dụng hiệu quả hoạt động của các trạm chuyển tiếp RS để hỗ trợ chuyển giao thành công, giảm tối thiểu xác suất rớt cuộc gọi chuyển giao thời gian thực trong các vùng có lưu lượng rất cao có nguy cơ nghẽn cục bộ.
- Đề xuất các biểu thức tính toán tường minh cho tiêu chí hiệu năng duy trì và cải thiện chất lượng kết nối liên quan đến chống nhiễu can thiệp làm gián đoạn

kết nối, cụ thể là các biểu thức OP và IP toàn chặng, trong điều kiện xem xét đầy đủ các tham số cần thiết liên quan và tỉ lệ tín hiệu nhiễu ở mức cao.

- Luận án đã thực hiện tính toán lý thuyết, xây dựng mô phỏng để kiểm chứng kết quả nghiên cứu lý thuyết.

VIII. Cấu trúc luận án

Luận án được bố cục với 3 chương, cùng với phần Lời mở đầu, Kết luận, và phần Phụ lục. Các chương của luận án được kết cấu như sau:

- **Chương 1: Tổng quan**

Nội dung của Chương 1 sẽ tập trung vào các khái niệm và nguyên lý cơ bản của các hệ thống thông tin vô tuyến, các mô hình hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp, và các tham số hiệu năng của các hệ thống này. Đồng thời, chương này cũng sẽ tổng hợp các nghiên cứu liên quan đến các hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp và tổng hợp một số vấn đề tồn tại để định hướng nghiên cứu cụ thể cho luận án.

- **Chương 2: Giải pháp duy trì và cải thiện chất lượng kết nối trong hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng trạm chuyển tiếp**

Nội dung của chương sẽ tập trung vào kỹ thuật chuyển tiếp kênh để khai thác tối đa tài nguyên vô tuyến thông qua hoạt động của các trạm chuyển tiếp trong điều kiện lưu lượng rất cao. Tính toán CDP trong các mô hình mạng khác nhau trong hệ thống thông tin di động để duy trì kết nối cho các cuộc gọi thời gian thực, bao gồm cả cuộc gọi thoại và cuộc gọi số liệu. Các mô hình mô phỏng được xây dựng để kiểm nghiệm các tính toán lý thuyết.

- **Chương 3: Tính toán xác suất dừng và xác suất chặn toàn chặng để bảo đảm duy trì kết nối trong hệ thống vô tuyến chuyển tiếp đa chặng.**

Nội dung Chương 3 sẽ tập trung vào việc tính toán các tham số hiệu năng OP và IP toàn chặng; phân tích mối quan hệ của OP và IP thông qua các công thức toán học tường minh trong hệ thống thông tin vô tuyến chuyển tiếp thông qua mô hình WSN MH LEACH. Các tham số sẽ được đề cập trong mô hình này là việc sử dụng kỹ thuật thu hoạch năng lượng để hợp tác gây nhiễu và ảnh hưởng của phần cứng

không hoàn hảo trên kênh pha đỉnh Rayleigh. Việc tính toán cũng sẽ quan tâm đến các tham số như số lượng ăng ten của các nút, số lượng các cụm trong mạng, số lượng nút trong các cụm, mô hình lựa chọn ăng ten và lựa chọn nút gây nhiễu. Ngoài ra, các mô hình thực nghiệm sẽ được xây dựng để kiểm chứng các kết quả phân tích lý thuyết.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

Tóm tắt:

Chương 1 trình bày tổng quan về HTTT VT, kỹ thuật chuyển tiếp, một số vấn đề về hiệu năng của HTTT VT và các nghiên cứu liên quan đến luận án. HTTT VT thế hệ mới được trình bày khái quát trên quan điểm tiếp cận hai cụm kiến trúc: truyền thông di động hướng đến con người và truyền thông kiểu máy. Tương ứng, kỹ thuật chuyển tiếp được trình bày theo hai nhóm: nhóm chuyển tiếp trong thông tin di động và nhóm chuyển tiếp trong HTTT VT đa chặng. Tiếp đó, luận án tập trung vào tiêu chí hiệu năng quan trọng nhất đã được chỉ ra trong tiêu chuẩn quốc tế ITU-T Y.2225 về yêu cầu duy trì kết nối trong ngữ cảnh HTTT VT thế hệ mới. Tiêu chí hiệu năng này được thể hiện qua ba chỉ số hiệu năng chính: xác suất rớt cuộc gọi CDP nhằm duy trì kết nối khi chuyển giao trong điều kiện lưu lượng cao, xác suất dùng OP và xác suất chặn IP toàn chặng trong duy trì kết nối cho truyền thông đa chặng. Phần cuối chương trình bày các nghiên cứu liên quan đến các vấn đề nêu trên, chỉ ra vấn đề tồn tại và trọng tâm nghiên cứu của luận án.

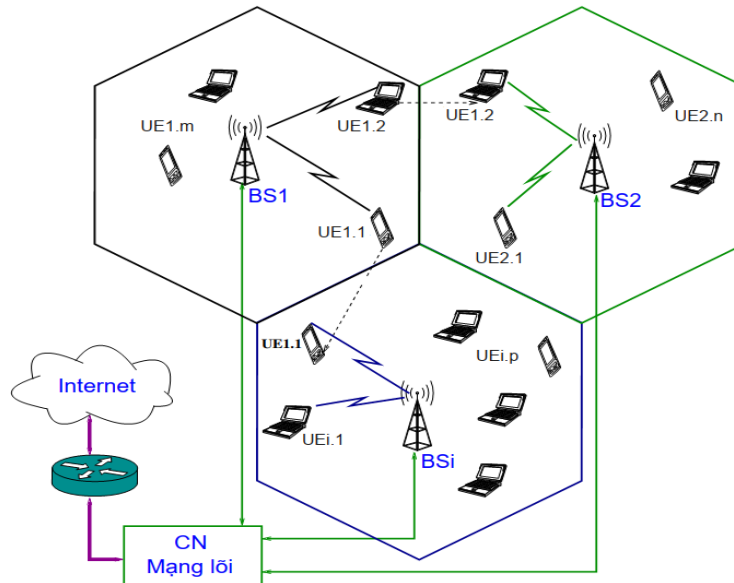
1.1 Tổng quan về hệ thống thông tin vô tuyến

1.1.1 Hệ thống thông tin di động

Thông tin di động là một hình thái của thông tin vô tuyến có khả năng cung cấp kết nối tới các thiết bị đầu cuối của người sử dụng thông qua môi trường không gian để bảo đảm khả năng di chuyển tự do trong quá trình trao đổi thông tin của con người. Người sử dụng trong hệ thống này được gọi là người sử dụng di động MU (Mobile User). Di động trong trường hợp này bao gồm cả ý nghĩa về khả năng di chuyển tự do của người dùng và của các thiết bị.

Mô hình tổng quát của một hệ thống thông tin di động được mô tả trong Hình 1.1. Trong Hình 1.1, CN là mạng lõi (Core Network) để thực hiện các chức năng như chuyển mạch và định tuyến cuộc gọi, định nghĩa dịch vụ di động, quản lý di động, bảo đảm kết nối vô tuyến cho các MU và tính cước; mạng truy nhập vô tuyến RAN

(Radio Access Network) bao gồm hệ thống các trạm gốc BS (Base Station) BS1, BS2, và BSi để cung cấp các kết nối vô tuyến tới các MU; và các MU UE1.1 và UE2.1 đại diện cho dịch vụ thoại, và UE1.2 và UEi.1 đại diện cho dịch vụ dữ liệu. Trong các hệ thống thế hệ 4 (4G) và sau 4G, cả 2 loại hình dịch vụ thoại và số liệu đều có thể được tích hợp trong một thiết bị người sử dụng UE (User Equipment) [26-27, 32-34, 54].



Hình 1.1 Mô hình hệ thống thông tin di động

Các hoạt động cơ bản của một hệ thống thông tin di động được thể hiện thông qua thủ tục thực hiện 2 loại hình cuộc gọi: cuộc gọi mới và cuộc gọi chuyển giao HO (Hand Over). Cuộc gọi mới là loại hình cuộc gọi khi MU đang đứng trong vùng phục vụ của một BS cụ thể nào đó và khởi tạo yêu cầu cấp một kết nối vô tuyến cho việc thực hiện trao đổi thông tin thông qua kênh truy nhập ngẫu nhiên RACH (Random Access CHannel). Cuộc gọi HO là loại hình cuộc gọi khi MU di chuyển từ vùng phục vụ của 2 BS liền kề nhau trong quá trình trao đổi thông tin.

Có thể nói rằng hoạt động của hệ thống thông tin di động gắn liền với các hoạt động cấp phát tài nguyên vô tuyến tới các MU để đáp ứng nhu cầu gọi của người sử dụng, và quản lý việc di chuyển của MU để bảo đảm kết nối cho các cuộc gọi HO. Như vậy, các bài toán liên quan đến việc cung cấp và khai thác tài nguyên tần số để đáp ứng và bảo đảm cho các nhu cầu kết nối của các MU luôn là những thách thức lớn trong các nghiên cứu về thông tin di động [111-114]. Có thể kể ra các bài toán cơ

bản để khai thác hiệu quả tài nguyên tần số trong các hệ thống thông tin di động là: sử dụng lại tần số [34, 104-107], phân chia tần số [34, 54-103], và các kỹ thuật đa truy nhập vô tuyến [34, 26-27, 108]. Các bài toán này cũng được nghiên cứu và phát triển cùng với sự phát triển của các hệ thống thông tin di động [32, 34, 103-104, 106-108].

Thế hệ đầu tiên 1G (1st Generation) của thông tin di động được bắt đầu từ năm 1920 với dịch vụ thoại, điều chế tương tự, và sử dụng kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo tần số FDMA (Frequency Division Multiple Access). FDMA cho phép phân chia băng tần dành cho hệ thống thành các tần số sóng mang con, trong đó mỗi sóng mang con sẽ được sử dụng để mang các tín hiệu cuộc gọi của các MU khi có yêu cầu. FDMA được sử dụng ngay từ đầu trong các hệ thống di động tương tự thế hệ đầu tiên, và là nền tảng cho việc phân chia tần số và kết hợp với các kỹ thuật đa truy nhập khác trong thông tin di động [34].

Các hệ thống 2G sử dụng các kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo thời gian TDMA (Time Division Multiple Access) kết hợp với FDMA (TDMA/FDMA) hoặc kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo mã CDMA (Code Division Multiple Access) kết hợp FDMA (CDMA/FDMA). Mặc dù là hệ thống di động số thế hệ đầu tiên, các hệ thống 2G chủ yếu phục vụ cho các dịch vụ thoại, và các dịch vụ số liệu một cách hạn chế như dịch vụ tin nhắn ngắn và truy cập Internet tốc độ thấp. Không những thế, các dịch vụ này được truyền trong những sóng mang có băng thông hẹp như là 200 kHz với các hệ thống TDMA và 1.25 MHz với các hệ thống CDMA [34, 103].

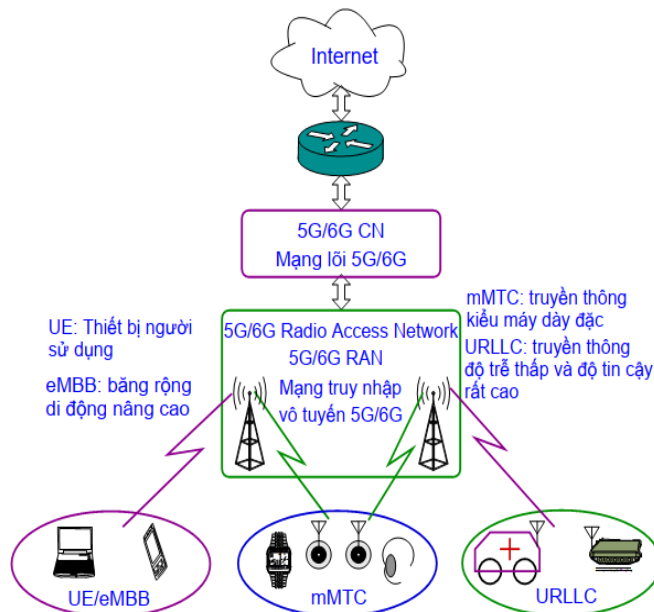
Các hệ thống 3G sử dụng kỹ thuật CDMA băng rộng W-CDMA (Wideband CDMA) với mong muốn cung cấp dịch vụ di động băng thông rộng hơn tới các MU. Mặc dù sử dụng băng tần 5 MHz cho W-CDMA, các hệ thống 3G cũng chỉ đạt được các tốc độ trao đổi dữ liệu là 2 Mb/s cho người đi bộ hoặc di chuyển tốc độ thấp, và 384 kb/s cho các phương tiện [103].

Các hệ thống 4G sử dụng kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo tần số trực giao OFDMA (Orthogonal FDMA) cho hướng lên và FDMA đơn sóng mang SC-FDMA (Single Carrier FDMA) cho hướng xuống kết hợp với kỹ thuật đa ăng ten MIMO

(Multiple Input Multiple Output) nhằm cung cấp các dịch vụ băng rộng tốc độ cao cho các dịch vụ số liệu thời gian thực. Các MU trong các hệ thống 4G có thể đạt được tốc độ trao đổi dữ liệu lên đến 300 Mb/s với tốc độ di chuyển lên đến 120 km/h [32-33, 54]. Thông qua các kỹ thuật đa truy nhập và điều chế, kết hợp MIMO, các hệ thống 4G đáp ứng một cách linh hoạt với các yêu cầu về băng thông cho các loại hình dịch vụ thông tin khác nhau của người sử dụng, cũng như khai thác tài nguyên tần số một cách hiệu quả hơn.

1.1.2 Hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới

Các hệ thống 5G/6G được coi là điển hình cho HTTTVT thế hệ mới như mô tả khái quát trong Hình 1.2 [26-27, 102, 108]. Hệ thống 5G sử dụng kỹ thuật đa truy nhập không trực giao NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) kết hợp đa ăng ten dày đặc (massive MIMO) để đạt đến các tốc độ cao hơn rất nhiều so với 4G cho các dịch vụ di động cả về tốc độ trao đổi dữ liệu và tốc độ di chuyển của MU. 5G cung cấp tốc độ dữ liệu 20Gb/s ở hướng xuống và 10Gb/s ở hướng lên với độ trễ 4 mili-giây (4ms) ở mặt phẳng người sử dụng và 10ms ở mặt phẳng điều khiển. Đồng thời, 5G cũng hỗ trợ tốc độ di chuyển lên đến 500 km/h cho các MU.



Hình 1.2 Hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới

Mặc dù vẫn trong giai đoạn nghiên cứu, nhưng các khái niệm về hệ thống thông tin di động thế hệ 6 (6G) đã được tổng hợp trong cuốn sách xuất bản năm 2021

[26]. Trong [26], 6G hướng tới việc cung cấp các dịch vụ di động thông minh và cá nhân hóa theo tác vụ tới người sử dụng thông qua hàng tỉ thiết bị vô tuyến bao gồm các cảm biến và các thiết bị di động sẽ được lắp đặt tại nhà, trên ô tô, trong nhà máy, và ở hầu hết mọi vị trí mà con người muốn nhận biết, giám sát, điều khiển, và khai thác thông tin. Một số đặc điểm chính của 6G là: dải tần làm việc Terahertz (10^{12} Hz) với khả năng cung cấp kết nối trên 10 tỉ thiết bị trong 1km^2 với độ trễ nhỏ hơn 0.1ms ở mặt phẳng người sử dụng; loại bỏ tín hiệu dẫn đường (pilot-free communications); hội tụ truyền thông, cảm biến và điện toán đám mây; và cấu hình mạng di động 4 chiều (4D Cellular network) thông qua việc khai thác các thiết bị bay không người lái UAV (Unmanned Aerial Vehicle) như là các trạm gốc di động mBS (mobile Base Station).

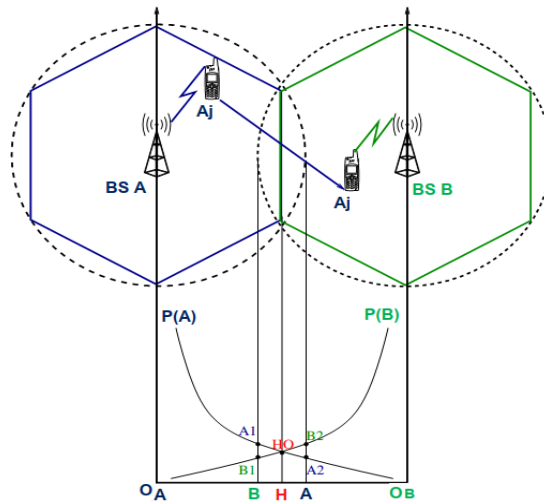
Trong Hình 1.2, các ứng dụng ở tầng dưới cùng bao gồm 3 nhóm đối tượng chính: 1) di động băng rộng nâng cao eMBB (enhanced Mobile Broadband), 2) truyền thông giữa các thiết bị với mật độ dày đặc mMTC (massive Machine Type Communications), và 3) truyền thông với độ trễ thấp và độ tin cậy rất cao URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications). eMBB là các ứng dụng lấy con người làm trung tâm nhằm thỏa mãn các nhu cầu trao đổi thông tin (bao gồm cả thông tin thoại và thông tin số liệu) với tốc độ cao và lưu lượng lớn giữa những người sử dụng thông qua các UE di động băng rộng như là các điện thoại di động, laptop, máy tính bảng. Ngược lại với eMBB, mMTC và URLLC là các ứng dụng lấy thiết bị làm trung tâm. Trong đó, mMTC tập trung vào việc cung cấp các kết nối cho một số lượng lớn các thiết bị băng hẹp đơn giản để gửi hoặc nhận các thông tin trong một vùng rộng lớn với lưu lượng nhỏ như là các cảm biến đơn giản, các thiết bị đo, các thiết bị theo dõi và giám sát đeo tay. URLLC được sử dụng trong các ứng dụng có tính thời gian thực và đòi hỏi độ tin cậy rất cao như là các thiết bị thực tế ảo, các xe tự hành, và các robot thông minh phục vụ cho công việc tìm kiếm cứu nạn hoặc phẫu thuật từ xa [102, 108].

Có thể thấy rằng với sự trợ giúp của IoT và điện toán đám mây, các HTTTVT thế hệ mới đã mở ra một kỷ nguyên mới trong truyền thông di động, kỷ nguyên của

truyền thông kiểu máy MTC (Machine Type Communications) để gián tiếp phục vụ con người. Theo [102, 108], đến năm 2025 sẽ có khoảng 5 tỉ kết nối 5G IoT MTC, hầu hết đều thông qua các cảm biến vô tuyến. Trong trường hợp này, mạng cảm biến vô tuyến WSN được coi là một nhánh của các HTTTVT thế hệ mới như mô tả tổng quan trong Hình 1 (cụm 2) trong Lời mở đầu của luận án này.

1.1.3 Chuyển giao cuộc gọi trong thông tin di động

Chuyển giao HO được coi là hoạt động đặc trưng của các hệ thống thông tin di động nhằm thỏa mãn nhu cầu trao đổi thông tin liên tục trong quá trình di chuyển của con người. Về mặt kỹ thuật, chuyển giao được hiểu là việc một MU chuyển từ một kênh lưu lượng TCH (Traffic CHannel) này sang một TCH khác trong quá trình đàm thoại [26, 32-34, 103, 133-135]. TCH là kênh logic mang lưu lượng thông tin của các MU trong hệ thống, thực hiện việc kết nối vô tuyến 2 chiều giữa MU và BS. Trong thực tế, chuyển giao được hiểu một cách trực quan là quá trình MU chuyển từ TCH được cấp bởi S-BS sang TCH được cấp bởi T-BS trong quá trình MU di chuyển trong vùng phủ sóng của 2 BS khi đang đàm thoại như mô tả trong Hình 1.3.



Hình 1.3 Bảo đảm kết nối vật lý cho cuộc gọi chuyển giao

Trong Hình 1.3, giả sử rằng MU A_j đứng trong vùng phủ sóng và thiết lập cuộc gọi thành công trên TCH của BS A. Trong quá trình đàm thoại, A_j di chuyển về BS B. Về mặt lý thuyết, vùng phủ sóng của các BS có hình dạng lục giác, nhưng vùng phủ sóng thực tế lý tưởng được coi là hình tròn có bán kính tương ứng là $R = O_AA = O_BB$ trong không gian 2 chiều. Khi A_j di chuyển vào BS B, một TCH của BS này sẽ

phải được cung cấp cho Aj để duy trì cuộc gọi cho MU này. Trong trường hợp BS B không có bất kỳ một TCH nào rảnh để cung cấp cho Aj, cuộc gọi chuyển giao của Aj sẽ được coi là bị rớt khi đang đàm thoại với xác suất thất bại được tính thông qua chỉ số xác suất rớt cuộc gọi CDP [34-35]. Thông thường, về phía người sử dụng, việc bị ngắt một cuộc gọi đang diễn ra mang lại cảm giác khó chịu hơn rất nhiều so với việc bị từ chối một cuộc gọi mới do thiếu kênh TCH. Chính vì thế, các cuộc gọi HO thường có mức độ ưu tiên cao hơn các cuộc gọi mới. Hơn nữa, các cuộc gọi thời gian thực thường đòi hỏi mức độ ưu tiên cao hơn các loại hình dịch vụ không yêu cầu thời gian thực. Như vậy, trong các hệ thống thông tin di động, cuộc gọi HO thời gian thực thường có mức độ ưu tiên cao nhất, cho dù đó là loại hình cuộc gọi thoại hay cuộc gọi số liệu [33-37].

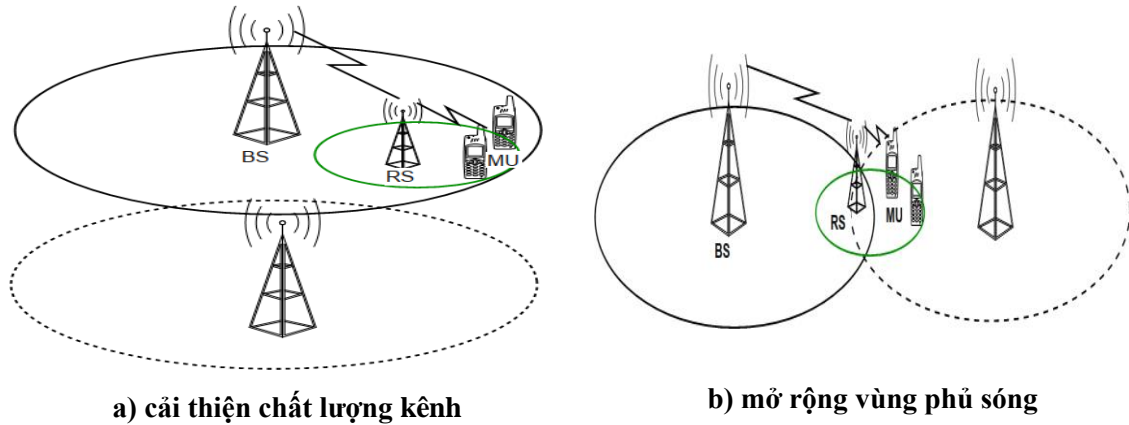
Thông thường, khi một trạm gốc nào đó không đủ TCH để đáp ứng cho các yêu cầu gọi, BS đó được gọi là BS nóng và yêu cầu cấp kênh cho cuộc gọi của MU sẽ bị từ chối. Khái niệm BS nóng được sử dụng để mô tả việc số lượng MU tập trung cao, hoặc lưu lượng cuộc gọi của các MU trong BS đó tăng lên đáng kể. Khi tất cả các BS trong mạng đều nóng, MU sẽ nhận được thông báo nghẽn mạng. Khi nghẽn mạng xảy ra trong một vùng gồm một số BS kề nhau, trường hợp này gọi là nghẽn mạng cục bộ. Như đã đề cập, trên quan điểm của người dùng, việc rớt một cuộc gọi HO sẽ mang lại cảm giác khó chịu hơn nhiều so với việc khóa một cuộc gọi mới với cùng một lý do hệ thống hiện đang bận vì tất cả các kênh đều đang bị chiếm. Chính vì thế, việc duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao luôn là một thách thức cho các hệ thống thông tin di động.

1.2 Kỹ thuật chuyển tiếp trong hệ thống thông tin vô tuyến

1.2.1 Chuyển tiếp trong thông tin di động

Chuyển tiếp trong thông tin di động được đặc biệt quan tâm trong các hệ thống 4G, và trong phiên bản 8 (Release 8) của 3GPP [26, 33, 54] do yêu cầu cao về chất lượng kết nối, điển hình đối với các cuộc gọi dữ liệu. Các trạm chuyển tiếp RS (Relay Station) được sử dụng như là trung gian giữa BS và MU như mô tả trong Hình 1.4. Mục đích chính của việc sử dụng các trạm chuyển tiếp trong di động được đề cập đến

trong [26, 33, 54] là: cải thiện chất lượng kênh truyền giữa BS và MU, và mở rộng vùng phục vụ của BS.



Hình 1.4 Chuyển tiếp trong thông tin di động

Trong Hình 1.4.a), một kết nối chuyển tiếp qua RS được thiết lập khi kết nối vô tuyến trực tiếp giữa BS và MU không bảo đảm chất lượng dưới ảnh hưởng của các yếu tố như mức công suất phát tại BS, nhiễu đường truyền, hoặc chất lượng kênh truyền suy giảm làm cho mức thu tại MU dưới ngưỡng cho phép. Trong Hình 1.4.b), vùng phục vụ của BS được mở rộng tới những MU nằm ở những vị trí cách xa BS thông qua các kết nối giữa BS và RS, và từ RS tới các MU [54].

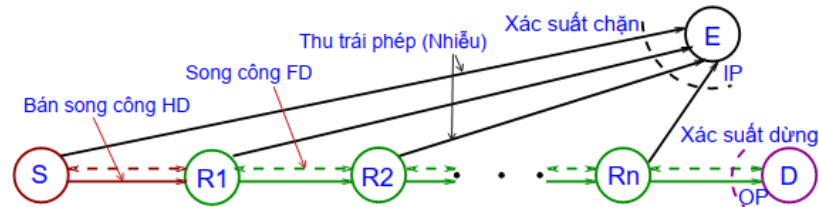
Các HTTT VT thế hệ mới (kể từ 4G) có khả năng sử dụng mật độ cao các trạm RS. Điều đó mở ra cơ hội nâng cao chất lượng duy trì kết nối song cũng đặt ra thêm nhiều thách thức mới. Một trong những thách thức đặt ra là làm thế nào để **tận dụng hiệu quả vai trò của RS trong việc cải thiện hiệu năng CDP và đó là một chủ đề quan tâm nghiên cứu của luận án này.**

1.2.2 Chuyển tiếp trong hệ thống thông tin vô tuyến đa chặng

Truyền thông đa chặng MH (Multi-Hop) được hiểu là việc truyền dữ liệu từ một nút nguồn S tới nút đích D thông qua các nút trung gian R (R_1, R_2, \dots, R_n) như mô tả trong Hình 1.5 [53, 90-91, 97-102].

Hình 1.5 cho thấy rằng truyền thông MH chính là sự thể hiện của HTTT VT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp. Mô hình này xuất hiện trong nhiều nghiên cứu về truyền thông MH [53, 90-91, 97-102]. Như đã đề cập trong Lời mở đầu và phần cuối của Mục 1.1.2, tiêu chuẩn viễn thông quốc tế ITU-T. Y3104 [11] đã chỉ ra WSN được coi

là một thành tố chính của các HTTT VT thế hệ mới. Do đặc điểm cấu tạo của các nút cảm biến SN (Sensor Node), truyền thông trong WSN tuân theo mô hình MH với giao thức định tuyến phân cấp cụm thích ứng năng lượng thấp LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [84-88].



Hình 1.5 Mô hình chuyển tiếp trong HTTT VT đa chặng

Chuyển tiếp trong HTTT VT đa chặng có thể bị cản trở việc duy trì kết nối (thậm chí gây gián đoạn) vì các lý do như: nhiễu từ các nút mạng khác; nhiễu do anten, suy hao Fading; tác động của phần cứng không hoàn hảo, v.v. Hầu hết các nghiên cứu tới nay đều tập trung vào hai chỉ số hiệu năng quan trọng nhất là xác suất dừng OP và xác suất chặn IP. Tuy nhiên, vẫn chưa thấy nghiên cứu nào xem xét các giá trị OP và IP đa chặng cũng như mối quan hệ giữa chúng trong điều kiện xét đầy đủ các tham số liên quan và tỉ số tín hiệu trên nhiễu ở mức cao. Do vậy, đây là **chủ đề quan tâm nghiên cứu thứ hai của luận án này**. Các giá trị OP và IP được xem xét tính toán cho kiến trúc đa chặng dựa trên một mô hình mạng WSN MH LEACH.

1.3 Hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến

1.3.1 Khái quát

Hiệu năng là một khái niệm để chỉ khả năng làm việc hiệu quả của một hệ thống trong các điều kiện khác nhau, được thể hiện và đánh giá thông qua một hoặc nhiều tham số biểu thị bằng các công thức toán học. Mặc dù khái niệm hiệu năng khá rộng, các tiêu chuẩn viễn thông quốc tế, điển hình như [35-38, 110] đã liệt kê các tiêu chí hiệu năng quan trọng nhất gồm: chất lượng dịch vụ, duy trì kết nối [35-36], độ sẵn sàng dịch vụ, tỉ lệ thất bại cuộc gọi (liên quan cuộc gọi mới), tỉ lệ rớt cuộc gọi chuyển giao, tỉ lệ mất gói, độ trễ đầu cuối, tỉ lệ lỗi bit [37-38, 110].

Trong phạm vi nghiên cứu, luận án này sẽ quan tâm tới tiêu chí hiệu năng HTTT VT thế hệ mới sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp được chỉ ra trong tiêu chuẩn ITU-

T Y.2225 năm 2018 [36] về yêu cầu duy trì kết nối trong ngữ cảnh mô hình kiến trúc kết hợp của mạng di động và mạng không dây đa chặng, cụ thể là mạng WSN MH LEACH. Như đề cập trong tiêu chuẩn ITU-T Y.2225, duy trì kết nối liên quan đến bảo đảm chuyển giao HO trong hệ thống thông tin di động yêu cầu chống gián đoạn và bảo đảm an toàn kết nối [36]. Do vậy, trong các mục tiếp theo luận án sẽ tập trung trình bày về tiêu chí hiệu năng duy trì kết nối, các vấn đề liên quan mật thiết đến duy trì kết nối là hoạt động chuyển giao, xác suất chuyển giao cuộc gọi, xác suất rớt cuộc gọi, xác suất dừng và xác suất chặn kết nối.

Nghiên cứu về hoạt động chuyển giao, xác suất chuyển giao cuộc gọi, xác suất rớt cuộc gọi được tập trung trong mô hình kiến trúc trong cụm 1 (Hình 1), cụ thể là trong hệ thống thông tin di động sử dụng trạm chuyển tiếp (Hình 1.4). Nghiên cứu về duy trì kết nối với xác suất dừng và xác suất chặn được tập trung trong mô hình kiến trúc trong cụm 2 (Hình 1), cụ thể là trong hệ thống WSN MH LEACH (Hình 1.5).

1.3.2 Duy trì kết nối

Các thiết bị vô tuyến thực hiện quá trình trao đổi thông tin thông qua các kênh tần số. Tùy theo mô hình truyền thông, việc duy trì kết nối đặt ra những yêu cầu khác nhau trên quan điểm của hiệu năng.

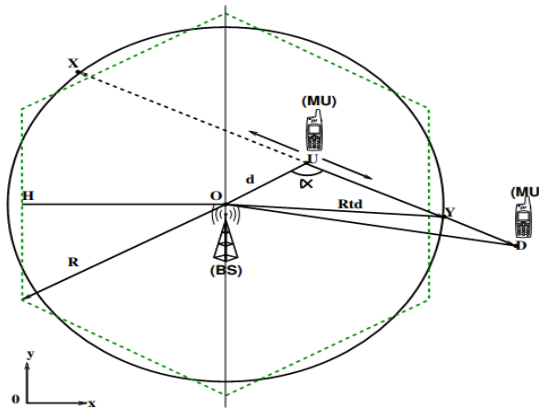
Đối với các UE/eMBB như trong các hệ thống thông tin di động, duy trì kết nối được hiểu là việc đạt được giá trị CDP thấp nhất cho các cuộc gọi HO, tức là tỉ lệ thành công của các cuộc gọi HO cao nhất [33-36, 133-137]. Trong trường hợp cuộc gọi HO của một UE nào đó bị rớt, hệ thống đã không duy trì được kết nối cho UE này.

Đối với các hệ thống WSN MH LEACH, duy trì kết nối được hiểu là việc bảo đảm các giá trị xác suất dừng OP (Outage Probability) và xác suất chặn IP (Intercept Probability) thấp nhất [53, 90-91, 97-102]. Nếu vì một lý do nào đó mà OP và IP vượt một giá trị danh định, hệ thống sẽ ngừng làm việc, tức là kết nối giữa các nút trong hệ thống không còn được duy trì.

Tóm lại, có thể thấy rằng duy trì kết nối là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến.

1.3.3 Chuyển giao và xác suất chuyển giao cuộc gọi

Yêu cầu chuyển giao đã được phân tích trong Mục 1.1.3. Mô hình tính toán xác suất chuyển giao được thể hiện trong Hình 1.6. Xác suất chuyển giao P_h là tham số được quan tâm trong các nghiên cứu về chuyển giao trong các hệ thống thông tin di động. Các tính toán P_h được bắt đầu từ nghiên cứu của Rappaport thông qua Hình 1.6 như sau [39-42].



Hình 1.6 Mô hình tính toán xác suất chuyển giao P_h của MU trong BS

Trong Hình 1.6, giả sử điểm U là vị trí ban đầu của MU trong BS và có khoảng cách đến BS là $d = OU$ (với O là tâm vùng phủ sóng hình tròn của BS) với phân bố của d là:

$$f_d(d) = \begin{cases} 2d / R_{td}^2, & 0 \leq d \leq R_{td} \\ 0 & d \neq \end{cases} \quad (1.1)$$

Trong công thức (1.1), R_{td} là bán kính phủ sóng của hình tròn có diện tích tương đương với diện tích của BS lục giác, nên R_{td} được tính như trong công thức (1.2) với R là bán kính hình tròn ngoại tiếp BS lục giác, hay bán kính hình tròn phủ sóng thực tế lý tưởng của BS.

$$R_{td} = \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} R \approx 0.91R \quad (1.2)$$

Sau khi thiết lập cuộc gọi, MU sẽ di chuyển tự do theo mọi hướng trong BS với vận tốc v và hướng di chuyển \overrightarrow{UD} với D là điểm đến dự kiến của MU được thể hiện thông qua góc $\alpha = \angle(\overrightarrow{OU}, \overrightarrow{UD})$. Hàm phân bố của v và α tuân theo các công thức (1.3) và (1.4), trong đó V_{max} là vận tốc lớn nhất của MU.

$$f_v(v) = \begin{cases} 1/V_{max}, & 0 \leq v \leq V_{max} \\ 0, & v \neq \end{cases} \quad (1.3)$$

$$f_\alpha(\alpha) = \begin{cases} 1/2\pi, & 0 \leq \alpha \leq 2\pi \\ 0, & \alpha \neq \end{cases} \quad (1.4)$$

Thời gian đàm thoại của MU tuân theo phân bố chuẩn sau:

$$f_t(t) = \begin{cases} \mu e^{-\mu t}, & t \geq 0 \\ 0, & t \neq \end{cases} \quad (1.5)$$

Như đã đề cập ở trên, cuộc gọi của MU sẽ được tính là chuyển giao khi MU vượt ra khỏi vùng phục vụ của BS hiện thời và điều này tương đương với việc khi MU di chuyển chạm đến điểm Y trong Hình 1.6 mà cuộc gọi vẫn tiếp diễn. Giả sử rằng MU giữ nguyên vận tốc và hướng di chuyển trong quá trình đàm thoại, lúc này xác suất chuyển giao P_h của MU được tính là:

$$P_h = P_r \left(t > t_{th} = \frac{UY(=v \cdot t_{th})}{v} \right) = 1 - P_r(t \leq t_{th}) = 1 - \int_{-\infty}^{t_{th}} f_t(t) dt \quad (1.6)$$

Trong công thức (1.6), t_{th} là thời gian ngưỡng cho biết MU đã chạm đến điểm Y, tức là khi thời gian đàm thoại lớn hơn giá trị ngưỡng này thì sẽ xảy ra chuyển giao. Tuy nhiên, bản thân thời gian đàm thoại cũng là một phân bố ngẫu nhiên như trong công thức (1.5), còn giá trị thời gian ngưỡng t_{th} lại là hàm số phụ thuộc vào vị trí ban đầu, hướng và vận tốc di chuyển như trong công thức (1.7):

$$t_{th} = \frac{UY}{v} = \frac{d \cdot \cos \alpha + \sqrt{R_{td}^2 - d^2 \sin^2 \alpha}}{v} \quad (1.7)$$

Trong đó UY được tính theo định lý cosine trong tam giác $\triangle OUY$, với:

$$R_{td}^2 = OU^2 - 2OU \cdot UY \cdot \cos \alpha + UY^2 \quad (1.8)$$

Tức là UY là nghiệm dương của phương trình (1.9), và được thể hiện trong (1.10):

$$UY^2 - 2UY \cdot d \cdot \cos \alpha + d^2 - R_{td}^2 = 0 \quad (1.9)$$

$$UY = d \cdot \cos \alpha + \sqrt{R_{td}^2 - d^2 \sin^2 \alpha} \quad (1.10)$$

Việc tính toán ngưỡng t_{th} lúc này được thực hiện như trong (1.11):

$$t_{th} = f(d, \alpha, v) = \begin{cases} \frac{d \cdot \cos(E[\alpha]) + \sqrt{R_{td}^2 - d^2 \sin^2(E[\alpha])}}{E[v]}, & \text{theo } d \\ \frac{E[d] \cdot \cos(E[\alpha]) + \sqrt{R_{td}^2 - (E[d])^2 \sin^2(E[\alpha])}}{v}, & \text{theo } v \\ \frac{E[d] \cdot \cos \alpha + \sqrt{R_{td}^2 - (E[d])^2 \sin^2 \alpha}}{E[v]}, & \text{theo } \alpha \end{cases} \quad (1.11)$$

Công thức (1.11) chỉ ra rằng việc tính giá trị ngưỡng cho chuyển giao của một cuộc gọi không hề dễ dàng, vì các tham số của quá trình đàm thoại của MU là hoàn toàn ngẫu nhiên nên người ta sẽ phải lựa chọn tham số cho mỗi phương pháp tính. Không những thế, việc giả định các phân bố đồng đều trong các khoảng giá trị (min, max) của các tham số để xác định giá trị kỳ vọng $E[.]$ của các biến cũng đã là một yếu tố giúp cho việc tính toán có thể khả dĩ hơn. Tuy vậy, các nghiên cứu về chuyển giao vẫn gặp rất nhiều khó khăn trong việc tìm ra một công thức gần đúng cho t_{th} theo như công thức (1.11). Hơn nữa, giả sử các giá trị trong công thức (1.11) được giải quyết thì với mục đích xác định xác suất chuyển giao, việc tính toán P_h theo công thức (1.6) lại gặp phải thách thức với điều kiện của công thức (1.5). Như vậy, việc tìm ra một kết quả tổng quát cho xác suất chuyển giao P_h là thực sự khó khăn. Chính vì thế, các nghiên cứu sau này chỉ ra rằng chỉ có thể tính toán P_h theo một trong các giả định: hoặc tính theo vị trí (d) [44, 119], hoặc theo vận tốc (v) [120], hoặc theo vết di chuyển (theo hướng của α) [121] với thời gian đàm thoại t có kỳ vọng $E[t]$ [39-42]. Tùy theo quan điểm đánh giá mà xác định độ phức tạp trong tính toán để có các kết quả phù hợp với các điều kiện giả định của mạng.

