

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM  
KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

---



LÊ HỮU BÌNH

**NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG MANET  
SỬ DỤNG KỸ THUẬT ĐỊNH TUYẾN CÂN BẰNG TẢI  
ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ CÔNG NGHỆ THÔNG TIN**

**HÀ NỘI - 2019**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM  
HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**

.....\*\*\*.....

**LÊ HỮU BÌNH**

**NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG MANET  
SỬ DỤNG KỸ THUẬT ĐỊNH TUYẾN CÂN BẰNG TẢI  
ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ CÔNG NGHỆ THÔNG TIN**

Chuyên ngành: Hệ thống thông tin

Mã số: 9 48 01 04

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:**

1. PGS.TS. Võ Thanh Tú
2. PGS.TS. Nguyễn Văn Tam

**HÀ NỘI - 2019**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Luận án Tiến sĩ với tiêu đề "*Nâng cao hiệu năng mạng MANET sử dụng kỹ thuật định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn*" là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn của PGS.TS. Võ Thanh Tú và PGS.TS. Nguyễn Văn Tam, trừ những kiến thức tham khảo từ các tài liệu đã được chỉ rõ.

Các kết quả, số liệu được trình bày trong luận án là trung thực, một phần đã được công bố trên các Tạp chí và Kỷ yếu Hội thảo khoa học chuyên ngành (*danh mục các công trình đã công bố của tác giả được trình bày ở cuối Luận án*), phần còn lại chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Hà Nội, ngày 17 tháng 11 năm 2019

Tác giả



**Lê Hữu Bình**

## LỜI CẢM ƠN

Luận án này được thực hiện tại Viện Công nghệ thông tin, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Nghiên cứu sinh (NCS) xin tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến PGS.TS. Võ Thanh Tú, người đã tận tình hướng dẫn, định hướng cho quá trình nghiên cứu thực hiện luận án, cung cấp những kiến thức quý báu cả về chuyên môn lẫn phương pháp nghiên cứu, phương pháp viết bài báo, báo cáo kỹ thuật, giúp cho NCS có đủ điều kiện hoàn thành quá trình học tập, nghiên cứu thực hiện luận án.

NCS xin tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến PGS.TS. Nguyễn Văn Tam, người đã tận tình hướng dẫn, tạo mọi điều kiện thuận lợi cho Nghiên cứu sinh trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu, thực hiện Luận án tại Viện Công nghệ thông tin, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

NCS xin chân thành cảm ơn các ý kiến đóng góp quý báu qua các buổi seminar định kỳ hàng tháng của quý Thầy Cô, các chuyên gia, các NCS trong nhóm nghiên cứu về Công nghệ mạng và Truyền thông tại Viện Công nghệ thông tin.

NCS xin chân thành cảm ơn các ý kiến đóng góp quý báu của quý Thầy Cô trong Hội đồng đánh giá luận án cấp cơ sở, những ý kiến góp ý của các Phản biện, các Thành viên hội đồng cho việc chỉnh sửa, hoàn thiện luận án sau khi bảo vệ cấp cơ sở.

NCS xin chân thành cảm ơn Lãnh đạo Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Công nghệ thông tin, Phòng Tin học Viễn thông đã tạo những điều kiện thuận lợi cho việc nghiên cứu thực hiện Luận án.

NCS xin chân thành Cảm ơn Ban giám hiệu và các Phòng ban liên quan của Trường Cao đẳng công nghiệp Huế, cũng như các đồng nghiệp đã tạo điều kiện và giúp đỡ tôi hoàn thành được đề tài nghiên cứu của mình.

Cuối cùng là sự biết ơn sâu sắc tới gia đình đã luôn chia sẻ, cảm thông cho tôi trong những chuỗi ngày dài miệt mài học tập, nghiên cứu để có được kết quả như ngày hôm nay.

## MỤC LỤC

Trang phụ bìa.....	i
Lời cam đoan .....	ii
Lời cảm ơn.....	iii
Danh mục các cụm từ viết tắt .....	viii
Danh mục hình .....	x
Danh mục bảng .....	xv
<b>MỞ ĐẦU</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Mục tiêu nghiên cứu</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu</b> .....	<b>3</b>
<b>4. Nội dung và phương pháp nghiên cứu</b> .....	<b>4</b>
<b>5. Các kết quả nghiên cứu cần đạt được</b> .....	<b>5</b>
<b>6. Bố cục của luận án</b> .....	<b>5</b>
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ MANET VÀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN HIỆU NĂNG MẠNG</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1. Những vấn đề cơ bản về mạng MANET</b> .....	<b>8</b>
1.1.1. Nguyên lý.....	8
1.1.2. Đặc điểm .....	10
1.1.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng mạng MANET .....	11
<b>1.2. Định tuyến trong mạng MANET</b> .....	<b>12</b>
1.2.1. Tổng quan .....	12
1.2.2. Phân loại.....	13
<b>1.3. Tình hình nghiên cứu về định tuyến trong mạng MANET</b> .....	<b>15</b>
1.3.1. Định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ (QoS).....	16
1.3.2. Định tuyến đảm bảo chất lượng truyền dẫn (QoT).....	16
1.3.3. Định tuyến cân bằng tải .....	19

1.3.4. Một số nhận xét và đánh giá .....	21
<b>1.4. Những đóng góp của luận án .....</b>	<b>22</b>
<b>1.5. Kết luận chương .....</b>	<b>23</b>
<b>CHƯƠNG 2. ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN CỦA MẠNG MANET KHI SỬ DỤNG CÁC GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN THEO YÊU CẦU VÀ CÂN BẰNG TẢI .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Các hiệu ứng vật lý xảy ra trên lộ trình truyền dữ liệu .....</b>	<b>24</b>
2.1.1. Các yếu tố kỹ thuật liên quan .....	24
2.1.2. Suy hao công suất qua môi trường dẫn .....	25
2.1.3. Nhiều tích lũy trên đường truyền .....	27
<b>2.2. Hiệu năng mạng MANET .....</b>	<b>29</b>
2.2.1. Xác suất chặn gói dữ liệu .....	29
2.2.2. Thời gian trễ .....	29
2.2.3. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu .....	30
2.2.4. Tỷ lệ lỗi bit .....	33
2.2.5. Một số kết quả tính toán và thảo luận .....	34
<b>2.3. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình khi sử dụng các giao thức định tuyến theo yêu cầu .....</b>	<b>39</b>
2.3.1. Nguyên lý cơ bản của các giao thức định tuyến theo yêu cầu .....	40
2.3.2. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình .....	44
<b>2.4. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình khi sử dụng các giao thức định tuyến cân bằng tải .....</b>	<b>46</b>
2.4.1. Nguyên lý cơ bản của kỹ thuật định tuyến cân bằng tải .....	46
2.4.2. Các phương pháp định tuyến cân bằng .....	46
2.4.3. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình .....	48
<b>2.5. Đánh giá chất lượng truyền dẫn và hiệu năng mạng thông qua mô phỏng .....</b>	<b>49</b>
2.5.1. Kịch bản mô phỏng .....	49
2.5.2. Trường hợp sử dụng giao thức DSR .....	53
2.5.3. Trường hợp sử dụng giao thức AODV .....	59

<b>2.6. Kết luận chương</b> .....	62
<b>CHƯƠNG 3. ĐỊNH TUYẾN CÂN BẰNG TẢI ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN DỰA TRÊN TẢI LƯU LƯỢNG QUA MỖI LỘ TRÌNH</b> .....	64
<b>3.1. Đặt vấn đề</b> .....	64
<b>3.2. Cơ sở lý thuyết liên quan</b> .....	67
3.2.1. Phân tích xác suất chặn gói dữ liệu dựa trên lý thuyết hàng đợi .....	67
3.2.2. Phân tích thời gian trễ dựa trên lý thuyết hàng đợi .....	69
<b>3.3. Ý tưởng đề xuất thuật toán</b> .....	70
3.3.1. Mô hình giải tích của thuật toán .....	70
3.3.2. Ý tưởng thực thi thuật toán trên mô hình xuyên lớp.....	73
<b>3.4. Nguyên lý hoạt động của thuật toán</b> .....	79
<b>3.5. Áp dụng cho giao thức AODV</b> .....	84
3.5.1. Đặt vấn đề .....	84
3.5.2. Chỉnh sửa khuôn dạng gói RREQ và RREP .....	85
3.5.3. Thuật toán định tuyến LBRQT-AODV .....	86
<b>3.6. Áp dụng cho giao thức DSR</b> .....	88
3.6.1. Đặt vấn đề .....	88
3.6.2. Chỉnh sửa khuôn dạng gói RREQ và RREP .....	89
3.6.3. Thuật toán định tuyến LBRQT-DSR.....	90
<b>3.7. Mô phỏng và phân tích kết quả</b> .....	92
3.7.1. Xây dựng kịch bản mô phỏng .....	92
3.7.2. Kết quả mô phỏng thuật toán LBRQT-AODV.....	92
3.7.3. Kết quả mô phỏng thuật toán LBRQT-DSR .....	97
3.7.4. So sánh các thuật toán được đề xuất với các công trình nghiên cứu liên quan .....	105
<b>3.8. Kết luận chương</b> .....	107

<b>CHƯƠNG 4. ĐỊNH TUYẾN CÂN BẰNG TẢI ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN DỰA TRÊN THÔNG TIN ĐỊNH TUYẾN CỦA NÚT NGUỒN .....</b>	<b>109</b>
<b>4.1. Ý tưởng đề xuất thuật toán .....</b>	<b>109</b>
4.1.1. Chọn lộ trình cân bằng tải .....	109
4.1.2. Xác định điều kiện ràng buộc QoS .....	110
<b>4.2. Mô hình giải tích của thuật toán .....</b>	<b>111</b>
4.2.1. Xây dựng hàm mục tiêu và các điều kiện ràng buộc .....	111
4.2.2. Ví dụ minh họa.....	112
<b>4.3. Thực thi thuật toán SLBQT-DSR .....</b>	<b>116</b>
4.3.1. Chỉnh sửa khuôn dạng gói RREQ .....	116
4.3.2. Lưu đồ thuật toán SLBQT-DSR .....	116
<b>4.4. Mô phỏng và phân tích kết quả .....</b>	<b>118</b>
4.4.1. Kịch bản mô phỏng .....	118
4.4.2. Kết quả mô phỏng .....	119
4.4.3. So sánh thuật toán được đề xuất với các công trình nghiên cứu liên quan.....	125
<b>4.5. Đánh giá ưu nhược điểm của thuật toán được đề xuất .....</b>	<b>128</b>
4.5.1. Ưu điểm.....	128
4.5.2. Nhược điểm .....	128
<b>4.6. Kết luận chương .....</b>	<b>129</b>
<b>KẾT LUẬN VÀ NHỮNG ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN .....</b>	<b>130</b>
<b>HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA ĐỀ TÀI LUẬN ÁN .....</b>	<b>132</b>
<b>CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN .</b>	<b>133</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>134</b>
<b>PHỤ LỤC A. TÍNH TOÁN CHI TIẾT VÍ DỤ MINH HỌA NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA THUẬT TOÁN LBRQT.....</b>	<b>P1</b>
<b>PHỤ LỤC B. MÃ NGUỒN CỦA MỘT SỐ MODULE CƠ BẢN TRONG CHƯƠNG TRÌNH MÔ PHỎNG TRÊN OMNET++ .....</b>	<b>P14</b>