Mặc dù tập trung vào cải thiện CDP, bài toán đơn giản hóa việc tính toán P_h cũng được quan tâm trong luận án này và sẽ được đề cập trong Chương 2.

1.3.4 Xác suất rớt cuộc gọi CDP

Theo kỹ thuật lưu lượng được khuyến nghị bởi ITU và ETSI [35-38], CDP được tính toán thông qua cấp độ dịch vụ GoS (Grade of Service) đối với các dịch vụ **thời gian thực** như sau (1.12):

$$\text{GoS} = \frac{T^{N_c} / N_c!}{\sum_{k=0}^{N_c} (T^k / k!)} \quad (1.12)$$

Trong đó, T là lưu lượng và được tính bằng $T = \lambda / \mu$, với λ, μ là tốc độ yêu cầu gọi và tốc độ kết thúc cuộc gọi tương ứng. Các tham số này thường có phân bố ngẫu nhiên với các hàm mật độ phân bố xác suất theo phân bố Poisson và hàm số mũ âm; N_c là số kết nối vật lý (dung lượng) của một BS [34-35, 136]. Dựa trên các phân tích và tính toán về GoS cho cả các dịch số liệu trong tài liệu về kỹ thuật lưu lượng [35], và trên quan điểm bảo đảm việc cung cấp các **kết nối vô tuyến** cho các **cuộc gọi thời gian thực** trong thông tin di động, hoàn toàn có thể áp dụng công thức GoS trong các thế hệ sau (4G và 5G) của thông tin di động để đánh giá các chỉ số xác suất chặn cuộc gọi CBP và xác suất rớt cuộc gọi CDP.

Giả sử mỗi BS được cung cấp N_c kết nối vô tuyến để phục vụ cho các yêu cầu gọi của MU, và dung lượng này được chia thành N_n và N_h dành cho các cuộc gọi mới và cuộc gọi chuyển giao tương ứng, với $N_c = N_n + N_h$. Ta có:

$$\text{CBP} = \frac{T_n^{N_n} / N_n!}{\sum_{k=0}^{N_n} (T_n^k / k!)} \quad (1.13)$$

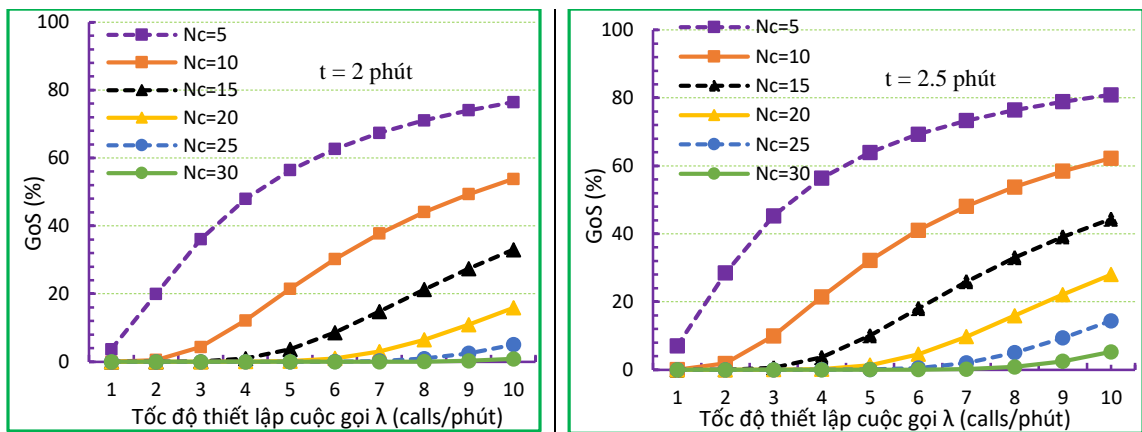
$$\text{CDP} = \frac{T_h^{N_h} / N_h!}{\sum_{k=0}^{N_h} (T_h^k / k!)} \quad (1.14)$$

Trong đó T_n và T_h tương ứng là các lưu lượng cuộc gọi mới và lưu lượng cuộc gọi chuyển giao trong hệ thống.

Có thể nhận thấy trong các công thức (1.12) và (1.13) là khi dung lượng bằng 0, tất cả các cuộc gọi đều không thể thực hiện được với xác suất thất bại bằng 1. Trong thực tế, điều này không xảy ra vì dung lượng của các trạm gốc là một số nguyên dương ($N_c > 0$); và các cuộc gọi mới luôn phải được khởi tạo thành công và chiếm dụng kênh ($0 < N_n \leq N_c$) trước khi các cuộc gọi chuyển giao được khởi tạo. Tuy nhiên, trong trường hợp của CDP như trong công thức (1.14), khi tất cả các kênh đều đã dành cho các cuộc gọi mới ($N_c = N_n$) làm cho $N_h = 0$ và $\text{CDP} = 1$, tức là tất cả các

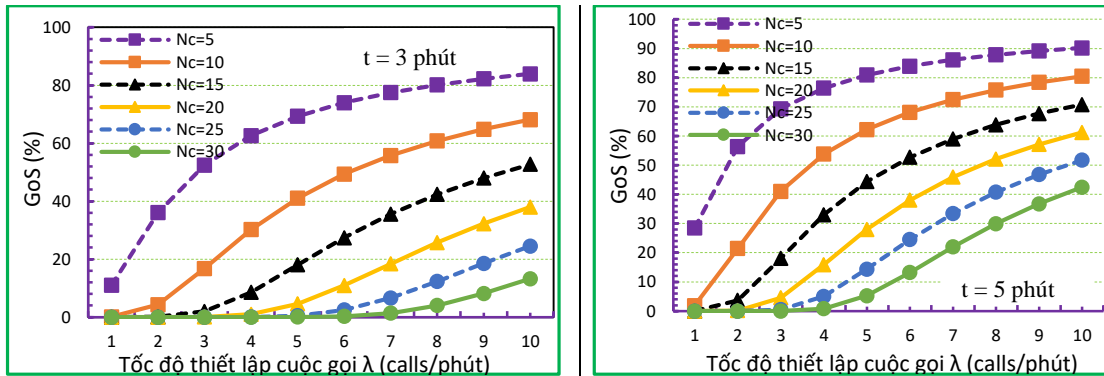
cuộc gọi chuyển giao đều bị rớt. Trong khi đó, các cuộc gọi chuyển giao có mức độ ưu tiên cao hơn các cuộc gọi mới nên cần phải tính toán N_h để đạt được các giá trị CDP danh định như trong [50, 57, 115-118]. Thông thường, giá trị lớn nhất của GoS được chấp nhận là 5% cho các cuộc gọi mới và 2% cho các cuộc gọi HO trong các hệ thống thông tin di động. Tuy nhiên, giá trị danh định của GoS cho các cuộc gọi mới và cuộc gọi HO tương ứng là $CBP \leq 2\%$ và $CDP \leq 1\%$ [36-38, 109-110].

Trong trường hợp tổng quát, để có cái nhìn trực quan về xác suất thất bại cuộc gọi, tác giả thực hiện tính toán giá trị GoS thông qua các tham số tốc độ thiết lập cuộc gọi và thời gian chiếm dụng kênh với các giá trị khác nhau của dung lượng BS. Việc tính toán được thực hiện bằng cách sử dụng các hàm số được định nghĩa trong Excel. Thông qua việc lập trình trong Excel, tác giả nhận được các kết quả như thể hiện trong các hình từ Hình 1.7 đến Hình 1.11.

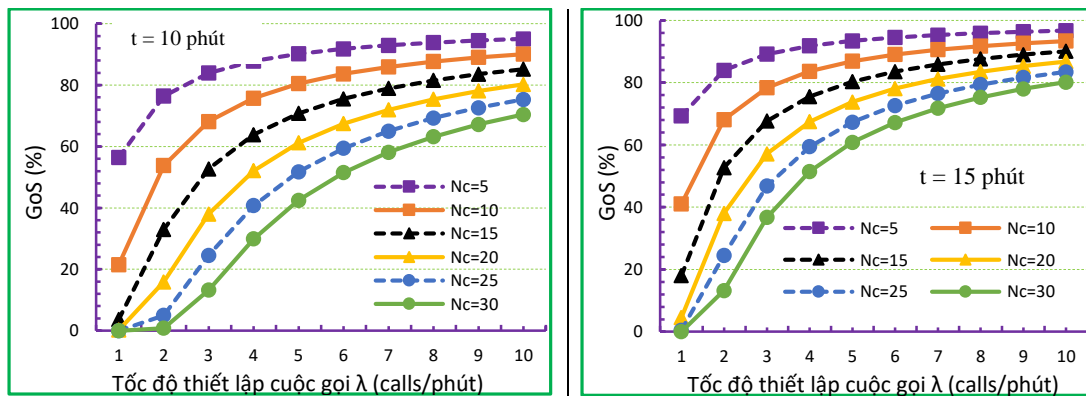


Hình 1.7 GoS với thời gian chiếm kênh 2 phút và 2.5 phút

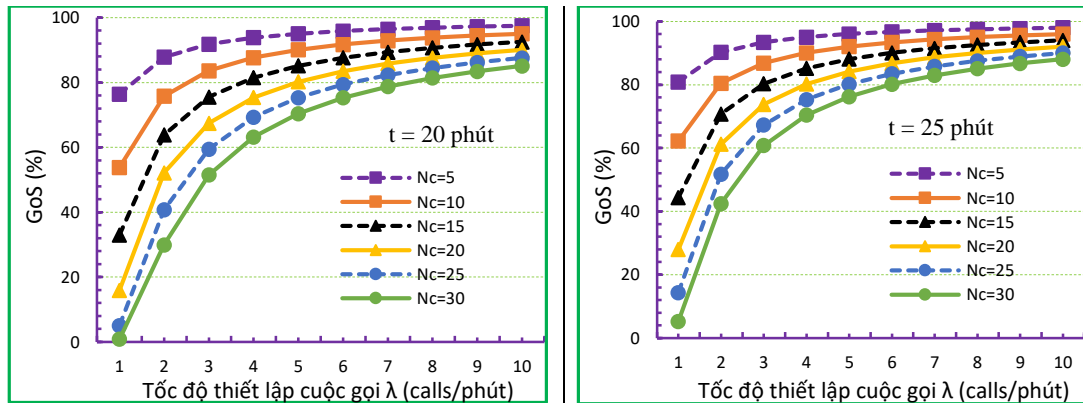
Có thể nhận thấy trên Hình 1.7 rằng khi $N_c = 30$ và thời gian chiếm dụng TCH là 2 phút và $\lambda = 10$ cuộc gọi/phút, hệ thống đáp ứng khá tốt với GoS khoảng 2%, nhưng giá trị này sẽ tăng rất nhanh lên đến giá trị lớn hơn 5% khi thời gian chiếm dụng kênh là 2.5 phút và $\lambda = 10$ cuộc gọi/phút. Hơn nữa, có thể thấy rằng với cùng một $\lambda = 10$ cuộc gọi/phút và các khoảng thời gian chiếm dụng kênh là 2 phút và 2.5 phút, giá trị GoS là khoảng gần 80% trong BS có dung lượng thấp ($N_c = 5$). Như vậy, việc giảm chỉ số xác suất thất bại cuộc gọi về các giá trị danh định thực sự là áp lực lớn trong các hệ thống thông tin di động.



Hình 1.8 GoS với thời gian chiếm kênh 3 phút và 5 phút



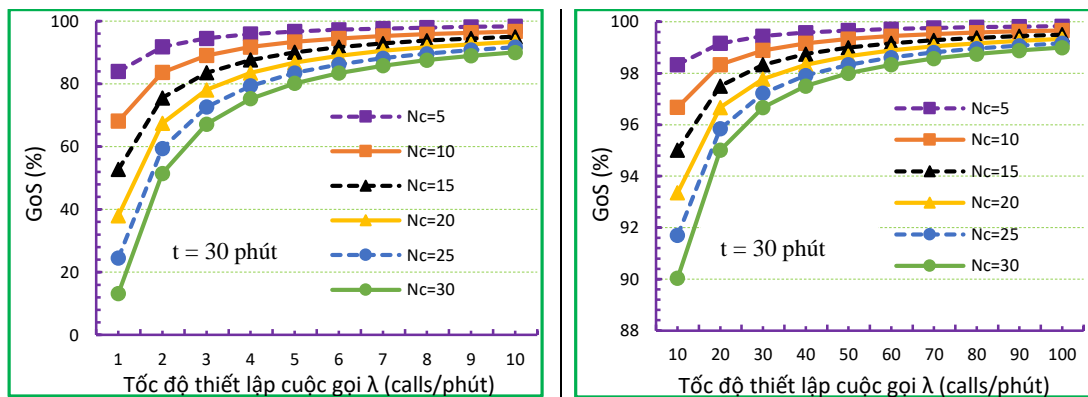
Hình 1.9 GoS với thời gian chiếm kênh 10 phút và 15 phút



Hình 1.10 GoS với thời gian chiếm kênh 20 phút và 25 phút

Hình 1.8 và Hình 1.9 cho thấy rằng với cùng một giá trị $\lambda = 10$ cuộc gọi/phút $N_c = 30$, GoS đã tăng từ hơn 40% lên 80% khi thời gian chiếm dụng kênh tăng từ 5 phút lên 15 phút. Đồng thời, với thời gian chiếm dụng kênh là 15 phút, giá trị GoS trong Hình 1.9 đã lớn hơn 10% khi $\lambda = 2$ cuộc gọi/phút. Như vậy, có thể thấy rằng thời gian chiếm kênh tác động rất lớn đến GoS. Hình 1.10 cho thấy rằng với tốc độ thiết lập cuộc gọi khá nhỏ ($\lambda = 1$ cuộc gọi/phút), thời gian chiếm kênh là 25 phút, tất

cả các giá trị GoS đều lớn hơn 4%. Tương tự như vậy, với cùng một giá trị $\lambda = 1$ cuộc gọi/phút nhưng thời gian chiếm kênh là 30 phút, tất cả các giá trị GoS đều tăng lên hơn 10% như trong Hình 1.11. Hơn nữa, trong Hình 1.11, khi λ tăng lên hơn 10 cuộc gọi/phút, tất cả các giá trị GoS đều lớn hơn 90%. Như vậy, để giảm xác suất thất bại của các cuộc gọi với thời gian chiếm kênh lớn, các hệ thống cần phải tăng dung lượng lên rất lớn.



Hình 1.11 GoS với thời gian chiếm kênh 30 phút

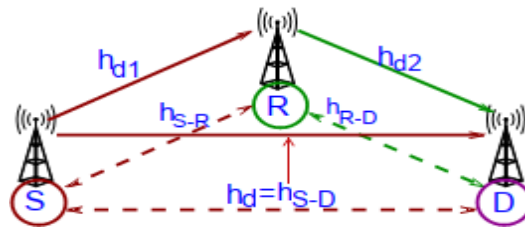
Quan sát các giá trị GoS trong các hình từ Hình 1.7 đến Hình 1.11, có thể thấy rằng nếu λ là tốc độ thiết lập cuộc gọi HO, và N_c trong các hình này được coi là các giá trị dung lượng dành cho chuyển giao N_h thì $GoS = CDP$. Điều này đòi hỏi các BS phải có dung lượng rất lớn để có thể duy trì kết nối cho các cuộc gọi HO. Hơn nữa, như đã đề cập ở trên, lưu lượng chuyển giao và lưu lượng cuộc gọi mới có quan hệ biện chứng với nhau. Tức là, khi tốc độ thiết lập cuộc gọi mới tăng lên thì tốc độ cuộc gọi HO cũng tăng theo, với cùng một xác suất chuyển giao P_h . Do đó, khi lưu lượng tăng lên, việc duy trì kết nối cho các cuộc gọi HO trở thành một thách thức thực sự cho các hệ thống.

Các kết quả thí nghiệm đã thực hiện (từ Hình 1.7 đến Hình 1.11) cho thấy xác suất thất bại cuộc gọi chuyển giao, hay xác suất rớt cuộc gọi, có liên quan mật thiết đến khả năng chuyển tiếp lưu lượng trong điều kiện lưu lượng rất cao. Xem xét tỉ lệ chuyển giao phù hợp, tận dụng hiệu quả các trạm RS để hỗ trợ chuyển giao trong điều kiện lưu lượng cao khi tất cả các kết nối trong các trạm gốc BS ở một vùng nhất định đều đang bị chiếm dụng và tính toán xác suất CDP trong điều kiện tương ứng sẽ là

một hướng giải quyết để cải thiện chất lượng duy trì kết nối cho chuyển tiếp các cuộc gọi chuyển giao.

1.3.5 Xác suất dừng OP

Hình 1.12 mô tả mô hình kinh điển của kỹ thuật chuyển tiếp trong HTTTVT thông qua việc sử dụng nút chuyển tiếp R đặt giữa nút nguồn S và nút đích D. Việc sử dụng nút R nhằm bảo đảm cho nút D thu và giải mã chính xác nội dung phát từ nút S.



Hình 1.12 Mô hình truyền thông 2 chặng

Theo lý thuyết thông tin hiện đại, tín hiệu $y_z(D)$ thu được tại nút D như trong Hình 1.12 được tính thông qua tín hiệu x phát từ nguồn S và các hệ số kênh truyền vô tuyến h_z và nhiễu n_z với $z = \{d, d_1, d_2\}$ tương ứng như sau đây, trong đó γ_z với $z = \{S-D, R-D, S-R\}$ là giá trị tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal to Noise Ratio) tương ứng trên các hướng truyền, và N_0 là nhiễu trắng Gauss cộng tính AWGN [53]:

- 1) Thu trực tiếp từ S theo đường S-D, kênh truyền d :

$$y_{S-D}(D) = x \cdot h_d + n_d \quad (1.15)$$

$$\text{với } \gamma_{S-D} = \frac{P_S |h_d|^2}{N_0^2} \quad (1.16)$$

- 2) Thu từ nút R theo đường R-D, kênh truyền d_2 :

$$y_{R-D}(D) = x \cdot h_{d_2} + n_{d_2} \quad (1.17)$$

$$\text{với } \gamma_{R-D} = \frac{P_R |h_{d_2}|^2}{N_0^2} \quad (1.18)$$

- 3) Với tín hiệu thu được tại R từ nguồn S, rồi mới phát tới D:

$$y_{S-R}(R) = x \cdot h_{d_1} + n_{d_1} \quad (1.19)$$

$$\text{với } \gamma_{S-R} = \frac{P_S |h_{d_1}|^2}{N_0^2} \quad (1.20)$$

Xác suất dừng OP (Outage Probability) là xác suất mà hệ thống sẽ dừng làm việc khi giá trị SNR γ_D tại nút D giảm xuống dưới một mức ngưỡng định trước nào đó như trong công thức (1.21):

$$\text{OP} = \Pr(\gamma_D < \gamma_{th}) \quad (1.21)$$

với $\gamma_{th} = 2^{R_{th}} - 1$, R_{th} là ngưỡng tốc độ trên kênh truyền dẫn.

Các giá trị γ_z trong các công thức (1.16), (1.18), và (1.20) là cơ sở tính toán để bảo đảm OP tại nút D sao cho máy thu có thể khôi phục chính xác nội dung thông tin từ nút S gửi tới thông qua hệ thống. Trong thực tế, OP là một trong những thông số hiệu năng mạng quan trọng đánh giá khả năng hoạt động chính xác và ổn định của các hệ thống vô tuyến đa chặng. Nếu vì một lý do nào đó mà $\gamma_D < \gamma_{th}$, **kết nối tới nút D sẽ không còn được duy trì.**

Trong trường hợp tổng quát của truyền thông đa chặng như trong Hình 1.5, OP tại nút D là xác suất dừng toàn chặng từ nút đầu tới nút cuối, và xác suất này bị ảnh hưởng bởi các OP tức thời tại chặng S và nút chuyển tiếp R đầu tiên (S_R1), và tại các chặng trung gian giữa các nút Ri ($i = \{1, \dots, n-1\}$), cho đến chặng cuối Rn_D, với n là số chặng chuyển tiếp.

Bài toán tính hiệu năng OP toàn chặng trong vô tuyến chuyển tiếp bị ảnh hưởng bởi nhiều tham số như mô hình kênh truyền vô tuyến, mô hình chuyển tiếp, số lượng ăng ten tại các nút, mô hình thu hoạch năng lượng và khả năng thu hoạch năng lượng EH tại các nút R, và mức độ ảnh hưởng của phân cứng không hoàn hảo tại các nút [77, 79]. Như vậy, việc tính toán OP tường minh để có cơ sở đánh giá hiệu năng mạng là một thách thức trong nghiên cứu về vô tuyến chuyển tiếp.

1.3.6 Xác suất chặn IP

Khái niệm xác suất chặn IP (Intercept Probability) được đưa ra trong trường hợp xuất hiện một hoặc nhiều nút E khai thác thông tin một cách bất hợp pháp trong hệ thống như trong Hình 1.5. IP là xác suất mà hệ thống sẽ ngừng làm việc để ngăn

chặn việc nút E khôi phục chính xác thông tin từ việc khai thác trái phép trên các chặng truyền dẫn từ S tới D thông qua các nút trung gian R_i , và được tính như sau [66]:

$$IP = \Pr(\gamma_E \geq \gamma_{th}) \quad (1.22)$$

Trong thực tế, E là nút bất kỳ bên ngoài hệ thống truyền thông của S, R_i , và D. Do đó, trong Hình 1.5, E có thể thu tín hiệu từ tất cả các nút phát, bao gồm S và các R_i . Như vậy, IP toàn chặng tại E được tính toán thông qua các IP của các chặng trung gian. Hơn nữa, trên quan điểm hiệu năng, giá trị IP có ảnh hưởng lớn tới γ_D tại nút D hay OP của hệ thống. Nói một cách khác, nút E trong trường hợp này có thể coi là một tác nhân gây gián đoạn kết nối từ S tới D.

Xét một cách tổng quát, nút E có thể xem như tác nhân gây nhiễu (kể cả nút chuyển tiếp trung gian và tác nhân can thiệp bất hợp pháp) làm cho việc chuyển tiếp kết nối có thể bị gián đoạn hoặc bị chặn. Cùng với OP, IP cũng là một tham số hiệu năng quan trọng trong việc duy trì kết nối trong mô hình truyền thông đa chặng. Xác suất IP đã được quan tâm trong nhiều nghiên cứu trong ngữ cảnh WSN MH LEACH [69, 75, 79, 92, 100]. Cũng tương tự như OP, việc tính toán các biểu thức tường minh cho IP toàn chặng trong các HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp khá phức tạp, phụ thuộc vào việc lựa chọn tham số và xây dựng mô hình tính toán.

1.4 Các nghiên cứu liên quan

1.4.1 Nghiên cứu liên quan kỹ thuật chuyển tiếp trong thông tin di động

Các bài toán về chuyển giao trong thông tin di động luôn là đề tài nghiên cứu hấp dẫn, đặc biệt trong bối cảnh HTTTVT thế hệ mới với các trạm chuyển tiếp. Mô hình lưu lượng và hiệu năng trong chuyển giao được bắt đầu khá sớm trong nghiên cứu của Rappaport và các cộng sự [34, 39]. Sau đó, các mô hình và công thức tính toán tỉ lệ chuyển giao được phát triển và thực hiện trong [40-42, 44, 119-121]. Các tính toán về CDP được thực hiện trong [40-42, 57, 119, 121, 135-137]. Để cải thiện CDP, giải pháp dự trữ kênh dưới các điều kiện làm việc khác nhau được đề xuất trong các nghiên cứu [115-118]. Trong các nghiên cứu này, người ta sẽ dự trữ N_h kênh để chỉ dành cho các yêu cầu HO, và $(N_C - N_h)$ kênh được sử dụng cho cả các yêu cầu

gọi mới và yêu cầu HO. Vấn đề khó khăn của giải pháp này là tỉ lệ dự trữ, bởi vì nếu dự trữ nhiều thì bảo đảm CDP, song sẽ lãng phí tài nguyên; ngược lại thì CDP sẽ không bảo đảm. Nói cách khác, việc bảo đảm cùng một lúc 2 yêu cầu về hiệu quả khai thác tài nguyên tần số và CDP là một thách thức trong các nghiên cứu.

Trong [46], tác giả đã nghiên cứu các giải pháp bảo đảm kết nối liên tục cho các MU khi di chuyển trong một mạng hỗn hợp gồm các trạm gốc và các trạm chuyển tiếp có bán kính phủ sóng nhỏ nằm trong vùng phủ sóng của một trạm gốc có bán kính lớn hơn. Các tham số được quan tâm trong [46] là việc quản lý các dòng dữ liệu của MU trong quá trình trao đổi thông tin khi di chuyển qua các trạm (cell), và thông qua nhiều lớp trạm một cách liên tục. Mục đích của [46] là giảm tỉ lệ chuyển giao thất bại, và giảm hiệu ứng ping-pong trong chuyển giao. Các tham số ảnh hưởng đến tính toán chuyển giao và xác suất chuyển giao thành công trong luận án là vị trí các trạm và vị trí MU, vận tốc di chuyển, hướng di chuyển và thời gian kết nối của MU. Mặc dù đạt được những cải thiện đáng kể trong việc nâng cao xác suất chuyển giao thành công, nghiên cứu này chỉ dừng lại ở các mức lưu lượng trong điều kiện mạng hoạt động bình thường mà chưa đề cập đến vai trò của các trạm chuyển tiếp, và cũng chưa tính toán việc cải thiện CDP thông qua cơ chế chuyển tiếp trong điều kiện tất cả các trạm trong một vùng mạng đều đang bận.

Tương tự như vậy, các tác giả trong [120], [122-124] cũng đề cập đến việc tính toán và nâng cao xác suất chuyển giao thành công nhưng các vấn đề về việc chuyển tiếp và sử dụng các trạm chuyển tiếp trong LTE để cải thiện CDP trong điều kiện lưu lượng cao vẫn chưa được quan tâm.

Các nghiên cứu về việc sử dụng các trạm chuyển tiếp RS (Relay Station) để cải thiện các chỉ số CBP và CDP được thực hiện trong [49-50, 55-57, 125]. Ưu điểm của giải pháp này là có thể chuyển các kênh rãnh từ các BS có lưu lượng thấp sang các BS có lưu lượng cao để cải thiện các chỉ số GoS, tăng hiệu quả khai thác tài nguyên tần số, và cân bằng lưu lượng. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chưa giải quyết bài toán lưu lượng cao khi tất cả các BS đều không có kênh rãnh. Hơn nữa, các tác

giả cũng chưa giải quyết bài toán bảo đảm CDP cho các cuộc gọi HO trong trường hợp lưu lượng cao, đặc biệt là các cuộc gọi số liệu thời gian thực.

Các nghiên cứu gần đây về chuyển giao và chuyển tiếp trong các hệ thống thông tin di động vẫn chưa khai thác tối ưu vai trò của trạm chuyển tiếp RS trong vấn đề cải thiện CDP, bởi vì khi đánh giá CDP thì hoặc là không sử dụng RS như trong [46, 122-123, 127], hoặc là chỉ khai thác RS trong các điều kiện lưu lượng bình thường của hệ thống nhằm cải thiện chất lượng kết nối như trong [45, 48, 51-52].

Có thể nhận thấy rằng mặc dù đạt được những kết quả nhất định trong việc cải thiện CDP và quản lý tài nguyên vô tuyến; việc tính toán tỉ lệ chuyển giao và CDP, cũng như việc sử dụng các kỹ thuật chuyển tiếp trong các hệ thống thông tin di động được thực hiện trong các nghiên cứu trên vẫn còn tồn tại những vấn đề sau:

- 1) Thứ nhất, các tính toán về tỉ lệ chuyển giao hoặc xác suất chuyển giao cuộc gọi của các MU thực sự phức tạp trong các nghiên cứu [40-42]. Mặc dù là tham số quan trọng trong việc tính toán và đánh giá lưu lượng chuyển giao, để từ đó có thể tính toán và ước lượng nguồn tài nguyên tần số tương ứng nhằm đáp ứng giá trị CDP; song, lưu lượng chuyển giao là lưu lượng thứ cấp, được sinh ra từ lưu lượng cuộc gọi mới và việc tính toán tỉ lệ chuyển giao chỉ để giúp cho việc quản lý và khai thác tài nguyên tần số hiệu quả hơn. Trong khi đó, cho dù phức tạp đến đâu, việc tính toán và mô phỏng bằng các công cụ toán học vẫn gặp phải khó khăn trong việc mô tả hoạt động của một hệ thống thực, đặc biệt là trong vấn đề chuyển giao. Thực tế, tỉ lệ chuyển giao chỉ mang tính chất tham khảo, còn trong hoạt động của hệ thống thì việc đáp ứng được các yêu cầu cấp kênh cho các MU và duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao để bảo đảm CBP và CDP mới là mục tiêu chính. Như vậy, câu hỏi đặt ra ở đây là có thể ước lượng tỉ lệ chuyển giao theo mô hình đơn giản hơn mà vẫn bảo đảm được các tính toán cho CDP được không?
- 2) Thứ hai, vai trò của trạm chuyển tiếp RS chỉ dừng lại ở việc cải thiện chất lượng các kết nối vô tuyến trong BS, hoặc mở rộng vùng phục vụ của BS (cũng là cải thiện chất lượng kết nối bằng cách nối dài vùng phủ sóng của BS) [32,

45, 48, 51-52, 54]. Câu hỏi đặt ra ở đây là: trước khi giải quyết bài toán cải thiện chất lượng kết nối, việc có đủ số lượng các kết nối để đáp ứng cho các yêu cầu gọi của MU cần phải được đặt ra, đặc biệt là trong việc chuyển giao; do đó, có thể sử dụng RS để hỗ trợ **chuyển giao** trong điều kiện **tất cả các kết nối trong các BS ở một vùng nhất định đều đang bị chiếm dụng** được không? Nói một cách khác, **khi tất cả TCH trong T-BS đều đang bị chiếm thì có thể sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp thông qua các RS để nâng cao tỉ lệ chuyển giao thành công hay không?**

Các tồn tại trong các câu hỏi trên chính là động lực thứ nhất cho các nghiên cứu về chuyển tiếp trong luận án này của nghiên cứu sinh.

1.4.2 Nghiên cứu liên quan kỹ thuật chuyển tiếp trong HTTTVT đa chặng

Các hệ thống truyền thông đa chặng MH là đề tài trong nhiều nghiên cứu. Việc phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống thông qua các giá trị OP và IP là những chủ đề chính trong các nghiên cứu này. Tuy nhiên, việc tính toán để nhận được các biểu thức tường minh cho các tham số hiệu năng OP và IP trong các hệ thống MH là một thách thức đối với các nhà nghiên cứu. Thách thức này liên quan chủ yếu đến việc lựa chọn các tham số tính toán và lựa chọn các mô hình mô hình nghiên cứu liên quan.

Các nghiên cứu trong vô tuyến chuyển tiếp tập trung vào việc lựa chọn mô hình chuyển tiếp AF hay DF, FD hay HD [29, 64], lựa chọn ăng ten và lựa chọn nút và vị trí của các nút chuyển tiếp [63]. Ngoài ra, trong mô hình chuyển tiếp sử dụng đa ăng ten tại các nút, vấn đề sử dụng kỹ thuật thu kết hợp MRC (Maximal Ratio Combining) cũng được đặt ra. Trong thời gian gần đây, việc sử dụng kỹ thuật thu hoạch năng lượng sóng điện từ RF-EH (Radio Frequency Energy Harvesting) tại các nút chuyển tiếp R cũng nhận được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Kỹ thuật này cho phép các nút R chuyển năng lượng sóng vô tuyến thu được từ một trạm phát hoặc từ các nút khác trong hệ thống thành năng lượng điện để làm việc. Tuy nhiên, việc thực hiện EH tại các nút R cần một khoảng thời gian nhất định, do đó ảnh hưởng đến quá trình truyền tin của hệ thống. Ngoài ra, hiệu suất thu hoạch năng lượng cũng là

một tham số tác động đến việc phân tích hiệu năng hệ thống dựa trên các kết quả tính toán các giá trị OP và IP. Một cách ngắn gọn, các đóng góp của các nghiên cứu này phụ thuộc vào việc lựa chọn độ phức tạp của các tham số và mô hình tính toán, và được thể hiện qua các biểu thức tường minh của các kết quả.

Trên quan điểm cải thiện hiệu năng OP và IP của mạng, các nghiên cứu liên quan đến WSN được tóm tắt như sau đây.

Các nghiên cứu về cải thiện OP của hệ thống theo mô hình MH được đề cập trong [58]. Các chủ đề bao gồm tối ưu hóa số chặng; cơ chế truyền dẫn đa chặng theo hình thức đơn công HD (Half Duplex) hay song công FD (Full Duplex); mô hình kênh vô tuyến dưới ảnh hưởng của pha đỉnh theo phân bố Rayleigh, Nakagami- m , hay Rician; các ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống như nghe lén hay thiết bị phần cứng không hoàn hảo; mô hình chuyển tiếp nối tiếp hay song song và kèm theo đó là việc lựa chọn nút chuyển tiếp, lựa chọn ăng ten trong mô hình đa ăng ten MIMO (Multiple Input Multiple Output); cơ chế chuyển tiếp khuếch đại rồi chuyển tiếp AF (Amplify and Forward) hay giải mã rồi chuyển tiếp DF (Decode and Forward) là những đề tài được thảo luận nhiều trong các nghiên cứu về MH [60-61, 65, 76-78]. Mục đích cuối cùng của các nghiên cứu này là đạt được các giá trị hiệu năng xác suất dừng OP (Outage Probability), và xác suất chặn IP (Intercept Probability) tốt nhất. Ngoài việc thu hoạch năng lượng để kéo dài tuổi thọ của SN, các nút cảm biến còn có thể sử dụng các năng lượng này như là một tín hiệu gây nhiễu lên các nút nghe lén E để bảo đảm IP tại E được thực hiện trong các nghiên cứu [30, 66-67, 99]. Hợp tác gây nhiễu CJ (Cooperative Jamming) là một kỹ thuật cơ bản để chống lại việc thu thập trái phép thông tin của các nút nghe lén được thực hiện trong các nghiên cứu [69, 71-75, 82, 129]. Có nhiều cơ chế hợp tác đã được thực hiện trong các nghiên cứu này. Trong đó, [71, 82] đề xuất các phương pháp kết hợp việc lựa chọn các nút chuyển tiếp và nút gây nhiễu để nâng cao hiệu năng IP trong các mạng chuyển tiếp hai chặng, và [71] còn đề xuất các nút gây nhiễu cần phải thu hoạch năng lượng từ nút nguồn S để phát AN. Trong [72-73] các tác giả đã đánh giá hiệu năng dừng bảo mật cho các mạng có sử dụng kỹ thuật đa truy nhập không trực giao kết hợp bằng CJ. Tài liệu [129] đã

quan tâm tới phương pháp ngẫu nhiên và chuyển tiếp để gây nhiễu cho nút E; trong đó, các nút S và R sử dụng các bộ mã ngẫu nhiên làm cho nút E không thể kết hợp được các tín hiệu thu được với tỉ lệ kết hợp lớn nhất MRC (Maximal Ratio Combining). Tài liệu này cũng đã đề xuất việc lựa chọn nút gây nhiễu và lựa chọn cặp đôi người dùng để cải thiện hiệu năng OP và IP. Tương tự như [129], việc đánh giá OP và IP với CJ và việc lựa chọn cặp đôi người dùng trong các mạng chuyển tiếp 2 chiều đã được nghiên cứu trong [74] dưới ảnh hưởng của việc ước lượng thông tin trạng thái kênh không hoàn hảo.

Các nghiên cứu được đề cập ở trên đã cung cấp một cái nhìn tổng quan về việc đánh giá OP và IP với các kỹ thuật CJ, MH, và RF-EH trong các mạng WSN sử dụng giao thức LEACH. Tuy nhiên, **chưa có nghiên cứu nào** đề cập tới việc xây dựng mô hình tính toán OP và IP trong điều kiện số chặng chuyển tiếp (số cụm) và số nút trong cụm là các tham số thay đổi, việc lựa chọn nút gây nhiễu J, vai trò của các CH trong LEACH như là một nút cung cấp năng lượng cho các nút gây nhiễu J trong cụm kế tiếp theo hướng truyền tin từ S tới D thông qua kỹ thuật EH, hay số lượng các ăng ten của CH và các SN, hay cơ chế lựa chọn ăng ten, cơ chế làm việc của EH, cơ chế lựa chọn nút, và ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo lên các tham số hiệu năng OP và IP trong mô hình được đề xuất. Từ những khảo sát trên, có thể nhận thấy những tham số sau đây có thể được **kết hợp** để xây dựng mô hình trong các nghiên cứu về đánh giá OP và IP toàn chặng trong mạng WSN MH LEACH sử dụng kỹ thuật thu hoạch năng lượng EH để gây nhiễu kép hợp CJ:

- 1) Cơ chế lựa chọn nút gây nhiễu kết hợp EH và vai trò của CH.
- 2) Số lượng ăng ten của các SN, CH, và E cũng như cơ chế lựa chọn ăng ten trong mô hình MIMO tạo nên bởi các nút đa ăng ten.
- 3) Số chặng chuyển tiếp (số cụm)?
- 4) Số nút thành viên trong các cụm và mô hình và mục đích áp dụng EH/CJ tại các nút trong cụm?
- 5) Ảnh hưởng của lỗi phần cứng lên hiệu năng hệ thống.
- 6) Mô hình kênh pha đỉnh.

Các vấn đề được đề cập ở trên chính là động lực thứ hai cho các nghiên cứu về cải thiện hiệu năng HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp trong luận án này của nghiên cứu sinh.

1.5 Kết luận Chương 1

Chương 1 đã cung cấp những thông tin cơ bản về các HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp; bao gồm: 1) hệ thống thông tin di động sử dụng các trạm chuyển tiếp, và 2) HTTTVT thế hệ mới với mô hình truyền thông đa chặng được minh họa điển hình với mạng WSN MH LEACH. Duy trì kết nối là một tiêu chí hiệu năng quan trọng nhất như đã nêu trong tiêu chuẩn quốc tế ITU-T Y.2225 [36] trong ngữ cảnh HTTTVT thế hệ mới. Tiêu chí này được thể hiện qua ba chỉ số hiệu năng chính là xác suất rớt CDP liên quan đến chuyển tiếp các cuộc gọi chuyển giao, xác suất dừng OP và xác suất chặn IP liên quan đến chuyển tiếp kết nối đa chặng. Chương 1 của luận án đã trình bày khái quát về chuyển giao cuộc gọi, kỹ thuật chuyển tiếp trong chặng di động và trong HTTTVT đa chặng qua mô hình WSN MH LEACH. Tiếp đó, luận án đã tập trung trình bày các vấn đề về chuyển giao, CDP, OP, IP và các nghiên cứu liên quan đến các vấn đề trên. Qua khảo sát các nghiên cứu đã có, luận án đưa ra định hướng nghiên cứu: 1) duy trì kết nối và chất lượng kết nối với kỹ thuật chuyển tiếp, nâng cao xác suất chuyển giao thành công trong các vùng lưu lượng rất cao của cụm chuyển tiếp trong thông tin di động khi các trạm gốc đều đang bận; và 2) tính toán hiệu năng OP và IP toàn chặng của cụm truyền thông đa chặng với một trường hợp điển hình là cụm WSN MH LEACH trong điều kiện có tác nhân sử dụng kỹ thuật thu hoạch năng lượng để hợp tác gây nhiễu, ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo và pha đỉnh Rayleigh. Các nội dung này sẽ được thực hiện trong các chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 2 GIẢI PHÁP DUY TRÌ VÀ CẢI THIỆN CHẤT LƯỢNG KẾT NỐI TRONG HỆ THỐNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN SỬ DỤNG TRẠM CHUYỂN TIẾP

Tóm tắt:

*Nội dung chương này sẽ phân tích định hướng nghiên cứu số 1 của nghiên cứu sinh: duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao HO thời gian thực trong một vùng mạng có lưu lượng rất cao của HTTTVT sử dụng trạm chuyển tiếp RS như thể hiện trong cụm 1 của Hình 1. Cụ thể là: các mô hình tính toán CDP với các trạm gốc không dự trữ kênh, và dự trữ 1 kênh; các kết quả mô phỏng tính toán xác suất chuyển giao và xác suất chuyển giao thành công cuộc gọi thông qua RS với các mô hình mạng khác nhau. Các nội dung chính của chương 2 gồm: giải pháp sử dụng trạm chuyển tiếp để duy trì kết nối với các mô hình trạm chuyển tiếp kênh tĩnh và chuyển tiếp trong chuyển giao; giải pháp duy trì kết nối và chất lượng kết nối với kỹ thuật chuyển tiếp xét trong ba trường hợp: khi các trạm gốc không dự trữ kênh để chuyển giao, khi trong vùng lưu lượng cao và khi các trạm gốc có dự trữ ít nhất một kênh để chuyển giao. Phần mô phỏng được thực hiện để kiểm chứng kết quả tính toán lý thuyết. Đóng góp của chương này được thể hiện trong các công trình **J.02**, **J.03**, và **J.04**.*

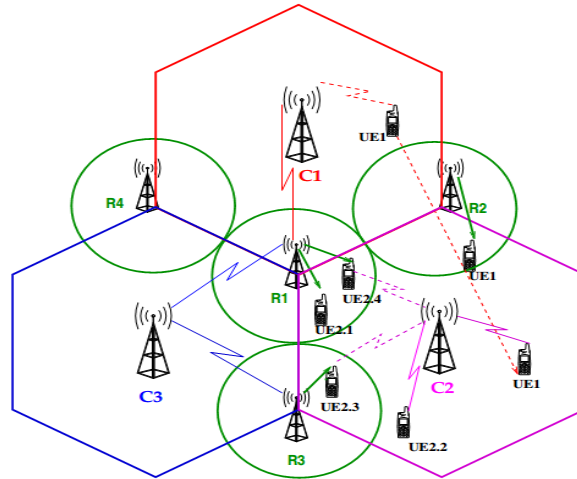
2.1 Giải pháp sử dụng trạm chuyển tiếp để duy trì kết nối

2.1.1 Mô hình các trạm chuyển tiếp kênh

Mô hình tổng quát của kỹ thuật chuyển tiếp kênh CRS (Channel Relaying Strategy) trong HTTTVT sử dụng RS được mô tả như trong Hình 2.1. Mô hình này bao gồm 3 BS được ký hiệu C1, C2, và C3; 4 RS ký hiệu từ R1 đến R4 và các MU với các ký hiệu UE1, UE2.x (với $x = \{1, 2, 3, 4\}$) để chỉ các MU thuộc vùng phục vụ của BS C1 và C2 tương ứng.

Với mục đích làm giảm các chỉ số CBP và CDP, CRS được đề xuất với 2 mô hình hoạt động: chuyển tiếp kênh tĩnh SCRS (Static CRS) cho các cuộc gọi mới và

chuyển tiếp kênh chuyển giao HCRS (Handover CRS) để phục vụ các cuộc gọi chuyển giao. Nguyên lý của SCRS và HCRS được mô tả vắn tắt như sau đây [50, 56-57].



Hình 2.1 Mô hình chuyển tiếp kênh CRS

2.1.2 Chuyển tiếp kênh tĩnh SCRS

SCRS được sử dụng để phục vụ các cuộc gọi mới trong các BS nóng. BS nóng được hiểu là các trạm gốc không có đủ số kênh lưu lượng TCH để đáp ứng cho các yêu cầu gọi, làm cho GoS trong các BS này vượt quá các giá trị danh định như đã nêu trong Chương 1. Ngược lại, BS lạnh là các BS có dư các TCH. Trong Hình 2.1, giả sử các BS C1 và C2 là các BS nóng, và C3 là BS lạnh. SCRS cho phép chuyển các kênh rảnh từ BS lạnh sang các BS nóng để phục vụ cuộc gọi mới như sau đây.

- SCRS trực tiếp: Giả sử UE2.1 trong BS C2 thiết lập một cuộc gọi mới và cuộc gọi này có nguy cơ bị chặn (blocked) vì tất cả các TCH trong C2 đều đang bị chiếm. Do UE2.1 đứng trong vùng phủ sóng của R1 và C3 là BS lạnh nên cuộc gọi của UE2.1 được kết nối thông qua R1 tới C3 như sau: $C3 \rightarrow R1 \rightarrow UE2.1$.
- SCRS gián tiếp: Giả sử UE2.2 cũng yêu cầu TCH để thiết lập cuộc gọi mới nhưng MU này không đứng trong vùng phục vụ của bất kỳ RS nào giữa các BS. Trong Hình 2.1, giả sử UE2.3 đang chiếm kênh của C2 và đứng trong vùng phủ sóng của R3. Lúc này, cuộc gọi của UE2.3 sẽ được chuyển tiếp sang C3 như sau: $C3 \rightarrow R3 \rightarrow UE2.3$. Sau khi chuyển tiếp, TCH của C2 đang bị chiếm bởi UE2.3 sẽ được chuyển sang cho UE2.2. Trong trường hợp này,

SCRS thực hiện việc chuyển tiếp để đáp ứng cho cuộc gọi của UE2.2 một cách gián tiếp thông qua UE2.3.

Như trên có thể thấy, kỹ thuật chuyển tiếp tĩnh SCRS không thực sự hiệu quả. Kỹ thuật chuyển tiếp HCRS có nhiều ưu điểm hơn đặc biệt trong điều kiện vùng lưu lượng rất cao, do vậy luận án sẽ chỉ tập trung chủ yếu vào nghiên cứu kỹ thuật HCRS.

2.1.3 Chuyển tiếp kênh chuyển giao HCRS

HCRS là kỹ thuật chuyển tiếp để phục vụ các cuộc gọi HO. Như đã giả sử ở mục 2.1.1, các trạm gốc C1 và C2 trong Hình 2.1 là các BS nóng, và C3 là BS lạnh. Các trường hợp chuyển giao trong mô hình này được mô tả như sau:

- 1) Chuyển giao tới BS lạnh (HO tới C3): do C3 là BS lạnh nên trạm gốc này vẫn còn dư các kênh TCH chưa dùng đến, vì vậy cuộc gọi chuyển giao này hoàn toàn được phục vụ mà không cần phải sử dụng HCRS.
- 2) Chuyển giao tới BS nóng: ví dụ như từ C3 sang C2 (HO từ cell lạnh sang cell nóng) hay từ C1 sang C2 (giữa 2 cell nóng). Trong trường hợp HO đến BS nóng, nếu không có các RS và kỹ thuật chuyển tiếp kênh CRS thì cuộc gọi HO sẽ bị thất bại do BS này không còn kênh TCH rảnh. Giả sử UE1 đang thực hiện cuộc gọi trong BS C1 và di chuyển theo hướng sang BS C2 như trong Hình 2.1. Cuộc gọi HO của UE1 được phục vụ thông qua các RS một cách trực tiếp và gián tiếp như sau:
 - i. Trong các hệ thống không sử dụng chuyển tiếp, khi UE1 vượt qua biên giới của BS C1 thì sẽ xảy ra chuyển giao giữa C1 và C2 để duy trì cuộc gọi cho UE1. Tuy nhiên, do tồn tại trạm chuyển tiếp R2 giữa 2 BS này nên UE1 sẽ chưa yêu cầu thực hiện HO ngay mà được tiếp tục phục vụ bởi C1 thông qua kết nối với R2 như sau: $C1 \rightarrow R2 \rightarrow UE1$. Trong trường hợp này, HCRS đã giúp giảm các yêu cầu chuyển giao trong hệ thống bằng việc duy trì TCH và mở rộng vùng phục vụ của C1 thông qua R2. Hơn nữa, nếu UE1 kết thúc cuộc gọi trong R2 thì coi như đã không có một yêu cầu cấp

kênh HO nào được gửi đến hệ thống thông qua C2, tức là tỉ lệ các cuộc gọi HO trong hệ thống đã được giảm đi.

- ii. Khi UE1 vẫn tiếp tục đàm thoại và di chuyển ra khỏi R2 và tiến vào vùng phục vụ chính thức của C2 thì MU này không còn nhận được sự hỗ trợ từ C1 và R2. Khi đó, UE1 sẽ giải phóng TCH về cho C1 và gửi yêu cầu cấp một TCH mới đến C2. Do C2 là BS nóng nên cuộc gọi của UE1 có nguy cơ bị rớt vì tất cả các TCH trong C2 đều đang bị chiếm. Lúc này C2 cần phải tìm kiếm một MU mà nó đang phục vụ, và đứng trong vùng phủ sóng của một trong số các RS giữa C2 và C1 để thực hiện việc chuyển tiếp kênh để phục vụ UE1. Giả sử UE2.4 của C2 đang chiếm TCH của C2 và đứng trong vùng phủ sóng của R1 như trong Hình 2.1. Việc chuyển tiếp kênh được thực hiện như sau: UE2.4 chuyển qua dùng TCH (mới được giải phóng bởi UE1) của C1 thông qua R1 ($C1 \rightarrow R1 \rightarrow UE2.4$), kênh TCH do UE2.4 giải phóng trong C2 sẽ được chuyển sang phục vụ UE1 ($C2 \rightarrow UE1$). Như vậy, trong trường hợp này HCRS đã giúp duy trì cuộc gọi HO của UE1 trong C2, tức là giảm CDP. Trong trường hợp không có một MU nào đang chiếm kênh TCH của C2 và đồng thời không đứng trong vùng phủ sóng của một trong hai RS nằm giữa C1 và C2, cuộc gọi HO của UE1 sang C2 sẽ bị thất bại.

Có thể thấy rằng xác suất thành công của việc duy trì cuộc gọi HO trong trường hợp 2) ii., ở trên tương đương với xác suất có một MU đang chiếm TCH của C2 và đứng trong vùng phục vụ của các RS giữa C1 và C2. Việc tính toán xác suất thành công cho các cuộc gọi HO sẽ được phân tích chi tiết hơn trong các nội dung tiếp theo.

2.2 Duy trì kết nối với kỹ thuật chuyển tiếp kênh

2.2.1 Duy trì kết nối khi các trạm gốc không dự trữ kênh để chuyển giao

Có thể nhận thấy rằng nguyên lý CRS phân tích trong nội dung Mục 2.1.2 ở trên đã khai thác tối đa vai trò của RS trong việc chuyển tiếp kênh để cải thiện hiệu năng CDP. CRS không những cho phép chuyển lưu lượng từ BS nóng sang BS lạnh như trong SCRS để cải thiện CBP, mà còn cho phép chuyển lưu lượng giữa các BS

nóng như trong HCRS để cải thiện CDP. Đây là ưu điểm nổi bật của CRS khi so sánh với nguyên lý mượn kênh [126], và ICAR trong việc chuyển tiếp kênh [49, 55, 125]. Trên cơ sở này, để đánh giá vai trò của CRS trong việc cải thiện hiệu năng mạng, nghiên cứu sinh đã thực hiện nghiên cứu trong điều kiện lưu lượng mạng có tốc độ thiết lập cuộc gọi λ rất cao, sao cho chỉ số GoS của mạng sẽ rất lớn như minh họa trong các tính toán ở các hình từ Hình 1.7 đến Hình 1.11. Điều kiện lưu lượng này dẫn đến các nhận định sau đây trong hoạt động của mạng:

- 1) Nếu không có CRS, để đạt được CDP danh định thì cần phải tính toán N_h đủ lớn. Như đã phân tích trong Mục 1.3.4, để tính được N_h , cần phải tính T_h . Trong khi đó, T_h là lưu lượng thứ cấp phát sinh từ T_n , và được tính thông qua T_n và xác suất chuyển giao P_h . Trong trường hợp tốc độ thiết lập cuộc gọi mới rất cao, làm cho T_n rất cao, tức là T_h cũng sẽ cao làm cho cả CBP và CDP đều cao và khó có thể tính được N_h thích hợp.
- 2) Trong trường hợp cả CBP và CDP đều rất cao, chọn mức ưu tiên cho CDP. Tuy nhiên, căn cứ theo công thức (1.14), khi lưu lượng chuyển giao T_h lớn đến mức ngay cả khi $N_h = N_C$ mà CDP vẫn rất cao thì bài toán quản lý và cấp phát tài nguyên vô tuyến gặp khó khăn theo như phân tích 1) ở trên.
- 3) Từ 2 nhận định trên, tác giả đề xuất giải pháp sử dụng toàn bộ dung lượng cho các cuộc gọi mới ($N_n = N_C$) để giảm CBP tối đa, và sử dụng các trạm chuyển tiếp để bảo đảm CDP.

Tóm lại, dựa trên nguyên lý của CRS, trong trường hợp lưu lượng tại một khu vực nào đó trong mạng tăng cao đột biến, tác giả đề xuất dành toàn bộ dung lượng của các BS trong vùng đó cho các cuộc gọi mới để đạt được giá trị CBP tốt nhất. Như vậy, **các BS không dự trữ một kênh vô tuyến nào cho các cuộc gọi HO. Việc duy trì kết nối để bảo đảm CDP sẽ được thực hiện nhờ HCRS.**

2.2.2 Duy trì kết nối trong vùng lưu lượng cao

Trở lại mô hình mạng gồm 3 trạm gốc như mô tả trong Hình 2.1. Điều kiện lưu lượng cao được thể hiện qua tốc độ thiết lập cuộc gọi λ (calls/time_unit) trong cả 3 trạm rất lớn, sao cho tất cả các TCH đều bị chiếm cho các cuộc gọi mới trước

khi xảy ra HO trong mạng. Ngoài ra, bất kỳ kênh TCH nào được giải phóng bởi một MU trong BS mà không sử dụng cho HCRS để duy trì kết nối cho cuộc gọi HO thì sẽ bị chiếm ngay bởi một cuộc gọi mới khác. Nói một cách khác, cho dù tốc độ thiết lập cuộc gọi tuân theo phân bố nào (thường là phân bố Poisson) thì giá trị trung bình của phân bố này cũng rất lớn. Giả thiết này được dùng để mô tả trạng thái nghẽn cục bộ trong một vùng mạng khi số lượng MU tập trung lớn với nhu cầu gọi cao. Ngoài ra, thời gian gọi hay thời gian chiếm kênh cũng là một tham số làm tăng lưu lượng. Thời gian này phụ thuộc vào loại hình cuộc gọi: cuộc gọi thoại thì thời gian chiếm kênh trung bình thường thấp hơn rất nhiều so với các cuộc gọi số liệu thời gian thực. Tham số thời gian sẽ được thể hiện tương ứng trong các kịch bản mô phỏng. Các tham số này hoàn toàn có thể so sánh được với các giá trị trong các nghiên cứu về lưu lượng trong các hệ thống thông tin di động thế hệ sau [41, 44-45, 136-137].

Với giả thiết như trên, cả 3 trạm trong vùng mạng Hình 2.1 đều nóng nên các cuộc gọi HO trong vùng này là chuyển giao giữa các trạm nóng. Như đã phân tích trong mục 2.1.3, xác suất thành công của cuộc gọi HO của UE1 khi di chuyển từ C1 sang C2 được tính như là xác suất có ít nhất một MU của C2 đang thực hiện cuộc gọi và nằm trong vùng phủ sóng của 1 trong 2 trạm chuyển tiếp R1 và R2 nằm giữa 2 BS C1 và C2. Do tất cả các kênh TCH của C2 đều đang bị chiếm, tức là có N_C thuê bao đang thực hiện cuộc gọi trong C2. Như vậy, xác suất chuyển giao thành công P_{hs} của cuộc gọi HO được tính như sau:

$$P_{hs} = P_r(1MU - trong - RS) = 1 - \left(1 - \frac{2 \cdot \frac{1}{3} \pi \left(\frac{R}{2}\right)^2}{\pi R^2} \right)^{N_C} = 1 - \left(\frac{5}{6}\right)^{N_C} \quad (2.1)$$

Các kết quả tính toán P_{hs} với các giá trị N_C khác nhau được cho trong Bảng 2.1.

Bảng 2.1 Xác suất chuyển giao thành công khi áp dụng HCRS

N_C	5	10	15	20	25	30
P_{hs} (%)	59.81	83.85	93.51	97.39	98.95	99.58

Các kết quả trong Bảng 2.1 đã chỉ ra rằng: về mặt lý thuyết, với dung lượng $N_C = 30$ TCH, hệ thống đã đáp ứng được chỉ số CDP nhỏ hơn 0.5% ($CDP = 1 - P_{hs}$). Kết quả này thực sự ấn tượng nếu so sánh với các kết quả trong các nghiên cứu về chuyển giao [40-42, 44-45, 136-137]. Hơn nữa, với điều kiện tất cả các TCH đều được sử dụng để phục vụ cho các cuộc gọi mới; tức là $N_h = 0$ thì theo công thức (1.14), giá trị $CDP = 1$ nếu không sử dụng HCRS. Trong trường hợp này, có thể nói rằng HCRS đã duy trì được kết nối cho các cuộc gọi HO và bảo đảm CDP trong điều kiện lưu lượng tăng cao đột biến trong các BS ở một vùng mạng nhất định.

2.2.3 Duy trì kết nối khi các trạm gốc dự trữ một kênh để chuyển giao

Các cơ sở của việc thực hiện bài toán dự trữ kênh là căn cứ vào tính ưu tiên của các cuộc gọi chuyển giao: thông thường, các hệ thống luôn cần dự trữ một lượng TCH nhất định để đáp ứng yêu cầu chuyển giao. Như vậy, dung lượng của BS sẽ được chia thành 2 phần: một phần N_{cc} dùng chung cho cả 2 loại hình cuộc gọi mới và cuộc gọi chuyển giao, và một phần N_r chỉ dành cho HO như trong công thức (2.2) sau đây [50, 56, 115-118, 122]:

$$N_C = N_{cc} + N_r, \quad \begin{cases} N_{cc} = (1-k)N_C \\ N_r = k \cdot N_C \end{cases} \quad (2.2)$$

Trong đó, k là hệ số dự trữ phụ thuộc vào lưu lượng chuyển giao T_h được tính thông qua xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h [50, 56, 115-118].

Căn cứ vào cơ sở trên, nghiên cứu sinh nhận thấy rằng: việc sử dụng toàn bộ dung lượng để phục vụ các cuộc gọi mới và sử dụng kỹ thuật HCRS để nâng cao xác suất thành công cho các cuộc gọi chuyển giao trong vùng nghẽn cục bộ đã được chứng minh như trong công thức (2.1) và thể hiện trong Bảng 2.1. Tuy nhiên, nhận thấy trong Bảng 2.1, trường hợp BS có dung lượng nhỏ hơn 20 TCH, giá trị $CDP > 5\%$ nên có thể xem xét giải pháp cải thiện.

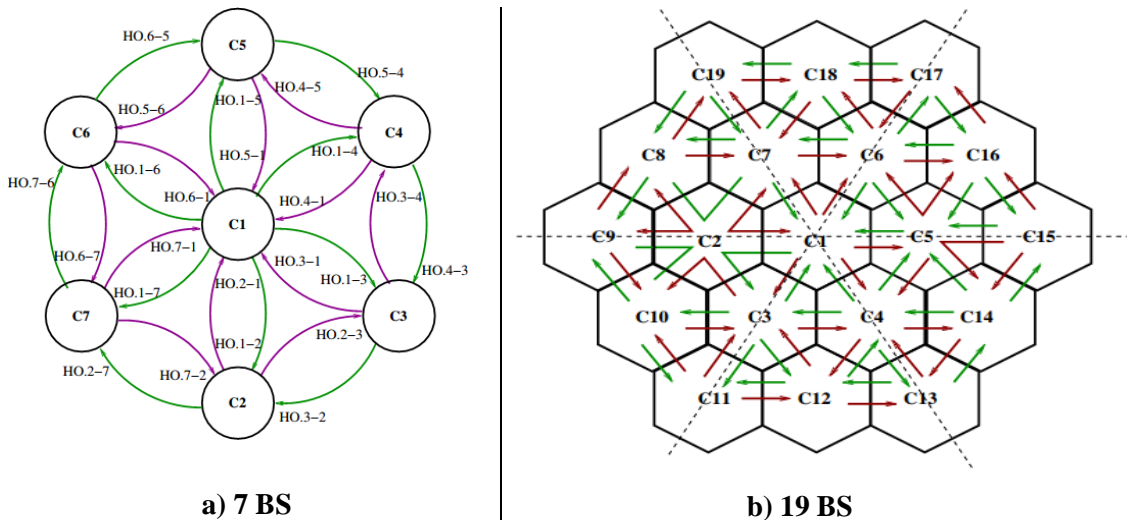
Dựa vào ưu điểm của HCRS, nghiên cứu sinh đề xuất dự trữ một kênh tại các BS vì những lý do sau:

1. Với một kênh dự trữ, các BS trong vùng nghẽn trở nên lạnh tạm thời. Dung lượng dành cho HO là $N_h = 1$. Trong trường hợp không sử dụng các trạm chuyển tiếp, thay $N_h = 1$ vào (1.14) ta có:

$$CDP = \frac{T_h^{N_h} / N_h!}{\sum_{k=0}^{N_h} (T_h^k / k!)} = \frac{T_h^1 / 1!}{T_h^0 / 0! + T_h^1 / 1!} = \frac{T_h}{T_h + 1} \quad (2.3)$$

Trong công thức (2.3), khi lưu lượng chuyển giao T_h rất lớn, nếu không sử dụng chuyển tiếp thì giá trị CDP vẫn xấp xỉ 1.

2. Khi sử dụng HCRS, các cuộc gọi HO đến các BS đều được phục vụ ở yêu cầu gọi đầu tiên và sau đó BS sẽ trở lại trạng thái nóng vì tất cả TCH đều đang tạm thời bị chiếm. Các cuộc gọi HO tiếp theo đến các BS nóng sẽ vẫn tuân theo nguyên lý HCRS với xác suất thành công được tính như trong công thức (2.1). Trong trường hợp này, xác suất thành công trong các mô hình mạng 7 BS và 19 BS như trong Hình 2.2 được tính như sau.



Hình 2.2 Các khả năng chuyển giao trong mô hình 1 kênh dự trữ

Mô hình vùng nghẽn cục bộ theo dạng phân bố vòng, bao gồm vòng trung tâm 1 BS (vòng 0th), các vòng tiếp theo có số BS là $6n$, với n là số thứ tự của vòng. Các khả năng chuyển giao có thể có với số vòng bằng 2 và bằng 3 tương đương với số BS tương ứng trong mạng là 7 BS và 19 BS như trong Hình 2.2 được tính như sau [49, 56]:

- Giả sử mô hình có n vòng.

- Các MU ở trong các BS của các vòng từ thứ 0^{th} đến thứ $(n-1)^{\text{th}}$ có 6 khả năng chuyển giao sang các BS xung quanh.
- Các MU ở trong BS của vòng thứ n^{th} được chia làm 2 loại:
 - a. Nếu ở trong các BS nằm trên các đường thẳng nét đứt như minh họa trong Hình 2.2.b) thì có 3 khả năng chuyển giao, bao gồm 2 BS ngang hàng trong cùng vòng, và 1 BS thuộc vòng bên trong. Với mỗi vòng, có 6 BS nằm trên các đường nét đứt.
 - b. Nếu nằm trong các BS còn lại của vòng thì sẽ có 4 khả năng chuyển giao sang các BS lân cận, bao gồm 2 BS ngang hàng trong cùng vòng, và 2 BS thuộc vòng bên trong. Với mỗi vòng, có $(6n - 6)$ các BS này.

- Như vậy, số các khả năng chuyển giao N_{HO} của một vùng có n vòng là:

$$N_{HO} = \left(1 + \sum_{k=1}^{n-1} 6k\right) \cdot 6 + [6 \cdot 3 + (6n - 6) \cdot 4] = 6 \left(\sum_{k=1}^n 6k - 2n\right) \quad (2.4)$$

Trong đó, $\left(1 + \sum_{k=1}^{n-1} 6k\right)$ là tổng số BS từ vòng thứ 0^{th} đến vòng thứ $(n-1)^{\text{th}}$.

- Trong trường hợp lý tưởng: tất cả các BS đều luôn ở trạng thái lạnh do các MU di chuyển qua lại lẫn nhau giữa các BS trong quá trình đàm thoại một cách lý tưởng làm cho không có một BS nào trở nên nóng và tất cả các cuộc gọi HO đều được phục vụ. Khi đó,

$$P_{hs}(best) = \Pr(1) = 1 \quad (2.5)$$

- Trong trường hợp xấu nhất: sau khi tất cả các BS đều trở nên nóng do kênh dự trữ đã bị chiếm dụng mà vẫn có các cuộc gọi HO di chuyển tới và yêu cầu cấp kênh. Như vậy, trong tổng số N_{HO} các khả năng được tính ở (2.4), sẽ có

$\left(1 + \sum_{k=1}^{n-1} 6k\right)$ khả năng có P_{hs} được tính theo (2.5), và số khả năng còn lại phải

sử dụng HCRS với P_{hs} được tính theo công thức (2.1). Như vậy, ta có:

$$P_{hs}(worst) = \frac{\Pr(1) + P_{hs}(HCRS)}{N_{HO}}$$

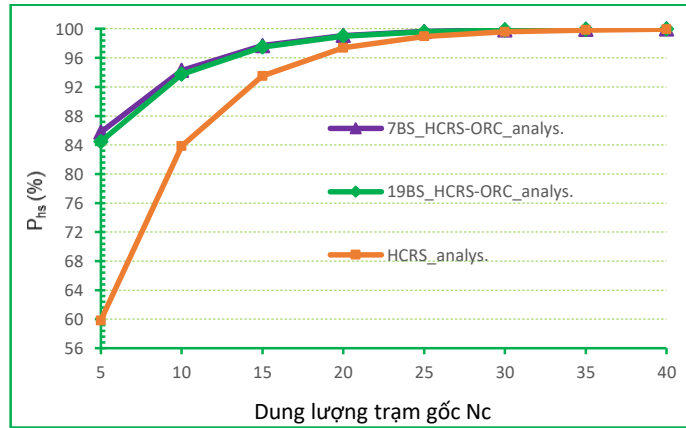
$$= \frac{\left(1 + \sum_{k=1}^n 6k\right) + \left[5 \sum_{k=1}^n 6k - (12n+1)\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{5}{6}\right)^{N_c}\right]}{6 \left(\sum_{k=1}^n 6k - 2n\right)} \quad (2.6)$$

- Như vậy, một cách lý thuyết, xác suất chuyển giao thành công trong trường hợp các BS có đủ một kênh $P_{hs}(HCRS-ORC)$ là:

$$P_{hs}(HCRS - ORC) = \frac{P_{hs}(best) + P_{hs}(worst)}{2}$$

$$= \frac{1 + \frac{\left(1 + \sum_{k=1}^n 6k\right) + \left[5 \sum_{k=1}^n 6k - (12n+1)\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{5}{6}\right)^{N_c}\right]}{6 \left(\sum_{k=1}^n 6k - 2n\right)}}{2} \quad (2.7)$$

Các kết quả tính toán cho thấy việc dự trữ 1 kênh cải thiện được CDP ở vùng dung lượng BS $N_c < 20$ như mô tả trong Hình 2.3.



Hình 2.3 Xác suất chuyển giao thành công của HCRS có và không dự trữ kênh

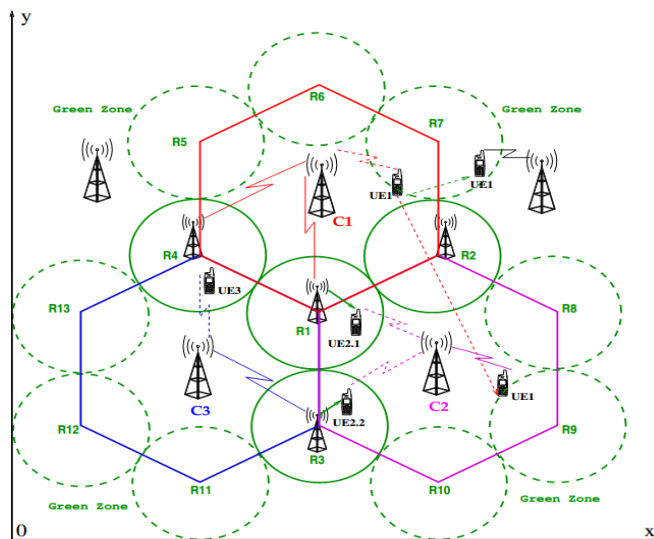
Hình 2.3 cho thấy rằng: về mặt lý thuyết, HCRS-ORC tăng khả năng chuyển giao thành công từ gần 60% lên hơn 84% với $N_c = 5$, và từ khoảng 84% lên khoảng 94% với $N_c = 10$ tương ứng. Ngược lại, với dung lượng BS đủ lớn ($N_c \geq 25$), việc sử dụng 1 kênh dự trữ không thực sự hiệu quả. Tuy nhiên, việc tính toán và chứng minh các kết quả trong trường hợp dự trữ một kênh đã khẳng định hiệu quả của HCRS

trong việc bảo đảm tỉ lệ thành công cho các cuộc gọi chuyển giao trong các hệ thống thông tin di động sử dụng trạm chuyển tiếp hoạt động ở miền lưu lượng cao.

2.3 Kết quả mô phỏng

2.3.1 Mô hình và kết quả mô phỏng với 3 trạm gốc không dự trữ kênh

Để đánh giá hiệu quả của HCRS trong việc nâng cao xác suất chuyển giao thành công cho các cuộc gọi số liệu thời gian thực trong vùng nghẽn cục bộ, tác giả xây dựng mô hình mạng 3 trạm gốc với 3 BS C1, C2, và C3, và 13 RS được đánh số từ R1 đến R13 được mô tả như trong Hình 2.4. Mô hình này được phát triển từ mô Hình 2.1 bằng việc gán thêm 9 RS được đánh số từ R5 đến R13. Việc gán thêm các RS này là để khoanh vùng khu vực xử lý với giả thiết nghẽn cục bộ chỉ xảy ra trong vùng gồm cả 3 BS đều có lưu lượng rất cao như các giả thiết ở mục 2.2.2. Ngoài vùng này, các BS hoạt động với lưu lượng bình thường (vùng xanh: Green Zone). Với việc khoanh vùng như vậy, hoàn toàn có thể giả sử rằng các cuộc gọi HO từ các BS C1, C2, và C3 ra vùng xanh đều được phục vụ. Một cách ngắn gọn, HCRS được áp dụng trong vùng 3 BS trong Hình 2.4.



Hình 2.4 Mô hình mô phỏng vùng mạng 3 BS sử dụng HCRS [J.04]

Các tham số mô phỏng được thể hiện trong Bảng 2.2, trong đó thời gian đàm thoại cho một cuộc gọi số liệu thời gian thực được mô phỏng lên tới 30 phút trong

điều kiện MU di chuyển với tốc độ của người đi bộ 1m/s (tương đương 3.6km/h) hoặc với tốc độ thấp 5m/s (trung bình 18km/h) trong vùng nghẽn.

Bảng 2.2 Tham số mô phỏng HCRS cho các cuộc gọi số liệu thời gian thực

Vận tốc v (m/s)	[1, 5]
Thời gian đàm thoại t (phút)	[5, 10, 15, 20, 25, 30]
Số TCH (N_C)	[5, 10, 15, 20, 25, 30]
Bán kính BS R (m)	[300, 400, 500, 600, 700]

Việc mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm Matlab thông qua việc xây dựng các chương trình (codes) như sau:

1. Xác định vị trí tọa độ của các trạm gốc và trạm chuyển tiếp theo mô hình mạng thể hiện trong Hình 2.4: Vùng phủ sóng của các BS và RS được coi là các hình tròn với tâm C_c và C_r được gán vào hệ thống theo tọa độ thông qua các giá trị của bán kính R như trong Phụ lục PL1.

2. Khởi tạo các cuộc gọi và việc chiếm kênh lưu lượng các MU: Việc chiếm kênh lưu lượng được thể hiện bằng việc gán tham số vị trí và tham số cuộc gọi cho tất cả các MU có trong các BS. Các MU được gán vào các BS trong hệ thống với các vị trí ban đầu và các tham số cuộc gọi (tốc độ di chuyển, hướng di chuyển, và thời gian chiếm kênh) như trong Phụ lục PL2.

3. Mô tả hoạt động của hệ thống: Hệ thống được mô tả theo các sự kiện (*Event*) và chương trình sẽ dừng lại khi xét đủ số sự kiện. Kịch bản mô phỏng được xây dựng theo các sự kiện thực tế trong hoạt động của hệ thống thông tin di động, tức là giả sử các MU thiết lập cuộc gọi mới thành công và di chuyển tự do với tốc độ và hướng không đổi trong suốt quá trình đàm thoại. Tùy theo các tham số của cuộc gọi mà MU có thể có các sự kiện như sau xảy ra:

- MU kết thúc cuộc gọi trong BS \rightarrow sự kiện kết thúc cuộc gọi: *Event = terminated*.

- MU di chuyển ra khỏi BS đang phục vụ theo nguyên lý HCRS đã phân tích ở trên, cuộc gọi của MU sẽ được tính là chuyển giao. Các sự kiện có thể xảy ra là với việc chuyển giao của MU là:
 - MU di chuyển vào vùng xanh → sự kiện HO xanh: *Event = green-HO*.
 - Cuộc gọi HO thành công → sự kiện HO thành công: *Event = handover-success*.
 - Cuộc gọi HO thất bại → sự kiện rớt cuộc gọi: *Event = dropped*.

Chương trình hoạt động theo kịch bản như sau:

```
○ no_sim = 10^6; % Số lượng sự kiện: Event = 10^6.
○ for run = 1:no_sim
○ ---
○ %%% xét sự kiện: 1 MU kết thúc cuộc gọi hoặc chuyển giao
    ■ %%% nếu kết thúc cuộc gọi → khởi tạo cuộc gọi mới
    ■ %%% nếu chuyển giao → thực hiện HCRS
○ %%% cập nhật hệ thống
○ ---
○ end
```

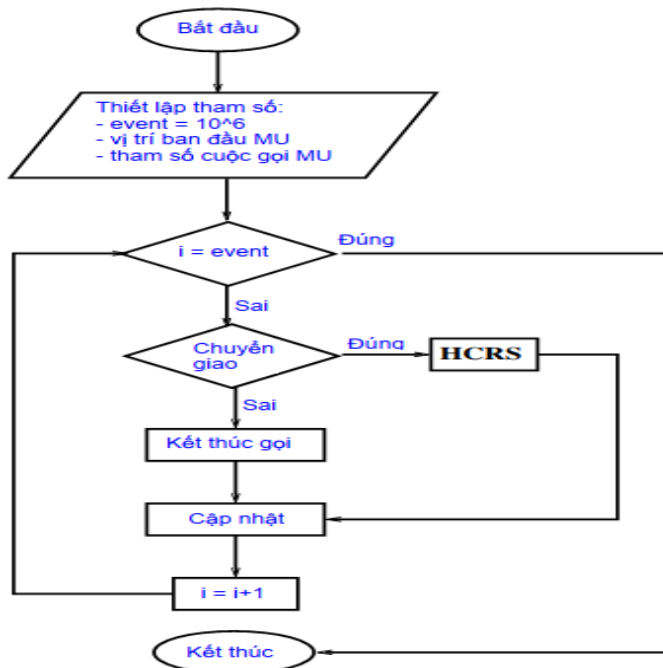
Lưu lượng trong vùng mô phỏng được thiết lập như sau: Toàn bộ N_C TCH của các BS sẽ luôn bị chiếm bởi các MU. Nếu bất kỳ một MU nào giải phóng TCH sau khi kết thúc cuộc gọi mà trong mạng không có sự kiện chuyển giao theo nguyên lý HCRS thì sẽ có một cuộc gọi mới được khởi tạo và chiếm TCH vừa được giải phóng ra để bảo đảm rằng số MU hoạt động trong hệ thống luôn là $Number(MU) = N \cdot N_C$, trong đó N là số BS. Các MU được khởi tạo thông qua việc cập nhật trạng thái mạng như trong Phụ lục PL3.

Để xác định cuộc gọi của một MU trong một BS cụ thể có chuyển giao hay không, cần xác định giá trị thời gian mà MU đó có thể di chuyển ra ngoài vùng phục vụ của BS và các RS kết nối với BS đó (*crossbound*) theo như phân tích trong mục 2.1.3. Nếu thời gian đàm thoại t của MU nhỏ hơn khoảng thời gian tính toán (*crossbound*), MU sẽ kết thúc cuộc gọi trong BS. Ngược lại, MU sẽ chuyển giao. Thời gian mà đường di chuyển của MU sẽ di chuyển ra ngoài vùng phủ sóng và cắt các đường tròn $Cc(BS)$ và $Cr(RS)$ liên quan (*crossbound*) được tính toán như trong Phụ lục PL4.

Khi một sự kiện xảy ra (kết thúc cuộc gọi hoặc chuyển giao), hệ thống sẽ cập nhật vị trí hiện thời của các MU như trong Phụ lục PL5.

Khi sự kiện chuyển giao xảy ra, thuật toán HCRS được sử dụng để xác định xác suất chuyển giao thành công của cuộc gọi. Xác suất chuyển giao thành công được tính bằng xác suất có ít nhất một MU của BS mục tiêu đang thực hiện cuộc gọi và đứng trong vùng phủ sóng của các RS liên quan đến 2 BS của cuộc gọi chuyển giao để thực hiện việc chuyển tiếp kênh. Việc xác định khả năng có một MU đứng trong vùng phủ sóng của trạm chuyển tiếp (Relay Station) được căn cứ vào vị trí hiện thời của các MU trong hệ thống. Thuật toán HCRS được mô phỏng như trong PL6.

Lưu đồ thuật toán cho chương trình mô phỏng được thể hiện trong Hình 2.5.



Hình 2.5 Lưu đồ thuật toán của chương trình mô phỏng

Trong Hình 2.5, khi xác định sự kiện chuyển giao xảy ra, chương trình sẽ chuyển sang thực hiện thuật toán HCRS. Nội dung của thuật toán này được trình bày như sau.