## DANH MỤC CÁC CỤM TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Nghĩa tiếng anh	Nghĩa tiếng việt
AF	Amplify and Forward	Khuếch đại và chuyển tiếp
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector	Định tuyến vector khoảng cách theo yêu cầu
ARA	Ant colony based Routing Algorithm	Định tuyến dựa trên thuật toán tối ưu đàn kiến
ASK	Amplitude Shift Keying	Điều chế khóa dịch biên độ
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ bit lỗi
BPD	Blocking Probability of Data packets	Xác suất chặn gói dữ liệu
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Điều chế khóa dịch pha hai mức
CBRP	Cluster-Based Routing Protocol	Định tuyến dựa trên cụm
CCK	Complementary Code Keying	Điều chế khóa mã bù
DDR	Distributed Dynamic Routing	Định tuyến động phân tán
DF	Decode and Forward	Kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp
DPSK	Differential Phase Shift Keying	Điều chế khóa dịch pha vi sai
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector	Giao thức vector khoảng cách theo thứ tự đến đích
DSN	Destination Sequence Number	Số thứ tự đích
DSR	Dynamic Source Routing	Định tuyến nguồn động
EED	End to End Delay	Thời gian trễ từ nguồn đến đích
ERP	Efficient Routing Protocol under Noisy Environment	Giao thức định tuyến hiệu quả dưới môi trường nhiễu
FEC	Forward Error Correction	Kỹ thuật sửa lỗi ở phía trước
FMLB	Fibonacci Multipath Load Balancing	Cân bằng tải đa đường dựa trên dãy Fibonacci
FSK	Frequency Shift Keying	Điều chế khóa dịch tần số
FSR	Fisheye State Routing	Giao thức định tuyến trạng thái Fisheye
HSR	Hierarchical State Routing	Định tuyến trạng thái phân cấp
IARM	Interference Aware Routing Metric	Độ đo định tuyến phản ánh nhiễu
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
LAR	Location Aided Routing	Định tuyến được hỗ trợ bởi vị trí
LBRQT	Load Balancing Routing ensuring Quality of Transmission	Định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn

<b>Viết tắt</b>	<b>Nghĩa tiếng anh</b>	<b>Nghĩa tiếng việt</b>
LBRQT-DSR	Load Balancing ensuring Quality of Transmission based on DSR	Định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn dựa trên giao thức DSR
LBRQT-AODV	Load Balancing Routing ensuring Quality of Transmission based on AODV	Định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn dựa trên giao thức AODV
LMP-DSR	Load balanced Multi-Path Dynamic Source Routing	Định tuyến nguồn đa đường cân bằng tải
LQ	Link Quality	Chất lượng kết nối
MANET	Mobile Ad hoc Network	Mạng tùy biến di động
MLBCC	Multipath Load Balancing technique for Congestion Control	Kỹ thuật cân bằng tải đa đường cho việc điều khiển tắc nghẽn
MRA	Multi-level Routing Algorithm	Thuật toán định tuyến đa mức
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao
OLSR	Optimized Link State Routing	Giao thức định tuyến trạng thái liên kết tối ưu
PSK	Phase Shift Keying	Điều chế khóa dịch pha
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Điều chế biên độ cầu phương
QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
QoT	Quality of Transmission	Chất lượng truyền dẫn
RREP	Route Reply Packet	Gói phản hồi lộ trình
RREQ	Route Request Packet	Gói yêu cầu lộ trình
SA	Stationary Agent	Tác tử tĩnh
SLURP	Scalable Location Updates Routing Protocol	Giao thức định tuyến cập nhật vị trí theo bậc
SNR	Signal to Noise Ratio	Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm	Định tuyến theo thứ tự tạm thời
WMN	Wireless Mesh Networks	Mạng hình lưới không dây
WRP	Wireless Routing Protocol	Giao thức định tuyến không dây
WSN	Wireless Sensor Networks	Mạng cảm biến không dây
ZHLS	Zone-based Hierarchical Link State Routing Protocol	Giao thức định tuyến trạng thái liên kết phân cấp theo vùng
ZRP	Zone Routing Protocol	Giao thức định tuyến vùng

## DANH MỤC HÌNH VẼ

<b>Hình 1.1.</b> Một ví dụ cấu hình lại tô-pô và bảng định tuyến trong mạng MANET	9
<b>Hình 1.2.</b> Phân loại các giao thức định tuyến trong mạng MANET .....	13
<b>Hình 2.1.</b> Suy hao công suất tín hiệu theo khoảng cách truyền dẫn .....	26
<b>Hình 2.2.</b> Suy hao công suất thu theo khoảng cách truyền dẫn.....	27
<b>Hình 2.3.</b> Công suất nhiễu nhiệt phát sinh trên các kênh với độ rộng băng thông khác nhau .....	28
<b>Hình 2.4.</b> Cấu trúc của một lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET qua nhiều bước truyền .....	30
<b>Hình 2.5.</b> Quan hệ giữa BER và SNR theo các kỹ thuật điều chế khác nhau .....	34
<b>Hình 2.6.</b> Một lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET qua 9 nút .....	35
<b>Hình 2.7.</b> Suy giảm SNR qua các bước truyền khi (a) Nút trung gian có tái tạo tín hiệu và (b) Nút trung gian không tái tạo tín hiệu sử dụng sóng mang 2.4 GHz .....	37
<b>Hình 2.8.</b> Suy giảm SNR qua các bước truyền khi (a) Nút trung gian có tái tạo tín hiệu và (b) Nút trung gian không tái tạo tín hiệu sử dụng sóng mang 5 GHz	39
<b>Hình 2.9.</b> Cấu trúc của gói (a) RREQ và (b) RREP trong giao thức DSR [22]....	40
<b>Hình 2.10.</b> Cấu trúc gói (a) RREQ và (b) RREP trong giao thức AODV [16].....	42
<b>Hình 2.11.</b> Một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng giao thức định tuyến AODV .....	45
<b>Hình 2.12.</b> Một ví dụ về định tuyến đa đường cân bằng tải trong mạng MANET ..	48
<b>Hình 2.13.</b> Một tô-pô mạng MANET được chụp trong quá trình mô phỏng .....	52
<b>Hình 2.14.</b> SNR trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến DSR .....	53
<b>Hình 2.15.</b> Tỷ lệ kênh đảm bảo QoS khi sử dụng giao thức định tuyến DSR.....	54
<b>Hình 2.16.</b> Sự thay đổi SNR nhỏ nhất theo tổng số nút mạng khi sử dụng giao thức định tuyến DSR .....	54

<b>Hình 2.17.</b> Sự thay đổi BER theo tổng số nút mạng khi sử dụng giao thức định tuyến DSR .....	55
<b>Hình 2.18.</b> BER trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến DSR .....	56
<b>Hình 2.19.</b> Sự thay đổi của BPD theo tải lưu lượng sử dụng giao thức DSR khi tổng số nút mạng là 50, tốc độ di chuyển trung bình 5 m/s, băng thông kênh (a) 40 MHz và (b) 80 MHz.....	57
<b>Hình 2.20.</b> Sự thay đổi của BPD theo tốc độ di chuyển sử dụng giao thức DSR khi tổng số nút mạng là 50, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh (a) 40 MHz và (b) 80 MHz.....	58
<b>Hình 2.21.</b> Sự thay đổi của BPD theo tổng số nút của giao thức DSR khi tốc độ di chuyển trung bình 10 m/s, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh 40 MHz.....	59
<b>Hình 2.22.</b> SNR trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến AODV .....	59
<b>Hình 2.23.</b> Tỷ lệ kênh đảm bảo QoS khi sử dụng giao thức định tuyến AODV .....	60
<b>Hình 2.24.</b> BER trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến AODV .....	60
<b>Hình 2.25.</b> Sự thay đổi của BPD theo tải lưu lượng của giao thức AODV khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển trung bình 5 m/s, băng thông kênh (a) 40 MHz và (b) 80 MHz..	61
<b>Hình 2.26.</b> Sự thay đổi của BPD theo tốc độ di chuyển của giao thức AODV khi tổng số nút mạng là 50, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh 40 MHz .....	61
<b>Hình 2.27.</b> Sự thay đổi của BPD theo tổng số nút của giao thức AODV khi tốc độ di chuyển trung bình 10 m/s, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh 40 MHz.....	62
<b>Hình 3.1.</b> Một ví dụ về mạng MANET có 15 nút.....	65
<b>Hình 3.2.</b> Mô hình đề xuất ý tưởng định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS .....	66
<b>Hình 3.3.</b> Mô hình một cổng ra của nút mạng không dây tùy biến .....	67
<b>Hình 3.4.</b> Lược đồ chuyển đổi trạng thái một cổng ra của nút mạng tùy biến theo mô hình hàng đợi M/M/1/L .....	68
<b>Hình 3.5.</b> Một tô-pô mạng tùy biến đang có 2 lộ trình truyền dữ liệu .....	71

<b>Hình 3.6.</b> Cấu trúc mô hình xuyên lớp sử dụng tác tử cho mạng MANET .....	74
<b>Hình 3.7.</b> Nguyên lý chuyển tiếp gói RREQ trong trường hợp nút trung gian không có lộ trình khả dụng đến đích .....	75
<b>Hình 3.8.</b> Nguyên lý chuyển tiếp gói RREQ trong trường hợp nút trung gian có lộ trình khả dụng đến đích .....	77
<b>Hình 3.9.</b> Lưu đồ mô tả nguyên lý hoạt động của giải pháp định tuyến LBRQT..	79
<b>Hình 3.10.</b> Một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng giải pháp định tuyến LBRQT....	80
<b>Hình 3.11.</b> Cấu trúc của các gói điều khiển sử dụng trong thuật toán LBRQT-AODV: (a) RREQ và (b) RREP.....	85
<b>Hình 3.12.</b> Cấu trúc của các gói điều khiển sử dụng trong thuật toán LBRQT-DSR: (a) RREQ và (b) RRREP.....	89
<b>Hình 3.13.</b> So sánh SNR của thuật toán (a) AODV và (b) LBRQT-AODV khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 10 m/s, băng thông kênh 40 MHz.....	92
<b>Hình 3.14.</b> So sánh tỷ lệ kênh đảm bảo QoT khi sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT-DSR và DSR.....	93
<b>Hình 3.15.</b> So sánh SNR khi sử dụng thuật toán LBRQT-AODV và AODV.....	94
<b>Hình 3.16.</b> So sánh BER của thuật toán (a) AODV và (b) LBRQT-AODV khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 10 m/s, băng thông kênh 40 MHz.....	95
<b>Hình 3.17.</b> So sánh BPD theo tải lưu lượng của các thuật toán AODV và LBRQT-AODV khi tổng số nút là 40, tốc độ di chuyển 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz.....	96
<b>Hình 3.18.</b> So sánh thông lưu lượng của các thuật toán AODV và LBRQT-AODV khi tổng số nút là 40, tốc độ di chuyển 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz và tải lưu lượng 0.95 Erlang .....	97
<b>Hình 3.19.</b> So sánh SNR của thuật toán (a) DSR và (b) LBRQT-DSR khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz .....	98
<b>Hình 3.20.</b> Sự thay đổi SNR nhỏ nhất khi sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT-DSR và DSR .....	99

<b>Hình 3.21.</b> So sánh BER của thuật toán (a) DSR và (b) LBRQT-DSR khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz .....	100
<b>Hình 3.22.</b> So sánh BER khi sử dụng các thuật toán định tuyến LBRQT-DSR và DSR .....	100
<b>Hình 3.23.</b> So sánh BPD theo tải lưu lượng của thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 30, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz.....	101
<b>Hình 3.24.</b> So sánh BPD theo tổng số nút của thuật toán LBRQT-DSR và DSR, tốc độ di chuyển 5 m/s, tải lưu lượng là 0.95 Erlang, băng thông kênh 40 MHz ....	102
<b>Hình 3.25.</b> So sánh BPD theo tốc độ di chuyển của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 40, tải lưu lượng là 0.95 Erlang, băng thông kênh 40 MHz.....	102
<b>Hình 3.26.</b> So sánh thông lượng của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 50, tải lưu lượng là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển trung bình của các nút là 5 m/s.....	104
<b>Hình 3.27.</b> So sánh thông lượng của thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 50, tải lưu lượng là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển thay đổi .....	104
<b>Hình 3.28.</b> So sánh BPD theo tốc độ di chuyển của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR.....	105
<b>Hình 3.29.</b> So sánh BPD theo tổng số nút mạng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR.....	106
<b>Hình 3.30.</b> So sánh thông lượng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR .....	107
<b>Hình 4.1.</b> Mô hình xác định điều kiện ràng buộc QoS của thuật toán SLBQT-DSR	110
<b>Hình 4.2.</b> Một ví dụ tìm lộ trình cân bằng theo thuật toán SLBQT-DSR .....	113
<b>Hình 4.3.</b> Cấu trúc gói RREQ sử dụng trong thuật toán SLBQT-DSR .....	116
<b>Hình 4.4.</b> Lưu đồ thuật toán định tuyến SLBQT-DSR.....	117
<b>Hình 4.5.</b> Sự thay đổi SNR nhỏ nhất khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR .....	119

<b>Hình 4.6.</b> So sánh tỷ lệ kênh đảm bảo QoS khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR .....	120
<b>Hình 4.7.</b> Sự thay đổi SNR nhỏ nhất khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR .....	121
<b>Hình 4.8.</b> So sánh BPD theo tải lưu lượng của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 30, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz.....	122
<b>Hình 4.9.</b> So sánh xác suất chặn gói dữ liệu của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tổng số nút mạng thay đổi .....	123
<b>Hình 4.10.</b> So sánh xác suất chặn gói dữ liệu của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tốc độ di chuyển trung bình của các nút thay đổi .....	123
<b>Hình 4.11.</b> So sánh thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 50, tải lưu lượng là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển 5 m/s .....	124
<b>Hình 4.12.</b> So sánh thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tốc độ di chuyển của các nút thay đổi .....	125
<b>Hình 4.13.</b> So sánh BPD theo tải lưu lượng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR .....	126
<b>Hình 4.14.</b> So sánh BPD theo tốc độ di chuyển của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR .....	127
<b>Hình 4.15.</b> So sánh thông lượng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR .....	127
<b>Hình A.1.</b> Một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT ...	P1

## DANH MỤC BẢNG

<b>Bảng 2.1.</b> So sánh các tham số lớp vật lý theo chuẩn IEEE 802.11a/b/g/n/ac [20] ..	25
<b>Bảng 2.2.</b> Các giả thiết phân tích một lộ trình trong mạng MANET .....	35
<b>Bảng 2.3.</b> SNR trên các bước truyền của lộ trình ở Hình 2.6 trong trường hợp sóng mang có tần số 2.4 GHz .....	36
<b>Bảng 2.4.</b> SNR trên các bước truyền của lộ trình ở Hình 2.6, sử dụng sóng mang có tần số 5 GHz.....	38
<b>Bảng 2.5.</b> Các tham số mô phỏng.....	50
<b>Bảng 2.6.</b> Tọa độ vị trí khởi tạo và lựa chọn nguồn phát của các kịch bản mô phỏng	51
<b>Bảng 3.1.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút 1 bởi SA.....	81
<b>Bảng 3.2.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 1 .....	82
<b>Bảng 3.3.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 2 .....	82
<b>Bảng 3.4.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 3 .....	83
<b>Bảng A.1.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút 1 bởi SA.....	P6
<b>Bảng A.2.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 1 .....	P11
<b>Bảng A.3.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 2 .....	P12
<b>Bảng A.4.</b> Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 3 .....	P13



# MỞ ĐẦU

## 1. Tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu

Trong xu thế phát triển của công nghệ mạng, truyền thông không dây là giải pháp chủ đạo cho công nghệ mạng viễn thông nói chung, mạng truyền dữ liệu và mạng máy tính nói riêng. Trong thời đại của công nghệ mạng thế hệ thứ 5 (5G) và Internet vạn vật (Internet of Things - IoT), đã xuất hiện một số mô hình mạng không dây để cung cấp các ứng dụng trong thực tế. Cơ bản như mạng cảm biến không dây, mạng không dây hình lưới [32, 47, 49], mạng tùy biến di động (Mobile Ad-Hoc Network - MANET). Trong đó, MANET là mô hình mạng hoạt động theo nguyên lý của mạng ngang hàng, không phụ thuộc vào một kết cấu hạ tầng cố định nào. Việc triển khai một mô hình mạng là rất đơn giản và linh hoạt, chỉ cần các nút di động có hỗ trợ các giao diện kết nối không dây là có thể tạo thành một mô hình mạng MANET bất cứ ở đâu. Vì vậy, MANET đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, như quân sự, y tế, giáo dục, giao thông, hàng không, vận tải tàu biển, nghiên cứu thám hiểm [66].

Để mở rộng phạm vi ứng dụng của mạng MANET, cần phải nâng cao tốc độ truyền dẫn của mỗi kênh truyền, tăng phạm vi vùng phủ sóng của mỗi nút, mở rộng vùng diện tích sử dụng. Tuy nhiên, điều này sẽ gặp phải một số khó khăn về mặt công nghệ. Vì việc tăng tốc độ truyền dẫn, phạm vi phủ sóng và vùng diện tích sử dụng thì các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu cũng tăng lên, làm ảnh hưởng đến hiệu năng mạng [26, 29, 30, 61, 65]. Các hiệu ứng này bao gồm: suy giảm công suất qua môi trường không khí, nhiễu tích lũy dọc theo lộ trình truyền dữ liệu, nhiễu giao thoa giữa các kênh truyền dẫn đồng thời, hiện tượng mờ dần (fading). Các hiệu ứng vật lý này tác động lên kênh truyền, làm suy giảm chất lượng tín hiệu truyền dẫn (Quality of Transmission - QoT), làm tăng xác suất gói dữ liệu bị lỗi do không đảm bảo QoT, dẫn đến suy giảm hiệu năng mạng, đặc biệt là trong mô hình mạng có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, sử dụng kênh có băng thông lớn.

Để đảm bảo hiệu năng mạng MANET trong trường hợp vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, tốc độ dữ liệu lớn, cần phải tìm ra các giải pháp kỹ thuật nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý. Về mặt công nghệ, các hiệu ứng vật lý đã được đề cập ở trên thường được giải quyết bằng công nghệ ở lớp vật lý. Ví dụ như hiệu ứng suy

hao công suất thường được giải quyết bằng cách lắp đặt thêm các bộ tái tạo tín hiệu (repeater) hoặc sử dụng anten để khuếch đại công suất tín hiệu. Với các hiệu ứng gây ra lỗi bit như nhiễu môi trường, nhiễu nhiệt, nhiễu giao thoa giữa các kênh thì thường được giải quyết bằng phương pháp sửa lỗi trước (FEC - Forward Error Correction) sử dụng kỹ thuật xử lý tín hiệu số. Tuy nhiên, trên thực tế, việc bù công suất bằng các bộ tái tạo tín hiệu, cũng như việc xử lý lỗi đường truyền bằng kỹ thuật FEC không thể thực hiện một cách tuyệt đối, mà luôn luôn tồn tại một phần nhỏ các hiệu ứng vật lý sau khi đã xử lý. Phần nhỏ này thường không ảnh hưởng đến chất lượng hệ thống đối với các tuyến truyền dẫn điểm - nối - điểm, hoặc là đối với các tuyến truyền dẫn chỉ đi qua một vài bước truyền (hop). Trong trường hợp mạng MANET có vùng diện tích sử dụng rộng, mật độ nút cao, có trường hợp dữ liệu phải truyền qua nhiều nút trung gian, nghĩa là qua nhiều bước truyền với tổng khoảng cách lớn. Trong trường hợp này, phần nhiễu còn tồn tại sau khi đã xử lý ở lớp vật lý sẽ tích lũy dọc theo lộ trình truyền dữ liệu, làm ảnh hưởng đến QoT của hệ thống mạng. Mức độ ảnh hưởng của nhiễu tích lũy phụ thuộc vào lộ trình truyền dữ liệu, mà lộ trình truyền dữ liệu được quyết định bởi thuật toán định tuyến. Vì vậy, việc nghiên cứu các thuật toán định tuyến ràng buộc QoT trong mạng MANET, nhằm tìm ra các thuật toán định tuyến đảm bảo QoT trên các lộ trình truyền dữ liệu là điều cần thiết, có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong việc ứng dụng mạng MANET cho các trường hợp vùng diện tích lớn, tốc độ dữ liệu và mật độ nút cao. Vấn đề này đã và đang được nhiều nhóm nghiên cứu quan tâm trong thời gian gần đây [5, 24, 33, 35, 46, 51, 53]. Các công trình nghiên cứu này đã đề xuất các thuật toán định tuyến với mục tiêu lựa chọn lộ trình có QoT tốt nhất để truyền dữ liệu.

Tuy nhiên, một vấn đề đặt ra với kỹ thuật định tuyến theo QoT tốt nhất là tăng tình trạng nghẽn cục bộ (bottleneck) do tải lưu lượng phân bố không đồng đều trên các kết nối trong toàn mạng. Nghẽn cục bộ là một vấn đề ảnh hưởng lớn đến hiệu năng mạng, đặc biệt là trong các hệ thống mạng có tải lưu lượng lớn. Vấn đề này thường được giải quyết bằng kỹ thuật định tuyến cân bằng tải (load balancing routing). Trong mạng MANET, định tuyến cân bằng tải cũng đã được nhiều nhóm nghiên cứu triển khai [34, 39, 41, 44, 67, 70]. Các công trình nghiên cứu này đã đề xuất được các thuật toán định tuyến cân bằng tải lưu lượng qua các kết nối trong mạng, giảm thiểu tình trạng nghẽn cục bộ. Tuy nhiên, do đặc trưng cơ bản của kỹ thuật định tuyến cân bằng tải là thuật toán định tuyến có thể chọn "lộ trình dài", nghĩa là các lộ trình đi qua nhiều nút trung gian, nhiều bước truyền để cân bằng tải lưu lượng. Điều này có thể làm giảm QoT của

hệ thống mạng. Các công trình nghiên cứu về kỹ thuật định tuyến cân bằng tải trong mạng MANET đã được đề cập ở trên chưa xét đến vấn đề này.

Thông qua việc phân tích tình hình nghiên cứu về kỹ thuật định tuyến đảm bảo QoS và định tuyến cân bằng tải ở trên, tác giả nhận thấy rằng, các công trình nghiên cứu đã công bố về định tuyến đảm bảo QoS không xem xét đến vấn đề cân bằng tải lưu lượng. Ngược lại, vấn đề về QoS của các lộ trình truyền dữ liệu không được xem xét trong các công trình nghiên cứu về định tuyến cân bằng tải. Vì vậy, một vấn đề đặt ra là cần có sự kết hợp hài hòa giữa định tuyến cân bằng tải và định tuyến đảm bảo QoS nhằm nâng cao hiệu năng mạng MANET. Đặc biệt là trong hệ thống mạng MANET có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, sử dụng kênh có băng thông lớn. Vì vậy, trong đề tài luận án này, tác giả tập trung nghiên cứu các kỹ thuật định tuyến cân bằng tải, đồng thời đảm bảo QoS của các lộ trình truyền dữ liệu nhằm nâng cao hiệu năng mạng MANET.