- **Thuật toán HCRS**

Thuật toán HCRS tìm cơ hội duy trì cuộc gọi HO cho một MU thông qua nguyên lý chuyển tiếp kênh như phân tích trong nội dung 2) ii. của Mục 2.1.3. Khi sự kiện HO xảy ra, thuật toán HCRS sẽ xác định T-BS là BS mà MU di chuyển tới

(dòng 2-4). Tiếp theo, thuật toán sẽ xác định các RS, gọi là RS-HO, liên quan tới S-BS và T-BS bằng hàm “intersect” trong Matlab (dòng 6) thông qua hàm “bind” là hàm xác định các RS liên quan tới một BS cụ thể. Sau đó, các dòng từ 7 đến 12 của thuật toán xác định xem có MU nào của T-BS đang thực hiện cuộc gọi và đứng trong vùng phủ sóng của RS-HO hay không, nếu có thì cuộc gọi HO sẽ thành công (*handover-success*), và ngược lại thì cuộc gọi sẽ bị rớt (*dropped*).

```

1: Function HCRS
2: FOR i = 1 to N % N: số BS trong vùng mạng%
3:     IF
            $(x_{BS(i)} - x_{HO})^2 + (y_{BS(i)} - y_{HO})^2 < R^2$ 
        THEN
           T-BS = BS(i)
4:     ENDIF
5: ENDFOR
6: RS-HO = INTERSECT(BIND(S-BS), BIND(T-BS)) % xác định các RS
giữa S-BS và T-BS khi xảy ra HO %
7: FOR i = 1 to LENGTH(RS-HO)
8:     FOR j = 1 to NC % NC: số TCH/MU của T-BS %
9:         IF
            $(x_{RS-HO(i)} - x_j)^2 + (y_{RS-HO(i)} - y_j)^2 < (R/2)^2$ 
        THEN
           handover-success = handover-success + 1
        ELSE
           dropped = dropped + 1
10:        ENDIF
11:     ENDFOR
12: ENDFOR
13: END Function

```

Sau khi thực hiện thuật toán HCRS, chương trình mô phỏng trong Hình 2.5 sẽ cập nhật trạng thái mạng và tiếp tục chạy cho đến khi xét đủ số sự kiện đặt ra.

Xác suất thành công của các cuộc gọi chuyển giao theo theo kịch bản mô phỏng được thể hiện trong các bảng từ Bảng 2.3 đến Bảng 2.8.

Bảng 2.3 P_{hs} (%) với v = 1m/s, N_C = 5, và N_C = 10

v = 1 m/s	R(m)	300	400	500	600	700	300	400	500	600	700
	N _C	5					10				
t (phút)	5	56.28	54.77	54.15	53.26	52.74	80.40	79.39	78.32	78.61	77.27

	10	58.89	57.75	56.98	55.99	55.58	82.66	82.01	80.93	80.77	79.87
	15	60.36	59.47	58.57	57.89	57.32	83.67	82.72	82.35	81.57	80.86
	20	61.05	60.53	59.35	58.69	58.50	84.24	83.71	83.21	82.58	82.44
	25	61.65	61.01	60.34	59.62	58.99	84.50	84.01	83.64	83.29	82.83
	30	62.01	61.34	60.93	60.26	60.15	85.26	84.38	84.12	83.48	83.05

Bảng 2.4 P_{hs} (%) với $v = 1m/s$, $N_c = 15$, và $N_c = 20$

	$R(m)$	300	400	500	600	700	300	400	500	600	700
	N_c	15					20				
t (phút)	5	91.38	90.26	90.06	89.70	89.57	96.26	95.35	95.28	95.20	95.13
	10	92.69	92.18	91.90	91.19	90.84	96.92	96.54	96.20	95.89	96.07
	15	93.37	92.56	92.20	91.80	91.86	97.36	96.68	96.30	95.90	96.36
	20	93.59	92.89	92.60	92.05	92.23	97.52	97.32	97.10	96.88	96.70
	25	93.75	93.27	93.20	92.89	92.55	97.64	97.21	96.98	96.54	97.03
	30	93.62	93.18	92.98	92.16	91.86	97.71	97.26	96.88	96.50	96.20

Bảng 2.5 P_{hs} (%) với $v = 1m/s$, $N_c = 25$, và $N_c = 30$

	$R(m)$	300	400	500	600	700	300	400	500	600	700
	N_c	25					30				
t (phút)	5	98.19	97.86	97.91	97.70	97.69	99.23	99.13	99.04	98.90	98.83
	10	98.66	98.22	97.90	97.26	98.09	99.47	99.36	99.20	99.27	99.18
	15	98.83	97.89	97.63	97.20	98.45	99.51	99.45	99.45	99.32	99.32
	20	98.95	98.72	98.50	98.48	98.56	99.56	99.49	99.43	99.43	99.39
	25	98.99	98.76	98.72	98.52	98.30	99.59	99.55	99.51	99.47	99.48
	30	99.01	98.88	98.56	98.10	97.90	99.61	99.57	99.52	99.48	99.47

Bảng 2.6 P_{hs} (%) với $v = 5m/s$, $N_c = 5$, và $N_c = 10$

	$R(m)$	300	400	500	600	700	300	400	500	600	700
	N_c	5					10				
t (phút)	5	61.69	61.04	60.25	59.76	59.02	84.80	84.08	83.65	83.30	82.68
	10	63.28	62.58	62.14	61.67	61.25	85.82	85.28	84.90	84.75	84.28
	15	63.57	63.20	62.94	62.84	62.50	86.06	85.82	85.66	85.41	85.16
	20	63.93	63.60	63.65	63.15	63.08	86.50	86.18	85.89	85.79	85.58
	25	64.27	63.67	63.78	63.25	63.28	86.50	86.38	86.16	85.89	85.91
	30	64.29	63.99	63.67	63.57	63.22	86.36	86.48	86.37	86.14	85.95

Bảng 2.7 P_{hs} (%) với $v = 5m/s$, $N_c = 15$, và $N_c = 20$

	$R(m)$	300	400	500	600	700	300	400	500	600	700
	N_c	15					20				
t (phút)	5	93.82	93.44	93.27	93.02	98.97	97.55	97.35	97.20	96.99	96.92
	10	94.34	94.18	94.07	93.76	99.12	97.83	97.67	97.61	97.45	97.44
	15	94.58	94.51	94.44	94.28	99.24	94.53	97.85	97.83	97.67	97.62
	20	94.89	94.64	94.47	94.30	99.26	98.08	97.96	97.84	97.74	97.75
	25	94.94	94.72	94.53	94.65	99.26	98.04	98.01	98.04	97.87	97.83
	30	94.88	94.86	94.83	94.75	99.30	98.03	98.01	97.96	98.04	97.91

Bảng 2.8 P_{hs} (%) với $v = 5\text{m/s}$, $N_C = 25$, và $N_C = 30$

$v =$ 5 m/s	$R(m)$	300	400	500	600	700	300	400	500	600	700
	N_C	25					30				
t (phút)	5	98.97	98.85	98.87	98.78	98.70	99.56	99.54	99.54	99.53	99.43
	10	99.12	99.12	99.01	98.99	98.91	99.64	99.59	99.59	99.62	99.56
	15	99.24	99.12	99.13	99.13	99.05	99.71	99.66	99.62	99.64	99.64
	20	99.26	99.23	99.17	99.14	99.08	99.70	99.71	99.68	99.66	99.67
	25	99.26	99.25	99.22	99.21	99.12	99.70	99.71	99.69	99.69	99.63
	30	99.30	99.23	99.23	99.20	99.16	99.70	99.68	99.71	99.69	99.68

Quan sát các kết quả trong các bảng từ Bảng 2.3 đến Bảng 2.8, có thể nhận thấy rằng các kết quả này phù hợp với các tính toán lý thuyết như mô tả trong Bảng 2.1. Đồng thời, mặc dù tất cả các kênh vô tuyến trong vùng mạng cục bộ đều đang bị chiếm cho các cuộc gọi tại thời điểm chuyển giao của các MU, song tỉ lệ chuyển giao thành công trong vùng mạng này vẫn được đáp ứng.

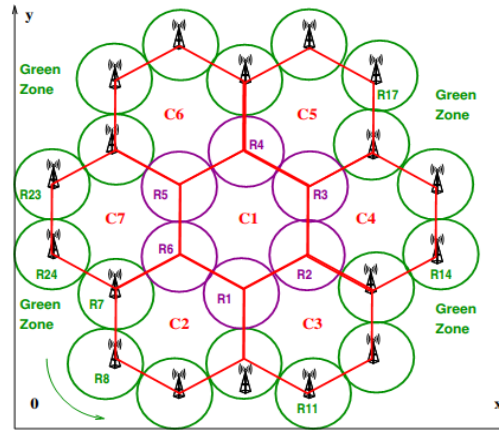
Các kết quả CDP đạt được trong luận án ở mô hình này trong so sánh với các nghiên cứu về thất bại chuyển giao HOF (Hand Over Fail) trong [40-42, 44-45, 136-137] cho thấy: tận dụng hiệu quả hoạt động của các trạm RS với kỹ thuật HCRS có thể cải thiện được CDP, duy trì được chất lượng kết nối trong điều kiện lưu lượng rất cao.

Các kết quả của mô hình mạng 3 BS như trên được sử dụng trong công trình [J.04] của tác giả.

2.3.2 Mô hình và kết quả mô phỏng với vùng mạng nhiều trạm gốc

Để khảo sát toàn diện hiệu quả của HCRS trong việc bảo đảm CDP, tác giả mở rộng phạm vi mô phỏng cho khu vực gồm 7 trạm gốc như trong Hình 2.6. Mô hình Hình 2.6 được xây dựng từ 7 BS từ C1 đến C7, và 24 RS từ R1 đến R24 theo cấu trúc vòng (ring). Trong đó, BS C1 nằm ở vòng thứ 0th, được coi là vòng trung tâm và là hạt nhân của vùng nghẽn. Các BS từ C2 đến C7 nằm ở vòng thứ 1th theo nguyên lý mô tả sự lan rộng của việc nghẽn mạng khi mật độ thuê bao tập trung tại một khu vực nhất định tăng cao trong khoảng thời gian xảy ra một sự kiện văn hóa-xã hội nào đó [49-50, 55-57]. Với mô hình 7 trạm gốc, tác giả xây dựng 2 kịch bản

cho 2 loại hình cuộc gọi tương ứng: cuộc gọi thoại và cuộc gọi số liệu với các tham số và kết quả như sau.



Hình 2.6 Mô hình nhện cục bộ trong vùng 7 BS và 24 RS

1. Tham số và kết quả cho các cuộc gọi thoại

Các tham số cho mô hình cuộc gọi thoại được thể hiện trong Bảng 2.9, trong đó, các cuộc gọi thoại có thời gian chiếm kênh trung bình với được giả định là 2 phút, 2.5 phút, và 3 phút tương ứng 120s, 150s, và 180s. Các giá trị vận tốc được khảo sát lên đến 20m/s với bán kính BS là $R = 1500m$. Mô hình mạng được mô phỏng trong Phụ lục PL7.

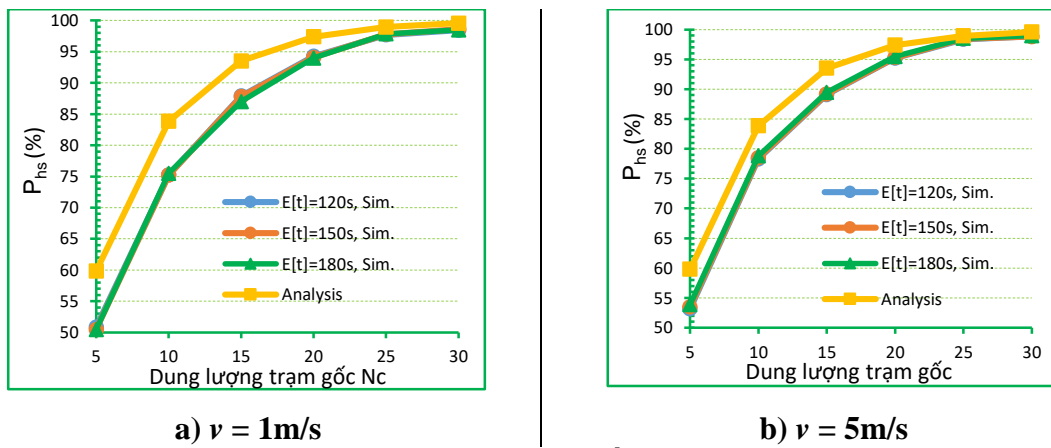
Bảng 2.9 Các tham số mô phỏng cho cuộc gọi thoại trong mô hình 7 BS

Vận tốc v (m/s)	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
Thời gian t (s)	120					150					180				
Dung lượng BS	$N_C = [5, 10, 15, 20, 25, 30]$														

Thực hiện việc chạy các chương trình tương ứng với các kịch bản mô phỏng trên Matlab, tác giả nhận được các kết quả như sau.

Hình 2.7 mô tả xác suất chuyển giao thành công khi MU di chuyển với tốc độ 1m/s (tương đương 3.6km/h của người đi bộ) và 5m/s tương đương 18km/s với các phương tiện di chuyển trung bình trong điều kiện mật độ thuê bao tập trung cao. Với mật độ tập trung cao như vậy, các MU sẽ khó có thể di chuyển nhanh với tốc độ cao. Mặc dù xác suất chuyển giao thành công không phụ thuộc nhiều vào tham số cuộc

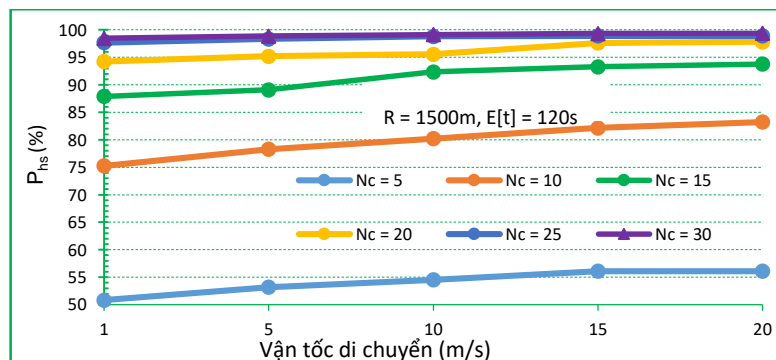
gọi, nhưng sự phân bố động (do di chuyển của các MU) cũng ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng, đặc biệt là với dung lượng thấp. Có thể thấy trên Hình 2.7 rằng khi dung lượng $N_C < 15$ TCH, xác suất thành công thực tế (Sim.) thấp hơn lý thuyết tính toán (Analysis) khoảng từ 10% đến 5%; hơn nữa, với vận tốc di chuyển lớn hơn, sự chênh lệch giữa lý thuyết và thực tế cũng giảm đi, cụ thể là: với $N_C = 5$, vận tốc di chuyển $v = 1\text{m/s}$ thì chênh lệch khoảng 10% như trong Hình 2.7.a), nhưng với vận tốc di chuyển $v = 5\text{m/s}$ thì chênh lệch giảm xuống chỉ còn hơn 5% như trong Hình 2.7.b). Nhưng với $N_C = 30$, giữa lý thuyết và thực tế gần như nhau và đạt gần 100% cho cả 2 tốc độ di chuyển.



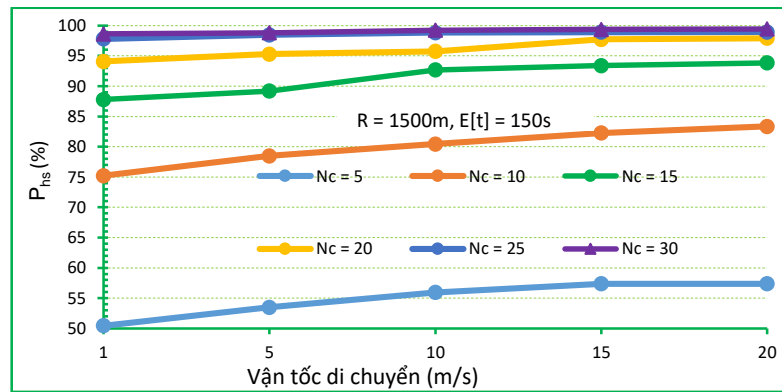
Hình 2.7 P_{hs} với các vận tốc 1m/s và 5m/s

Các kịch bản sau đó được mở rộng cho các vận tốc 10m/s, 15m/s, và 20m/s với các kết quả được thể hiện tương ứng trong Hình 2.8, Hình 2.9, và Hình 2.10.

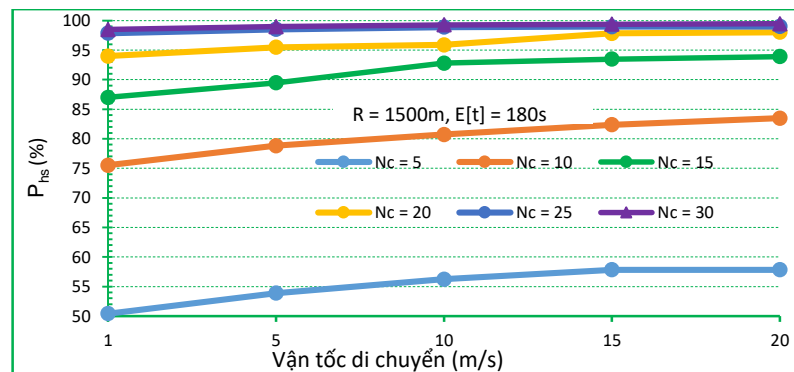
Có thể nhận thấy rằng với cùng một tham số di chuyển (tốc độ và thời gian đàm thoại), xác suất chuyển giao thành công P_{hs} phụ thuộc rất nhiều vào dung lượng các BS và phù hợp với phân tích trong công thức (2.1).



Hình 2.8 P_{hs} với thời gian đàm thoại trung bình 120s



Hình 2.9 P_{hs} với thời gian đàm thoại trung bình 150s



Hình 2.10 P_{hs} với thời gian đàm thoại trung bình 180s

Trong các hình từ Hình 2.8 đến Hình 2.10, khả năng thành công của các cuộc gọi HO chỉ hơn 50% với $N_c = 5$, nhưng sau đó có thể đạt tới gần 100% với $N_c = 30$. Như vậy, có thể thấy rằng HCRS đặc biệt thích hợp với điều kiện mạng có lưu lượng cao đến rất cao. Ngược lại, với cùng một dung lượng, xác suất chuyển giao thành công chỉ thay đổi rất nhỏ (dưới 10% trong các trường hợp dung lượng thấp với $N_c = 5, N_c = 10, N_c = 15$) hoặc gần như không đổi với $N_c = 30$ trong các vận tốc di chuyển khác nhau của MU.

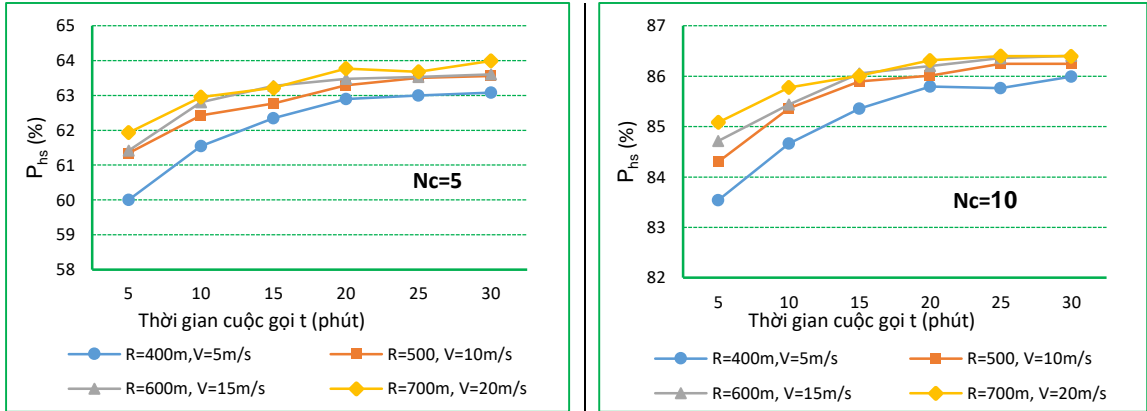
2. Tham số và kết quả cho các cuộc gọi số liệu thời gian thực

Tương tự như các cuộc gọi số liệu thời gian thực trong mô hình của Mục 2.3.1, các tham số mô phỏng trong mô hình này được thể hiện trong Bảng 2.10.

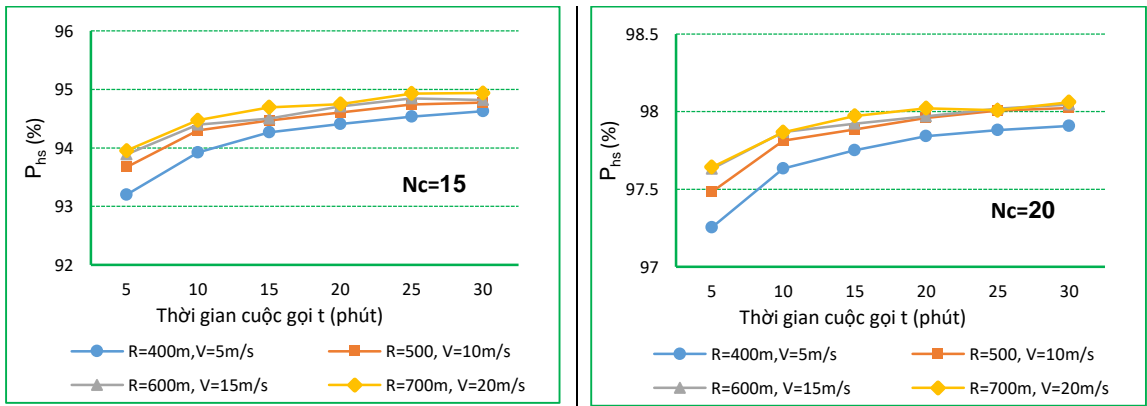
Bảng 2.10 Các tham số mô phỏng cho cuộc gọi số liệu thời gian thực

Vận tốc v (m/s)	5	10	15	20
Bán kính BS (m)	400	500	600	700
Thời gian chiếm kênh (phút)	[5, 10, 15, 20, 25, 30]			

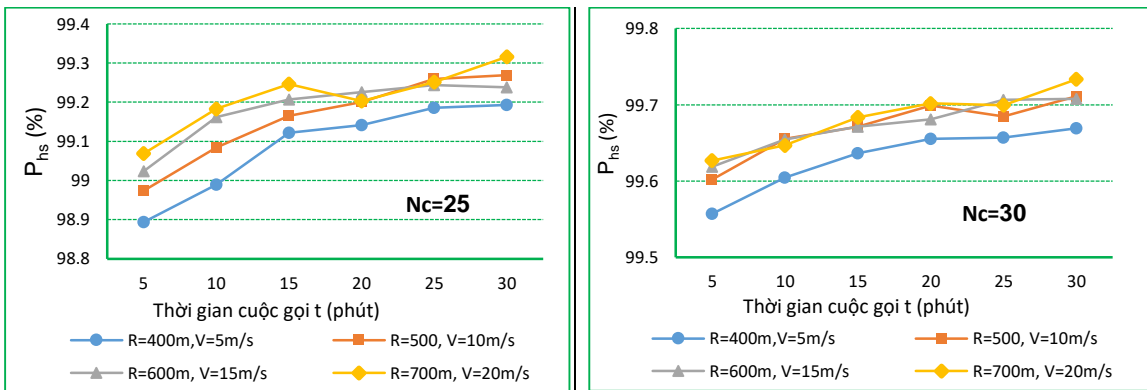
Số TCH (N_c)	[5, 10, 15, 20, 25, 30]
------------------	-------------------------



Hình 2.11 Xác suất chuyển giao thành công P_{hs} (%) với $N_c = 5$ và $N_c = 10$



Hình 2.12 Xác suất chuyển giao thành công P_{hs} (%) với $N_c = 15$ và $N_c = 20$



Hình 2.13 Xác suất chuyển giao thành công P_{hs} (%) với $N_c = 25$ và $N_c = 30$

Các kết quả mô phỏng đã trình bày ở trên cho các cuộc gọi thời gian thực trong điều kiện vùng mạng có nhiều trạm gốc và vùng lưu lượng rất cao. Các kết quả đạt được của luận án đã khẳng định được giải pháp tận dụng hiệu quả hoạt động của các

trạm chuyển tiếp RS sử dụng kỹ thuật HCRS trong so sánh với các nghiên cứu về chuyển giao và chuyển tiếp trong các hệ thống thông tin di động thế hệ sau của các nghiên cứu trước đó [40-42, 44, 119, 136-137]. Kết quả mô phỏng cũng đã được công bố trong các công trình **J.02**, **J.03** và **J.04** của nghiên cứu sinh.

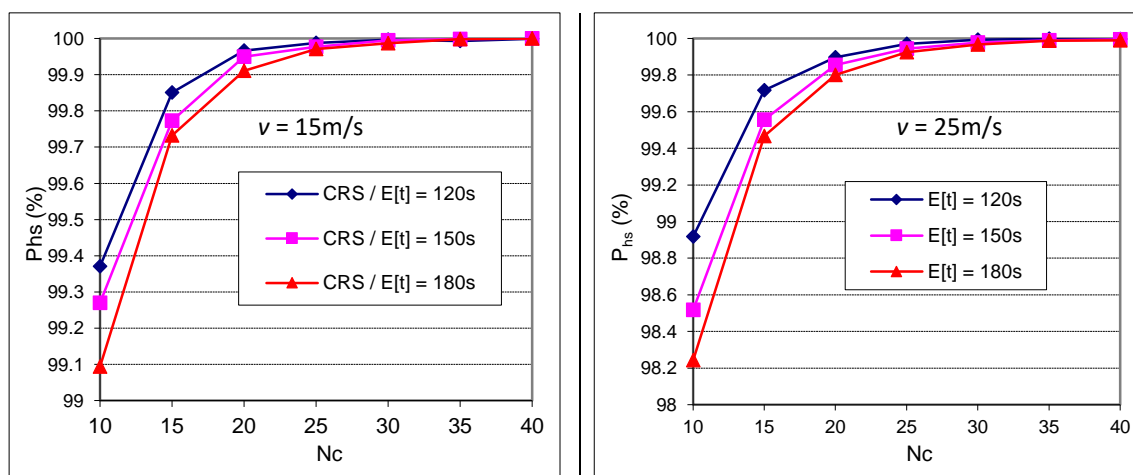
2.3.3 Kết quả mô phỏng với các trạm gốc dự trữ một kênh

Điều kiện mô phỏng vùng lưu lượng rất cao có thể được thử nghiệm với mô hình các trạm gốc có dự trữ ít nhất một kênh. Tham số mô phỏng cho các cuộc gọi thoại được thể hiện trong Bảng 2.11.

Bảng 2.11 Các tham số mô phỏng cho mô hình với các trạm gốc dự trữ 1 kênh

Vận tốc v (m/s)	[15, 25]
Bán kính BS (m)	1500
Thời gian chiếm kênh (s)	[120, 150, 180]
Số TCH (N_c)	[10, 15, 20, 25, 30, 35, 40]

Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 2.14. Có thể nhận thấy rằng việc dự trữ một kênh đã cải thiện một cách đáng kể các giá trị CDP ở các giá trị dung lượng thấp trong các BS.



Hình 2.14 Xác suất chuyển giao thành công HCRS-ORC 19 BS

Các kết quả tính toán chi tiết cho HCRS-ORC trong phần này được sử dụng trong công trình [**J.02**] của tác giả.

2.3.4 Xác suất chuyển giao cuộc gọi

Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h mà nghiên cứu sinh áp dụng là ước lượng điểm đến D (Destination estimation) để xem xét khả năng chuyển giao cuộc gọi của MU. Giả sử rằng MU phân bố ngẫu nhiên trong BS và khởi tạo cuộc gọi với các tham số liên quan như đã đề cập ở trên, khi đó cuộc gọi của MU sẽ được chuyển giao khi điểm đến ước lượng vượt ra khỏi vùng phủ sóng của BS có dạng hình tròn với bán kính R_{td} được tính theo công thức (41) trong [39], áp dụng cho mô hình sử dụng các trạm chuyển tiếp như sau:

$$\pi R_{td(\text{HCRS})}^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 + 6 \cdot \frac{2}{3} \pi \left(\frac{R}{2}\right)^2 \Rightarrow R_{td(\text{HCRS})} = R \sqrt{\frac{3\sqrt{3} + 2\pi}{2\pi}} \approx 1,35R \quad (2.8)$$

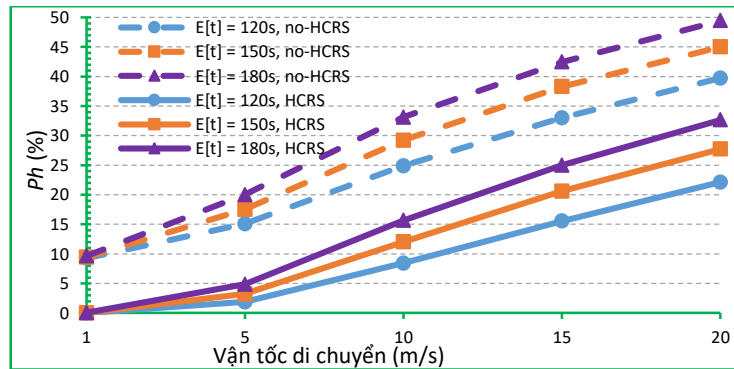
Khi MU được ước lượng vượt ra khỏi BS, tức là $OD > R_{td}$ (trong Hình 1.6), và P_h sẽ được tính như sau:

$$P_h = P_r(OD > R_{td}) = P_r\left(\sqrt{d^2 - 2d(v \cdot t) \cos \alpha + (v \cdot t)^2} > R_{td}\right) \quad (2.9)$$

Do các tham số liên quan đến cuộc gọi của MU (d, v, t, α) đều có phân bố ngẫu nhiên, nên việc tính P_h sẽ được thực hiện theo phương pháp tính xác suất kinh điển với số mẫu đủ lớn (10^6 mẫu) với việc sử dụng các hàm phân bố ngẫu nhiên ($rand(\cdot)$) trong Matlab. Việc ước lượng điểm đến khi đánh giá điểm đến D của MU so với điểm đặt BS cố định thông qua quãng đường di chuyển để biết được MU đã vượt ra khỏi ranh giới của BS hay chưa ($OD > R_{td}$, với O là điểm đặt BS) có ưu điểm là khảo sát được toàn bộ các phân bố ngẫu nhiên của các tham số cuộc gọi nhưng đơn giản hóa được việc tính toán. Chương trình tính toán P_h được mô tả như trong Phụ lục PL8. Công thức (2.9) cũng là cơ sở để tính toán về chuyển giao trong các nghiên cứu [40-42, 44, 119, 137].

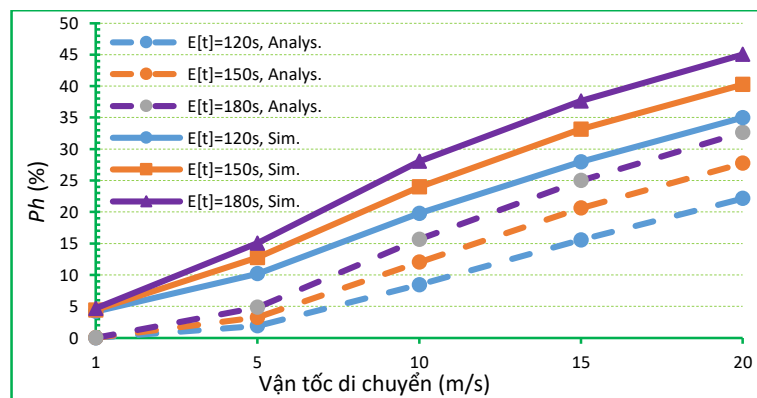
Các kết quả tính toán lý thuyết theo PL8 để so sánh các giá trị P_h khi không sử dụng chuyển tiếp và có sử dụng chuyển tiếp được thể hiện trong Hình 2.15. Có thể thấy rằng việc sử dụng các RS và nguyên lý HCRS đã làm giảm các yêu cầu chuyển giao lên hệ thống một cách đáng kể so với cùng hoạt động chuyển giao truyền thống. Cụ thể là với vận tốc di chuyển 1m/s, xác suất chuyển giao trong BS HCRS gần như

bằng 0; còn với vận tốc di chuyển 20m/s, HCRS giúp giảm khoảng 20% yêu cầu cấp kênh chuyển giao trong hệ thống. Việc giảm xác suất chuyển giao tương đương với việc hệ thống phải xử lý số lượng yêu cầu HO ít hơn, tức là giảm tính phức tạp và tăng độ tin cậy trong hoạt động của hệ thống.



Hình 2.15 Xác suất chuyển giao P_h với $R = 1500m$, có và không có HCRS

Hình 2.16 so sánh các kết quả tính toán xác suất chuyển giao giữa lý thuyết và mô phỏng của kỹ thuật HCRS. Nhận thấy rằng khi tốc độ di chuyển là 1m/s, kết quả mô phỏng cao hơn phân tích lý thuyết khoảng gần 5%; nhưng sau đó độ chênh lệch giữa mô phỏng và lý thuyết tăng lên 10% với các tốc độ lớn hơn 5m/s của MU. Sai số này là do việc giả định MU di chuyển trong hình tròn bán kính $R_{td(HCRS)} \approx 1,35R$ của BS trong công thức (2.8), trong khi đó với mô hình thực tế thì MU chiếm giữ TCH trong một BS mở rộng thông qua các RS như phân tích trong mô hình mạng trong Hình 2.6.



Hình 2.16 So sánh tỉ lệ chuyển giao P_h giữa lý thuyết và mô phỏng với $R = 1500m$

Bảng 2.12 và Bảng 2.13 thể hiện các kết quả mô phỏng nhận được về xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h của MU theo nguyên lý HCRS trong khu vực mô phỏng của

mô hình mạng trong Hình 2.4. Các kết quả phân tích và mô phỏng này được sử dụng một phần trong công trình [J.03] của tác giả. Ngoài ra, các kết quả này cũng sẽ được sử dụng trong các công bố tiếp theo của tác giả trên quan điểm tận dụng tài nguyên tần số và cải thiện HOF trong các hệ thống thông tin di động thế hệ sau sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp.

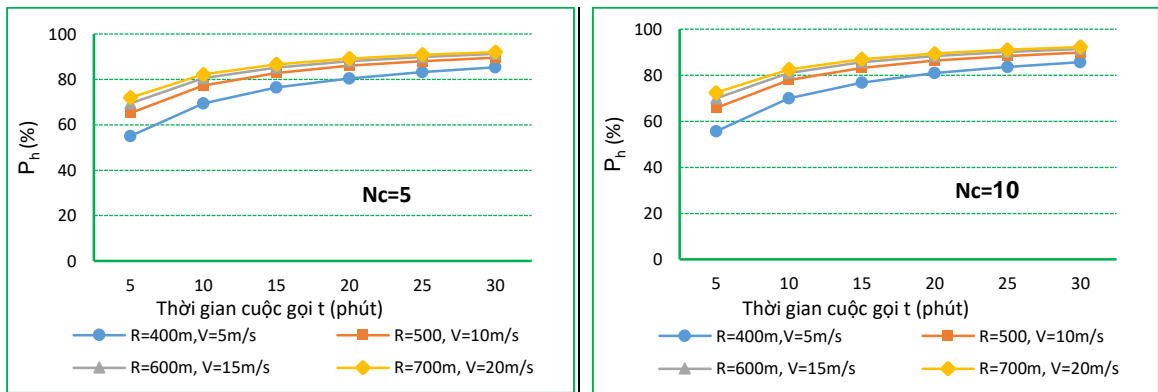
Bảng 2.10 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $v = [1\text{m/s}, 5\text{m/s}]$

t (s)	$v = 1\text{m/s}$			$v = 5\text{m/s}$		
	120	150	180	120	150	180
Nc=5	4.16	4.39	4.65	9.95	12.33	14.74
Nc=10	4.17	4.41	4.65	10.10	12.52	14.86
Nc=15	4.18	4.41	4.66	10.15	12.71	14.98
Nc=20	4.19	4.42	4.66	10.24	12.86	15.11
Nc=25	4.20	4.43	4.68	10.30	12.96	15.24
Nc=30	4.21	4.44	4.68	10.46	13.14	15.35

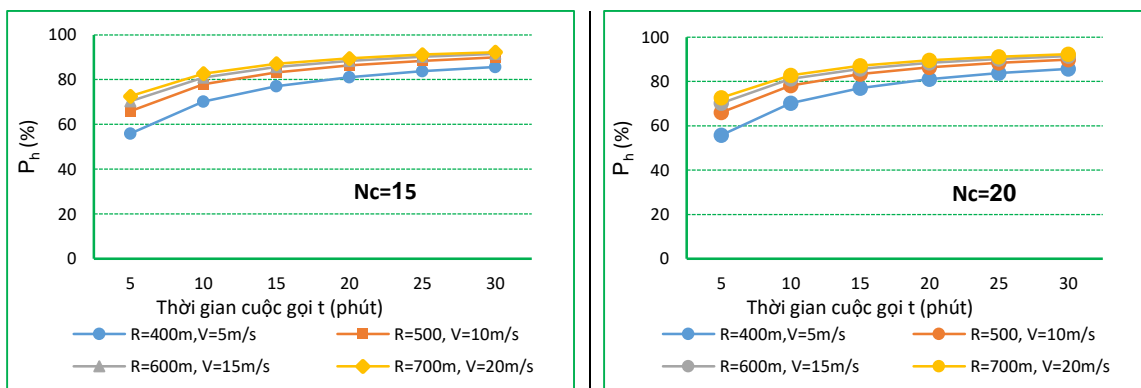
Bảng 2.11 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $v = [10\text{m/s}, 15\text{m/s}, 20\text{m/s}]$

t (s)	$v = 10\text{m/s}$			$v = 15\text{m/s}$			$v = 20\text{m/s}$		
	120	150	180	120	150	180	120	150	180
Nc=5	19.40	23.81	27.70	27.70	32.87	37.25	34.92	40.01	44.90
Nc=10	19.58	23.92	27.82	27.82	32.98	37.36	34.96	40.12	44.92
Nc=15	19.72	23.98	27.98	27.91	33.01	37.51	34.97	40.26	45.00
Nc=20	19.89	24.01	28.11	27.98	33.16	37.72	34.98	40.28	45.01
Nc=25	20.01	24.04	28.24	28.12	33.32	37.94	35.01	40.34	45.10
Nc=30	20.11	24.08	28.35	28.32	33.51	38.02	35.05	40.54	45.20

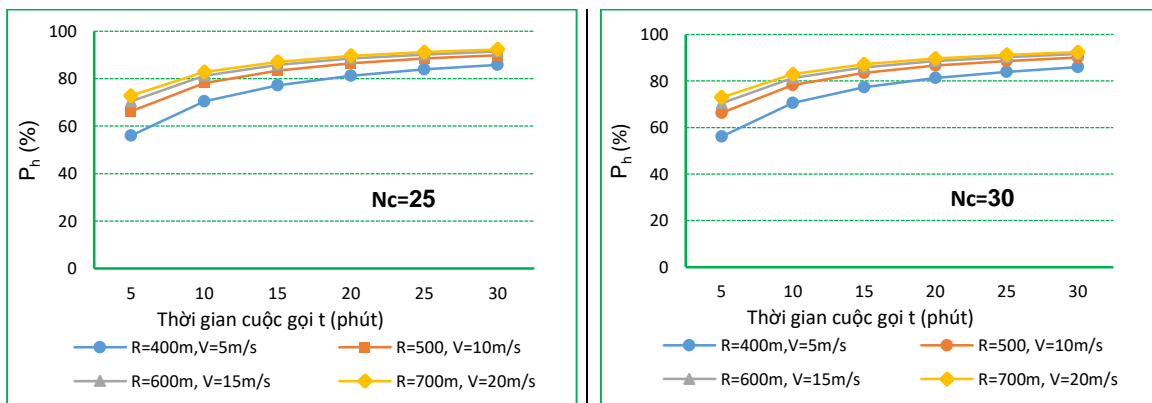
Xác suất chuyển giao cuộc gọi số liệu thời gian thực trong mô hình mạng của Hình 2.6 được thể hiện trong các hình từ Hình 2.17 đến Hình 2.19. Quan sát các kết quả trên các hình này, có thể nhận thấy rằng P_h chỉ phụ thuộc vào các tham số cuộc gọi như vị trí, tốc độ và di chuyển, và thời gian đàm thoại của MU mà không phụ thuộc vào dung lượng của BS. Các kết quả này cũng phù hợp với phân tích lý thuyết.



Hình 2.17 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $N_C = 5$ và $N_C = 10$



Hình 2.18 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $N_C = 15$ và $N_C = 20$



Hình 2.19 Xác suất chuyển giao cuộc gọi P_h (%) với $N_C = 25$ và $N_C = 30$

2.4 Một số nhận xét

Vai trò của trạm chuyển tiếp trong việc duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao thời gian thực trong các hệ thống thông tin di động trong điều kiện lưu lượng cao đã được chứng minh trong cả tính toán lý thuyết và mô phỏng. Điều kiện lưu lượng trong các tính toán được thể hiện trong luận án là tất cả các kết nối (các kênh lưu lượng) của các trạm gốc trong một vùng mạng nhất định đều đã bị chiếm bởi các

cuộc gọi tương đương với tốc độ thiết lập cuộc gọi λ (calls/time_unit) rất lớn. Nếu không có các trạm chuyển tiếp RS, các cuộc gọi trong vùng mạng này sẽ có CDP =

1. Có thể nhận thấy rằng:

- Xác suất chuyển giao thành công được tính thông qua xác suất có ít nhất một MU đang thực hiện cuộc gọi trong T-BS và đứng trong vùng phủ sóng của một trong hai RS đặt giữa S-BS và T-BS. Xác suất này liên quan đến dung lượng N_C của BS như tính toán trong công thức (2.1), nên, khi N_C càng cao, CDP càng nhỏ. Cả lý thuyết và mô phỏng đều thể hiện rằng khi $N_C > 30$, $CDP \approx 0$.
- HCRS giúp giảm các yêu cầu chuyển giao và tỉ lệ chuyển giao cuộc gọi trong hệ thống bằng việc mở rộng vùng phủ sóng của các BS thông qua các RS như phân tích trong công thức (2.9).

Các kết quả nghiên cứu cũng đã thể hiện rằng:

- Xác suất chuyển giao được tính thông qua các tham số cuộc gọi (vị trí ban đầu, vận tốc và hướng di chuyển, và thời gian đàm thoại của MU) một cách đơn giản hơn theo nguyên lý xác suất kinh điển, nhưng vẫn hoàn toàn phù hợp khi so sánh với các nghiên cứu tương đương [40-42, 44, 119, 133, 137].
- Bán kính của BS được sử dụng trong mô phỏng có vùng giá trị rộng, từ 1500m và trong khoảng từ 300m đến 700m để tăng khả năng lựa chọn khi áp dụng vào các trạm gốc của các hệ thống thực tế. Các giá trị bán kính này cũng có thể so sánh được với các nghiên cứu trong [133, 136].
- Các mô phỏng cũng được thực hiện cho 2 loại hình cuộc gọi với đặc điểm thời gian gọi tương ứng: cuộc gọi thoại với thời gian ngắn, và cuộc gọi số liệu với thời gian kết nối dài (lên đến 30 phút).

Có thể nhận thấy rằng nguyên lý HCRS với việc tận dụng hiệu quả hoạt động của RS trình bày trong chương này có thể áp dụng cho các hệ thống di động trong thực tế trong việc bảo đảm duy trì kết nối cho các cuộc gọi HO thời gian thực. Tuy nhiên, phạm vi nghiên cứu của luận án ở phần này chưa xét đến xác suất thành công của HO khi thực hiện chuyển tiếp kênh giữa 2 MU có độ rộng băng thông kết nối

khác nhau (do khác nhau về số lượng các khối tài nguyên vô tuyến mà MU yêu cầu) trong hệ thống 4G. Đây có thể là gợi ý cho các nghiên cứu trong tương lai.

2.5 Kết luận Chương 2

Nội dung chương 2 đã tập trung vào trình bày giải pháp duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao HO thời gian thực trong một vùng mạng thông tin di động có lưu lượng rất cao của HTTTVT sử dụng trạm chuyển tiếp RS. Luận án đã đề xuất tận dụng hiệu quả hoạt động của trạm chuyển tiếp trong chuyển giao sử dụng kỹ thuật HCRS, đã phân tích và tính toán CDP trong một số trường hợp cụ thể để đánh giá khả năng duy trì kết nối chuyển giao HO cho các cuộc gọi thời gian thực. Điều kiện lưu lượng cao được xét với tốc độ thiết lập cuộc gọi mới λ (số cuộc gọi/đơn vị thời gian) rất lớn và các BS sử dụng toàn bộ các kênh lưu lượng được cấp phát để phục vụ cho các yêu cầu gọi của MU. Điều này sẽ làm cho việc duy trì kết nối cho các cuộc gọi HO trở nên khó khăn, dẫn đến $CDP = 1$. Kỹ thuật chuyển tiếp được sử dụng để cải thiện CDP trong điều kiện lưu lượng như giả thiết trên. Thông qua việc sử dụng các trạm chuyển tiếp RS, kết nối cho các cuộc gọi HO được duy trì với tỉ lệ thành công được nâng cao rõ rệt cả trong tính toán lý thuyết và mô phỏng. Các kết quả của chương này được thể hiện trong các công trình **J.02**, **J.03**, và **J.04** và là đóng góp thứ nhất của luận án.

Đối với HTTTVT đa chặng, việc duy trì kết nối không chỉ phụ thuộc vào vùng mạng thông tin di động mà còn phụ thuộc vào các trạm chuyển tiếp ở các vùng mạng tiếp theo trong mô hình truyền thông đa chặng. Một kiến trúc điển hình của vùng mạng tiếp theo của HTTTVT thế hệ mới là mạng IoT với hạ tầng là mạng cảm biến không dây WSN kết nối vào Internet. Chương 3 tiếp theo của luận án sẽ nghiên cứu giải pháp duy trì kết nối trong vùng mạng này. Nội dung nghiên cứu tập trung vào tính toán xác suất dừng và xác suất chặn toàn chặng để bảo đảm duy trì kết nối trong HTTTVT chuyển tiếp đa chặng với mô hình kiến trúc điển hình của vùng chuyển tiếp này là sử dụng mạng WSN MH LEACH.

CHƯƠNG 3 TÍNH TOÁN XÁC SUẤT DỪNG VÀ XÁC SUẤT CHẶN TOÀN CHẶNG ĐỂ BẢO ĐẢM DUY TRÌ KẾT NỐI TRONG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP ĐA CHẶNG

Tóm tắt:

*Chương 3 sẽ tập trung vào việc tính toán các tham số hiệu năng phản ánh khả năng duy trì kết nối của HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp, cụ thể là xác suất dừng OP và xác suất chặn IP của HTTTVT đa chặng. Mô hình WSN MH LEACH được đưa ra như là một trường hợp nghiên cứu điển hình trong chương này. Khi các giá trị OP và IP tăng vượt ngưỡng, hệ thống sẽ ngừng làm việc và kết nối giữa các nút sẽ bị gián đoạn. Bên cạnh việc áp dụng các kỹ thuật thu hoạch năng lượng EH và hợp tác gây nhiễu CJ, chương này sẽ tập trung vào việc phân tích các vấn đề cụ thể như: đề xuất nút chủ cụm phía trước cung cấp năng lượng cho nút thành viên của cụm liền kề phía sau thông qua kỹ thuật EH để tạo nhiễu lên nút E (mô hình EH CJ mới); đánh giá ảnh hưởng của số nút trong cụm và phân cứng không hoàn hảo của các nút lên các giá trị OP và IP; tính toán OP và IP toàn chặng trong trường hợp số chặng tổng quát (lớn hơn 2 chặng) với các nút đơn ăng ten và đa ăng ten trong các mô hình (bao gồm cả tính toán lựa chọn ăng ten và nút gây nhiễu trong mô hình đa ăng ten). Đóng góp của luận án ở chương này là đưa ra các biểu thức tính toán tường minh cho OP và IP toàn chặng trong điều kiện xem xét đầy đủ các tham số cần thiết liên quan và tỉ lệ tín hiệu nhiễu ở mức cao. Các đóng góp này được thể hiện trong các công trình **C.01** và **J.01**.*

3.1 Mô hình và phương thức tính toán OP và IP cho HTTTVT chuyển tiếp đa chặng

3.1.1 Mô hình HTTTVT chuyển tiếp đa chặng

Như đã trình bày ở chương 1, HTTTVT đa chặng thế hệ mới bao gồm vùng mạng thông tin di động và vùng mạng kết nối đa chặng IoT sử dụng hạ tầng điển hình là mạng cảm biến không dây WSN kết nối vào Internet.

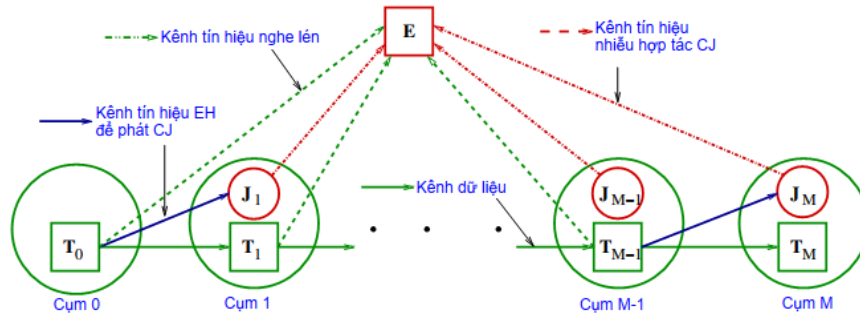
Theo khuyến nghị của tổ chức viễn thông quốc tế ITU-T, WSN được coi là nền tảng hạ tầng của việc kết nối vạn vật vào Internet trong IoT [84-88, 100-102, 132]. Cấu trúc và hoạt động của WSN điển hình được quan tâm trong nghiên cứu có những đặc điểm cơ bản sau:

1. Định tuyến theo mô hình phân cấp cụm năng lượng thích ứng LEACH để kéo dài tuổi thọ hệ thống [86-88].
2. Dễ dàng áp dụng các kỹ thuật thu hoạch năng lượng EH cho các nút mạng [93, 85-87].
3. Hoạt động theo mô hình truyền thông đa chặng MH, trong đó dữ liệu được chuyển tiếp giữa các nút chủ cụm CH, từ cụm đầu tiên đến cụm cuối cùng để gửi về mạng lõi.

Vì lý do trên, để nghiên cứu tiêu chí hiệu năng duy trì kết nối của HTTTVT đa chặng sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp, luận án sử dụng mô hình WSN MH LEACH như một trường hợp điển hình cho các HTTTVT thế hệ mới sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp. Mô hình WSN MH LEACH như mô tả trong Hình 3.1 được sử dụng cho nghiên cứu đánh giá khả năng duy trì kết nối giữa các nút mạng thông qua việc tính toán OP và IP toàn chặng.

Nội dung mục này sẽ trình bày khái quát mô hình chuyển tiếp đa chặng với WSN MH LEACH với các thành phần cơ bản của vùng mạng chuyển tiếp gồm: các nút cụm chủ, các nút tác nhân gây nhiễu làm gián đoạn kết nối (phá vỡ tính duy trì kết nối). Không làm mất tính tổng quát, luận án đưa ra các giả định về điều kiện hoạt động của vùng mạng liên quan đến quá trình chuyển tiếp thông tin, phương thức chuyển tiếp, tác động gây nhiễu, môi trường truyền với pha đỉnh có phân bố Rayleigh.

Các giả định này nhằm mục đích đưa ra phương thức và các kết quả tính toán định lượng cụ thể cho các giá trị OP và IP. Phương thức tính toán OP và IP hoàn toàn có thể được thực hiện tương tự với các điều kiện biên khác.



Hình 3.1 Mô hình hệ thống MH LEACH EH-CJ [C.01]

Trong Hình 3.1, các nút chủ cụm CH (Cluster Head) của các cụm được ký hiệu là $T_0, T_1, \dots, T_{M-1}, T_M$; nút E là nút tác nhân gây gián đoạn kết nối thông qua việc thu thập thông tin trái phép làm tăng giá trị IP; để duy trì kết nối, hệ thống chủ động sử dụng các nút thành viên trong các cụm làm các nút gây nhiễu (Jammer) được ký hiệu là J_1, \dots, J_{M-1}, J_M nhằm cản trở hoạt động của nút E. Hệ thống trong Hình 3.1 làm việc theo các giả định sau đây:

1. Nút nguồn T_0 gửi thông tin tới nút đích T_M thông qua các nút trung gian theo mô hình truyền thông đa chặng MH.
2. Nút E thu thập thông tin trái phép ở tất cả các chặng trong hệ thống, tức là nút E thu trái phép các tín hiệu được phát từ các CH.
3. Để ngăn chặn hoạt động của nút E, các nút CH cần phải hợp tác với nhau bằng việc phát các bộ mã ngẫu nhiên để gây phân vân cho nút E.
4. Tất cả các nút trong hệ thống đều sử dụng một ăng ten đơn.
5. Việc chuyển tiếp thông tin từ nút T_0 đến nút T_M thông qua M chặng trung gian theo phương thức bán song công, tức là $T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow \dots \rightarrow T_{M-1} \rightarrow T_M$ với thời gian truyền từ đầu cuối đến đầu cuối được xác định là T . Như vậy, dữ liệu sẽ được truyền từ T_0 đến T_M thông qua M khe thời gian trực giao theo phương thức TDMA với thời gian truyền được sử dụng cho mỗi khe thời gian

là $\delta = T/M$. Hơn nữa, hình thức chuyển tiếp trong mô hình này là giải mã và chuyển tiếp DF (Decode and Forward).

6. Chặng thứ m làm việc ở khe thời gian thứ m , với $m = 1, 2, \dots, M$, là chặng mà T_{m-1} gửi thông tin tới T_m . Để bảo vệ thông tin trước tác động của nút E, các CH chọn ngẫu nhiên một SN trong cụm của mình để làm nút gây nhiễu J (Jammer). Đồng thời, các nút J sẽ thu hoạch năng lượng từ CH của cụm liền trước để phát các tín hiệu nhiễu tới nút E. Như vậy, nút gây nhiễu của cụm thứ m là J_m . Như vậy, khoảng thời gian $\delta = T/M$ không chỉ được dành cho việc nút T_{m-1} gửi dữ liệu tới T_m mà còn dành cho việc thu hoạch năng lượng EH của J_m . Như vậy, khe thời gian thứ m lúc này được chia làm 2 phân khe: $\alpha\tau = \alpha\delta$ dành cho RF-EH từ T_{m-1} đến J_m và $(1-\alpha)\tau = (1-\alpha)\delta$ dành cho việc truyền dữ liệu từ T_{m-1} đến T_m , với $0 \leq \alpha \leq 1$.
7. Các kênh vô tuyến trong hệ thống có pha đình theo phân bố Rayleigh.

Gọi $\psi_{X,Y}$ là độ lợi kênh vô tuyến giữa nút X và nút Y, với $(X, Y) \in \{T_{m-1}, T_m, J_m, E\}$. Theo giả định 7) ở trên, các kênh trong hệ thống là các kênh pha đình theo phân bố Rayleigh nên hàm phân phối tích lũy CDF (Cumulative Distribution Function) và hàm mật độ xác suất PDF (Probability Density Function) của $\psi_{X,Y}$ là:

$$F_{\psi_{X,Y}}(x) = 1 - \exp(-\Omega_{X,Y}x) \quad (3.1)$$

$$f_{\psi_{X,Y}}(x) = \Omega_{X,Y} \exp(-\Omega_{X,Y}x) \quad (3.2)$$

Trong đó: $\Omega_{X,Y}$ là tham số của $\psi_{X,Y}$ và được tính bằng $\Omega_{X,Y} = d_{X,Y}^{-\beta}$ [78], với $d_{X,Y}$ là cự ly tuyến kết nối X-Y, và β là số mũ (tham số) suy hao đường truyền.

Theo lý thuyết RF-RH và giả định 6) ở trên, năng lượng E_{J_m} mà một nút gây nhiễu J nhận được được tính thông qua công suất phát P của CH và hiệu suất chuyển đổi năng lượng η như sau:

$$E_{J_m} = \eta\alpha\delta P\psi_{T_{m-1}, J_m} \quad (3.3)$$

Với năng lượng nhận được từ phương trình (3.3), nút J_m phát ra một tín hiệu nhiễu có công suất được tính như sau:

$$Q_m = \frac{E_{J_m}}{(1-\alpha)\delta} = \frac{\eta\alpha\delta P\psi_{T_{m-1},J_m}}{(1-\alpha)\delta} = \kappa P\psi_{T_{m-1},J_m} \quad (3.4)$$

$$\text{Trong đó, } \kappa = \frac{\eta\alpha}{(1-\alpha)}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Vì J_m và T_m là các nút trong cùng một cụm nên các nút này “biết nhau”, do đó T_m sẽ biết được các tín hiệu gây nhiễu Q_m phát ra từ J_m và T_m có thể triệt tiêu nhiễu này, nhưng nút E thì không thể. Như vậy, dung lượng kênh tức thời giữa T_{m-1} và T_m là:

$$C_{D,m} = (1-\alpha)\delta \log_2 \left(1 + \frac{P\psi_{T_{m-1},T_m}}{\tau_D^2 P\psi_{T_{m-1},T_m} + N_0} \right) = (1-\alpha)\delta \log_2 \left(1 + \frac{\Delta\psi_{T_{m-1},T_m}}{\tau_D^2 \Delta\psi_{T_{m-1},T_m} + 1} \right) \quad (3.5)$$

Với $\Delta = P/N_0$, N_0 là nhiễu trắng Gauss cộng tính AWGN (Additive White Gauss Noise), τ_D^2 là tổng mức (nhiều) ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo khi truyền từ T_{m-1} sang T_m .

Tương tự như vậy, dung lượng kênh giữa nút T_{m-1} và nút E được tính như sau:

$$\begin{aligned} C_{E,m} &= (1-\alpha)\delta \log_2 \left(1 + \frac{P\psi_{T_{m-1},E}}{\tau_E^2 P\psi_{T_{m-1},E} + Q_m\psi_{T_{m-1},E} + N_0} \right) \\ &= (1-\alpha)\delta \log_2 \left(1 + \frac{\Delta\psi_{T_{m-1},E}}{\tau_E^2 \Delta\psi_{T_{m-1},E} + \kappa\Delta\psi_{T_{m-1},J_m}\psi_{J_m,E} + 1} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Với τ_E^2 là tổng mức (nhiều) ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo khi truyền từ T_{m-1} sang E.

Theo giả định 5) ở trên, hình thức chuyển tiếp trong mô hình MH LEACH trong nghiên cứu này là DF nên dung lượng kênh truyền từ T_0 đến T_M được tính như sau:

$$C_D^{e2e} = \min_{m=1,2,\dots,M} (C_{D,m}) \quad (3.7)$$

Theo giả định 3 ở trên, các CH phát các bộ mã ngẫu nhiên để gây nghi ngờ cho nút E, do đó, dung lượng kênh mà nút E nhận được là:

$$C_E^{e2e} = \max_{m=1,2,\dots,M} (C_{E,m}) \quad (3.8)$$

Như vậy, xác suất dừng OP và xác suất chặn IP được tính theo dung lượng ngưỡng C_{th} như sau:

$$OP = \Pr(C_D^{e2e} < C_{th}) \quad (3.9)$$

$$IP = \Pr(C_E^{e2e} \geq C_{th}) \quad (3.10)$$

3.1.2 Phương thức tính toán OP và IP toàn chặng trong WSN MH LEACH

3.1.2.1 Tính toán OP

Từ (3.7) và (3.9) ta có:

$$OP = \Pr\left(\min_{m=1,2,\dots,M} (C_{D,m}) < C_{th}\right) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - OP_m) \quad (3.11)$$

Với $OP_m = \Pr(C_{D,m} < C_{th})$ là OP tại chặng thứ m . Thay $C_{D,m}$ ở (3.5) vào (3.11) ta có:

$$OP_m = \Pr\left(\frac{\Delta \psi_{T_{m-1}, T_m}}{\tau_D^2 \Delta \psi_{T_{m-1}, T_m} + 1} < \rho\right) = \Pr\left((1 - \tau_D^2 \rho) \Delta \psi_{T_{m-1}, T_m} < \rho\right) \quad (3.12)$$

$$\text{Với } \rho = 2^{\frac{C_{th}}{(1-\alpha)\delta}} - 1.$$

Từ công thức (3.12) có thể thấy rằng nếu $1 - \tau_D^2 \rho \leq 0$ thì $OP_m = 1$ và $OP = 1$, còn nếu $1 - \tau_D^2 \rho > 0$ thì sử dụng công thức (3.1) cho hàm CDF của kênh Rayleigh, ta có:

$$OP_m = \Pr\left(\psi_{T_{m-1}, T_m} < \frac{\rho}{(1 - \tau_D^2 \rho) \Delta}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{m-1}, T_m} \rho}{(1 - \tau_D^2 \rho) \Delta}\right) \quad (3.13)$$

Thay thế OP_m trong công thức (3.13) vào (3.11), ta có:

$$OP = 1 - \prod_{m=1}^M \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{m-1}, T_m} \rho}{(1 - \tau_D^2 \rho) \Delta}\right) \quad (3.14)$$

Khi giá trị SNR đủ lớn (công suất tín hiệu đủ lớn so với công suất nhiễu), tức là $\Delta \rightarrow +\infty$, lúc này, giá trị OP_m theo (3.13) có thể được tính gần đúng như sau:

$$OP_m \approx \frac{\Omega_{T_{m-1}, T_m} \rho}{(1 - \tau_D^2 \rho) \Delta} \quad (3.15)$$

Khi đó, giá trị OP từ T_0 đến T_M được tính gần đúng như sau:

$$OP \approx \sum_{m=1}^M OP_m = \sum_{m=1}^M \frac{\Omega_{T_{m-1}, T_m} \rho}{(1 - \tau_D^2 \rho) \Delta} \quad (3.16)$$

3.1.2.2 Tính toán IP

Theo các công thức (3.8) và (3.10), xác suất chặn IP được tính như sau:

$$IP = \Pr\left(\max_{m=1,2,\dots,M} (C_{E,m}) \geq C_{th}\right) = 1 - \prod_{m=1}^M \Pr(C_{E,m} < C_{th}) \quad (3.17)$$

Giá trị $\Pr(C_{E,m} < C_{th})$ trong công thức (3.17) được tính thông qua công thức (3.6) như sau:

$$\Pr(C_{E,m} < C_{th}) = \Pr\left(\left(1 - \tau_E^2 \rho\right) \Delta \psi_{T_{m-1}, E} < \kappa \rho \Delta \psi_{T_{m-1}, J_m} \psi_{J_m, E} + \rho\right) \quad (3.18)$$

Nhìn vào công thức (3.18) ta thấy nếu $1 - \tau_E^2 \rho \leq 0$, thì $\Pr(C_{E,m} < C_{th}) = 1$ và $IP = 1$.

Ngược lại, ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(C_{E,m} < C_{th}) &= \Pr\left(\psi_{T_{m-1}, E} < \omega_1 + \omega_2 \psi_{T_{m-1}, J_m} \psi_{J_m, E}\right) \\ &= \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} F_{\psi_{T_{m-1}, E}}(\omega_1 + \omega_2 yz) f_{\psi_{T_{m-1}, J_m}}(y) f_{\psi_{J_m, E}}(z) dy dz \end{aligned} \quad (3.19)$$

Trong đó:

$$\omega_1 = \frac{\rho}{(1 - \tau_E^2 \rho) \Delta}, \omega_2 = \frac{\kappa \rho}{1 - \tau_E^2 \rho} \quad (3.20)$$

Thay các hàm CDF và PDF của kênh Rayleigh từ (3.1) và (3.2) vào (3.19), ta có:

$$\Pr(C_{E,m} < C_{th}) = 1 - \theta_m \exp(\theta_m - \Omega_{T_{m-1}, E} \omega_1) E_1(\theta_m) \quad (3.21)$$

Trong đó $E_1(\cdot)$ là hàm tích phân mũ [113-114], và:

$$\theta_m = \frac{\Omega_{T_{m-1}, J_m} \Omega_{J_m, E}}{\Omega_{T_{m-1}, E} \omega_2} \quad (3.22)$$

Thay (3.21) vào (3.17), ta có giá trị tường minh của IP là:

$$IP = 1 - \prod_{m=1}^M \left[1 - \theta_m \exp(\theta_m - \Omega_{T_{m-1}, E} \omega_1) E_1(\theta_m)\right] \quad (3.23)$$

Quá trình tính toán chi tiết cho công thức (3.23) được thực hiện trong Phụ lục PL9.1.

Sử dụng việc tính gần đúng cho dung lượng kênh tức thời tại nút E trong công thức (3.6) ở vùng SNR lớn (Δ lớn), ta có:

$$\begin{aligned}
 C_{E,m} &= (1-\alpha) \delta \log_2 \left(1 + \frac{\Delta \psi_{T_{m-1},E}}{\tau_E^2 \Delta \psi_{T_{m-1},E} + \kappa \Delta \psi_{T_{m-1},J_m} \psi_{J_m,E} + 1} \right) \\
 &\approx (1-\alpha) \delta \log_2 \left(1 + \frac{\Delta \psi_{T_{m-1},E}}{\tau_E^2 \Delta \psi_{T_{m-1},E} + \kappa \Delta \psi_{T_{m-1},J_m} \psi_{J_m,E}} \right) \\
 &= (1-\alpha) \delta \log_2 \left(1 + \frac{\psi_{T_{m-1},E}}{\tau_E^2 \psi_{T_{m-1},E} + \kappa \psi_{T_{m-1},J_m} \psi_{J_m,E}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Tương tự như việc tính toán (3.21), chúng ta có thể tính gần đúng cho $\Pr(C_{E,m} < C_{th})$ bằng việc sử dụng (3.24). Khi đó ta có giá trị tiệm cận (Asymptotic) của IP là:

$$IP \approx 1 - \prod_{m=1}^M [1 - \theta_m \exp(\theta_m) E_1(\theta_m)] \tag{3.25}$$

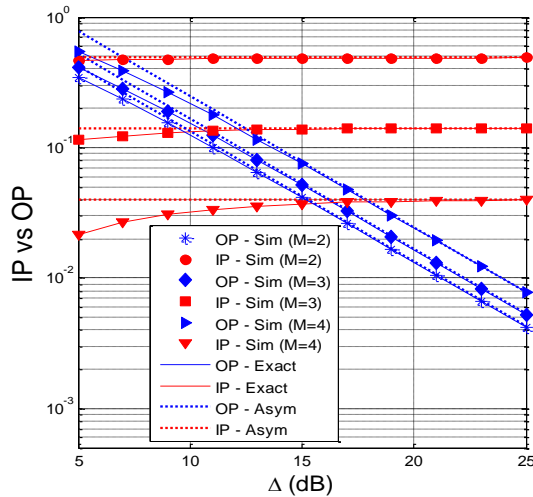
Có thể thấy từ các công thức (3.21), (3.22), (3.24), và (3.25) rằng tại vùng SNR cao, giá trị IP không phụ thuộc vào Δ .

3.1.3 Kết quả mô phỏng của WSN MH LEACH

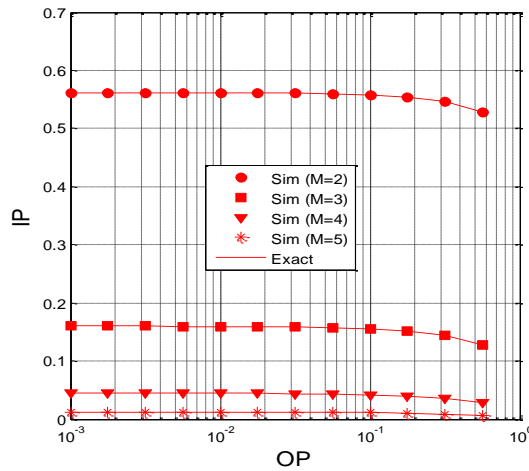
Sử dụng mô phỏng bằng Matlab theo phương pháp Monte-Carlo để kiểm nghiệm các tính toán ở trên. Các tham số cho môi trường mô phỏng được gán các giá trị như sau: hệ số suy hao đường truyền $\beta = 3$, dung lượng ngưỡng $C_{th} = 1$, hiệu suất chuyển đổi năng lượng $\eta = 1$, và tổng thời gian truyền từ đầu tới cuối $T = 1$. Ngoài ra, các SN trong cụm thứ m có cùng tọa độ $(m/M, 0)$, và nút E có tọa độ (x_E, y_E) . Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong các hình, từ Hình 3.2 đến Hình 3.5.

Hình 3.2 mô tả quan hệ giữa OP và IP với Δ với các số chặng khác nhau, nút E có tọa độ $(0.5, 0.3)$, hằng số thời gian cho EH là $\alpha = 0.25$, giả sử các nút làm việc ở chế độ hoàn hảo, tức là không có lỗi phần cứng nên $\tau_D^2 = \tau_E^2 = 0$. Có thể nhận thấy trên Hình 3.2 rằng khi Δ tăng lên, các giá trị OP giảm đi, còn các giá trị IP tăng ở các vùng có SNR thấp rồi sau đó đạt tới một hằng số và không tăng nữa ở vùng có SNR cao. Đồng thời, cũng có thể thấy trên Hình 3.2 rằng khi số chặng tăng lên, các giá trị OP và IP đều giảm đi. Hơn nữa, Hình 3.2 cũng chỉ ra rằng các giá trị tính toán (Exact.)

phù hợp hoàn toàn với các giá trị mô phỏng (Sim.), và cũng nhanh chóng hội tụ với giá trị tiệm cận (Asym.) ở vùng SNR cao như trong phân tích ở các mục 3.1.2.1 và 3.1.2.2.

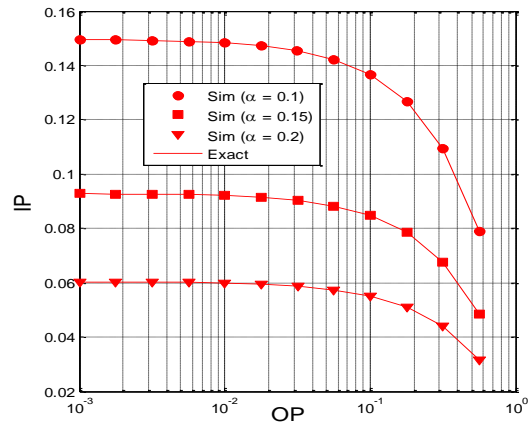


Hình 3.2 Mối quan hệ giữa OP và IP với SNR



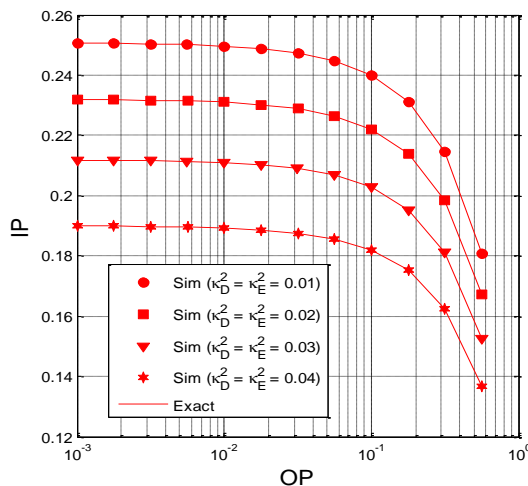
Hình 3.3 Mối quan hệ giữa OP và IP với số chặng

Hình 3.3 mô tả mối quan hệ giữa OP và IP với số chặng M nhận các giá trị 2, 3, 4, và 5 chặng, tọa độ của E là (0.5, 0.25), $\alpha = 0.25$, $\tau_D^2 = \tau_E^2 = 0$. Có thể nhận thấy rằng các giá trị tính toán phù hợp hoàn toàn với các giá trị mô phỏng. Ngoài ra, với cùng một giá trị của OP, xác suất chặn IP giảm khi M tăng lên. Hơn nữa, khi M = 2, giá trị của IP cao hơn hẳn so với khi M nhận các giá trị còn lại (M = 3/4/5). Hình 3.3 cũng cho thấy các giá trị IP sẽ đạt bão hòa (hằng số) khi OP thấp ($OP < 10^{-2}$).



Hình 3.4 Mỗi quan hệ giữa IP và OP khi $M=4$, với các thời gian EH khác nhau

Hình 3.4 mô tả rõ hơn mối quan hệ giữa OP và IP với mức thu hoạch năng lượng EH, trong điều kiện số chặng cố định $M = 4$, $x_E = 0.5$, $y_E = 0.3$, $\tau_D^2 = \tau_E^2 = 0$. Các giá trị α liên quan đến thời gian EH được thay đổi trong khoảng (0.1, 0.15, và 0.2). Có thể thấy rằng khi α tăng từ 0.1 lên 0.2, xác suất chặn IP đạt giá trị tốt hơn hẳn bởi vì nếu thời gian dành cho EH tăng lên, các nút gây nhiễu J sẽ nhận được nhiều công suất hơn và phát tín hiệu nhiễu tốt hơn. Tuy nhiên, có thể thấy rõ ràng rằng khi α tăng lên, thời gian dùng cho việc truyền dữ liệu giảm đi, làm cho OP bị ảnh hưởng và nhận các giá trị kém hơn.



Hình 3.5 Mỗi quan hệ giữa OP và IP với $M=3$ và phần cứng không hoàn hảo

Hình 3.5 mô tả mối quan hệ giữa OP và IP với $M = 3$, $x_E = 0.5$, $y_E = 0.3$, $\alpha = 0.15$, khảo sát ở các giá trị τ_D^2 và τ_E^2 khác nhau. Giả sử các nút có cùng mức độ

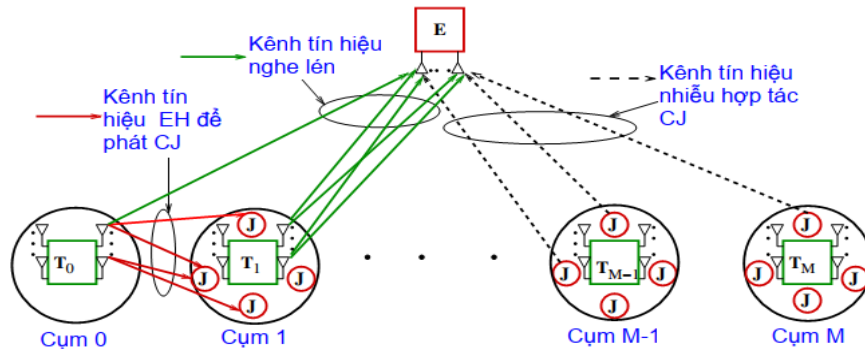
không hoàn hảo, tức là $\tau_D^2 = \tau_E^2$. Có thể thấy khi mức độ không hoàn hảo của thiết bị tăng lên, tức là mức suy hao phần cứng gây ra bởi sự không hoàn hảo của thiết bị tăng lên sẽ tác động lên IP cao hơn tác động lên OP. Đây là cơ sở cho việc giám sát các thiết bị để bảo đảm hiệu năng làm việc của hệ thống.

Các kết quả trong nội dung này được thực hiện trong công trình **C.01** của tác giả.

3.2 Mô hình và phương thức tính toán OP và IP cho mạng LEACH MIMO đa chặng

3.2.1 Mô hình mạng LEACH MIMO đa chặng

Hình 3.6 mô tả hệ thống MH LEACH MIMO sử dụng kỹ thuật EH để gây nhiễu nhằm chống lại sự khai thác thông tin trái phép của nút E. Mô hình MIMO trong nghiên cứu này được thực hiện bằng việc thay thế các nút CH (các T_m trong các cụm) và nút E sử dụng một ăng ten bằng các nút sử dụng nhiều ăng ten.



Hình 3.6 Mô hình MH LEACH MIMO EH-CJ [J.01]

Do việc sử dụng đa ăng ten tại các nút chủ cụm T_m và nút E, nên bên cạnh những giả định đã được mô tả trong Mục 3.1, mô hình mạng trong Hình 3.6 còn áp dụng các giả định sau đây:

1. Số lượng ăng ten của các nút CH và nút E tương ứng là N_T , và N_E .
2. Các nút CH sử dụng các kỹ thuật lựa chọn ăng ten phát TAS (Transmit Antenna Selection) và tổ hợp sự lựa chọn SC (Selection Combining) cho việc truyền dữ liệu qua các chặng từ nút nguồn T_0 tới nút đích T_M . Ngoài ra, các nút CH mã hóa dữ liệu bằng các bộ mã ngẫu nhiên, và áp dụng kỹ thuật ngẫu nhiên và chuyển tiếp trong quá trình truyền để tăng độ bảo mật.

3. Nút E sử dụng kỹ thuật SC để giải mã tín hiệu nhận được.
4. Số nút cảm biến (SN) trong cụm thứ m là K_m , trong đó nút gây nhiễu được ký hiệu là $J_{m,u}$, với $m \in [0, M]$, $u \in [0, K_m]$. Nút $J_{m,u}$ sẽ thu hoạch năng lượng sóng vô tuyến từ nút T_{m-1} để phát tín hiệu gây nhiễu cho nút E. Việc xác định $J_{m,u}$ sẽ được thực hiện qua các thuật toán được đề xuất sau đây trong quá trình tính toán.

Do việc sử dụng đa ăng ten tại các nút CH và nút E, nên để khảo sát chi tiết và đa dạng hơn trong nghiên cứu, nghiên cứu sinh đề xuất 3 mô hình thực hiện việc tính toán các giá trị OP và IP như sau:

1. Mô hình BA-BJ (Best Antenna-Best Jammer): trong mô hình này, một ăng ten có công suất phát tốt nhất của T_{m-1} được lựa chọn để phát tín hiệu cho việc thu hoạch năng lượng tại các nút gây nhiễu $J_{m,u}$, và một nút gây nhiễu tốt nhất $J_{m,b}$ được lựa chọn trong số các $J_{m,u}$ để phát tín hiệu nhiễu lên E.
2. Mô hình RA-AJ (Random Antenna-All Jammer): một ăng ten của T_{m-1} được chọn ngẫu nhiên để phát tín hiệu cho việc thực hiện EH các nút $J_{m,u}$, và tất cả các nút $J_{m,u}$ này đều phát tín hiệu nhiễu lên E.
3. Mô hình AA-AJ (All Antenna-All Jammer): tất cả các ăng ten của T_{m-1} được lựa chọn cho việc thực hiện EH tại $J_{m,u}$, và tất cả các nút $J_{m,u}$ này đều phát tín hiệu nhiễu lên E.