## **2. Mục tiêu nghiên cứu**

Từ việc phân tích tính cấp thiết của đề tài ở trên, tác giả xác định mục tiêu nghiên cứu của đề tài là tập trung phân tích, đánh giá QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu và ảnh hưởng của nó đến hiệu năng mạng MANET theo các thuật toán định tuyến khác nhau. Trên cơ sở đó, đề xuất các thuật toán định tuyến cải tiến nhằm cân bằng tải lưu lượng, đồng thời đảm bảo QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng MANET. Mục tiêu này được cụ thể hóa như sau:

- (i) Phân tích, đánh giá được QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu và ảnh hưởng của nó đến hiệu năng mạng MANET theo các giao thức định tuyến khác nhau, tập trung vào lớp giao thức định tuyến theo yêu cầu và định tuyến cân bằng tải.
- (ii) Đề xuất được các thuật toán định tuyến cải tiến của các giao thức DSR và AODV sử dụng kỹ thuật định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn, nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý, nâng cao hiệu năng mạng MANET.

## **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu của đề tài luận án tập trung vào các thuật toán định tuyến cân bằng tải và định tuyến đảm bảo QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu. Trong mạng MANET, có nhiều nhóm giao thức định tuyến khác nhau, trong đó nhóm giao thức

định tuyến theo yêu cầu đang được nghiên cứu và sử dụng rộng rãi trong thời gian gần đây. Đây là nhóm giao thức có nhiều ưu điểm về mặt hiệu năng, cũng như vấn đề điều khiển và quản lý. Vì vậy, phạm vi nghiên cứu của đề tài tập trung vào nhóm giao thức định tuyến này. Cụ thể là các giao thức DSR, AODV và các giao thức định tuyến cân bằng tải được cải tiến từ hai giao thức này.

#### **4. Nội dung và phương pháp nghiên cứu**

##### ***\* Nội dung nghiên cứu:***

Để đạt được mục tiêu nghiên cứu như đã đề ra ở trên, tác giả xác định nội dung nghiên cứu của đề tài luận án là tiếp tục phát triển hướng nghiên cứu về kỹ thuật định tuyến cân bằng tải ràng buộc QoS trong mạng MANET, cụ thể như sau:

- (i) Xây dựng và phát triển các điều kiện ràng buộc QoS theo các thuật toán định tuyến khác nhau trong mạng MANET. Cụ thể là thuật toán DSR và AODV.
- (ii) Phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đến hiệu năng mạng MANET đối với các giao thức định tuyến DSR, AODV và định tuyến cân bằng tải.
- (iii) Đề xuất các thuật toán định tuyến cải tiến của giao thức DSR và AODV, nhằm cân bằng tải lưu lượng trong toàn mạng, đồng thời đảm bảo QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng MANET.

##### ***\* Phương pháp nghiên cứu:***

Các phương pháp được sử dụng xuyên suốt quá trình học tập, nghiên cứu thực hiện luận án là nghiên cứu lý thuyết, phân tích bằng mô hình toán học và thống kê bằng kỹ thuật mô phỏng.

##### **- Phương pháp nghiên cứu lý thuyết:**

Tiến hành nghiên cứu, khảo sát, tổng hợp, đánh giá các công trình nghiên cứu liên quan ở trong và ngoài nước để phân tích những vấn đề chưa giải quyết, những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu theo hướng của đề tài. Từ đó, lựa chọn các nội dung, vấn đề sẽ nghiên cứu, đề xuất và giải quyết. Hệ thống hóa các vấn đề cần thực hiện, đề xuất mô hình bài toán, đưa ra các vấn đề để phân tích, đánh giá và thực hiện.

### - Phân tích bằng mô hình toán học:

Sử dụng lý thuyết hàng đợi, lý thuyết xác suất thống kê để xây dựng mô hình giải tích của các tham số hiệu năng trong mạng MANET. Hàng đợi được áp dụng trong luận án là M/M/1/K [19] kết hợp với lý thuyết xác suất thống kê để xây dựng mô hình tính toán xác suất chặn gói dữ liệu trên một lộ trình, thời gian trễ từ nguồn đến đích. Mô hình toán học cũng được sử dụng để phân tích các tham số QoS của một lộ trình truyền dữ liệu như tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR), tỷ lệ bit lỗi (BER). Ngoài ra, lý thuyết quy hoạch tuyến tính và quy hoạch phi tuyến cũng được sử dụng để mô hình hóa các thuật toán định tuyến được đề xuất.

### - Phương pháp mô phỏng:

Xây dựng một mô hình mô phỏng các thuật toán định tuyến trong mạng MANET trên phần mềm mô phỏng mạng OMNeT++ [10]. Mô hình mô phỏng được sử dụng cho việc đánh giá hiệu quả thực thi của các thuật toán định tuyến trong mạng MANET, cho các trường hợp có và không có ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý cũng như các thuật toán định tuyến được đề xuất.

## 5. Các kết quả nghiên cứu cần đạt được

Với mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu như trên, luận án cần đạt được những kết quả sau đây:

- (i) Phân tích, đánh giá được được ảnh hưởng của QoS đến hiệu năng mạng MANET theo các giao thức định tuyến khác nhau, tập trung vào lớp giao thức định tuyến theo yêu cầu và cân bằng tải.
- (ii) Đề xuất được thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn, nâng cao hiệu năng mạng MANET trong trường hợp mạng có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, sử dụng kênh có băng thông lớn.

## 6. Bố cục của luận án

Với những kết quả nghiên cứu đã thực hiện, luận án được trình bày trong bố cục bao gồm phần mở đầu, 4 chương nội dung và phần kết luận, hướng phát triển của đề tài. Cụ thể như sau:

**Phần mở đầu:** Tập trung phân tích tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu, từ đó xác

định mục tiêu nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu cũng như các phương pháp nghiên cứu của đề tài luận án.

### **Chương 1: Tổng quan về MANET và các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng mạng.**

Nội dung chương này trình bày những vấn đề cơ bản về mạng MANET và các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng mạng, trong đó các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET được đi sâu phân tích. Tác giả cũng tập trung phân tích kỹ tình hình nghiên cứu trong nước và trên thế giới liên quan đến các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET. Đánh giá những kết quả mà các nhà nghiên cứu trong nước và trên thế giới đã đạt được, những vấn đề còn tồn tại cần phải được tiếp tục nghiên cứu. Phần cuối chương trình bày những đóng góp của luận án.

### **Chương 2: Đánh giá chất lượng truyền dẫn của mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến theo yêu cầu và cân bằng tải.**

Nội dung chương này trình bày các kết quả nghiên cứu về các hiệu ứng xảy ra ở lớp vật lý mà nó ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu năng mạng MANET, bao gồm: suy giảm công suất tín hiệu, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tỷ lệ lỗi bit. Từ đó, đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng này đến hiệu năng mạng khi sử dụng các giao thức định tuyến khác nhau, tập trung vào các giao thức định tuyến theo yêu cầu và cân bằng tải. Các kết quả nghiên cứu ở chương này là cơ sở để thiết lập các điều kiện ràng buộc về chất lượng truyền dẫn, cũng như việc lựa chọn giao thức định tuyến phù hợp với từng mô hình mạng cụ thể. Đồng thời, làm cơ sở cho việc đề xuất các thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn ở các chương tiếp theo.

### **Chương 3: Định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn dựa trên tải lưu lượng qua mỗi lộ trình.**

Nội dung chương này trình bày nguyên lý của thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS dựa trên tải lưu lượng qua mỗi lộ trình, được đề xuất cho mạng MANET nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý, đồng thời cân bằng tải lưu lượng trên tất cả các kết nối, nâng cao hiệu năng mạng MANET.

### **Chương 4: Định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn dựa trên thông tin định tuyến của nút nguồn.**

Nội dung chương này trình bày thuật toán định tuyến cải tiến được đề xuất cho mạng MANET sử dụng kỹ thuật cân bằng tải dựa trên thông tin định tuyến của nút nguồn, đồng thời đảm bảo QoS của các lộ trình được chọn.

**Kết luận và hướng phát triển của đề tài luận án:** Phân tích những kết quả đóng góp của luận án, đồng thời đề ra những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu, giải quyết trong tương lai.

**Các phần Phụ lục:** Phụ lục A trình bày chi tiết các số liệu tính toán cho các ví dụ minh họa trong Luận án. Phụ lục B trình bày mã nguồn của một số mô đun chính trong phần mềm mô phỏng được tác giả triển khai trên OMNeT++ trong suốt quá trình nghiên cứu, thực hiện luận án.

# CHƯƠNG 1

## TỔNG QUAN VỀ MANET VÀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN HIỆU NĂNG MẠNG

Định tuyến là một chức năng không thể thiếu trong kỹ thuật điều khiển lưu lượng mạng viễn thông. Nhờ định tuyến mà các gói dữ liệu có thể truyền thành công từ nguồn đến đích thỏa mãn các yêu cầu đặt ra. Để thấy rõ cơ sở xác định mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu của đề tài luận án, nội dung chương này tập trung phân tích các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET. Phần 1.1 trình bày những vấn đề cơ bản của mạng MANET. Phần 1.2 trình bày các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET. Phần 1.3 phân tích tình hình nghiên cứu trong nước và trên thế giới liên quan đến các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET. Đánh giá những kết quả mà các nhà nghiên cứu trong nước và trên thế giới đã đạt được, những vấn đề còn tồn tại cần phải được tiếp tục nghiên cứu. Phần 1.4 trình bày các đóng góp của luận án. Cuối cùng là kết luận chương, được trình bày trong Phần 1.5.

### 1.1. Những vấn đề cơ bản về mạng MANET

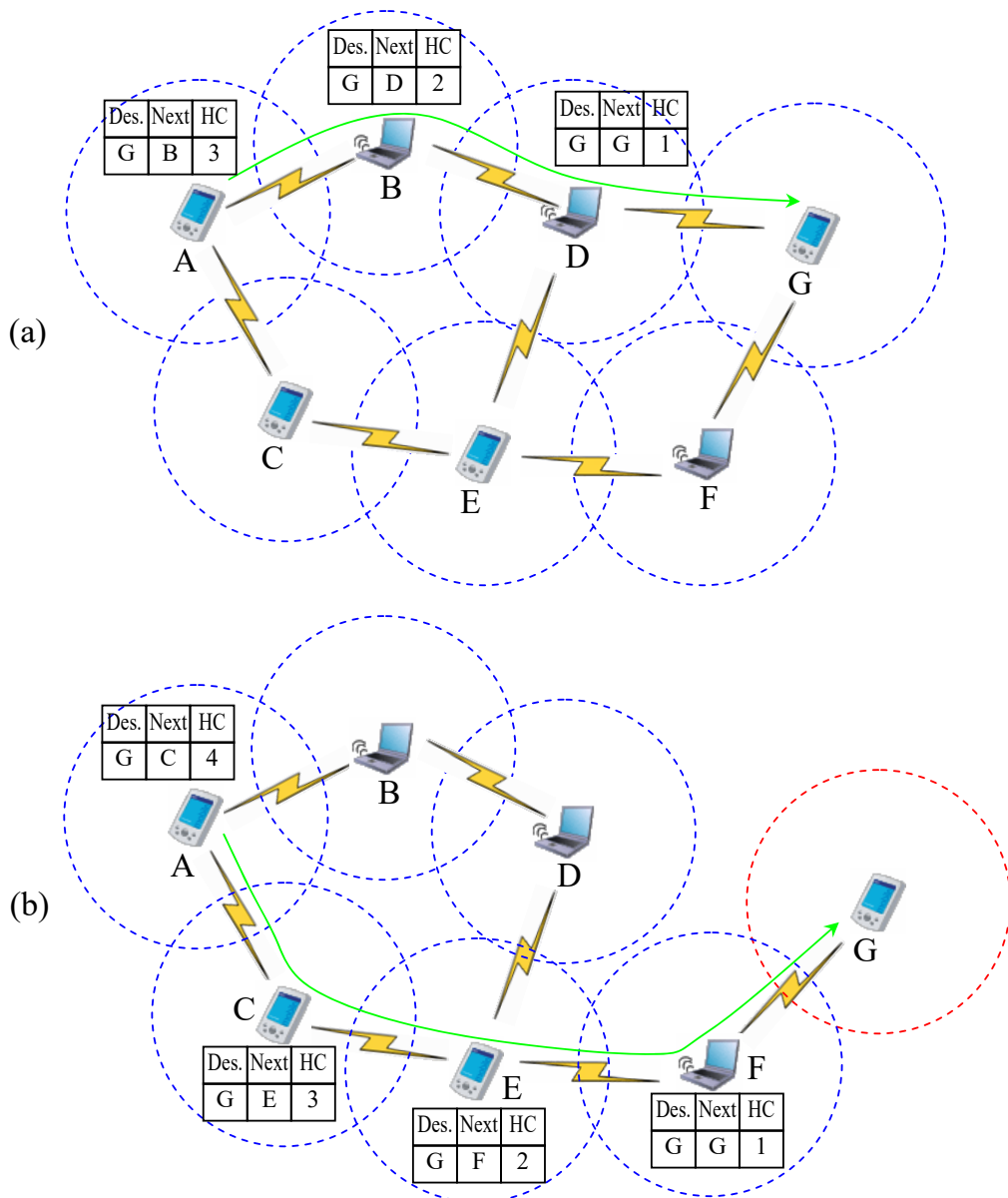
#### 1.1.1. Nguyên lý

Nhu cầu ứng dụng các hệ thống mạng không dây đang ngày càng tăng cao, đặc biệt là trong thời đại internet vạn vật (Internet of Things - IoT). Hiện nay, có bốn mô hình mạng không dây đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, đó là mạng tùy biến di động (MANET), mạng cảm biến không dây (wireless sensor networks - WSN), mạng không dây hình lưới (wireless mesh networks - WMN) [48, 69] và mạng không dây hỗn hợp (hybrid wireless networks) [72]. Trong đó, mô hình mạng MANET đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, như quân sự, y tế, giáo dục, giao thông, hàng không, vận tải tàu biển, nghiên cứu thám hiểm [66]. Đặc trưng cơ bản của mạng MANET là các nút giao tiếp ngang hàng với nhau qua môi trường truyền thông không dây, không có trung tâm điều khiển. Mỗi nút mạng hoạt động vừa như một máy chủ, vừa như một thiết bị đầu cuối, đồng thời cũng thực hiện vai trò của một thiết bị chuyển mạch, định tuyến. Tô-pô mạng biến đổi thường xuyên theo sự di



chuyển của các nút. Vì vậy, bảng định tuyến tại mỗi nút phải được cập nhật thường xuyên để đáp ứng nhu cầu truyền dữ liệu giữa tất cả các nút trong mạng.

Hình 3.1 cho ta thấy một ví dụ về việc cập nhật lại tô-pô và bảng định tuyến trong mạng MANET. Giả sử ở thời điểm hiện tại, tô-pô mạng như ở Hình 3.1a, dựa trên thông tin được lưu trữ trong bảng định tuyến của các nút, lộ trình từ A đến G được xác định là  $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow G$ . Sau một khoảng thời gian, nút G di chuyển đến vị trí mới, tô-pô mạng và bảng định tuyến của các nút được cập nhật lại như ở Hình 3.1b. Lúc này, lộ trình từ A đến G chuyển hướng thành  $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ .



**Hình 1.1.** Một ví dụ cấu hình lại tô-pô và bảng định tuyến trong mạng MANET

### **1.1.2. Đặc điểm**

Từ nguyên lý của mạng MANET, chúng ta có thể thấy được các đặc điểm cơ bản của nó như sau:

Một là, mạng MANET không có một kết cấu hạ tầng cố định: Mạng MANET được tạo thành bởi các nút di động có hỗ trợ các giao diện kết nối không dây. Khi các nút nằm trong vùng phủ sóng của nhau thì các kết nối không dây giữa các nút được hình thành mà không phụ thuộc vào một kết cấu hạ tầng cố định nào. Đặc điểm này cho phép mạng MANET được hình thành một cách dễ dàng và bất cứ nơi đâu. Đây cũng chính là một ưu điểm nổi bật của mạng MANET so với các mô hình mạng không dây khác.

Hai là, mạng MANET hoạt động theo nguyên lý của một mạng ngang hàng: Với mạng MANET, không có nút trung tâm hay hệ thống server để điều khiển hoạt động của toàn mạng. Vì vậy, đối với các nút trong mạng MANET, ngoài chức năng gửi và nhận dữ liệu, các nút còn phải thực hiện các chức năng cơ bản để điều khiển quá trình truyền dữ liệu, bao gồm chức năng chuyển mạch, định tuyến, xử lý báo hiệu, xử lý tắc nghẽn và xử lý lỗi.

Ba là, tô-pô mạng và bảng định tuyến tại mỗi nút là không cố định: Trong trường hợp các nút di chuyển, một số kết nối giữa các nút sẽ bị hủy bỏ do vùng phủ sóng không còn đảm bảo. Trong khi đó, một số kết nối khác được hình thành khi các nút nằm trong vùng phủ sóng của nhau. Kết quả là tô-pô mạng sẽ thay đổi theo sự di chuyển của các nút. Khi tô-pô mạng thay đổi, bảng định tuyến tại các nút mạng phải được cập nhật lại để đảm bảo việc truyền dữ liệu trong mạng được thông suốt.

Bốn là, phạm vi phủ sóng và băng thông phụ thuộc vào công nghệ WLAN: Mạng MANET sử dụng các chuẩn IEEE 802.11 để thiết lập các giao diện kết nối [25, 40]. Do đó, vùng phủ sóng cũng như băng thông của các kênh phụ thuộc vào đặc tính kỹ thuật của các chuẩn này. Ví dụ, với chuẩn IEEE 802.11ac [20], là chuẩn truyền thông không dây mới nhất hiện nay, vùng phủ sóng tối đa là 100 m, tốc độ dữ liệu lên đến 1.73 Gbit/s.

Năm là, năng lượng của các nút mạng hạn chế: Các nút trong mạng MANET sử dụng nguồn nuôi là pin, nên khi tham gia vào mạng chúng sẽ bị hạn chế về năng lượng. Thời gian tồn tại của mỗi nút phụ thuộc vào mức tiêu thụ năng lượng của việc duy trì

kết nối, xử lý các gói dữ liệu và gói điều khiển, xử lý chuyển mạch và định tuyến.

### ***1.1.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng mạng MANET***

Hiệu năng của mạng MANET chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, trong đó các yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất bao gồm năng lượng của các nút, đặc tính di chuyển của các nút, nhiễu phát sinh trên các kết nối không dây, suy hao công suất tín hiệu và giao thức định tuyến được sử dụng.

#### ***1.1.3.1. Năng lượng của các nút***

Năng lượng của các nút trong mạng MANET là một trong những yếu tố có ảnh hưởng lớn đến hiệu năng mạng. Khi một nút bị cạn kiệt năng lượng, nút đó sẽ bị loại bỏ khỏi hệ thống mạng. Các lộ trình đi qua nút đó không còn khả thi, gây ra tình trạng gói dữ liệu bị chặn. Thông thường, khi có một nút hết năng lượng, các gói báo lỗi sẽ được phát đi trong mạng để cập nhật lại tô-pô và bảng định tuyến. Tuy nhiên, với các yêu cầu truyền dữ liệu mà đích đến là nút đã hết năng lượng thì việc truyền dữ liệu chắc chắn là không thành công.

#### ***1.1.3.2. Đặc tính di chuyển của các nút***

Khi các nút di chuyển, tô-pô mạng phải được cấu hình lại theo vị trí mới của các nút. Từ đó, bảng định tuyến tại tất cả các nút cũng được cập nhật lại. Để có thể cập nhật lại tô-pô mạng cũng như bảng định tuyến, các nút mạng phải gửi cho nhau các gói điều khiển để trao đổi các thông tin trạng thái. Điều này làm tiêu tốn một khoảng băng thông trên các kết nối trong mạng. Ngoài ra, nếu các nút mạng di chuyển với tốc độ cao, có một số trường hợp bảng định tuyến không được cập nhật kịp thời để đáp ứng nhu cầu truyền dữ liệu giữa các nút, làm tăng xác suất chặn gói dữ liệu.

Trong một số công trình nghiên cứu đã công bố về kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET, các tác giả đã chứng minh rằng, tốc độ di chuyển của các nút càng tăng, hiệu năng mạng càng suy giảm về mặt xác suất chặn gói dữ liệu, thông lượng và thời gian trễ [13, 39, 44].

#### ***1.1.3.3. Các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các kết nối***

Trong mạng MANET, các nút kết nối với nhau qua môi trường truyền dẫn không dây. Vì vậy, hiệu năng mạng sẽ chịu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các kết nối. Các hiệu ứng này bao gồm: hiệu ứng suy giảm công suất qua môi trường

không khí, nhiễu tích lũy dọc theo lộ trình truyền dữ liệu, nhiễu giao thoa giữa các kênh truyền dẫn đồng thời, hiện tượng mờ dần (fading). Các hiệu ứng vật lý này tác động lên tín hiệu truyền dẫn, làm suy giảm chất lượng tín hiệu truyền dẫn (Quality of Transmission - QoT), làm tăng xác suất gói dữ liệu bị chặn do không đảm bảo QoT, dẫn đến làm giảm hiệu năng mạng, đặc biệt là trong mô hình mạng có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, sử dụng kênh có băng thông lớn.

Đối với mạng MANET đơn kênh, các hiệu ứng vật lý có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu năng mạng là hiệu ứng suy giảm công suất qua môi trường không khí và nhiễu tích lũy dọc theo lộ trình truyền dữ liệu. Vì vậy, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả tập trung nghiên cứu các hiệu ứng này.

#### *1.1.3.4. Giao thức định tuyến được sử dụng*

Trong một hệ thống mạng, các tham số hiệu năng của một lộ trình truyền dữ liệu như thời gian trễ, xác suất nghẽn, chất lượng truyền dẫn phụ thuộc vào cấu trúc của lộ trình đó. Mặt khác, cấu trúc của một lộ trình từ nguồn đến đích được quyết định bởi giao thức định tuyến được sử dụng. Vì vậy, hiệu năng của hệ thống mạng chịu tác động rất lớn bởi các giao thức định tuyến. Tùy theo cấu trúc, đặc tính kỹ thuật của hệ thống mạng mà giao thức định tuyến cần được lựa chọn phù hợp để nâng cao hiệu năng mạng.