Hơn nữa, do việc sử dụng đa ăng ten nên các tham số của kênh Rayleigh được viết lại như sau:

- Độ lợi kênh: $\psi_{X^{n_t}, Y^{n_r}}$ là một biến ngẫu nhiên RV (Random Variable) của hàm số mũ, là độ lợi kênh truyền giữa ăng ten thứ n_t của máy phát X và ăng ten thứ n_r của máy thu Y, với $(X, Y) \in \{T_m, J_{m,u}, E\}$, $n_t \in [1, N_X]$, $n_r \in [1, N_Y]$.

- Hàm phân bố tích lũy CDF:

$$F_{\psi_{X^{n_t}, Y^{n_r}}}(x) = 1 - \exp(-\Omega_{XY}x) \quad (3.26)$$

- Hàm phân bố xác suất PDF:

$$f_{\psi_{X^{n_t}, Y^{n_r}}}(x) = \Omega_{XY} \exp(-\Omega_{XY}x) \quad (3.27)$$

Trong đó: $\Omega_{XY} = 1/E\{\psi_{X^r Y^r}\} = d_{XY}^\beta$, với d_{XY} là khoảng cách giữa X và Y, và β là số mũ của hàm suy hao đường truyền.

Đồng thời, lưu ý rằng do các nút T_m và $J_{m,u}$ trong cùng một cụm và ở khá gần nhau nên có thể giả sử rằng $\Omega_{T_{m-1}T_m} = \Omega_{T_{m-1}J_{m,u}}$ và $\Omega_{J_{m,u}E} = \Omega_{T_mE}$ với mọi giá trị của m và u .

3.2.2 Lựa chọn an ten và nút gây nhiễu

1. Mô hình BA-BJ

Đối với mô hình này, CH T_{m-1} chọn một ăng ten có công suất tín hiệu tốt nhất để phát tín hiệu cho một nút gây nhiễu có mức EH tốt nhất trong cụm thứ m theo công thức (3.28) như sau:

$$\psi_{T_{m-1}J_{m,b}}^a = \max_{r=1,\dots,N_T} \left(\max_{u=1,\dots,K_m} \left(\psi_{T_{m-1}J_{m,v}}^r \right) \right) \quad (3.28)$$

Trong đó, a là chỉ số của ăng ten được chọn tại nút T_{m-1} , $J_{m,b}$ là nút gây nhiễu tốt nhất tại được chọn tại cụm thứ m . Công thức (3.28) muốn nhấn mạnh rằng T_{m-1} cố gắng để cung cấp năng lượng được thu thập cao nhất cho nút gây nhiễu được chọn. Năng lượng mà nút $J_{m,b}$ thu thập được trong suốt khoảng thời gian $\alpha\tau$ với $0 \leq \alpha \leq 1$, $\tau = 1/M$ được tính như sau:

$$E_{J_{m,b}} = \eta\alpha\tau P\psi_{T_{m-1}J_{m,b}}^a \quad (3.29)$$

Với $\eta(0 \leq \eta \leq 1)$ là hệ số chuyển đổi năng lượng, P là công suất phát của nút T_{m-1} với mọi giá trị của m . Lúc này, công suất phát trung bình mà nút $J_{m,b}$ phát ra trong suốt khoảng thời gian truyền dữ liệu được tính như sau:

$$P_{J_{m,b}} = \frac{E_{J_{m,b}}}{(1-\alpha)\tau} = \kappa P\psi_{T_{m-1}J_{m,b}}^a \quad (3.30)$$

Với $\kappa = \eta\alpha / (1-\alpha)$.

2. Mô hình RA-AJ

Trong trường hợp nút T_{m-1} lựa chọn một ăng ten ngẫu nhiên để phát tín hiệu cho quá trình EH của các nút $J_{m,u}$ trong cụm thứ m , và tất cả các nút $J_{m,u}$ đều được chọn cho việc hợp tác để gây nhiễu lên nút E, thì công suất phát trung bình của $J_{m,u}$ được tính như sau:

$$P_{J_{m,u}} = \kappa P \psi_{T_{m-1}^c J_{m,u}} \quad (3.31)$$

Với c là chỉ số của ăng ten được chọn trong số N_T ăng ten tại nút T_{m-1} .

3. Mô hình AA-AJ

Khi tất cả các ăng ten của T_{m-1} được sử dụng để cung cấp EH cho tất cả các nút J , và mọi $J_{m,u}$ đều được sử dụng để gây nhiễu lên E thì công suất trung bình được tính là:

$$P_{J_{m,u}} = \kappa P \sum_{r=1}^{N_T} \psi_{T_{m-1}^r J_{m,u}} \quad (3.32)$$

Cần phải lưu ý rằng các nút T_m và $J_{m,u}$ trong cùng một cụm và khá gần nhau nên chúng có thể trao đổi thông tin về các tín hiệu nhiễu nhân tạo AN (Artificial Noise) được phát ra từ các nút J , do đó các nút T_m hoàn toàn có thể loại bỏ các tín hiệu AN này, trong khi nút E thì không thể vì với việc khai thác thông tin trái phép, nút E chỉ luôn tập trung vào việc thu các tín hiệu từ các ăng ten khác phát tới mà không phân biệt được đâu là nút CH và đâu là nút J . Hơn nữa, nhìn vào các công thức (3.30), (3.31), và (3.32) có thể thấy rằng các tính toán trong các mô hình RA-AJ và AA-AJ (mô hình 2 và 3) sẽ phức tạp hơn so với tính toán trong mô hình BA-BJ (mô hình 1) bởi vì các mô hình 2 và 3 đòi hỏi sự đồng bộ cao giữa CH và các SN trong cụm để thực hiện việc triệt tiêu nhiễu. Hơn nữa, mô hình 3 (AA-AJ) có thể coi là có mức độ tính toán phức tạp nhất vì nó dành nhiều năng lượng và tài nguyên vô tuyến hơn cho chu trình thu hoạch năng lượng khi mà tất cả các ăng ten đều được sử dụng cho việc phát tín hiệu trong chu trình EH của các nút J .

3.2.3 Lựa chọn an ten phát và tổ hợp gây nhiễu

Việc lựa chọn ăng ten phát và tổ hợp các lựa chọn TAS/SC tại các CH được thể hiện qua công thức sau đây [69]:

$$\psi_{T_{m-1}^p T_m^q} = \max_{u=1, \dots, N_T} \left(\max_{v=1, \dots, N_T} \left(\psi_{T_{m-1}^u T_m^v} \right) \right) \quad (3.33)$$

Trong đó p và q tương ứng là các chỉ số của các ăng ten phát tại T_{m-1} và ăng ten thu tại T_m . Giả sử nhiễu kênh truyền hoàn toàn được triệt tiêu tại các CH, lúc này

dung lượng tức thời của kênh vô tuyến trên đường truyền của chặng từ T_{m-1} đến T_m dưới ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo được tính như sau:

$$C_{D,m} = (1-\alpha)\tau \log_2 \left(1 + \frac{P\psi_{T_{m-1}^p T_m^q}}{\mu_D^2 P\psi_{T_{m-1}^p T_m^q} + \sigma_0^2} \right) = (1-\alpha)\tau \log_2 \left(1 + \frac{\Delta\psi_{T_{m-1}^p T_m^q}}{\mu_D^2 \Delta\psi_{T_{m-1}^p T_m^q} + 1} \right) \quad (3.34)$$

Trong đó σ_0^2 là phương sai của nhiễu trắng Gauss cộng thêm AWGN (Additive White Gaussian Noise), $\Delta = P/\sigma_0^2$ là SNR phát, μ_D^2 là tổng giá trị tác động của mức nhiễu gây ra do sự không hoàn hảo của thiết bị trong quá trình truyền từ T_{m-1} sang T_m với mọi m . Khi đó, dung lượng kênh toàn chặng (từ đầu đến cuối_e2e) được tính như sau:

$$C_D^{e2e} = \min_{m=1,2,\dots,M} (C_{D,m}) \quad (3.35)$$

Trong hoạt động của mình, nút E sử dụng kỹ thuật tổ hợp sự lựa chọn SC (Selection Combining) vì nút này không thể xác định và phân biệt được quá trình EH, cũng như vai trò của CH và J tại các cụm. Do đó, độ lợi kênh vô tuyến tại khe thời gian thứ m tương ứng với khoảng thời gian mà CH T_{m-1} phát tín hiệu cho $J_{m,u}$ để thu hoạch năng lượng, rồi $J_{m,u}$ hợp tác với T_{m-1} trong quá trình T_{m-1} phát tín hiệu dữ liệu sang cho T_m (cũng trong khe thời gian này) để phát tín hiệu nhiễu lên nút E được tính như sau:

$$\psi_{T_{m-1}^p E^r} = \max_{v=1,\dots,N_E} (\psi_{T_{m-1}^p E^v}) \quad (3.36)$$

Trong đó, r là chỉ số ăng ten thu được lựa chọn tại nút E dành cho việc thu trái phép tín hiệu từ T_{m-1} phát cho T_m tại khe thời gian thứ m . Dưới ảnh hưởng của các tín hiệu AN phát ra từ $J_{m,u}$ và tạp âm do độ không hoàn hảo của phần cứng HI (Hardware Imperfection), tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tạp âm SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) nhận được tại E ở khe thời gian thứ m tùy theo từng mô hình BA-BJ, RA-AJ, và AA-AJ được tính như sau:

$$\phi_{T_{m-1}^p E^r}^{BA-BJ} = \frac{\Delta\psi_{T_{m-1}^p E^r}}{\mu_E^2 \Delta\psi_{T_{m-1}^p E^r} + \kappa \Delta\psi_{T_{m-1}^a J_{m,b}} \psi_{J_{m,b} E^r} + 1} \quad (3.37)$$

$$\varphi_{T_{m-1}^p E^r}^{\text{RA-AJ}} = \frac{\Delta \psi_{T_{m-1}^p E^r}}{\mu_E^2 \Delta \psi_{T_{m-1}^p E^r} + \kappa \Delta \sum_{u=1}^{K_m} \psi_{T_{m-1}^p J_{m,u}} \psi_{J_{m,u} E^r}} + 1 \quad (3.38)$$

$$\varphi_{T_{m-1}^p E^r}^{\text{AA-AJ}} = \frac{\Delta \psi_{T_{m-1}^p E^r}}{\mu_E^2 \Delta \psi_{T_{m-1}^p E^r} + \kappa \Delta \sum_{l=1}^{N_T} \sum_{u=1}^{K_m} \psi_{T_{m-1}^p J_{m,u}} \psi_{J_{m,u} E^r}} + 1 \quad (3.39)$$

Trong đó μ_E^2 là tổng mức tạp âm HI của đường truyền từ T_{m-1} sang nút E, với mọi m . Căn cứ vào các công thức (3.37), (3.38), và (3.39), có thể thấy rằng nút E không thể lựa chọn được ăng ten thu có khả năng cung cấp giá trị SINR lớn nhất vì nút này không thể biết được mức công suất phát của các nút $J_{m,u}$ do công suất này phụ thuộc vào quá trình EH. Đồng thời, từ các công thức này có thể tính được dung lượng kênh tức thời tại nút E ở khe thời gian thứ m như sau:

$$C_{E,m}^Z = (1-\alpha) \tau \log_2 \left(1 + \varphi_{T_{m-1}^p E^r}^Z \right) \quad (3.40)$$

Với $Z \in \{\text{BA-BJ, RA-AJ, AA-AJ}\}$. Như vậy, dung lượng toàn chặng (từ đầu đến cuối_e2e) mà E thu được như sau:

$$C_E^{\text{e2e},Z} = \max_{m=1,2,\dots,M} \left(C_{E,m}^Z \right) \quad (3.41)$$

Các giá trị C_D^{e2e} trong (3.35) và $C_E^{\text{e2e},Z}$ trong (3.41) sẽ được sử dụng để tính toán EP và IP trong mục tiếp theo.

3.2.4 Tính toán xác suất dừng OP và xác suất chặn IP toàn chặng trong mô hình MH LEACH MIMO

1. Tính xác suất dừng OP toàn chặng:

Xác suất dừng OP toàn chặng được tính như sau:

$$\text{OP}_{\text{e2e}} = \Pr \left(C_D^{\text{e2e}} < C_{\text{th}} \right) = 1 - \prod_{m=1}^M \left(1 - \Pr \left(C_{D,m} < C_{\text{th}} \right) \right) = 1 - \prod_{m=1}^M \left(1 - \text{OP}_m \right) \quad (3.42)$$

Với C_{th} là dung lượng ngưỡng, là một giá trị tốc độ danh định được xác định trước mà hệ thống muốn đạt tới, OP_m là xác suất dừng của chặng thứ m , và được tính từ công thức (3.34) như sau:

$$\text{OP}_m = \Pr \left(\left(1 - \mu_D^2 \rho_{\text{th}} \right) \Delta \psi_{T_{m-1}^p T_m^q} < \rho_{\text{th}} \right) \quad (3.43)$$

Với $\rho_{\text{th}} = 2^{C_{\text{th}}/(1-\alpha)^r} - 1$. Có thể thấy từ công thức (3.43) rằng nếu $1 - \mu_{\text{D}}^2 \rho_{\text{th}} \leq 0$ thì $\text{OP}_m = 1$. Ngược lại, ta có thể tính OP_m thông qua các giá trị liên quan trong (3.43) như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP}_m &= \Pr \left(\psi_{\text{T}_{m-1}^p \text{T}_m^q} < \frac{\rho_{\text{th}}}{(1 - \mu_{\text{D}}^2 \rho_{\text{th}}) \Delta} \right) = \prod_{u=1}^{N_{\text{T}}} \prod_{v=1}^{N_{\text{T}}} \Pr \left(\psi_{\text{T}_{m-1}^u \text{T}_m^v} < \frac{\rho_{\text{th}}}{(1 - \mu_{\text{D}}^2 \rho_{\text{th}}) \Delta} \right) \\ &= \left[1 - \exp \left(- \frac{\Omega_{\text{T}_{m-1} \text{T}_m} \rho_{\text{th}}}{(1 - \mu_{\text{D}}^2 \rho_{\text{th}}) \Delta} \right) \right]^{N_{\text{T}}^2} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Ở vùng SNR lớn, tức là $\Delta \rightarrow +\infty$, ta có thể tính giá trị gần đúng của OP_m trong (3.44) như sau:

$$\text{OP}_m \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} \left[\frac{\Omega_{\text{T}_{m-1} \text{T}_m} \rho_{\text{th}}}{(1 - \mu_{\text{D}}^2 \rho_{\text{th}}) \Delta} \right]^{N_{\text{T}}^2} \quad (3.45)$$

Thay thế OP_m trong công thức (3.44) vào (3.42) sẽ nhận được công thức tường minh của OP_{e2e} . Đồng thời, tại vùng SNR lớn, giá trị tiệm cận của OP_{e2e} được tính như sau:

$$\text{OP}_{\text{e2e}} \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} \sum_{m=1}^M \text{OP}_m \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} \sum_{m=1}^M \left[\frac{\Omega_{\text{T}_{m-1} \text{T}_m} \rho_{\text{th}}}{(1 - \mu_{\text{D}}^2 \rho_{\text{th}}) \Delta} \right]^{N_{\text{T}}^2} \quad (3.46)$$

Có thể nhận thấy rằng xác suất chặn toàn chặng OP_{e2e} không phụ thuộc vào mô hình lựa chọn ăng ten phát của CH và việc lựa chọn nút gây nhiễu $J_{m,u}$ tại các cụm, bởi vì OP chỉ phụ thuộc vào dung lượng kênh truyền giữa 2 nút CH liền kề, mà việc truyền dữ liệu giữa 2 nút CH này được thực hiện theo TAS/SC như phân tích trong các công thức (3.33) và (3.34) của mục 3.2.3 ở trên. Như vậy, OP_{e2e} của cả 3 mô hình BA-BJ, RA-AJ, và AA-AJ là như nhau.

2. Tính xác suất chặn IP toàn chặng

Ngược lại với OP, xác suất chặn IP phụ thuộc vào mô hình cụ thể được chọn trong số các mô hình BA-BJ, RA-AJ, và AA-AJ bởi vì IP được tính theo mức tín hiệu SINR tại nút E. Giá trị IP toàn chặng được tính như sau:

$$\text{IP}_Z^{\text{e2e}} = \Pr \left(C_{\text{E}}^{\text{e2e},Z} \geq C_{\text{th}} \right) = 1 - \prod_{m=1}^M \Pr \left(C_{\text{E},m}^Z < C_{\text{th}} \right) = 1 - \prod_{m=1}^M \overline{\text{IP}}_m^Z \quad (3.47)$$

Với $\overline{\text{IP}}_m^Z = \Pr(C_{E,m}^Z < C_{th})$ là xác suất mà nút E không thể giải mã được chính xác dữ liệu thu được ở khe thời gian thứ m trong toàn chặng. Giá trị $\overline{\text{IP}}_m^Z$ này được tính theo lý thuyết như sau:

$$\overline{\text{IP}}_m^Z = \Pr\left(\varphi_{T_{m-1}^p E^r}^Z < \rho_{th}\right) \quad (3.48)$$

(với $Z \in \{\text{BA-BJ}, \text{RA-AJ}, \text{AA-AJ}\}$). Giá trị $\overline{\text{IP}}_m^Z$ và IP_Z^{e2e} được tính tùy theo mô hình lựa chọn ăng ten và lựa chọn nút gây nhiễu như trong các nội dung sau đây.

1) Mô hình BA-BJ

Thay thế $\varphi_{T_{m-1}^p E^r}^Z$ ở (3.37) vào (3.48), ta có:

$$\begin{aligned} \overline{\text{IP}}_m^{\text{BA-BJ}} &= \Pr\left(\frac{\Delta\psi_{T_{m-1}^p E^r}}{\mu_E^2 \Delta\psi_{T_{m-1}^p E^r} + \kappa \Delta\psi_{T_{m-1}^a J_{m,b}} \psi_{J_{m,b} E^r}} < \rho_{th}\right) \\ &= \Pr\left(\left(1 - \mu_E^2 \rho_{th}\right) \Delta\psi_{T_{m-1}^p E^r} < \kappa \rho_{th} \Delta\psi_{T_{m-1}^a J_{m,b}} \psi_{J_{m,b} E^r} + \rho_{th}\right) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Có thể thấy rằng nếu $1 - \mu_E^2 \rho_{th} \leq 0$ thì $\overline{\text{IP}}_m^{\text{BA-BJ}} = 1$, do đó, các tính toán tiếp theo chỉ quan tâm tới trường hợp $1 - \mu_E^2 \rho_{th} > 0$ như sau:

$$\begin{aligned} \overline{\text{IP}}_m^{\text{BA-BJ}} &= \Pr\left(\psi_{T_{m-1}^p E^r} < \omega_1 \psi_{T_{m-1}^a J_{m,b}} \psi_{J_{m,b} E^r} + \omega_2\right) \\ &= \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} F_{\psi_{T_{m-1}^p E^r}}(\omega_1 xy + \omega_2) \times f_{\psi_{J_{m,b} E^r}}(x) \times f_{\psi_{T_{m-1}^a J_{m,b}}}(y) dx dy \end{aligned} \quad (3.50)$$

Với:

$$\omega_1 = \frac{\kappa \rho_{th}}{1 - \mu_E^2 \rho_{th}}, \omega_2 = \frac{\rho_{th}}{(1 - \mu_E^2 \rho_{th}) \Delta} \quad (3.51)$$

Hàm CDF của $\psi_{T_{m-1}^p E^r}$ trong công thức (3.50) được tính như sau:

$$\begin{aligned} F_{\psi_{T_{m-1}^p E^r}}(x) &= \prod_{v=1}^{N_E} F_{\psi_{T_{m-1}^p E^r}}(x) = \left(1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1} E} x)\right)^{N_E} \\ &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(-p \Omega_{T_{m-1} E} x) \end{aligned} \quad (3.52)$$

Thay (3.52) hàm PDF $f_{\psi_{J_{m,b} E^r}}(x) = \Omega_{T_{m,E}} \exp(-\Omega_{T_{m,E}} x)$ vào (3.50), ta có:

$$\overline{\text{IP}}_m^{\text{BA-BJ}} = 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(-p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_2) \times \int_0^{+\infty} \frac{\theta_{1,p}}{\theta_{1,p} + y} f_{\psi_{T_{m-1}^a J_{m,b}}}(y) dy \quad (3.53)$$

Với $\theta_{1,p} = \Omega_{T_m E} / (p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_1)$.

Từ (3.26), (3.27), và (3.28) cùng với lưu ý rằng các nút T_m và $J_{m,u}$ trong cùng một cụm và khá gần nhau nên $\Omega_{T_{m-1} T_m} = \Omega_{T_{m-1} J_{m,u}}$ và $\Omega_{J_{m,u} E} = \Omega_{T_m E}$ với mọi giá trị của m và u (như đã đề cập), có thể tính CDF của $\psi_{T_{m-1} J_{m,b}}$ trong công thức (3.53) như sau:

$$F_{\psi_{T_{m-1} J_{m,b}}}^a(y) = \prod_{r=1}^{N_T} \prod_{u=1}^{K_m} F_{\psi_{T_{m-1} J_{m,u}}}^r(y) = \left[1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1} T_m} y) \right]^{N_T K_m} \quad (3.54)$$

Khi đó, hàm phân bố xác suất PDF của $F_{\psi_{T_{m-1} J_{m,b}}}$ (y) được tính như sau:

$$\begin{aligned} f_{\psi_{T_{m-1} J_{m,b}}}^a(y) &= N_T K_m \Omega_{T_{m-1} T_m} \exp(-\Omega_{T_{m-1} T_m} y) \times \left[1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1} T_m} y) \right]^{N_T K_m - 1} \\ &= \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^u C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \Omega_{T_{m-1} T_m} \times \exp(-(u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} y) \end{aligned} \quad (3.55)$$

Thay thế (3.55) vào (3.53), ta có:

$$\begin{aligned} \overline{\text{IP}}_m^{\text{BA-BJ}} &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \\ &\quad \times \exp((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} - p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_2) \times \Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} E_1((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p}) \end{aligned} \quad (3.56)$$

Quá trình tính toán chi tiết cho công thức (3.56) được thực hiện trong Phụ lục PL9.2.

Thay thế (3.56) vào (3.47), ta có:

$$\text{IP}_{e2e}^{\text{BA-BJ}} = 1 - \prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \times \exp((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} - p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_2) \times \Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} E_1((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p}) \right] \quad (3.57)$$

Tại vùng có SNR cao, ta có:

$$\frac{\Delta \psi_{T_{m-1} E^r}}{\mu_E^2 \Delta \psi_{T_{m-1} E^r} + \kappa \Delta \psi_{T_{m-1} J_{m,b}} \psi_{J_{m,b} E^r}} + 1 \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} \frac{\psi_{T_{m-1} E^r}}{\mu_E^2 \psi_{T_{m-1} E^r} + \kappa \psi_{T_{m-1} J_{m,b}} \psi_{J_{m,b} E^r}} \quad (3.58)$$

Khi đó, giá trị của $\text{IP}_{e2e}^{\text{BA-BJ}}$ trong công thức (3.57) được tính gần đúng như sau:

$$\mathbb{IP}_{e2e}^{\text{BA-BJ}} \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} 1 - \prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \times \exp\left((u+1)\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}\right) \right. \\ \left. \times \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} E_1\left((u+1)\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}\right) \right] \quad (3.59)$$

2) Mô hình RA-AJ

Thay thế $\varphi_{T_{m-1}E^r}^Z$ ở (3.38) vào (3.48) với điều kiện $1 - \mu_E^2 \rho_{\text{th}} > 0$, ta có:

$$\overline{\mathbb{IP}}_m^{\text{RA-AJ}} = \Pr\left(\psi_{T_{m-1}E^r} < \omega_1 \sum_{u=1}^{K_m} \psi_{T_{m-1}J_{m,u}} \psi_{J_{m,u}E^r} + \omega_2\right) \\ = 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(-p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \\ \times \prod_{u=1}^{K_m} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \exp(-p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_1 xy) f_{\psi_{J_{m,u}E^r}}(x) \times f_{\psi_{T_{m-1}J_{m,u}}}(y) dx dy \quad (3.60)$$

Thay thế các giá trị của các hàm phân bố xác suất PDF của kênh Rayleigh $f_{\psi_{J_{m,u}E^r}}(x) = \Omega_{T_{m-1}E} \exp(-\Omega_{T_{m-1}E} x)$ và $f_{\psi_{T_{m-1}J_{m,u}}}(y) = \Omega_{T_{m-1}T_m} \exp(-\Omega_{T_{m-1}T_m} y)$ vào (3.60) ta có:

$$\overline{\mathbb{IP}}_m^{\text{RA-AJ}} = 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(K_m \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} - p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \\ \times \left[\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} E_1\left((p+1)\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}\right) \right]^{K_m} \quad (3.61)$$

Thay thế (3.61) vào (3.47), ta có:

$$\mathbb{IP}_{e2e}^{\text{RA-AJ}} = 1 - \prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(K_m \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} - p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \right. \\ \left. \times \left[\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} E_1\left(\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}\right) \right]^{K_m} \right] \quad (3.62)$$

Ở vùng SNR cao, ta có thể tính gần đúng giá trị IP toàn chặng của mô hình RA-AJ như sau:

$$\mathbb{IP}_{e2e}^{\text{RA-AJ}} \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} 1 - \prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(K_m \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}) \times \left[\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} E_1\left(\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}\right) \right]^{K_m} \right] \quad (3.63)$$

3) Mô hình AA-AJ

Thay thế $\varphi_{T_{m-1}E^r}^Z$ ở (3.39) vào (3.48) với điều kiện $1 - \mu_E^2 \rho_{\text{th}} > 0$, ta có thể tính

$\overline{\mathbb{IP}}_m^{\text{AA-AJ}}$ như sau:

$$\begin{aligned}
 \overline{\text{IP}}_m^{\text{RA-AJ}} &= \Pr \left(\psi_{T_{m-1}E^r}^p < \omega_1 \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{u=1}^{K_m} \psi_{T_{m-1}J_{m,u}}^t \psi_{J_{m,u}E^r} + \omega_2 \right) \\
 &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(-p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \\
 &\quad \times \prod_{u=1}^{K_m} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \exp(-p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_1 xy) f_{\psi_{J_{m,u}E^r}}(x) \times f_{Y_{\text{sum}}}(y) dx dy \\
 &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(-p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \times \prod_{u=1}^{K_m} \int_0^{+\infty} \frac{\theta_{1,p}}{\theta_{1,p} + y} f_{Y_{\text{sum}}}(y) dy
 \end{aligned} \tag{3.64}$$

Trong đó $Y_{\text{sum}} = \sum_{t=1}^{N_T} \psi_{T_{m-1}J_{m,u}}^t$ là tổng của các biến ngẫu nhiên độc lập và có phân bố giống nhau, nên hàm phân bố xác suất PDF của Y_{sum} có thể được tính như sau [130-131]:

$$f_{Y_{\text{sum}}}(x) = \frac{\Omega_{T_{m-1}T_m}^{N_T}}{(N_T - 1)!} x^{N_T-1} \exp(-\Omega_{T_{m-1}T_m} x) \tag{3.65}$$

Thay (3.65) vào (3.64) và đổi biến $z = \theta_1 + y$, ta có:

$$\begin{aligned}
 \overline{\text{IP}}_m^{\text{AA-AJ}} &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(K_m \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p} - p\Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \\
 &\quad \times \prod_{p=1}^{K_m} (-1)^p \frac{\theta_{1,p} \Omega_{T_{m-1}T_m}^{N_T}}{(N_T - 1)!} \underbrace{\int_{\theta_{1,p}}^{+\infty} \frac{1}{z} (z - \theta_{1,p})^{N_T-1} \exp(-\Omega_{T_{m-1}T_m} z) dz}_I
 \end{aligned} \tag{3.66}$$

Áp dụng công thức khai triển nhị thức Newton cho $(z - \theta_{1,p})^{N_T-1}$ để tính tích phân I trong công thức (3.66), ta có:

$$\begin{aligned}
 I &= \sum_{q=0}^{N_T-1} (-1)^q C_{N_T-1}^q (\theta_{1,p})^q \int_{\theta_{1,p}}^{+\infty} z^{N_T-2-q} \exp(-\Omega_{T_{m-1}T_m} z) dz \\
 &= (-1)^{N_T-1} (\theta_{1,p})^{N_T-1} E_1(\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}) + \sum_{q=0}^{N_T-2} (-1)^q C_{N_T-1}^q \frac{(\theta_{1,p})^q}{(\Omega_{T_{m-1}T_m})^{N_T-1-q}} \Gamma(N_T - 1 - q, \theta_{1,p})
 \end{aligned} \tag{3.67}$$

Thay (3.67) vào (3.66), rồi sau đó thay kết quả nhận được của (3.66) vào (3.47) sẽ nhận được IP toàn chặng của mô hình AA-AJ như sau:

$$\text{IP}_{e2e}^{\text{AA-AJ}} = 1 - \prod_{m=1}^M [1], \text{ với } \prod_{m=1}^M [1] \text{ được tính như sau:}$$

$$\prod_{m=1}^M [1] = \prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(K_m \Omega_{T_{m-1}T_m} - p \Omega_{T_{m-1}E} \omega_2) \times \dots \right. \\ \left. \dots \times \prod_{p=1}^{K_m} \frac{1}{(N_T - 1)!} \times \left[(-1)^{N_T-1} (\theta_{1,p} \Omega_{T_{m-1}T_m})^{N_T} E_1(\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{q=0}^{N_T-2} (-1)^q C_{N_T-1}^q (\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p})^{q+1} \Gamma(N_T - 1 - q, \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}) \right] \right] \quad (3.68)$$

Ở vùng SNR cao, ta có thể tính gần đúng giá trị IP toàn chặng của mô hình RA-AJ như sau:

$$\text{IP}_{e2e}^{\text{AA-AJ}} \stackrel{\Delta \rightarrow +\infty}{\approx} 1 - \prod_{m=1}^M [2], \text{ với } \prod_{m=1}^M [2] \text{ được tính như sau:}$$

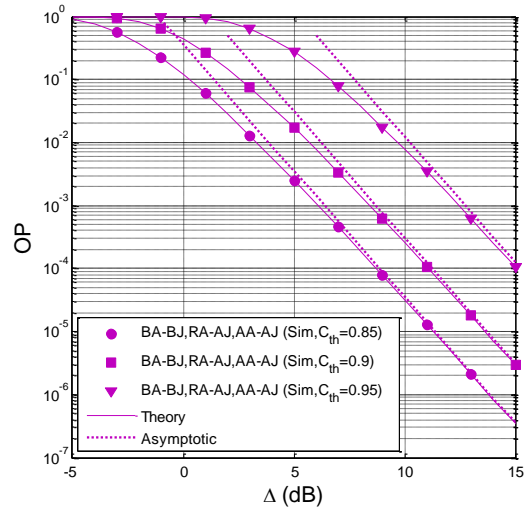
$$\prod_{m=1}^M [2] = \prod_{m=1}^M \left[1 + \sum_{p=1}^{N_E} (-1)^p C_{N_E}^p \exp(K_m \Omega_{T_{m-1}T_m}) \right. \\ \left. \times \prod_{p=1}^{K_m} \frac{1}{(N_T - 1)!} \times \left[(-1)^{N_T-1} (\theta_{1,p} \Omega_{T_{m-1}T_m})^{N_T} E_1(\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{q=0}^{N_T-2} (-1)^q C_{N_T-1}^q (\Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p})^{q+1} \Gamma(N_T - 1 - q, \Omega_{T_{m-1}T_m} \theta_{1,p}) \right] \right] \quad (3.69)$$

Từ công thức (3.48), kết hợp với các công thức (3.37), (3.38), và (3.39) có thể thấy rằng khi $1 - \mu_E^2 \rho_{\text{th}} \leq 0$ thì $\overline{\text{IP}}_m^Z = 1$, làm cho $\text{IP}_Z^{e2e} = 1 - \prod_{m=1}^M \overline{\text{IP}}_m^Z = 0$ (theo công thức (3.47)). Hơn nữa, các công thức (3.59), (3.63), và (3.69) cho thấy rằng ở vùng có mức SNR cao, giá trị IP toàn chặng không phụ thuộc vào Δ .

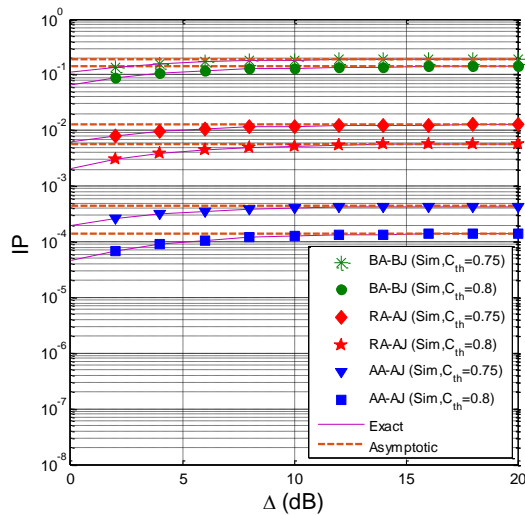
3.2.5 Kết quả mô phỏng của MH LEACH MIMO

Sử dụng mô phỏng bằng Matlab theo phương pháp Monte-Carlo để kiểm nghiệm các tính toán lý thuyết của các giá trị OP và IP ở trên. Các tham số cho môi trường mô phỏng được gán các giá trị như sau: hệ số suy hao đường truyền $\beta = 3$ cho kênh Rayleigh; và không mất tính tổng quát: giả sử vị trí đặt nút E: $(x_E, y_E) = (0.5, 0.3)$ một cách ngẫu nhiên trong hệ tọa độ 2 chiều 0xy, với giả định về kích thước nhỏ gọn nên các SN trong cụm thứ m có cùng tọa độ $(m/M, 0)$, số nút trong các cụm là $K_m = K (\forall m)$.

Các kết quả mô phỏng được trình bày trong các hình từ Hình 3.7 đến Hình 3.15.



Hình 3.7 $OP(\Delta)$ với $M=4$, $N_T=2$, $N_E=3$, $K=4$, $\alpha = 0.1$, $\mu_D^2 = 0.05$

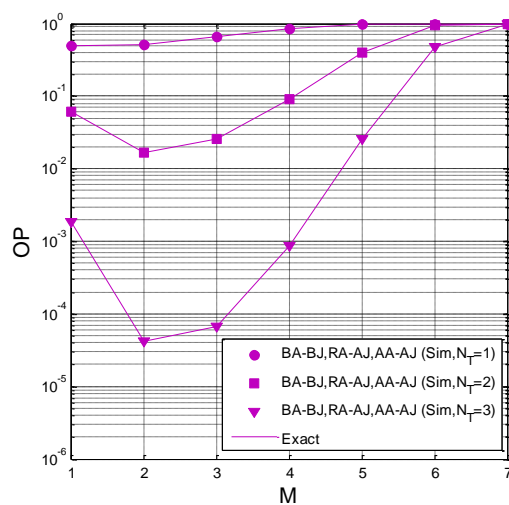


Hình 3.8 $IP(\Delta)$ với $M=4$, $N_T=2$, $N_E=3$, $K=4$, $\alpha = 0.1$, $\mu_E^2 = 0.05$

Hình 3.7 và Hình 3.8 mô tả mối quan hệ giữa OP và IP với Δ trong trường hợp số chặng $M=4$, số ăng ten của các CH là $N_T=2$, số ăng ten của nút E là $N_E=3$, mỗi cụm có 4 nút cảm biến, hệ số thời gian dành cho EH là $\alpha = 0.1$, độ không hoàn hảo của phần cứng $\mu_D^2 = \mu_E^2 = 0.05$ với các giá trị dung lượng ngưỡng C_{th} trong khoảng (0,85, 0.9, 0.95). Trong Hình 3.7, có thể thấy rằng giá trị của OP giảm đi khi Δ tăng lên bởi vì khi các nút trong hệ thống làm việc ở vùng công suất phát cao hơn thì OP trở nên tốt hơn. Đồng thời, ở vùng có SNR cao, các giá trị của OP theo lý thuyết (Theory) hội tụ với giá trị tiệm cận (Asymptotic). Hơn nữa, OP sẽ đạt các giá trị tốt hơn khi

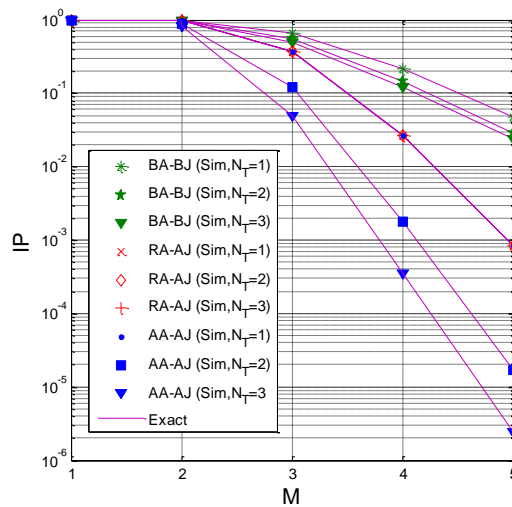
dung lượng ngưỡng C_{th} giảm đi. Hình 3.8 chỉ ra rằng các giá trị IP của cả 3 mô hình BA-BJ, RA-AJ, và AA-AJ đều tăng lên khi Δ tăng, và các giá trị này hội tụ với các giá trị tiệm cận (các đường Exact và Asymptotic hội tụ nhau với các giá trị $\Delta > 10$). Hơn nữa, cũng có thể thấy rằng IP của mô hình AA-AJ là tốt nhất bởi vì mô hình này tận dụng tất cả các ăng ten cho việc truyền dữ liệu và thu hoạch năng lượng, cũng như tận dụng tất cả các nút gây nhiễu $J_{m,u}$ để hạn chế hoạt động của nút E. Đồng thời, cũng có thể thấy rằng IP giảm khi dung lượng ngưỡng C_{th} tăng lên. Một cách ngắn gọn, khi so sánh các kết quả trong Hình 3.7 và Hình 3.8, có thể thấy rằng với cùng một tham số hệ thống, khi tăng công suất phát (tăng Δ) hoặc giảm ngưỡng mục tiêu của dung lượng kênh C_{th} thì sẽ đạt được giá trị OP tốt hơn (OP giảm đi), nhưng điều này lại làm cho IP tăng lên tức là làm tăng khả năng giải mã chính xác các thông tin khai thác trái phép tại nút E. Như vậy, cần phải cân nhắc để đạt được mức cân bằng giữa 2 mục tiêu bảo mật (IP) và tin cậy (OP) trong các hệ thống thực tế tùy theo điều kiện vận hành và mục đích khai thác.

Hình 3.9 và Hình 3.10 mô tả mối quan hệ giữa các giá trị OP và IP với số chặng trong hệ thống, với các tham số $\Delta = 5(dB)$, số ăng ten của nút E là $N_E = 3$ và số nút trong mỗi cụm $K = 3$, hệ số EH $\alpha = 0.1$, và phân cứng hoàn hảo $\mu_D^2 = \mu_E^2 = 0$ với số lượng ăng ten phát tại các CH N_T thay đổi trong khoảng $N_T = \{1, 2, 3\}$.