## **1.2. Định tuyến trong mạng MANET**

### ***1.2.1. Tổng quan***

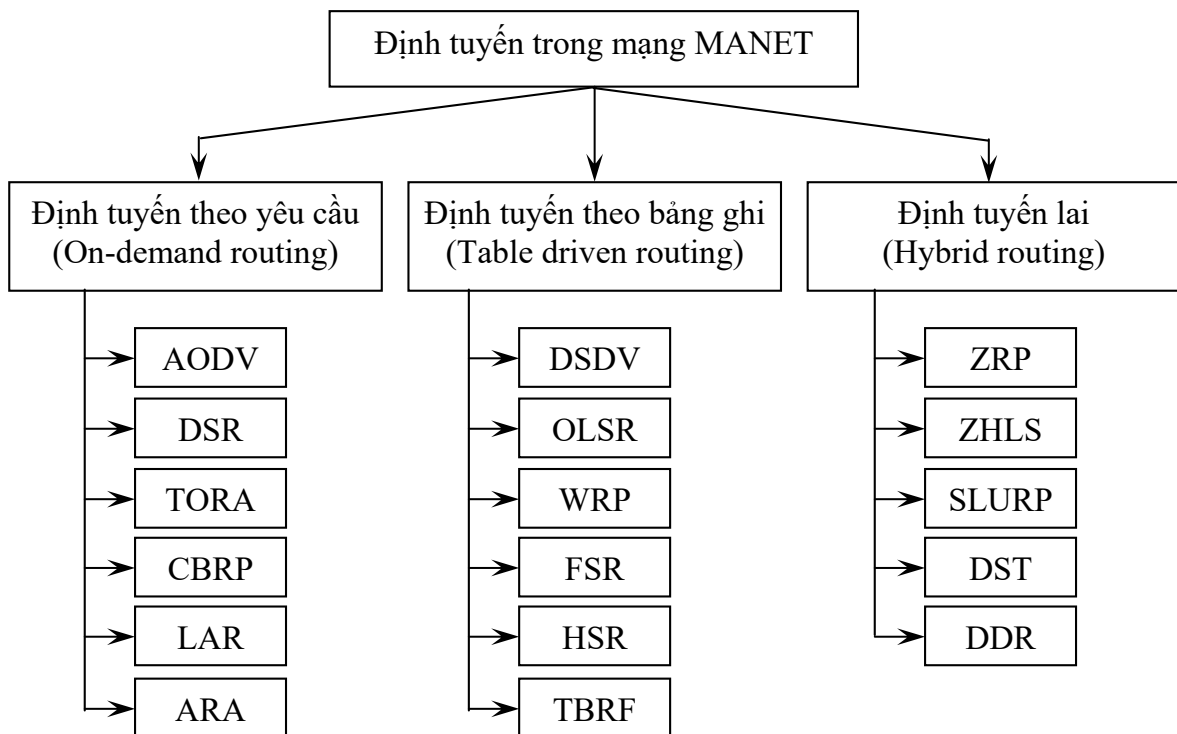
Với việc thay đổi thường xuyên của tô-pô mạng do các nút di chuyển, vấn đề định tuyến giữa các nút trong mạng MANET trở nên khó khăn và phức tạp so với các mô hình mạng truyền thống. Cũng chính nhờ vậy mà các đề tài nghiên cứu về định tuyến trong mạng MANET đã và đang thu hút nhiều nhóm nghiên cứu trong nước cũng như trên thế giới đặc biệt quan tâm.

Khác với các giao thức định tuyến trong mạng có dây cũng như mạng không dây cố định, các giao thức định tuyến trong mạng MANET cần phải thực hiện hai nhiệm vụ, đó là tạo thông tin định tuyến và duy trì thông tin định tuyến. Tạo thông tin định tuyến là giai đoạn tìm lộ trình từ nút nguồn đến nút đích để cập nhật thông tin lộ trình vào bảng định tuyến khi có yêu cầu. Sau khi thông tin lộ trình đã được cập nhật vào

bảng định tuyến, giao thức định tuyến phải thực hiện nhiệm vụ duy trì thông tin này để xác định các thông tin lộ trình trong bảng định tuyến có còn khả thi hay không, vì các nút mạng thường xuyên di chuyển nên thông tin lộ trình trong bảng định tuyến có thể khả thi trong thời điểm này, nhưng lại không khả thi trong thời điểm khác do tô-pô mạng đã thay đổi. Khi một lộ trình không còn khả thi, giao thức định tuyến phải thực hiện lại giai đoạn tạo thông tin định tuyến để tìm lộ trình mới phù hợp với trạng thái mạng hiện hành.

### 1.2.2. Phân loại

Định tuyến trong mạng MANET được phân loại theo một số phương pháp khác nhau, trong đó phương pháp phân loại phổ biến nhất là dựa vào cách thức thiết lập và duy trì thông tin định tuyến tại các nút mạng. Với phương pháp này, các giao thức định tuyến trong mạng MANET được chia thành 3 loại, đó là định tuyến theo bảng (Table Driven Routing), định tuyến theo yêu cầu (On Demand Routing) và định tuyến kết hợp (Hybrid Routing) như cho thấy trong Hình 1.2.



**Hình 1.2.** Phân loại các giao thức định tuyến trong mạng MANET

### *1.2.2.1. Định tuyến theo yêu cầu*

Định tuyến theo yêu cầu là nhóm giao thức định tuyến hiện đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong mạng MANET. Theo nguyên lý hoạt động của nhóm giao thức định tuyến này, các lộ trình truyền dữ liệu sẽ được tạo ra khi có yêu cầu [3, 4]. Khi một nút yêu cầu một lộ trình mới để đến đích, nút đó phải khởi đầu một quá trình khám phá lộ trình (Route Discovery). Quá trình này sẽ kết thúc khi tìm được một lộ trình khả thi, hoặc quá thời gian chờ cho phép mà không tìm được lộ trình. Khi một lộ trình khả thi được tìm thấy và được cập nhật vào bảng định tuyến của các nút, giao thức định tuyến thực hiện duy trì thông tin định tuyến cho đến khi hoặc là lộ trình đó không thể truy nhập được từ nút nguồn, hoặc là không còn khả thi nữa. Với nguyên lý đó, các giao thức định tuyến điều khiển theo yêu cầu không phát quảng bá đến các nút láng giềng về các thay đổi của bảng định tuyến theo thời gian, điều này tiết kiệm được tài nguyên mạng. Vì vậy, nhóm giao thức định tuyến này có thể sử dụng hiệu quả trong các mạng MANET với cấu trúc phức tạp, các nút di chuyển nhiều.

Trong nhóm giao thức định tuyến điều khiển theo yêu cầu, có nhiều giao thức hiện đang được nghiên cứu và ứng dụng phổ biến trong mạng MANET, cơ bản như giao thức định tuyến nguồn động (Dynamic Source Routing - DSR), định tuyến vector khoảng cách theo yêu cầu (Ad Hoc On-Demand Distance Vector - AODV), định tuyến theo thứ tự tạm thời (Temporally Ordered Routing Algorithm - TORA), định tuyến dựa trên cụm (Cluster-Based Routing Protocol CBRP), định tuyến hỗ trợ vị trí (Location Aided Routing - LAR) và định tuyến dựa trên thuật toán tối ưu đàn kiến (Ant Colony Based Routing Algorithm - ARA) [66].

### *1.2.2.2. Định tuyến theo bảng ghi*

Theo nguyên lý của nhóm giao thức định tuyến theo bảng ghi, mỗi nút trong mạng luôn luôn duy trì thông tin định tuyến đến tất cả các nút khác trong bảng định tuyến của nó [72]. Thông tin định tuyến được phát quảng bá trên mạng theo một khoảng thời gian quy định để giúp cho bảng định tuyến luôn luôn cập nhật những thông tin mới nhất. Đây là ưu điểm của nhóm giao thức định tuyến này. Tuy nhiên, việc phát quảng bá định kỳ thông tin định tuyến sẽ gây ra tình trạng nhiễu gởi điều khiển được truyền trên mạng, điều này làm tiêu tốn tài nguyên mạng, đặc biệt là trong các mô hình mạng có nhiều nút và các nút di chuyển nhiều. Vì vậy, nhóm giao thức định tuyến theo bảng

ghi chỉ áp dụng hiệu quả đối với các mô hình mạng MANET vừa và nhỏ, các nút ít di chuyển.

Một số giao thức định tuyến tiêu biểu thuộc nhóm giao thức định tuyến theo bảng ghi bao gồm: giao thức vector khoảng cách theo thứ tự đến đích (Destination Sequenced Distance Vector - DSDV), giao thức định tuyến trạng thái liên kết tối ưu (Optimized Link State Routing - OLSR), giao thức định tuyến không dây (Wireless Routing Protocol - WRP), giao thức định tuyến trạng thái Fisheye (Fisheye State Routing - FSR) và giao thức định tuyến trạng thái phân cấp (Hierarchical State Routing - HSR) [66].

### 1.2.2.3. Định tuyến lai

Định tuyến lai là nhóm giao thức kết hợp nguyên lý của cả định tuyến theo yêu cầu và định tuyến theo bảng ghi [3, 72]. Với nhóm giao thức định tuyến này, toàn bộ hệ thống mạng được chia thành các vùng (zone). Mỗi nút duy trì cả thông tin về kiến trúc mạng trong vùng của nó và thông tin về các vùng láng giềng. Cơ chế định tuyến theo yêu cầu được sử dụng giữa các vùng và cơ chế định tuyến theo bảng ghi được sử dụng cho các nút trong cùng một vùng.

Một số giao thức định tuyến tiêu biểu thuộc nhóm giao thức định tuyến lai bao gồm: giao thức định tuyến trạng thái liên kết phân cấp theo vùng (Zone-based Hierarchical Link State Routing Protocol - ZHLS), giao thức định tuyến vùng (Zone Routing Protocol - ZRP), giao thức định tuyến cập nhật vị trí theo bậc (Scalable Location Updates Routing Protocol - SLURP) và giao thức định tuyến động phân tán (Distributed Dynamic Routing - DDR).

## 1.3. Tình hình nghiên cứu về định tuyến trong mạng MANET

Định tuyến trong mạng MANET đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu trong nước cũng như trên thế giới quan tâm. Hầu hết các công trình nghiên cứu đã công bố tập trung vào việc đề xuất, cải tiến các giao thức định tuyến nhằm nâng cao hiệu năng mạng. Dựa trên mục tiêu của các giao thức định tuyến, các hướng nghiên cứu về định tuyến trong mạng MANET có thể phân thành ba nhóm, đó là định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ (Quality of Service - QoS), định tuyến đảm bảo chất lượng truyền dẫn (Quality of Transmission) và định tuyến cân bằng tải (Load Balancing).

### ***1.3.1. Định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ (QoS)***

Định tuyến QoS trong mạng MANET là kỹ thuật định tuyến mà trong đó các tham số về QoS được xem xét trong quá trình khám phá lộ trình, nhằm đảm bảo QoS của hệ thống mạng. Các tham số về QoS thường được xem xét bao gồm xác suất nghẽn, thông lượng, độ trễ, xác suất lỗi gói. Các tham số này đã được nhóm tác giả trong [62] đánh giá đối với các giao thức định tuyến AODV, DSR và ZRP. Bằng phương pháp mô phỏng trên công cụ Netsim, các tác giả đã cho thấy rằng, giao thức AODV thực thi hiệu quả hơn các giao thức DSR và ZRP đối với các tham số về xác suất lỗi và xác suất gói dữ liệu bị nghẽn.

Trong [1], các tác giả đã cải tiến thuật toán khám phá lộ trình của giao thức định tuyến DSR bằng cách sử dụng tác tử di động. Thuật toán cải tiến được đặt tên là MAR-DSR. Nhóm tác giả trong [1] sử dụng một tác tử có tên FA để gửi kèm theo gói RREQ, một tác tử khác có tên BA gửi kèm theo gói RREP trong quá trình khám phá lộ trình. Một hàm trọng số có chứa tham số về mức độ tắc nghẽn của mỗi nút cũng được đề xuất trong thuật toán MAR-DSR để làm tiêu chí để lựa chọn lộ trình. Trọng số của các kết nối được tác tử FA tính toán trong quá trình khám phá lộ trình. Thông qua mô phỏng, các tác giả đã chứng minh thuật toán MAR-DSR thực thi hiệu quả hơn thuật toán DSR về xác suất chặn gói dữ liệu, thông lượng và độ trễ trong trường hợp mật độ lưu lượng phát sinh tại các nút ở mức trung bình, từ 40 đến 70%. Phương pháp này cũng được áp dụng để đề xuất thuật toán MAR-AODV trong [14], nhưng với một hàm trọng số khác. Hiệu năng của thuật toán MAR-AODV cũng được đánh giá bằng phương pháp mô phỏng đối với các tham số xác suất chặn gói dữ liệu và thông lượng. Kết quả mô phỏng đã cho thấy rằng, MAR-AODV thực thi hiệu quả hơn giao thức AODV.

### ***1.3.2. Định tuyến đảm bảo chất lượng truyền dẫn (QoT)***

Định tuyến QoT là kỹ thuật định tuyến mà trong đó các tham số về QoT được xem xét trong quá trình khám phá lộ trình, nhằm đảm bảo QoT của các lộ trình truyền dữ liệu. Trong thời gian gần đây, kỹ thuật định tuyến QoT trong mạng MANET đã được một số nhóm nghiên cứu triển khai. Có hai phương pháp hiện đang được các nhóm nghiên cứu sử dụng để đưa các điều kiện ràng buộc về QoT vào các thuật toán định tuyến. Một là, ràng buộc QoT thông qua hàm trọng số [46]. Hai là, ràng buộc QoT thông qua các gói điều khiển [5, 24, 51].



### *1.3.2.1. Ràng buộc QoS thông qua hàm trọng số*

Với phương pháp này, hàm trọng số của các kết nối trong mạng được xây dựng có chứa các tham số về QoS, thuật toán định tuyến dựa trên hàm trọng số này để lựa chọn lộ trình. Nhóm tác giả trong [46] đã đề xuất một hàm trọng số phản ánh tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu trung bình WSA (Weighted Signal to noise ratio Average) cho giao thức định tuyến DSDV. Hàm trọng số WSA sử dụng thông tin về SNR được cung cấp bởi lớp vật lý để xác định chất lượng của các kết nối trong mạng. Kết quả mô phỏng đã cho thấy rằng, với việc sử dụng hàm trọng số WSA, hiệu năng của mạng MANET được cải thiện về mặt thông lượng và độ trễ. Trong [35], một giao thức định tuyến được đề xuất cho mạng tùy biến không dây sử dụng các tham số về năng lượng còn lại và chất lượng kết nối để lựa chọn lộ trình. Nhóm tác giả của [35] đã đề xuất một hàm trọng số cho các kết nối (Cost Function - CF). CF bao gồm hai thành phần, chất lượng kết nối (Link Quality - LQ) và năng lượng sẵn sàng (Available Energy - AE). LQ được xác định dựa trên SNR của mỗi kết nối. Bằng phương pháp mô phỏng, các tác giả đã cho thấy rằng hiệu năng mạng được cải thiện về mặt tỷ lệ truyền gói dữ liệu thành công, chi phí khám phá lộ trình và năng lượng của các nút.

Cũng với phương pháp xem xét điều kiện ràng buộc QoS thông qua hàm trọng số, nhóm tác giả trong [29] đã nghiên cứu đề xuất một hàm trọng số phản ánh nhiễu được đặt tên IARM (Interference Aware Routing Metric). Hàm trọng số IARM gồm có hai thành phần, chất lượng các kết nối và tỷ lệ tổn thất gói dữ liệu. Các thành phần này được dự đoán bằng phương pháp thăm dò. Sau đó, hàm trọng số IARM được tích hợp với giao thức OSLR bằng cách chỉnh sửa mô đun tính toán định tuyến của giao thức này. Mức độ cải thiện hiệu năng mạng khi sử dụng hàm trọng số IARM so với hàm trọng số mặc định của giao thức OSLR được các tác giả chứng minh bằng phương pháp mô phỏng trên NS-2 [21, 43]. Các tham số hiệu năng được đánh giá bao gồm trễ trung bình, tỷ lệ chuyển phát gói tin, tỷ lệ tổn thất gói tin và thông lượng trên toàn mạng. Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, với hàm trọng số IARM được đề xuất, hiệu năng mạng cải thiện một cách đáng kể so với giao thức OSLR.

### *1.3.2.2. Ràng buộc QoS thông qua các gói điều khiển*

Với các giao thức định tuyến trong mạng MANET, việc khám phá lộ trình mới được thực hiện bằng cách phát quảng bá gói RREQ và phản hồi gói RREP. Vì vậy, thông

tin về QoT trên các kết nối có thể trao đổi thông qua các gói điều khiển này. Nhóm tác giả trong [5] đã đề xuất một giao thức định tuyến cải tiến của AODV sử dụng mô hình xuyên lớp có xét đến QoT, được đặt tên là SDP (SNR, Delay and Power). Cụ thể, các tác giả đã thêm một trường có tên LC (Link Cost) vào gói RREP. LC chứa ba thành phần, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR), độ trễ (Delay) và thời gian tồn tại của nút (node lifetime). Thời gian tồn tại được xác định bằng nguồn nuôi của nút. Dựa trên giá trị LC trong gói RREP, thuật toán định tuyến sẽ lựa chọn lộ trình có giá trị LC tốt nhất để truyền dữ liệu. Hiệu quả thực thi của giao thức SDP được đánh giá bằng phương pháp mô phỏng, so sánh với giao thức AODV. Kết quả mô phỏng đã cho thấy rằng, giao thức SDP mang lại tỷ lệ truyền gói dữ liệu thành công cao hơn, thông lượng cao hơn và thời gian trễ thấp hơn so với giao thức AODV.

Trong [24], một thuật toán định tuyến có xét đến các tham số SNR và công suất thu (RP - Received Power) đã được đề xuất với mục tiêu lựa chọn lộ trình truyền dữ liệu có SNR và RP tốt nhất. Thuật toán được cải tiến trên nền thuật toán DSR và AODV bằng cách tích hợp thêm hai trường vào gói RREP, với độ dài của mỗi trường là 8 bits để chứa thông tin SNR và RP. Sau đó, dựa trên thông tin của các trường SNR và RP, thuật toán định tuyến sẽ lựa chọn lộ trình có chất lượng tín hiệu truyền dẫn tốt nhất. Để đánh giá hiệu quả thực thi của thuật toán được đề xuất ở trên, các tác giả đã thực thi mô phỏng trên phần mềm OPNET Moduler 14.5 [55]. Các tham số hiệu năng được đánh giá là tỷ lệ truyền gói tin thành công, trễ truyền tải trung bình và chi phí hoạt động. Một phương pháp khác đã được sử dụng cho việc nghiên cứu các thuật toán định tuyến rằng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý trong mạng MANET là đưa các tham số vật lý vào hàm trọng số của các kết nối. Sau đó, thuật toán định tuyến sẽ lựa chọn lộ trình có tổng trọng số nhỏ nhất theo nghĩa chịu ảnh hưởng nhỏ nhất của các hiệu ứng vật lý.

Nhóm tác giả trong [51] cũng đã đề xuất một cơ chế khám phá lộ trình cải tiến của giao thức AODV, được đặt tên là SNR based AODV. Nguyên lý của giao thức SNR based AODV là lựa chọn lộ trình dựa trên thông tin về SNR ở lớp vật lý thay cho tổng số bước truyền của giao thức AODV. Để thực hiện điều này, các tác giả trong [51] đã sử dụng trường *Reserved* của gói RREQ để lưu trữ thông tin về SNR. Trường này có 9 bits, giá trị của tất cả các bit được thiết lập bằng 0 trong giao thức AODV. Với giao thức SNR based AODV, bit đầu tiên của trường *Reserved* được sử dụng để nhận diện

giao thức định tuyến, 1 cho giao thức SNR based AODV và 0 cho giao thức AODV. 8 bits còn lại được sử dụng để lưu trữ giá trị SNR. Bằng phương pháp mô phỏng trên phần mềm OPNET Modeler, các tác giả của [51] đã chứng minh rằng, giao thức SNR based AODV thực thi hiệu quả hơn giao thức AODV truyền thống.

Ngoài các phương pháp đã nêu ở trên, phương pháp sử dụng lý thuyết logic mờ để nghiên cứu các thuật toán định tuyến ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý trong mạng MANET cũng đã được triển khai. Nhóm tác giả trong [58] đã sử dụng lý thuyết logic mờ để đề xuất một thuật toán định tuyến có tên ERP (Efficient Routing Protocol under Noisy Environment). Các hiệu ứng vật lý được xem xét thông qua các tham số cường độ tín hiệu và hệ số nhiễu. Các tác giả đã chứng minh rằng, thuật toán định tuyến ERP mang lại tỷ lệ truyền gói tin thành công và thông lượng cao hơn, giảm số kết nối bị lỗi và giảm tỷ lệ lỗi bit so với các thuật toán định tuyến truyền thống.

### ***1.3.3. Định tuyến cân bằng tải***

Nếu xét về mục tiêu, định tuyến cân bằng tải là kỹ thuật định tuyến mà trong đó tiêu chí phân phối tải lưu lượng đồng đều giữa tất cả các kết nối trong mạng được sử dụng làm tiêu chí lựa chọn lộ trình. Mục tiêu của kỹ thuật định tuyến cân bằng tải là giảm thiểu tình trạng nghẽn cục bộ tại một số kết nối, cũng như tại một số nút trung gian trong mạng. Hiện nay, kỹ thuật định tuyến cân bằng tải được sử dụng phổ biến trong hệ thống mạng có dây cũng như mạng không dây để nâng cao hiệu quả khai thác tài nguyên mạng, đặc biệt là đối với các mô hình mạng có cấu trúc theo tô-pô mắt lưới. Trong mạng MANET, kỹ thuật định tuyến cân bằng tải cũng đã được nhiều nhóm nghiên cứu đặc biệt quan tâm. Trong [44], các tác giả đã đề xuất một giao thức định tuyến cân bằng tải cho mạng tùy biến có tên LMP-DSR (Load balanced Multi-Path Dynamic Source Routing). Giao thức LMP-DSR được cải tiến từ giao thức DSR bằng cách sử dụng kỹ thuật định tuyến đa đường thay cho định tuyến đơn đường. Các tác giả đã trình bày hai cấu trúc dữ liệu trong mỗi nút mạng, đó là bảng định tuyến và bảng lưu lượng. Nút nguồn chứa 5 lộ trình trong bảng định tuyến của nó, các lộ trình này nhận được từ kết quả thực thi thuật toán khám phá lộ trình. Khi lựa chọn lộ trình để truyền dữ liệu, giao thức LMP-DSR theo dõi mức cân bằng tải bằng cách kiểm tra tổng số gói đã được truyền trên một lộ trình đã cho mà nó được lưu trữ trong bảng lưu lượng. Bằng phương pháp mô phỏng, các tác giả đã chứng minh rằng, giao thức LMP-DSR

cải thiện hiệu năng mạng so với giao thức DSR về mặt trễ trung bình, tỷ lệ truyền gói dữ liệu thành công và thông lượng mạng. Trong [39], thuật toán định tuyến đa mức (Multi-level Routing Algorithm - MRA) được đề xuất để cân bằng tải lưu lượng trong mạng tùy biến. Thuật toán MRA sử dụng phương pháp lựa chọn các nút trung gian mà nó có đủ tài nguyên và dung lượng để đến nút đích. Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, thời gian trễ trung bình giảm và việc thiết lập kết nối hiệu quả hơn. Trong [34], các tác giả đã đề xuất giao thức định tuyến có tên LBCAR (load balanced congestion adaptive routing). Giao thức LBCAR sử dụng hai độ đo, đó là mật độ tải lưu lượng và chi phí kết nối kết hợp với lộ trình định tuyến để xác định trạng thái tắc nghẽn. Lộ trình có mật độ tải lưu lượng thấp và thời gian tồn tại cao nhất sẽ được lựa chọn cho việc truyền dữ liệu. Hiệu năng của giao thức LBCAR được so sánh với giao thức AODV [16] và giao thức CRP (Congestion Adaptive Routing Protocol) [17] sử dụng phương pháp mô phỏng. Kết quả đã cho thấy rằng, giao thức LBCAR thực thi hiệu quả hơn AODV về tỷ lệ truyền gói dữ liệu thành công, thời gian trễ trung bình và số gói điều khiển. Tuy nhiên, nếu so với CRP thì tỷ lệ truyền gói dữ liệu thành công và thời gian trễ trung bình gần như giống nhau.