Hình 3.9 Quan hệ OP và số chặng M với số lượng ăng ten khác nhau tại CH

Có thể thấy trong Hình 3.9 rằng OP tăng lên khi số chặng trong hệ thống tăng $M \geq 2$, tức là độ lớn của các khe thời gian $\tau = 1/M$ giảm đi. Trong trường hợp $M = 1$, tức là không sử dụng chuyển tiếp, hệ thống hoạt động ở mức OP kém hơn so với $M = 2$; đồng thời, Hình 3.9 chỉ ra rằng hệ thống đạt giá trị OP tốt nhất với 2 chặng. Hơn nữa, các giá trị OP được cải thiện một cách đáng kể khi số lượng ăng ten tại các CH tăng lên làm cho việc truyền dữ liệu giữa các chặng tin cậy hơn khi có nhiều ăng ten phát hơn.

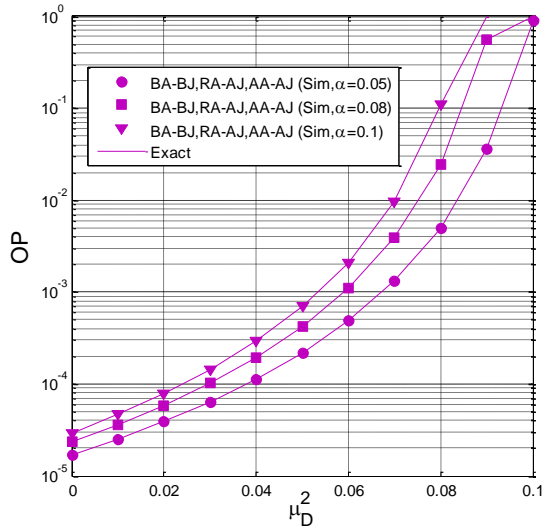


Hình 3.10 Quan hệ IP và số chặng M với số lượng ăng ten khác nhau tại CH

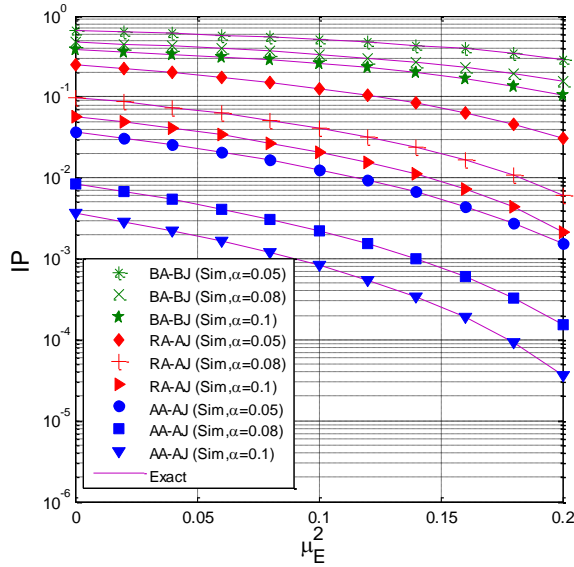
Khác với OP, các giá trị IP của giảm một cách đáng kể khi số chặng tăng lên như trong Hình 3.10. Một lần nữa, Hình 3.10 chỉ ra rằng mô hình AA-AJ đạt được giá trị IP tốt nhất trong các mô hình. Đồng thời, mô hình AA-AJ và mô hình BA-BJ có IP tốt hơn khi số lượng ăng ten phát của các CH tăng lên vì điều này giúp cho việc thu hoạch năng lượng tại các nút $J_{m,u}$ tốt hơn, tức là nút E nhận được nhiều thông tin hơn từ $J_{m,u}$. Hình 3.10 cũng chỉ ra rằng việc lựa chọn ngẫu nhiên các ăng ten phát của mô hình RA-AJ làm cho IP của mô hình này không phụ thuộc vào số lượng ăng ten, làm cho giá trị IP của mô hình AA-AJ trở thành IP của mô hình RA-AJ khi $N_T = 1$.

Hình 3.11 và Hình 3.12 mô tả ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo lên các giá trị OP và IP với các tham số hệ thống bao gồm số chặng $M = 5$, số nút trong mỗi cụm $K = 4$, ngưỡng dung lượng $C_{th} = 0.65$, số lượng ăng ten phát của các CH và

nút E tương ứng là $N_T = 2, N_E = 3$, và $\Delta = 2.5(dB)$ với các hệ số EH khác nhau trong khoảng $\alpha = \{0.05, 0.08, 0.1\}$.



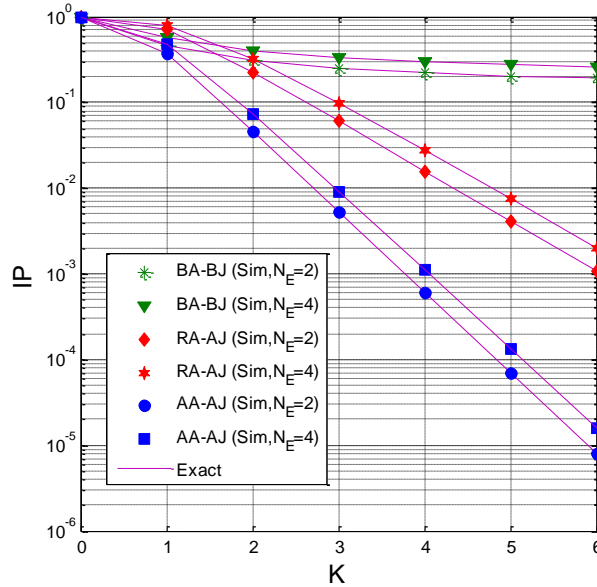
Hình 3.11 Ảnh hưởng của nhiễu phân cứng lên OP



Hình 3.12 Ảnh hưởng của nhiễu phân cứng lên IP

Có thể thấy rõ ràng rằng OP tăng lên một cách đáng kể khi nhiễu do tác động của lỗi phân cứng tăng lên, đặc biệt khi $\mu_D^2 = 0.1$ thì OP gần như bằng 1 tức là hiệu năng hệ thống bị ảnh hưởng rất lớn chỉ với mức $\mu_D^2 = 0.1$ như mô tả trong Hình 3.11. Đồng thời, nếu thời gian dành cho EH nhỏ, tức là thời gian dành cho việc truyền dữ liệu tăng lên cũng sẽ cải thiện được OP. Ngược lại với OP, xác suất chặn IP tốt hơn

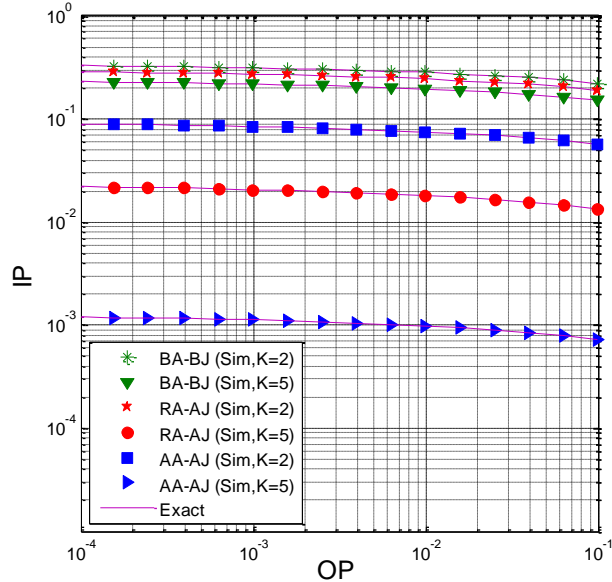
khi μ_E^2 và α tăng lên như mô tả trong Hình 3.12. Nếu không tính đến việc can thiệp của lỗi phân cứng, tác động của α lên hệ thống là rất đáng kể nên cần phải cân nhắc khoảng thời gian dành cho chu trình EH một cách hợp lý.



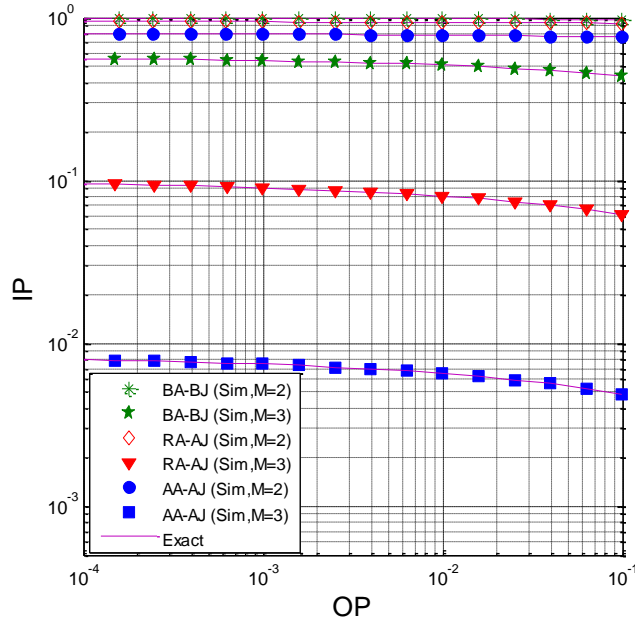
Hình 3.13 Mối quan hệ giữa IP và số nút trong cụm

Hình 3.13 mô tả mối quan hệ giữa IP với số nút trong cụm K với sự thay đổi về số lượng ăng ten tại nút E. Các giá trị trong hình này được thực nghiệm với điều kiện $\Delta=5(dB)$, $C_{th}=0.5$, $N_T=2$, $\alpha=0.1$, $K=4$, $M=5$, và $\mu_E^2=0$. Một cách khách quan, OP chỉ liên quan đến việc truyền dữ liệu giữa các CH nên số nút trong cụm không tác động đến xác suất dừng, song, do cơ chế hợp tác và việc lựa chọn nút để gây nhiễu nên số lượng nút trong cụm sẽ ảnh hưởng đến số lượng các nút gây nhiễu và tác động đáng kể đến chất lượng tín hiệu thu được tại nút E như mô tả trong Hình 3.13. Có thể nhận thấy rằng IP sẽ giảm một cách đáng kể khi K tăng lên, tức là khi số lượng nút trong cụm tăng sẽ làm cho độ tin cậy của hệ thống tăng lên, tức là IP giảm đi. Đặc biệt, khi không hợp tác để gây nhiễu ($K=0$), giá trị của $IP=1$. Hình 3.13 cũng chỉ ra rằng mô hình AA-AJ cho các giá trị IP tốt hơn 2 mô hình BA-BJ và RA-AJ, và đặc biệt, mức độ tin cậy của mô hình AA-AJ vượt xa so với 2 mô hình còn lại khi K tăng lên. Đồng thời, khi số lượng ăng ten của nút E tăng lên, độ tin cậy của hệ thống giảm

đi vì E có nhiều khả năng giải mã thành công hơn với số lượng ăng ten được trang bị nhiều hơn.



Hình 3.14 Mối quan hệ giữa OP và IP với số nút trong cụm



Hình 3.15 Mối quan hệ giữa OP và IP với số ăng ten

Hình 3.14 và Hình 3.15 mô tả mối quan hệ giữa OP và IP với các tham số hệ thống khác nhau. Trước hết, các giá trị OP được tính toán để đạt mức mục tiêu (OP_{target}) trong khoảng $10^{-4} \leq OP_{\text{target}} \leq 10^{-1}$. Để đạt được giá trị trong vùng này, hệ thống

sẽ đòi hỏi một mức công suất phát tương ứng với các giá trị của Δ được tính toán thông qua OP mục tiêu. Các giá trị khác được sử dụng trong mô phỏng là $C_{th} = 1.25$, $N_T = 2$, $N_E = 2$, $\alpha = 0.1$, $M = 3$, và $\mu_D^2 = \mu_E^2 = 0.01$ cho kết quả Hình 3.14; và $C_{th} = 0.9$, $N_T = 2$, $N_E = 4$, $\alpha = 0.1$, $K = 7$, và $\mu_D^2 = \mu_E^2 = 0.01$ cho kết quả Hình 3.15.

Có thể nhận thấy trong Hình 3.14 và Hình 3.15 rằng IP tăng khi OP giảm nên tùy theo yêu cầu cụ thể về mức công suất cho việc khôi phục thông tin chính xác tại D và khả năng ngăn chặn việc rò rỉ thông tin tại E mà lựa chọn các giá trị OP và IP tương ứng. Các giá trị trong hình các hình này cũng chỉ ra rằng mô hình AA-AJ đạt được giá trị IP tốt nhất với cùng một mức OP. Hơn nữa, với cùng mức OP và số chặng $M = 3$, các giá trị IP giảm một cách đáng kể khi số nút trong cụm tăng từ $K = 2$ lên $K = 5$ như mô tả trong Hình 3.14. Đồng thời, với cùng mức OP và số nút trong cụm $K = 7$, các giá trị IP giảm đáng kể khi số chặng thay đổi từ $M = 2$ lên $M = 3$ như mô tả trong Hình 3.15.

Một cách tổng quát, có thể thấy rằng các kết quả thể hiện trong các hình, từ Hình 3.7 đến Hình 3.15 cho thấy sự tương thích hoàn toàn giữa các giá trị tính toán lý thuyết chính xác với các giá trị thực nghiệm. So sánh kết quả giữa lý thuyết và thực nghiệm cũng chỉ ra rằng mặc dù có độ phức tạp nhất, mô hình AA-AJ nhận được độ tin cậy cao nhất do việc tận dụng tất cả các ăng ten của các CH cho việc phát các tín hiệu để các nút $J_{m,u}$ thu hoạch năng lượng, cũng như tận dụng tất cả các nút $J_{m,u}$ cho việc hợp tác để gây nhiễu lên nút E. Hơn nữa, do dữ liệu chỉ truyền giữa các nút CH, nên xác suất dừng OP của hệ thống là như nhau với cả 3 mô hình BA-BJ, RA-AJ, và AA-AJ vì OP không bị tác động bởi số lượng các nút trong cụm. Tuy nhiên, các kết quả này cũng chỉ ra rằng việc tăng số chặng và số lượng nút trong các cụm sẽ cải thiện được mối quan hệ giữa OP và IP trong hệ thống. Như vậy, các kết quả thực nghiệm với các điều kiện làm việc khác nhau được chỉ ra trong các hình trên là những tham khảo trực quan trong việc lựa chọn các giá trị OP và IP cụ thể trong việc xây dựng mô hình mạng.

3.3 Một số nhận xét

Nhằm mục tiêu nghiên cứu giải pháp duy trì kết nối của HTTTVT thế hệ mới trong vùng mạng chuyển tiếp đa chặng thông qua việc phân tích, tính toán, đánh giá các chỉ số hiệu năng là xác suất dừng OP và xác suất chặn IP toàn chặng, các kết quả nghiên cứu của luận án trong chương 3 có thể tổng kết lại như sau:

- Đề xuất sử dụng mô hình mạng chuyển tiếp đa chặng LEACH để nghiên cứu trong trường hợp tổng quát. Đây là điểm khác biệt so với hầu hết các nghiên cứu trước đây [71], [80-82], [129] chỉ sử dụng mạng chuyển tiếp hai chặng. Các mô hình trong Hình 3.1 và Hình 3.6 thể hiện tính tổng quát khi có thể áp dụng cho số chặng bất kỳ.
- Đề xuất sử dụng kỹ thuật tạo nhiễu nhân tạo để đánh giá hiệu năng IP do kỹ thuật này cho phép đạt giá trị IP tốt hơn như đã chỉ ra trong một số nghiên cứu trước đây [70], [72], [73], [75]. Tuy nhiên, khác với các nghiên cứu này, luận án đề xuất áp dụng kỹ thuật tạo nhiễu sử dụng thu thập năng lượng sóng vô tuyến RF-EH. Kỹ thuật RF-EH đạt được cả hiệu quả năng lượng cho các nút phát tín hiệu nhiễu và tác động gây nhiễu.
- Đề xuất sử dụng các nút thành viên trong các cụm LEACH làm nút tạo nhiễu, thay vì sử dụng thêm một nút tạo nhiễu Jammer bên ngoài hệ thống. Đây cũng là một điểm mới của luận án so với các nghiên cứu trước đó.
- Trong trường hợp các nút trong hệ thống sử dụng đa ăng ten, luận án đề xuất 03 kỹ thuật chọn lựa ăng ten tại nút chủ cụm và chọn lựa nút/các nút tạo nhiễu để đạt được hiệu năng OP và IP tốt nhất. Đây là những mô hình mới, chưa thấy trong các nghiên cứu đã có tới nay. Luận án đã thực hiện so sánh hiệu năng OP/IP của các phương pháp đề xuất, cũng như đưa ra các biện luận về sự phức tạp khi triển khai các phương pháp chọn lựa này trong các nội dung ở Mục 3.2.
- Đóng góp quan trọng nhất của Chương 3 là đưa ra được các biểu thức toán học đánh giá chính xác giá trị OP và IP toàn trình cho 03 mô hình chọn lựa ăng ten tại nút chủ cụm và chọn lựa nút/các nút tạo nhiễu đã đề xuất ở trên. Đặc biệt, các biểu thức OP và IP được đưa ra ở dạng tường minh (closed-form). Các

tính toán có xét đến độ hoàn hảo của thiết bị. Các biểu thức này có thể áp dụng hiệu quả trong việc tính toán, thiết kế và tối ưu hiệu năng mạng bởi nếu thiếu các công thức tường minh, việc tối ưu bằng mô phỏng sẽ khó khăn hơn rất nhiều hoặc mất rất nhiều thời gian.

3.4 Kết luận Chương 3

Chương 3 đã thực hiện nghiên cứu giải pháp duy trì kết nối trong HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp với việc sử dụng một vùng mạng chuyển tiếp đa chặng điển hình là mô hình WSN MH LEACH. Các tham số hiệu năng quan trọng nhất liên quan đến hoạt động của mô hình này là xác suất dừng OP và xác suất chặn IP toàn chặng do hệ thống sẽ ngừng làm việc, kết nối trong HTTTVT sẽ bị gián đoạn khi OP và IP tăng lên vượt quá một giá trị ngưỡng cho phép. Hai kiến trúc cụ thể đã được đề xuất là WSN MH LEACH với các nút mạng đơn ăng ten và kiến trúc WSN MH LEACH MIMO có các nút đa ăng ten. Kỹ thuật thu hoạch năng lượng và hợp tác tạo nhiễu được áp dụng. Từ những đề xuất cụ thể cho một mô hình điển hình của vùng mạng HTTTVT chuyển tiếp đa chặng sử dụng mô hình WSN MH LEACH, nội dung chương 3 đã đưa ra được các biểu thức toán học tường minh cho tính toán chính xác các giá trị OP và IP toàn chặng trong điều kiện xem xét đầy đủ các tham số cần thiết liên quan và tỉ lệ tín hiệu nhiễu ở mức cao. Luận án đã thực hiện mô phỏng để kiểm chứng các kết quả tính toán lý thuyết. Các kết quả đạt được trong chương này thể hiện trong các công trình **C.01** và **J.01** của tác giả luận án.

KẾT LUẬN

Các hệ thống thông tin vô tuyến (HTTTVT) không những cung cấp các kết nối cho phép người sử dụng trao đổi thông tin với nhau qua các thiết bị di động UE (User Equipment), mà còn kết nối vạn vật vào Internet thông qua IoT. Cùng với các công nghệ hỗ trợ, các HTTTVT thế hệ mới hướng tới một nhiệm vụ quan trọng là bảo đảm và duy trì kết nối cho 2 nhóm đối tượng ứng dụng chính: 1) nhóm ứng dụng hướng đến con người thông qua các hệ thống di động băng rộng tiên tiến eMBB (enhanced Mobile Broad Band), và 2) nhóm ứng dụng hướng đến thiết bị thông qua hệ thống truyền thông kiểu máy MTC (Machine Type Communications). Việc tăng lên của số lượng người sử dụng ở nhóm 1), và sự phát triển nhanh chóng số lượng các thiết bị ở nhóm 2) đã và đang đặt ra các thách thức về việc duy trì kết nối trong hoạt động của các HTTTVT thế hệ mới.

Trong số các tiêu chí hiệu năng mạng, duy trì kết nối là tiêu chí quan trọng nhất đã được Tổ chức Viễn thông Quốc tế ITU-T khuyến nghị trong một tiêu chuẩn riêng ITU-T Y.2225 năm 2018 [36] về yêu cầu duy trì kết nối trong ngữ cảnh HTTTVT thế hệ mới. Trong tiêu chuẩn này, ITU-T đã chỉ ra duy trì kết nối có liên quan đến chuyển giao cuộc gọi, chống gián đoạn và bảo đảm an toàn kết nối.

Đối với các ứng dụng eMBB, việc duy trì các cuộc gọi chuyển giao HO (Hand Over) để hạn chế xác suất rớt cuộc gọi CDP (Call Dropping Probability) là thách thức điển hình do liên quan đến sự khan hiếm của tài nguyên và việc cấp phát tần số tới các trạm gốc BS (Base Station). Kỹ thuật chuyển tiếp được khuyến nghị trong HTTTVT nhằm cải thiện CDP. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chỉ mới dừng lại ở việc tính toán CDP trong các điều kiện lưu lượng thông thường, cũng như tập trung vào độ phức tạp của xác suất chuyển giao cuộc gọi, mà chưa tính toán CDP trong trường hợp các kênh vô tuyến đã được khai thác triệt để nhằm phục vụ cho các yêu cầu gọi mới và vai trò của RS trong điều kiện lưu lượng mạng tăng cao đột biến và việc đơn giản hóa các tính toán xác suất chuyển giao.

Đối với các ứng dụng MTC, kết nối vô tuyến giữa các thiết bị sẽ bị gián đoạn khi giá trị các xác suất dừng OP (Outage Probability) và xác suất chặn IP (Intercept Probability) vượt một mức ngưỡng cho phép. Mô hình truyền thông đa chặng MH (Multi-Hop) với phân cấp cụm thích ứng năng lượng thấp LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) của mạng cảm biến vô tuyến WSN (Wireless Sensor Network) là một trường hợp điển hình của HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp và là chủ đề cho nhiều nghiên cứu trong thời gian gần đây. Giá trị OP và IP trong các hệ thống này thể hiện khả năng duy trì kết nối trong quá trình truyền dữ liệu giữa các nút chủ cụm CH trong hệ thống. Tuy nhiên, việc tính toán OP và IP luôn là thách thức trong các nghiên cứu khi độ phức tạp và khả năng thành công trong tính toán phụ thuộc vào số chặng trong hệ thống các tham số của mô hình truyền thông như: số lượng ăng ten tại các nút, sự tham gia của các kỹ thuật thu hoạch năng lượng EH (Energy Harvesting) và hợp tác gây nhiễu CJ (Co-operative Jamming), mô hình kênh pha đình và độ hoàn hảo của phần cứng thiết bị. Hầu hết các nghiên cứu tới nay vẫn còn một số hạn chế, điển hình là: mới chỉ thực hiện với các mô hình hai chặng (chưa có đa chặng), không sử dụng kỹ thuật EH cho các nút thành viên trong các cụm để phát CJ, không sử dụng các nút thành viên trong các cụm để thực hiện CJ trong việc bảo đảm IP, chưa xét đến độ không hoàn hảo của phần cứng.

Qua khảo sát, phân tích các điểm còn hạn chế của các nghiên cứu tới nay, luận án này tập trung vào nghiên cứu giải pháp cải thiện hiệu năng HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp. Luận án tập trung vào tiêu chí hiệu năng quan trọng nhất là duy trì kết nối theo khuyến nghị của ITU-T, cụ thể là các chỉ số hiệu năng CDP, OP và IP.

Chỉ số CDP được nghiên cứu trong vùng mạng thông tin di động của HTTTVT thế hệ mới sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp để duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao trong điều kiện lưu lượng rất cao (điều kiện xấu nhất), nghĩa là khi có tốc độ yêu cầu kết nối cho cuộc gọi mới rất lớn, toàn bộ dung lượng của các BS trong khu vực này luôn bị chiếm, các trạm gốc không đủ năng lực phục vụ làm cho CDP luôn ở giá trị cực đại (=1). Luận án đã đề xuất giải pháp tận dụng hiệu quả hoạt động của các

trạm chuyển tiếp RS (Relay Station), giúp giảm CDP một cách đáng kể và cải thiện được chất lượng duy trì kết nối cuộc gọi chuyển giao.

Các chỉ số hiệu năng OP và IP được nghiên cứu trong vùng mạng chuyển tiếp đa chặng của HTTT VT thế hệ mới, xét trong một trường hợp điển hình với mạng WSN MH LEACH. Sở cứ cho lựa chọn mô hình này dựa vào khuyến nghị của tiêu chuẩn ITU-T /Y.3104 [11] và ITU-T / Y.2255 [36]. Hai mô hình nghiên cứu đã được đề xuất cho tính toán OP và IP toàn chặng là WSN MH LEACH với các nút đơn ăng ten và WSN MH LEACH MIMO với các nút đa ăng ten. Kỹ thuật thu hoạch năng lượng EH được đề xuất áp dụng cho việc gây nhiễu tác động đến nguy cơ gián đoạn kết nối. Trong thực hiện mô hình, luận án cũng đã đưa ra một số đề xuất cụ thể cho áp dụng EH. Luận án đã đề xuất được các biểu thức toán học tường minh cho tính toán chính xác các giá trị OP và IP toàn chặng trong điều kiện xem xét đầy đủ các tham số về số chặng bất kỳ, lựa chọn ăng ten, lựa chọn nút gây nhiễu, môi trường truyền với tỉ lệ tín hiệu nhiễu ở mức cao.

Song song với các phân tích, luận án đã thực hiện mô phỏng để kiểm chứng các kết quả tính toán lý thuyết.

I. Đóng góp mới của luận án

Luận án có những đóng góp chính như sau:

- 1) Đề xuất giải pháp tận dụng hiệu quả hoạt động của các trạm chuyển tiếp RS để hỗ trợ chuyển giao thành công, giảm tối thiểu xác suất rớt cuộc gọi chuyển giao thời gian thực trong các vùng có lưu lượng rất cao có nguy cơ nghẽn cục bộ. Đồng thời, bài toán tính xác suất chuyển giao cuộc gọi cũng đã được giải quyết đơn giản hơn. Việc tận dụng hiệu quả hoạt động của RS cho phép khai thác tối đa tài nguyên vô tuyến trong các HTTT VT thế hệ mới sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp để cải thiện hiệu năng CDP, duy trì kết nối chuyển giao trong các hệ thống này. Các kết quả nghiên cứu đã thể hiện trong các công bố [**J.02-J.04**].
- 2) Đưa ra các biểu thức mới trong tính toán OP và IP toàn chặng tương ứng với các mô hình nghiên cứu mới với độ phức tạp hơn để đánh giá độ ổn

định kết nối của HTTTVT sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp. Các tham số hệ thống được khảo sát một cách tổng quát hơn như: số chặng, số ăng ten trong các nút của HTTTVT đa chặng, và độ hoàn hảo của phần cứng. Hơn nữa, luận án đề xuất cải tiến trong việc áp dụng các mô hình EH và CJ so với các nghiên cứu trước đây trong việc tính toán OP và IP. Các biểu thức toán học tường minh của OP và IP toàn chặng là đóng góp chính của nội dung này. Các kết quả nhận được từ việc tính toán và mô phỏng là cơ sở tham khảo cho công tác đánh giá và duy trì kết nối mạng, và được công bố trong [C.01] và [J.01].

II. Hướng phát triển tiếp theo

Các hướng có thể phát triển tiếp của luận án bao gồm:

- Tính toán khả năng thành công của chuyển tiếp kênh trong điều kiện lưu lượng cao với các băng thông khác nhau của UE.
- Tính toán CDP với các RS di động trong các mô hình mạng khác nhau của HTTTVT thế hệ mới.
- Khảo sát, tính toán OP và IP toàn chặng trong các điều kiện Fading khác nhau với sự lựa chọn các yếu tố tác động khác nhau của các mô hình mạng ứng dụng cụ thể.

DANH MỤC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

- [C.01] Ngo The Anh, Ha Duy Hung, Tran Trung Duy, Hoang Dang Hai, and Nguyen Canh Minh (2019), “Reliability-Security Analysis for Harvest-to-Jam based Multi-hop LEACH Networks under Impact of Hardware Noises”, *IEEE 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp.174-178, (Scopus Index).
- [J.01] Ngo The Anh , Nguyen Canh Minh , Tran Trung Duy, Tan Hanh, Hoang Dang Hai (2021), “Reliability_Security Analysis for Harvest-to-Jam based Multi-hop Cluster MIMO Networks Using Cooperative Jamming Methods Under Impact of Hardware Impairments”, *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(28), e5, pp.1-14, (Scopus Index).
- [J.02] ANH, NGO The; HAI, HOANG Dang; MINH, NGUYEN Canh (2017), “Minimising reserved channels to satisfy handover requests for voice calls in mobile communication systems using handover channel relaying strategy”, *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 8-13, ISSN 2525-2224.
- [J.03] Ngô Thế Anh, Hoàng Đăng Hải, Nguyễn Cảnh Minh (2016), “Tăng tỷ lệ thành công các cuộc gọi chuyển giao trong các hệ thống thông tin di động không dự trữ kênh bằng chuyển tiếp kênh”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Thông tin và Truyền thông, Học viện công nghệ Bưu chính Viễn thông*, Số 2, trang 27-34, tháng 9/2016.
- [J.04] Ngô Thế Anh, Trần Huỳnh Minh Tân, Phạm Huyền Trang, Lê Ngọc Thạch (2022), “Cải thiện hoạt động của các trạm chuyển tiếp để duy trì kết nối cho các cuộc gọi chuyển giao trong hệ thống 4G LTE bằng kỹ thuật chuyển tiếp kênh”, *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, Tập 73, Số 5 (06/2022), trang 526-539.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ESTR – KPI-RAN, “Key performance indicators (KPIs) for radio access mobile networks”, Technical Report (2022), ITU-T, 17 June 2022.
- [2] G.1028.2 (2019), SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS, “Multimedia Quality of Service and performance – Generic and user-related aspects Assessment of the LTE circuit switched fall back – Impact on voice quality of service”, ITU-T, 06/2019.
- [3] A. Dogra, R. K. Jha and S. Jain (2021), "A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67512-67547.
- [4] Q.3715 (2018), SERIES Q: SWITCHING AND SIGNALLING, AND ASSOCIATED MEASUREMENTS AND TESTS, “Signaling requirements and protocols for SDN – Resource control protocols Signaling requirements for dynamic bandwidth adjustment on demand on broadband network gateway implemented by software-defined networking technologies”. ITU-T, 01/2018.
- [5] Tarkaa, N.S, Pahason (2019), “C.A.D, Analysis of Drop- Call Probability: A Study of Mobile Telecommunication Network (Apapa Lagos, Nigeria)”, *International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS) / Volume IV, Issue VII, July 2019/ISSN 2454-6194*, pp.97-100.
- [6] A. Saif, et al. (2020), “Opportunities and Challenges for Deploying Relays in the Fifth Generation (5G) Network Wireless”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 9, ISSUE 06, JUNE 2020*, pp.820-827.
- [7] P.530-18, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”, RECOMMENDATION, ITU-R, 09/2021.
- [8] Olaonipekun O. Erunkulu, et al. (2019), “Prediction of Call Drops in GSM Network using Artificial Neural Network”, *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 7(1), 2019, pp.38-46.
- [9] D. O. Ojuh, J. Isabona (2021), “Empirical and Statistical Determination of Optimal Distribution Model for Radio Frequency Mobile Networks Using Realistic Weekly Block Call Rates Indicator”, *I. J. Mathematical Sciences and Computing*, 2021(3), pp.12-23.
- [10] Attah. I.B., Umar. B. U, Hamza. S.O, Abdullahi. M.B. (2021), “Call Drop Prediction Using Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input(NARX) Model”, *Nigerian Journal of Engineering Science Research (NIJESR)*, Vol. 4, Issue 4, pp.32-42, December, 2021.

- [11] Y.3104 (2018), SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS, NEXT-GENERATION NETWORKS, INTERNET OF THINGS AND SMART CITIES, “Future networks Architecture of the IMT-2020 network”, ITU-T, 12/2018.
- [12] Y. Yunida, et al. (2020), “Efficient Relay Selection Algorithm for Non-Orthogonal Amplify-and-Forward Cooperative Systems over Block-Fading Channels”, *RADIO ENGINEERING*, VOL. 29, NO. 2, pp.386-396.
- [13] Vardhman Pillaia, Shriram Iyera (2020), “Bandwidth utilization scheme for MIMO Co-operative Networks with 3G/4G Networks”, *GIT-Journal of Engineering and Technology (Twelfth Volume, 2020, ISSN 2249 – 6157)*, pp.55-59.
- [14] B. Perumal, et al. (2020), “Analysis of Amplify Forward, Decode and Amplify Forward, and Compression Forward Relay for Single and Multi-node Cognitive Radio Networks”, *ICASISSET 2020, May 16-17, Chennai, India*, DOI 10.4108/eai.16-5-2020.2304196
- [15] Sumant Ku Mohapatra¹, BiswaRanjan Swain¹ and Pravanjan Das (2015), “COMPREHENSIVE SURVEY OF POSSIBLE SECURITY ISSUES ON 4G NETWORKS”, *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*, Vol.7, No.2, March 2015, DOI: 10.5121/ijnsa.2015.7205 61
- [16] Y. Yengi, A. Kavak and H. Arslan (2020), "Physical Layer Detection of Malicious Relays in LTE-A Network Using Unsupervised Learning", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 154713-154726, 2020.
- [17] Ravendra Kumar Singh, Dr. Akhilendra Singh (2022), “Enhanced Spectrum Handoff Security Mechanism in Cognitive Radio Network”, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, ISSN: 2321-9653; IC Value: 45.98; SJ Impact Factor: 7.538 Volume 10 Issue VII July 2022, pp.851-856.
- [18] M. Selim Demir, Hossien B. Eldeeb, and Murat Uysal (2022), “RELAY-ASSISTED HANDOVER TECHNIQUE FOR VEHICULAR VLC NETWORKS”, *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, Volume 3, Issue 1, July 2022, pp.11-18.
- [19] S. D. Okegbile, B. T. Maharaj and A. S. Alfa (2020), "Outage and Throughput Analysis of Cognitive Users in Underlay Cognitive Radio Networks With Handover", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208045-208057, 2020.
- [20] Milutin Nešić, Nenad Milošević, Petar Spalević, Zorica Nikolić and Marko Smilić (2023), “Wireless Communication System Performance in M2M Nakagami-m Fading Channel”, *MPDI Sustainability 2023*, 15, 3211, pp.1-16. <https://doi.org/10.3390/su15043211>.

- [21] Venkata Vara Prasad Padyala, K. V. D. Kiran (2020), "Improved handoff mechanism for infiltrating user equipments in composite networks", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 10, No. 3, June 2020, pp. 2600~2606 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v10i3.pp.2600-2606
- [22] Qian Dong, Feng Zhu, Jinbao Xia, and Mi Lu (2023), "Latency Trade-off of Particle Swarm Optimization-enabled Seamless Handoff in Mobile WSNs", *Human-centric Computing and Information Sciences (2023)* DOI: <https://doi.org/10.22967/HGIS.2023.13.037>, pp.1-17.
- [23] Dario Sabella, et al. (2018), "Designing the 5G network infrastructure: a flexible and reconfigurable architecture based on context and content information", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2018)* 2018:199 <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1215-1>, pp.1-16.
- [24] Debarshi Kumar Sanyal, Udit Narayana Kar, and Monideepa Roy (2020), "Mobile Communications and Computing: A Broad Review with a Focus on Smart Healthcare", *Smart Healthcare Analytics in IoT Enabled Environment*, Springer Nature Switzerland AG 2020, ISBN 978-3-030-37551-5 (eBook), DOI: 10.1007/978-3-030-37551-5, pp.9-33.
- [25] GSMA (2022), *The Mobile Economy Report 2022*, <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2022/02/280222-The-Mobile-Economy-2022.pdf>
- [26] X.Lin and N.Lee (2021), *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*, Springer, Nature Switzerland AG.
- [27] W.Lei, A.C. K. Soong, L.Jianghua, W.Yong, B.Classon, W.Xiao, D.Mazzarese, Z.Yang, T.Saboorian (2021), *5G System Design: An End to End Perspective*, 2nd Edition, Springer, Nature Switzerland AG.
- [28] G.Soos, D.Ficzere, P.Varga (2020), "Towards Traffic Identification and Modeling for 5G Application Use-Cases", *Electronics MDPI*, 9(4), 640, pp.1-32.
- [29] A. Pandey and S. Yadav (2018), "Physical Layer Security in Cooperative AF Relaying Networks With Direct Links Over Mixed Rayleigh and Double-Rayleigh Fading Channels", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.67, no.11, pp.10615-10630.
- [30] V. N. Vo, T. G. Nguyen, C. So-in, Z. A. Baig, and S. Sanguanpong (2018), "Secrecy Outage Performance Analysis for Energy Harvesting Sensor Networks With a Jammer Using Relay Selection Strategy," *IEEE Access*, Vol.6, pp.23406-23419.

- [31] H. D. Hung, T. T. Duy, M. Voznak (2020), "Secrecy Outage Performance of Multi-hop LEACH Networks using Power Beacon Aided Cooperative Jamming with Jammer Selection Methods," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 124, ID 153357, pp.1-25.
- [32] E.Dahlman, S.Parkvall, J.Skold (2016), *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3rd Edition, Elsevier Ltd, UK.
- [33] Mpirical Limited (2013), *LTE 4G Network Design and Planning Optimisaion – Student Guide*, Mpirical Limited.
- [34] Theodore S.Rappaport (1996), *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA.
- [35] ITU–D (2005), Study Group 2, Question 16/2, Handbook, *TELETRAFFIC ENGINEERING*, Geneva.
- [36] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU, SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS, NEXT-GENERATION NETWORKS, INTERNET OF THINGS AND SMART CITIES , “Voice and video call continuity over LTE, Wi-Fi and 2G/3G”, ITU-T/Y.2255, 01/2018, Y.2255 : Voice and video call continuity over LTE, Wi-Fi and 2G/3G (itu.int).
- [37] ETSI TS 102 250-3, "Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ) ;QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 3: Typical procedures for Quality of Service measurement equipment".
- [38] ETSI TS 102 250-2, "Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation".
- [39] Daehyoung Hong and S. S. Rappaport (1986), "Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 35, no. 3, pp.77-92.
- [40] S. Sadr and R. S. Adve (2015), "Handoff Rate and Coverage Analysis in Multi-Tier Heterogeneous Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 5, pp.2626-2638.
- [41] K. Vasudeva, M. Simsek, D. López-Pérez and İ. Güvenç (2017), "Analysis of Handover Failures in Heterogeneous Networks With Fading”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.66, no.7, pp.6060-6074.
- [42] N. K. Panigrahy and S. C. Ghosh (2018), "Analyzing the Effect of Soft Handover on Handover Performance Evaluation Metrics Under Load Condition", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.67, no.4, pp. 3612-3624.

- [43] D.Naboulsi, M.Fiore, S.Ribot, R.Stanica (2015), *Mobile Traffic Analysis: a Survey*, Research Report, Université de Lyon; INRIA Grenoble - Rhône-Alpes; INSA Lyon; CNR – IEIIT.
- [44] Xiaodong Xu, Zhao Sun, Xun Dai, Tommy Svensson and Xiaofeng Tao (2017), “Modeling And Analyzing The Cross-Tier Handover In Heterogeneous Networks”, *IEEE Transactions On Wireless Communications*, Vol.16, No.12, pp.7859-7869.
- [45] Y. Ren, J. Chen and J. Chin (2018), "Impacts of S1 and X2 Interfaces on eMBMS Handover Failure: Solution and Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.67, no.7, pp.6599-6614.
- [46] Ravikumar Balakrishnan (2015), *HANDOVER MANAGEMENT IN HETEROGENEOUS NETWORKS FOR 4G AND BEYOND CELLULAR SYSTEMS*, PhD Thesis, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.
- [47] Saptarshi Chaudhuri, Irfan Baig, Debabrata Das (2017), “Self Organizing Method for Handover Performance Optimization in LTE-Advanced Network”, *Computer Communications* (2017), Volume 110, pp.151-163.
- [48] Ivan Chui Choon Ku (2013), *Spectral Energy Efficiency Trade-Off of Relay-Aided Cellular Networks*, PhD thesis, Heriot-Watt University, UK.
- [49] E.Yanmaz, O.K.Tonguz, S.Mishra, H.Wu and C.Qiao (2002), “Efficient Dynamic Load balancing Algorithms using iCAR Systems: A General Framework”, *IEEE VTC 2002-Fall*, Vol.1, pp.586-590.
- [50] T.-A. Ngo, S. Perreau, and A. Dadej (2006), "Balancing GoS in Cellular Networks using Static Channel Relaying Strategy with Adaptive Threshold", *Australian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)*, pp.61-66.
- [51] Zexi Yang, and Zhisheng Niu (2013), “Load Balancing by Dynamic Base Station Relay Station Associations in Cellular Networks”, *IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS*, VOL. 2, NO. 2, pp.155-158.
- [52] Yi Yu, Rose Qingyang Hu, Chandra S. Bontu, and Zhijun Cai (2011), “Mobile Association and Load Balancing in a Cooperative Relay Cellular Network”, *IEEE Communications Magazine*, pp.83-89.
- [53] Muhammad Asshada, Sajjad Ahmad Khan, Adnan Kavak, Kerem Kuc and Dawson Ladislaus Msongaleli (2019), “Cooperative Communications Using Relay Nodes for Next-Generation Wireless Networks with Optimal Selection Techniques: A Review”, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(5), pp.658–669.

- [54] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, and Johan Sköld (2011), *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Elsevier Ltd, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA.
- [55] H.Wu, C.Qiao, S.De and O.Tonguz (2001), "Integrated Cellular and Ad Hoc Relaying Systems: iCAR", *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, Vol.19 Issue 10, pp.2105-2115.
- [56] T. A. Ngo, S. Perreau, and A. Dadej (2005), "Releasing Congestion in Next Generation Cellular Networks by using Static Channel Relaying Strategy: Analytical Approach", *IEEE 7th Malaysia International Conference on Communication Jointly held with the 13th IEEE International Conference on Networks*, pp. 87-92.
- [57] T.-A. Ngo, S. Perreau, and A. Dadej (2005), "Enhancing GoS and Network Capacity in Next Generation Cellular Networks by using Handover Channel Relaying Strategy: Analytical Approach", in *Proc. 8th International Symposium on DSP and Communication Systems, DSPCS'2005 & 4th Workshop on the Internet, Telecommunications and Signal Processing, WITSP'2005*, pp. 271-277.
- [58] G. Farhadi and N. C. Beaulieu (2008), "On the Performance Of Amplify-and-Forward Cooperative Systems With Fixed Gain Relays", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 5, pp. 1851-1856.
- [59] F. S. Al-Qahtani, R. M. Radaydeh, S. Hessien, T. Q. Duong and H. Alnuweiri (2017), "Underlay Cognitive Multihop MIMO Networks With and Without Receive Interference Cancellation", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 4, pp. 1477-1493.
- [60] K. Zheng, X. Liu, L. Fu, X. Wang and Y. Zhu (2020), "Energy Efficiency in Multihop Wireless Networks with Unreliable Links", *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 576-588.
- [61] R. Katla and A.V. Babu (2020), "Multihop Full Duplex Relaying With Coherent Signaling: Outage Probability Analysis and Power Optimization", *Ad hoc Networks*, Vol.97, pp.1-13.
- [62] M. R. Bhatnagar, R. K. Mallik and O. Tirkkonen (2016), "Performance Evaluation of Best-Path Selection in a Multihop Decode-and-Forward Cooperative System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2722-2728.
- [63] K. J. Kim, T. Q. Duong and H. V. Poor (2013), "Outage Probability of Single-Carrier Cooperative Spectrum Sharing Systems with Decode-and-Forward Relaying and Selection Combining", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.12, no.2, pp. 806-817.

- [64] N. Romero-Zurita, M. Ghogho and D. McLernon (2012), "Outage Probability Based Power Distribution Between Data and Artificial Noise for Physical Layer Security", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 71-74.
- [65] J. Yao, X. Zhou, Y. Liu and S. Feng (2018), "Secure Transmission in Linear Multihop Relaying Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 822-834.
- [66] K. N. Le and T. A. Tsiftsis (2019), "Wireless Security Employing Opportunistic Relays and an Adaptive Encoder Under Outdated CSI and Dual-Correlated Nakagami- m Fading", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 3, pp. 2405-2419.
- [67] C. Yin, H. T. Nguyen, C. Kundu, Z. Kaleem, E. Garcia-Palacios and T. Q. Duong (2018), "Secure Energy Harvesting Relay Networks With Unreliable Backhaul Connections", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12074-12084.
- [68] N. N. Tan, T. H. Q. Minh, T. T. Phuong, M. Voznak, T. T. Duy, N. T. Long, P. T. Tin (2019), "Performance Enhancement for Energy Harvesting Based Two-Way Relay Protocols in Wireless Ad-hoc Networks with Partial and Full Relay Selection Methods", *Ad-hoc Networks*, vol. 54, pp. 178-187.
- [69] P. T. Tin, P. M. Nam, T. T. Duy, T. T. Phuong, M. Voznak (2019), "Secrecy Performance of TAS/SC-based Multi-hop Harvest-to-Transmit Cognitive WSNs under Joint Constraint of Interference and Hardware Imperfection", *Sensors MDPI*, vol. 19, no. 5, pp.1-20.
- [70] Tran, Truc Thanh (2021), "Network-Coding-based Jamming With Triple Transmission Time Slots: A Method To Secure Transmission In An Extreme Case of Source-Wiretapping and Unshared Jamming Signal", *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(27), pp.1-16.
- [71] T. M. Hoang, T. Q. Duong, N.-S. Vo, and C. Kundu (2017), "Physical Layer Security in Cooperative Energy Harvesting Networks With a Friendly Jammer", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 174-177.
- [72] V. L. Nguyen, H. D. Binh, T. D. Dung and Y. Lee (2019), "Enhancing Physical Layer Security for Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access Networks with Artificial Noise", *EAI Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 6(20), pp.1-11.
- [73] K. Cao, B. Wang, H. Ding, L. Lv, J. Tian and F. Gong (2020), "On the Security Enhancement of Uplink NOMA Systems With Jammer Selection", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 9, pp. 5747-5763.
- [74] X. Ding, T. Song, Y. Zou, X. Chen and L. Hanzo (2017), "Security-Reliability Tradeoff Analysis of Artificial Noise Aided Two-Way Opportunistic Relay Selection", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.66, no.5, pp. 3930-3941.

- [75] D. T. Hung, T. T. Duy, D. Q. Trinh (2019), "Security-Reliability Analysis of Multi-hop LEACH Protocol with Fountain Codes and Cooperative Jamming", *EAI Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol.6, no.18, pp. 1-7.
- [76] P. T. Tin, D. T. Hung, N. N. Tan, T. T. Duy, M. Voznak (2019), "Secrecy Performance Enhancement for Underlay Cognitive Radio Networks Employing Cooperative Multi-hop Transmission With and Without Presence of Hardware Impairments", *Entropy MDPI*, vol.21, no.2, 217, pp.1-17.
- [77] P. M. Nam, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, N. H. An (2020), "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises", *Electronics MDPI*, vol.9, no.6, pp.1-19.
- [78] T. T. Duy, P. T. D. Ngoc, T. T. Phuong (2021), "Performance Enhancement for Multihop Cognitive DF and AF Relaying Protocols under Joint Impact of Interference and Hardware Noises: NOMA for Primary Network and Best-Path Selection for Secondary Network", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.2021, ID 8861725, pp.1-15.
- [79] T. D. Hieu, T. T. Duy and B.-S. Kim (2018), "Performance Enhancement for Multi-hop Harvest-to-Transmit WSNs With Path-Selection Methods in Presence of Eavesdroppers and Hardware Noises", *IEEE Sensors Journal*, vol.18, no.12, pp.5173-5186.
- [80] T. T. Duy, T. Q. Duong, T. L. Thanh, and V. N. Q. Bao (2015), "Secrecy Performance Analysis with Relay Selection Methods under Impact of Co-channel Interference", *IET Communications*, 9(11), pp.1427-1435.
- [81] Y. Zou, B. Champagne, W. Zhu and L. Hanzo (2015), "Relay-Selection Improves the Security-Reliability Trade-Off in Cognitive Radio Systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol.63, no.1, pp. 215–228.
- [82] Y. Liu, L. Wang, T. T. Duy, M. ElKashlan, and Trung Q. Duong (2015), "Relay Selection for Security Enhancement in Cognitive Relay Networks", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.4, no.1, pp. 46-49.
- [83] Y. Zou, J. Zhu, X. Li and L. Hanzo (2016), "Relay Selection for Wireless Communications Against Eavesdropping: a Security-Reliability Trade-off Perspective", *IEEE Networks*, vol.30, no.5, pp.74–79.
- [84] G. Han, H. Xu, T. Q. Duong, J. Jiang, and T. Hara (2013), "Localization Algorithms of Wireless Sensor Networks: A Survey", *Telecommunication Systems*, vol.52, no.4, pp.2419-2436.
- [85] G. Han, J. Jiang, C. Zhang, T. Q. Duong, M. Guizani and G. K. Karagiannidis (2016), "A Survey on Mobile Anchor Node Assisted Localization in Wireless

- Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.18, no.3, pp.2220-2243.
- [86] H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar and L. Hanzo (2017), "A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.2, pp.828-854.
- [87] Nikolaos A.Pantazis, Stefanos A.Nikolidakis, and Dimitrios D.Vergados (2013), "Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.15, No.2, pp.551-591.
- [88] S. K. Singh, P. Kumar and J. P. Singh (2017), "A Survey on Successors of LEACH Protocol", *IEEE Access*, vol.5, pp.4298-4328.
- [89] Bhatiya Maneendra Pilanawithana (2019), *Resource Allocation in Energy Harvesting Relay Networks*, PhD Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Melbourne, Australia.
- [90] Pham Ngoc Son, Dongsoo Har, Nam Ik Cho, and Hyung Yun Kong (2017), "Optimal power allocation of relay sensor node capable of energy harvesting in cooperative cognitive radio network", *Sensors MDPI*, 17(3), 648, pp.1-18.
- [91] G. Pan, H. Lei, Y. Yuan, and Z. Ding (2017), "Performance Analysis and Optimization for SWIPT Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol.65, no.5, pp.2291-2302.
- [92] H. D. Hung, T. T. Duy, M. Voznak (2020), "Secrecy Outage Performance of Multi-hop LEACH Networks using Power Beacon Aided Cooperative Jamming with Jammer Selection Methods", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol.124, ID 153357, pp.1-25.
- [93] Hassan El Alami and Abdellah Najid (2019), "ECH: An Enhanced Clustering Hierarchy Approach to Maximize Lifetime of Wireless Sensor Networks", *IEEE Access*, Vol.7, pp.107142-107153.
- [94] M. A. Hossain, R. Md Noor, K. -L. A. Yau, I. Ahmedy and S. S. Anjum (2019), "A Survey on Simultaneous Wireless Information and Power Transfer With Cooperative Relay and Future Challenges", *IEEE Access*, vol.7, pp.19166-19198.
- [95] Ziqi Chen (2020), *Cellular Internet of Things: Optimisation of Random Access and Relaying Communications*, PhD Thesis, Faculty of Engineering, School of Electrical Engineering and Telecommunications, The University of New South Wales, Australia.
- [96] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar and S. Prakriya (2018), "Performance Analysis of Cluster-Based Multi-Hop Underlay CRNs Using Max-Link-Selection Protocol", *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol.4, no.1, pp.15-29.

- [97] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar and S. Prakriya (2018), "Performance of Incremental Relaying Protocols for Cooperative Multihop CRNs", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.67, no.7, pp. 6006-6022.
- [98] A. A. Nasir, H. D. Tuan, T. Q. Duong and M. Debbah (2019), "NOMA Throughput and Energy Efficiency in Energy Harvesting Enabled Networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol.67, no.9, pp.6499-6511.
- [99] H. V. Khuong and D. D. Thiem (2021), "Relay Selection for Security Improvement in Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.2021, pp.1-16.
- [100] J. Zhang, T. Q. Duong, R. Woods and A. Marshall (2017), "Securing Wireless Communications of the Internet of Things from the Physical Layer: An Overview", *Entropy*, 19(8), 420, pp.1-10.
- [101] Olof Liberg, Marten Sundberg, Eric Wang, Johan Bergman, Joachim Sachs, Gustav Wikström (2020), *Cellular Internet of Things_ From Massive Deployments to Critical 5G Applications*, 2nd Edition, Academic Press, Elsevier Ltd., UK.
- [102] Ericsson White Paper, "Cellular IoT in the 5G era", GFMC-20:000025 Uen, February 2020, Whitepaper on cellular IoT connectivity in the 5G era (ericsson.com)
- [103] Qualcomm University Student Guide 80-W1447-1 Rev A (2007), *UMTS/WCDMA Technical Overview*, QUALCOMM Incorporated 5775 Morehouse Drive, San Diego CA 92121-1714 U.S.A.
- [104] Y. A. Abohamra, M. R. Soleymani and Y. R. Shayan (2019), "Using Beamforming for Dense Frequency Reuse in 5G", *IEEE Access*, vol.7, pp. 9181-9190.
- [105] J. Wang, H. Zhu, N. J. Gomes and J. Wang (2018), "Frequency Reuse of Beam Allocation for Multiuser Massive MIMO Systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.17, no.4, pp.2346-2359.
- [106] G. Giambene, V. A. Le, T. Bourgeau and H. Chaouchi (2017), "Iterative Multi-Level Soft Frequency Reuse With Load Balancing for Heterogeneous LTE-A Systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.16, no.2, pp. 924-938.
- [107] R.K.Saha (2020), "3D Spatial Reuse of Multi-Millimeter-Wave Spectra by Ultra-Dense In-Building Small Cells for Spectral and Energy Efficiencies of Future 6G Mobile Networks", *Energies*, 13(1748), pp.1-19.
- [108] Ericsson White Paper, "5G wireless access: an overview", 1/28423-FGB1010937, April 2020, Whitepaper on 5G wireless access network - Ericsson

- [109] Bộ Thông tin truyền thông (2015), *QCVN 36:2015/BTTTT, QUY CHUẨN KỸ THUẬT QUỐC GIA VỀ CHẤT LƯỢNG DỊCH VỤ ĐIỆN THOẠI TRÊN MẠNG VIỄN THÔNG DI ĐỘNG MẶT ĐẤT*, Hà Nội.
- [110] ITU-T E.431, “Service Quality Assessment for Connection Set-up and Release Delays (Study Group II)”.
- [111] Rep. ITU-R M.2370-0, “IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030”, Radiocom-munication Sector of ITU, 2015, <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.
- [112] GSMA, “Spectrum primer series: Introducing spectrum management”, Feb.2017, *Introducing-Spectrum-Management.pdf* (gsma.com)
- [113] GSMA, “900 MHz and 1800 MHz band refarming case study Denmark”, Nov.2011, GSMA | 900MHz and 1800MHz Band Refarming Case Study — Denmark - Spectrum
- [114] ITU, “World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19)”, www.itu.int/go/wrc-19.
- [115] Ben-Jye Chang, Ying-Hsin Liang, Kai-Xiang Cao (2015), “Adaptive radio resource management for maximizing reward and balancing loads in 4G hybrid universal mobile telecommunications system and long term evolution communications”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 15(3), pp.510–526.
- [116] M.H.Gholami, P.Azmi, N.Mokari, M.Forouzesh (2017), “Radio resource allocation in heterogeneous cellular networks based on effective capacity maximization: Perspective mobile data offloading”, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 28(12), pp.1-18.
- [117] T.A.Chowdhury, et al. (2014), "Handover Priority Based on Adaptive Channel Reservation in Wireless Networks", *IEEE International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, pp.1-5.
- [118] Ruonan Zhang, Lin Cai, and Jianping Pan (2017), “Resource Management for Multimedia Services in High Data Rate Wireless Networks”, *SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering*, Chapter 4: Resource Reservation, pp.77-101.
- [119] X. Zhang, Y. Xie, Y. Cui, Q. Cui and X. Tao (2018), "Multi-Slot Coverage Probability and SINR-Based Handover Rate Analysis for Mobile User in Hetnet", *IEEE Access*, vol.6, pp.17868-17879.
- [120] Azar Taufique (2018), *ON ANALYTICAL MODELING OF MOBILITY SIGNALLING IN ULTRA. DENSE HETNETS*, PhD Thesis, University of Oklahoma, Tulsa, USA.
- [121] M. Mandour, F. Gebali, A. D. Elbayoumy, G. M. Abdel Hamid and A. Abdelaziz (2019), "Handover Optimization and User Mobility Prediction in

- LTE Femtocells Network", *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 1-6.
- [122] Lucas Chavarría Giménez (2017), *Mobility Management for Cellular Networks: From LTE Towards 5G*, PhD Thesis, Aalborg University, Department of Electronic Systems, Fredrik Bajers Vej 7, DK - 9220 Aalborg.
- [123] Kanwal Kapil (2017), *Increased energy efficiency in LTE networks through reduced early handover*, PhD Thesis, University of Bedfordshire, United Kingdom.
- [124] Olusegun Oladosu Omitola (2020), *HANDOVER MANAGEMENT STRATEGIES IN LTE-ADVANCED HETEROGENEOUS NETWORKS*, PhD Thesis, School of Engineering, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa.
- [125] C.Qiao and H.Wu (2000), "iCAR: an Integrated Cellular and Ad-hoc Relay System", *International Conference IEEE Computer Communications and Networks*, Vol.2, pp.154-161.
- [126] Hua Jiang and S. S. Rappaport (1996), "Prioritized channel borrowing without locking: a channel sharing strategy for cellular communications", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.4, no.2, pp.163-172.
- [127] M. Tayyab, X. Gelabert and R. Jäntti (2019), "A Survey on Handover Management: From LTE to NR", *IEEE Access*, vol.7, pp.118907-118930.
- [128] I. Chatzigeorgiou, W. Guo, I. J. Wassell and R. A. Carrasco (2011), "Exact and Asymptotic Outage Probability Analysis for Decode-and-Forward Networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 2, pp. 376-381.
- [129] X. Ding, T. Song, Y. Zou and X. Chen (2016), "Security-Reliability Tradeoff for Friendly Jammer Assisted User-Pair Selection in the Face of Multiple Eavesdroppers", *IEEE Access*, vol.4, pp.8386–8393.
- [130] Gradshteyn, Izrail Solomonovich, and Iosif Moiseevich Ryzhik (2014), *Table of integrals, series, and products*, Academic press, Elsevier, USA.
- [131] S.V. Amari, R.B. Misra (1997), "Closed-form Expressions for Distribution of Sum of Exponential Random Variables", *IEEE Transactions on Reliability*, 46(4), pp.519–522.
- [132] Holger Karl, Andreas Willig (2005), *Protocols and architectures for wireless sensor networks*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, England.
- [133] Abdulraqueeb, A., Mardeni, R., Yusoff, A.M. et al (2019), "Self-optimization of Handover Control Parameters for Mobility Management in 4G/5G Heterogeneous Networks", *Aut. Control Comp. Sci.* 53, 441–451.

- [134] E. Gures, I. Shayea, A. Alhammadi, M. Ergen and H. Mohamad (2020), "A Comprehensive Survey on Mobility Management in 5G Heterogeneous Networks: Architectures, Challenges and Solutions", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 195883-195913.
- [135] V. Mishra, D. Das and N. N. Singh (2020), "Novel Algorithm to Reduce Handover Failure Rate in 5G Networks", *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)*, Bangalore, India, pp. 524-529.
- [136] Xinjian Cao and Rui Wang (2016), "An Optimal Traffic Control Algorithm for 4G LTE Systems", *Advances in Computer Science Research*, vol.58, Atlantis Press, pp.277-281.
- [137] Ifeoma B. Asianuba¹, Ugochukwu C. Nnamdi (2021), "Optimized Model for Mitigating Handover Issues in Long Term Evolution Networks", *International Journal of Science and Engineering Investigations*, vol.10, Issue.112, pp.49-55.

PHỤ LỤC

PL1. Thiết lập tọa độ cho mô hình 3 BS và 13 RS

```
Cc=R*[0.5*(2*sqrt(3)+1), 3; 0.5*(sqrt(3)+1), 1.5; 0.5*(3*sqrt(3)+1), 1.5];  
  
Cr=R*[0.5*(2*sqrt(3)+1), 2; 0.5*(3*sqrt(3)+1), 2.5; 0.5*(sqrt(3)+1), 2.5;  
0.5*(2*sqrt(3)+1), 1; 0.5*(3*sqrt(3)+1), 0.5; 0.5*(4*sqrt(3)+1), 1;  
0.5*(4*sqrt(3)+1), 2; 0.5*(3*sqrt(3)+1), 3.5; 0.5*(2*sqrt(3)+1), 4;  
0.5*(sqrt(3)+1), 3.5; 0.5, 2; 0.5, 1; 0.5*(sqrt(3)+1), 0.5];  
  
relay_bind=[1, 2, 3; 1, 3, 0; 1, 2, 0; 2, 3, 0; 3, 0, 0; 3, 0, 0;  
3, 0, 0; 1, 0, 0; 1, 0, 0; 1, 0, 0; 2, 0, 0; 2, 0, 0;  
2, 0, 0];  
  
cell_bind=[1, 2, 3, 8, 9, 10; 1, 3, 4, 11, 12, 13; 1, 2, 4, 5, 6, 7];
```

PL2. Khởi tạo vị trí và tham số cuộc gọi cho tất cả các MU trong mạng

```
% Nc = no_channel  
% N = số BS trong mô hình  
  
for i=1:N %assign users in each cell  
    for j = 1:no_channel  
        dist=R*rand();  
        alpha=2*pi*rand();  
        u((i + (j-1)*N), 1)= Cc(i, 1)+ dist*cos(alpha); % UEx  
        u((i + (j-1)*N), 2)= Cc(i, 2)+dist*sin(alpha); % UEy  
        u((i + (j-1)*N), 3)= i;  
    end  
end  
for i=1:no_channel*N %velocity and direction of each user  
    v(i, 1)= 1*rand(); % velocity of UE  
    v(i, 2)= 2*pi*rand();% direction's UE  
end  
t= exprnd(300, 1, no_channel*N); %call duration t = 5 phut = 300s  
Using = no_channel*ones(1, N); %Number of busy channels in each cell
```

PL3. Cập nhật trạng thái mạng

```
% Update network  
for i=1:no_channel*N  
    if (u(i,1:2)~= 0)  
        u(i, 1:2)= locarr(i, :);  
        t(i)= t(i)-curr_time;  
    else  
        u(i, 1)= Cc(u(i,3), 1)+ R*rand()*cos(2*pi*rand());  
        u(i, 2)= Cc(u(i,3), 2)+ R*rand()*sin(2*pi*rand());  
        v(i,1) = 1*rand();  
        v(i,2) = 2*pi*rand();  
        t(i)= exprnd(300, 1);  
        Using(u(i,3)) = Using(u(i,3)) +1;  
        no_user = no_user + 1;  
    end  
end
```

PL4. Tính thời gian di chuyển ra ngoài BS và RS

```
for i=1:no_channel*N
    crossbound(i, :)= [0, 0];
    if (sum((u(i,1:2)-Cc(u(i,3),:)).^2) < R^2)
        temp1= u(i, 1:2)-Cc(u(i,3),:);
        delta1=R^2+2*temp1(1)*temp1(2)*cos(v(i, 2))*sin(v(i, 2))-
            temp1(1)^2*sin(v(i, 2))^2-temp1(2)^2*cos(v(i, 2))^2;
        crosscellbound = (-(temp1(1)*cos(v(i, 2))+
            temp1(2)*sin(v(i, 2)))+sqrt(delta1))/v(i,1);
        crossbound(i, 1)= crosscellbound+eps;
        relayCc = cell_bind(u(i,3),:);
        for ii = 1:length(relayCc)
            temp2= u(i, 1:2)-Cr(relayCc(ii), :);
            delta2=Rr^2+2*temp2(1)*temp2(2)*cos(v(i, 2))*sin(v(i, 2))-...
                temp2(1)^2*sin(v(i, 2))^2-temp2(2)^2*cos(v(i, 2))^2;
            if (delta2 >= 0)
                root = (-(temp2(1)*cos(v(i, 2))+ temp2(2)*sin(v(i, 2)))+
                    sqrt(delta2))/v(i,1);
                smallroot = (-(temp2(1)*cos(v(i, 2))+ temp2(2)*sin(v(i, 2))) -
                    sqrt(delta2))/v(i,1);
                loc(1)= u(i, 1)+ v(i, 1)*root*cos(v(i, 2));
                loc(2)= u(i, 2)+ v(i, 1)*root*sin(v(i, 2));
                loc2(1)= u(i, 1)+ v(i, 1)*smallroot*cos(v(i, 2));
                loc2(2)= u(i, 2)+ v(i, 1)*smallroot*sin(v(i, 2));
                if ((root > crossbound(i,1)) && (sum((loc-Cc(u(i,3),:)).^2)> R^2))
                    crossbound(i,1) = root;
            else
                if ((smallroot > crossbound(i,1))&&(sum((loc2-Cc(u(i,3),:)).^2)>
                    R^2))
                    crossbound(i,1) = crossbound(i,1);
                end
            end
        end
    end
end
crossbound(i,:) = [crossbound(i,1), u(i,3)];
```

PL5. Vị trí hiện thời của các MU khi xảy ra sự kiện kết thúc cuộc gọi hoặc chuyển giao

```
[t_cross, ho] = min(crossbound(:,1));
[t_term, te] = min(t);
curr_time = min(t_term, t_cross);
%Check the network situation: 1 UE terminated or handed over
%Location of UE at time of event
if (curr_time <= 0)
    curr_time;
end
for i=1:no_channel*N
    locarr(i,1)= u(i, 1)+ v(i, 1)*curr_time*cos(v(i, 2));
    locarr(i,2)= u(i, 2)+ v(i, 1)*curr_time*sin(v(i, 2));
end
if (t_term <= t_cross)
    v(te,:) = [0, 0];
    Using(u(te,3))=Using(u(te,3))-1;
```

```
        u(te,1:2)=[0, 0];
        t(te)=0;
        no_user=no_user-1;
        terminated=terminated+1;
    else
        Using(u(ho,3))= Using(u(ho, 3))-1;
        network_handover;
    end
```

PL6. HCRS

```
% network_handover;
clc
dc = [];
for i=1:N
    dd = sum((Cc(i, :)-locarr(ho,:)).^2);

    if (dd < R^2)
        dc = [dd i];
        cell_arr = i;
    end
end
%cell_arr: the cell UE moving to
if (size(dc,1) == 0)%User is in the green zone
    no_user = no_user -1;
    u(ho, 1:2)= [0, 0];
    v(ho, :)= [0, 0];
    t(ho)= inf;
    hgreen=hgreen+1;
else
    if (Using(cell_arr) == no_channel) %The cell_arr has no available
channel

        % cell_arr has no available channel
        % Find the UE of cell_arr are in RS between cell_arr and cell_ho
        cell_ho = u(ho,3);
        relay_ho = intersect(cell_bind(cell_ho, :), cell_bind(cell_arr, :));
        incell_arr = []; % UEs of cell_arr
        for i = 1:no_user
            if (u(i,3) == (cell_arr))
                incell_arr = [incell_arr i];
            end
        end
        in_relay = [];

%
        for i=1:length(incell_arr)
            relay = relay_ho(1);
            if(sum((locarr(incell_arr(i), 1:2)-Cr(relay, :)).^2)< Rr^2)
                in_relay= [in_relay; [incell_arr(i) relay]];
            else
                relay = relay_ho(2);
                if (sum((locarr(incell_arr(i), 1:2)-Cr(relay, :)).^2)<
Rr^2)
                    in_relay= [in_relay; [incell_arr(i) relay]];
                end
            end
        end
end
end
%
```

```
if(size(in_relay, 1)==0) %No user is in relay -> dropped
    drop = drop +1;
    no_user = no_user -1;
    u(ho, 1:2)= [0, 0];
    v(ho, :)= [0, 0];
    t(ho)= inf;
else
    handover_succ= handover_succ+1; %handover-success
    u(ho, 1:2)= [0, 0];
    v(ho, :)= [0, 0];
    t(ho)= inf;
    no_user = no_user - 1;
end
else
end
end
end
```

PL7. Thiết lập tọa độ mô hình 7 BS và 24 RS

```
Cc=R*[0.5*(3*sqrt(3)+1), 3; 0.5*(2*sqrt(3)+1), 1.5;
    0.5*(4*sqrt(3)+1), 1.5; 0.5*(5*sqrt(3)+1), 3;
    0.5*(4*sqrt(3)+1), 4.5; 0.5*(2*sqrt(3)+1), 4.5;
    0.5*(sqrt(3)+1), 3];

Cr=R*[0.5*(3*sqrt(3)+1), 2; 0.5*(4*sqrt(3)+1), 2.5;
    0.5*(4*sqrt(3)+1), 3.5; 0.5*(3*sqrt(3)+1), 4;
    0.5*(2*sqrt(3)+1), 3.5; 0.5*(2*sqrt(3)+1), 2.5;
    0.5*(sqrt(3)+1), 2; 0.5*(sqrt(3)+1), 1; 0.5*(2*sqrt(3)+1), 0.5;
    0.5*(3*sqrt(3)+1), 1; 0.5*(4*sqrt(3)+1), 0.5; 0.5*(5*sqrt(3)+1), 1;
    0.5*(5*sqrt(3)+1), 2; 0.5*(6*sqrt(3)+1), 2.5;
    0.5*(6*sqrt(3)+1), 3.5; 0.5*(5*sqrt(3)+1), 4; 0.5*(5*sqrt(3)+1), 5;
    0.5*(4*sqrt(3)+1), 5.5; 0.5*(3*sqrt(3)+1), 5;
    0.5*(2*sqrt(3)+1), 5.5; 0.5*(sqrt(3)+1), 5; 0.5*(sqrt(3)+1), 4;
    0.5, 3.5; 0.5, 2.5];

relay_bind=[1, 2, 3; 1, 3, 4; 1,4,5; 1,5, 6; 1, 6, 7; 1, 2, 7; 2, 7, 0;
    2, 0, 0; 2, 0, 0; 2, 3, 0; 3, 0, 0; 3, 0, 0;
    3, 4, 0; 4, 0, 0; 4, 0, 0; 4, 5, 0; 5, 0, 0; 5, 0, 0;
    5, 6, 0; 6, 0, 0; 6, 0, 0; 6, 7, 0; 7, 0, 0; 7, 0, 0];

cell_bind=[1, 2, 3, 4, 5, 6; 1, 6, 7, 8, 9, 10; 1, 2, 10, 11, 12, 13;
    2, 3, 13, 14, 15, 16; 3, 4, 16, 17, 18, 19;
    4, 5, 19, 20, 21, 22; 5, 6, 7, 22, 23, 24];
```

PL8. Tính P_h

```
clear all;
HO1 = 0;
HO2 = 0;
N_test = 10^6;
R = 700;
Req1 = 0.91*R;
Req2 = 1.35*R;
Cc=R*[sqrt(3), 1]; % toa do tam cell
for i=1:N_test
    dist=R*rand();
    alpha=2*pi*rand();
    U(1)= Cc(1) + dist*cos(alpha); % toa do 0x User
    U(2)= Cc(2) + dist*sin(alpha); % toa do 0y User
```

```

CU = sqrt((U(1) - Cc(1))^2 + (U(2) - Cc(2))^2);
v(1)= 20*rand(); % van toc User
v(2)= 2*pi*rand(); % huong di chuyen User
t= exprnd(120, 1); % thoi gian goi cua User
UD = v(1)*t;
CD = sqrt(CU^2 + UD^2 - 2*CU*UD*cos(v(2)));
if CD > Req1
    HO1 = HO1 + 1;
end
if CD > Req2
    HO2 = HO2 + 1;
end
end
Ph1 = HO1*100/N_test;
Ph2 = HO2*100/N_test;

```

PL9. Các tính toán trung gian cho IP

PL9.1. Tính công thức (3.23)

Ta có:

$$\begin{aligned}
 \Pr(C_{E,m} < C_{th}) &= \Pr(\psi_{T_{m-1},E} < \omega_1 + \omega_2 \psi_{T_{m-1},J_m} \psi_{J_m,E}) \\
 &= \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} F_{\psi_{T_{m-1},E}}(\omega_1 + \omega_2 yz) f_{\psi_{T_{m-1},J_m}}(y) f_{\psi_{J_m,E}}(z) dydz
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Trong đó:

$$\omega_1 = \frac{\rho}{(1 - \tau_E^2 \rho) \Delta}, \omega_2 = \frac{\kappa \rho}{1 - \tau_E^2 \rho} \tag{3.20}$$

Thay các hàm CDF và PDF của kênh Rayleigh từ (3.1) và (3.2) vào (3.19), ta có:

$$\Pr(C_{E,m} < C_{th}) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \left\{ \left[1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1},E}(\omega_1 + \omega_2 yz)) \right] \Omega_{T_{m-1},J_m} \exp(-\Omega_{T_{m-1},J_m} y) \right. \\
 \left. \times \Omega_{J_m,E} \exp(-\Omega_{J_m,E} z) \right\} dydz. \tag{PL9.1}$$

Thực hiện tính toán cho lớp tích phân đầu tiên theo dy , ta có kết quả sau:

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{+\infty} \left[1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1},E}(\omega_1 + \omega_2 yz)) \right] \Omega_{T_{m-1},J_m} \exp(-\Omega_{T_{m-1},J_m} y) dy \\
 &= 1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1},E} \omega_1) \int_0^{+\infty} \Omega_{T_{m-1},J_m} \exp(-\Omega_{T_{m-1},E} \omega_2 z y) \exp(-\Omega_{T_{m-1},J_m} y) dy \\
 &= 1 - \frac{\Omega_{T_{m-1},J_m}}{\Omega_{T_{m-1},J_m} + \Omega_{T_{m-1},E} \omega_2 z} \exp(-\Omega_{T_{m-1},E} \omega_1).
 \end{aligned} \tag{PL9.2}$$

Thay công thức (PL9.2) vào (PL9.1), ta có:

$$\begin{aligned}
 \Pr(C_{E,m} < C_{th}) &= \int_0^{+\infty} \left[1 - \frac{\Omega_{T_{m-1},J_m}}{\Omega_{T_{m-1},J_m} + \Omega_{T_{m-1},E}\omega_2 z} \exp(-\Omega_{T_{m-1},E}\omega_1) \right] \Omega_{J_m,E} \exp(-\Omega_{J_m,E}z) dz \\
 &= 1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1},E}\omega_1) \int_0^{+\infty} \frac{\Omega_{T_{m-1},J_m} \Omega_{J_m,E}}{\Omega_{T_{m-1},J_m} + \Omega_{T_{m-1},E}\omega_2 z} \exp(-\Omega_{J_m,E}z) dz \\
 &= 1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1},E}\omega_1) \int_0^{+\infty} \frac{\theta_m}{\theta_m / \Omega_{J_m,E} + z} \exp(-\Omega_{J_m,E}z) dz
 \end{aligned} \tag{PL9.3}$$

với $\theta_m = \frac{\Omega_{T_{m-1},J_m} \Omega_{J_m,E}}{\Omega_{T_{m-1},E}\omega_2}$ (như trong công thức (3.22)).

Tiếp theo, đặt $u = \theta_m + \Omega_{J_m,E}z$ (suy ra $du = \Omega_{J_m,E}dz$ và $z = \frac{u - \theta_m}{\Omega_{J_m,E}}$), ta viết lại công

thức (PL9.3) như sau:

$$\begin{aligned}
 \Pr(C_{E,m} < C_{th}) &= 1 - \exp(-\Omega_{T_{m-1},E}\omega_1) \int_{\theta_m}^{+\infty} \frac{\theta_m \Omega_{J_m,E}}{u} \exp(-(u - \theta_m)) \frac{du}{\Omega_{J_m,E}} \\
 &= 1 - \theta_m \exp(\theta_m - \Omega_{T_{m-1},E}\omega_1) \int_{\theta_m}^{+\infty} \frac{\exp(-u)}{u} du.
 \end{aligned} \tag{PL9.4}$$

Sử dụng định nghĩa của hàm tích phân mũ: $E_1(x) = \int_x^{+\infty} \frac{\exp(-t)}{t} dt$, và thay vào trong công thức (PL9.4), ta có được kết quả như trong công thức (3.23):

$$\Pr(C_{E,m} < C_{th}) = 1 - \theta_m \exp(\theta_m - \Omega_{T_{m-1},E}\omega_1) E_1(\theta_m).$$

PL9.2. Tính công thức (3.56)

Thay thế (3.55) vào (3.53), ta có:

$$\begin{aligned}
 \overline{\text{IP}}_m^{\text{BA-BJ}} &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \Omega_{T_{m-1},T_m} \exp(-p\Omega_{T_{m-1},E}\omega_2) \\
 &\quad \times \int_0^{+\infty} \frac{\theta_{1,p}}{\theta_{1,p} + y} \exp(-(u+1)\Omega_{T_{m-1},T_m}y) dy.
 \end{aligned} \tag{PL9.5}$$

Đặt $z = (u+1)\Omega_{T_{m-1},T_m}(\theta_{1,p} + y)$ (hay $dz = (u+1)\Omega_{T_{m-1},T_m} dy$ và $y = \frac{z}{(u+1)\Omega_{T_{m-1},T_m}} - \theta_{1,p}$), ta

có:

$$\begin{aligned}
 \overline{\mathbb{P}}_m^{\text{BA-BJ}} &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \Omega_{T_{m-1} T_m} \exp(-p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_2) \\
 &\quad \times \int_{(u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p}}^{+\infty} \frac{\theta_{1,p} (u+1) \Omega_{T_{m-1} T_m} \exp(-(z - (u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p}))}{z} \frac{dz}{(u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m}} \quad (\text{PL9.6}) \\
 &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} \exp((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} - p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_2) \\
 &\quad \times \int_{(u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p}}^{+\infty} \frac{1}{z} \exp(-z) dz.
 \end{aligned}$$

Sử dụng định nghĩa của hàm tích phân mũ $E_1(x) = \int_x^{+\infty} \frac{\exp(-t)}{t} dt$, và thay vào trong công thức (PL9.6), ta có được kết quả như trong công thức (3.56):

$$\begin{aligned}
 \overline{\mathbb{P}}_m^{\text{BA-BJ}} &= 1 + \sum_{p=1}^{N_E} \sum_{u=0}^{N_T K_m - 1} (-1)^{p+u} C_{N_E}^p C_{N_T K_m - 1}^u N_T K_m \Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} \\
 &\quad \times \exp((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p} - p \Omega_{T_{m-1} E} \omega_2) E_1((u+1)\Omega_{T_{m-1} T_m} \theta_{1,p}).
 \end{aligned}$$