Nhóm tác giả trong [70] đã đề xuất giao thức định tuyến cân bằng tải cho mạng tùy biến di động có tên FMLB (Fibonacci Multipath Load Balancing). Giao thức FMLB sử dụng dãy Fibonacci để lựa chọn lộ trình truyền dữ liệu. Về mặt toán học, Fibonacci là một dãy tuần tự các số mà nó bắt đầu bằng 0 và 1. Mỗi số tiếp theo là tổng của 2 số trước đó. Phương trình toán học của dãy Fibonacci được xác định bởi [71]:

$$f(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } n = 0 \\ 1 & \text{if } n = 1 \\ f(n-2) + f(n-1) & \text{if } n \geq 2 \end{cases} \quad (1.1)$$

Giả sử rằng có  $k$  lộ trình khả thi giữa mỗi cặp nút nguồn - đích. Các lộ trình này được sắp xếp giảm dần theo tổng số bước truyền của nó. Từ đó, giao thức FMLB sẽ gán trọng số từ  $f(1)$  đến  $f(k)$  tương ứng với các lộ trình từ 1 đến  $k$ . Tổng số gói dữ liệu được phân phối cho các lộ trình tương ứng với giá trị fibonacci của nó. Trong [70], các tác giả đã lựa chọn  $k$  bằng 7. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, hiệu năng mạng sử dụng giao thức FMLB được cải thiện so với các giao thức định tuyến phổ biến. Cũng với kỹ thuật định tuyến cân bằng, các tác giả trong [59] đã đề xuất một giao thức định tuyến cân bằng đa đường cho việc điều khiển tắc nghẽn. Giao thức

được đề xuất có tên MLBCC (Multipath Load Balancing technique for Congestion Control). Với giao thức này, các tác giả đã đề xuất một cơ chế điều khiển tắc nghẽn và một cơ chế cân bằng tải. Cơ chế điều khiển tắc nghẽn phát hiện tắc nghẽn tại mỗi nút thông qua tỷ lệ lưu lượng đến và đi. Cơ chế cân bằng tải lựa chọn một nút làm gateway bằng cách sử dụng chi phí của kết nối và chi phí của lộ trình. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, giao thức MLBCC có thể cải thiện hiệu năng mạng nếu xét về số gói điều khiển, tỷ lệ truyền gói dữ liệu thành công, thời gian trễ trung bình và xác suất chặn gói dữ liệu so với các giao thức FMLB trong [70] và giao thức SBMRP (Stable Backbone based Multipath Routing Protocol) trong [60].

#### ***1.3.4. Một số nhận xét và đánh giá***

Qua các công trình nghiên cứu về kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET đã được đề cập ở trên, tác giả rút ra một số nhận xét và đánh giá như sau:

- (i) Kỹ thuật định tuyến QoS trong mạng không dây nói chung, mạng MANET nói riêng đã được triển khai ở bước đầu. Về tình hình nghiên cứu trong nước, các nhóm tác giả chỉ mới tập trung vào mạng không dây cố định WMN (Wireless Mesh Networks), còn các mạng không dây tùy biến như MANET, sensor chưa được triển khai. Về tình hình nghiên cứu trên thế giới, các nhóm tác giả đã triển khai cho cả mạng không dây cố định, MANET và sensor. Hầu hết các công trình nghiên cứu đã công bố tập trung vào việc phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đến hiệu năng mạng.
- (ii) Hầu hết các công trình nghiên cứu đã công bố chỉ đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đối với từng giao thức riêng biệt. Chưa có sự tổng hợp, so sánh giữa các giao thức định tuyến khác nhau để thấy được ưu - nhược điểm của từng giao thức khi hoạt động trong môi trường có sự tác động của các hiệu ứng vật lý.
- (iii) Việc đề xuất các thuật toán định tuyến tối ưu để giảm ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý cũng đã được triển khai. Tuy nhiên, hầu hết các thuật toán được đề xuất là kiểm tra điều kiện ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý sau khi tập lộ trình đã tìm được. Nghĩa là sau khi tìm xong tập lộ trình theo thuật toán truyền thống mới kiểm tra điều kiện ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý. Nếu lộ trình tìm thấy thỏa mãn điều kiện ràng buộc thì gói dữ liệu được

chấp nhận truyền đi. Ngược lại, gói dữ liệu sẽ bị chặn. Phương pháp này có thể sẽ làm tăng xác suất tổn thất gói dữ liệu và tập lộ trình truyền dữ liệu chưa phải là tập lộ trình tốt nhất thỏa mãn các điều kiện ràng buộc vật lý.

- (iv) Về các mô hình mạng được sử dụng cho việc đánh giá hiệu năng, hầu hết các công trình nghiên cứu chỉ đánh giá trên các mô hình mạng tốc độ thấp, chủ yếu là kênh có băng thông 20 MHz của các chuẩn IEEE 802.11 a/b/g. Chưa tập trung vào các hệ thống mạng tốc độ cao, sử dụng kênh của băng thông rộng như 40 MHz, 80 MHz hay 160 MHz của chuẩn IEEE 802.11ac hiện nay. Trong trường hợp hệ thống mạng sử dụng kênh băng thông rộng, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý cần phải được quan tâm, vì băng thông càng rộng thì nhiễu tác động lên kênh truyền càng lớn.
- (v) Vấn đề cảm biến sự thay đổi thường xuyên của các hiệu ứng vật lý trên các tuyến truyền dẫn chưa được xem xét. Đây là vấn đề đặc biệt quan trọng, vì với các mạng tùy biến, tô-pô mạng sẽ thay đổi thường xuyên.
- (vi) Kỹ thuật định tuyến cân bằng tải trong mạng MANET cũng đã được các nhóm nghiên cứu trên thế giới triển khai. Các kết quả nghiên cứu đã chứng minh hiệu năng mạng cải thiện một cách đáng kể về mặt xác suất nghẽn khi sử dụng kỹ thuật định tuyến cân bằng. Tuy nhiên, các điều kiện ràng buộc về QoS chưa được xem xét trong các thuật toán định tuyến cân bằng. Trong trường hợp hệ thống mạng có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, kỹ thuật định tuyến cân bằng có thể làm tăng ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý và thời gian trễ, do các lộ trình đi qua nhiều nút trung gian, nhiều bước truyền. Vì vậy, việc xem xét các điều kiện ràng buộc của chất lượng truyền dẫn trong các thuật toán định tuyến cân bằng tải là điều cần thiết, đặc biệt là đối với hệ thống mạng MANET có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, sử dụng kênh có băng thông lớn.

#### **1.4. Những đóng góp của luận án**

Qua việc phân tích, đánh giá tình hình nghiên cứu trong nước và trên thế giới về kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET và các vấn đề liên quan, tác giả xác định mục tiêu nghiên cứu của đề tài là tập trung phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu đến hiệu năng mạng MANET theo các thuật toán định tuyến khác nhau. Trên cơ sở đó, đề xuất các thuật toán định tuyến cải tiến nhằm

giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đến việc truyền dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng MANET.

Qua quá trình học tập, nghiên cứu thực hiện luận án, trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đã được công bố, luận án có một số đóng góp chính như sau:

- (i) Đề xuất phương pháp xác định các điều kiện ràng buộc của QoS dựa trên mô hình xuyên lớp, sử dụng cho chế khám phá lộ trình của các giao thức định tuyến theo yêu cầu trong mạng MANET.
- (ii) Đề xuất thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS dựa trên tải lưu lượng phân phối đến mỗi lộ trình (LBRQT) cho mạng MANET. Thuật toán định tuyến LBRQT cho phép tìm ra các lộ trình truyền dữ liệu thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS, đồng thời cân bằng tải lưu lượng phân phối đến tất cả các kết nối trong mạng.
- (iii) Đề xuất thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS cho mạng MANET dựa trên thông tin định tuyến của nút nguồn (SLBQT-DSR). Thuật toán SLBQT-DSR cho phép tìm ra lộ trình cân bằng tải đảm bảo QoS để truyền dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng MANET.

## 1.5. Kết luận chương

Trong chương này, tác giả đã trình bày những vấn đề cơ bản về mạng MANET và các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng mạng, trong đó các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET được đi sâu phân tích. Tác giả cũng đã phân tích kỹ tình hình nghiên cứu trong nước và trên thế giới liên quan đến các kỹ thuật định tuyến trong mạng MANET. Đánh giá những kết quả mà các nhà nghiên cứu trong nước và trên thế giới đã đạt được, những vấn đề còn tồn tại cần phải được tiếp tục nghiên cứu. Trên cơ sở đó, tác giả phát biểu tổng quát hóa bài toán cần giải quyết trong đề tài luận án.

Nội dung trọng tâm của luận án tiếp tục được trình bày trong các chương tiếp theo. Chương 2 trình bày các kết quả nghiên cứu về việc phân tích, đánh giá QoS của các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET và ảnh hưởng của nó đến hiệu năng mạng khi sử dụng các giao thức định tuyến theo yêu cầu. Chương 3 và Chương 4 trình bày các thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS, được tác giả đề xuất cho mạng MANET nhằm nâng cao hiệu năng mạng MANET.

## CHƯƠNG 2

# ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN CỦA MẠNG MANET KHI SỬ DỤNG CÁC GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN THEO YÊU CẦU VÀ CÂN BẰNG TẢI

Nội dung chương này trình bày các kết quả nghiên cứu về các hiệu ứng xảy ra ở lớp vật lý mà nó ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu năng mạng MANET, bao gồm suy giảm công suất tín hiệu, nhiễu tích lũy trên các lộ trình, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tỷ lệ lỗi bit. Từ đó, đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng này đến hiệu năng mạng khi sử dụng các giao thức định tuyến khác nhau. Các kết quả nghiên cứu ở chương này là cơ sở để thiết lập các điều kiện ràng buộc về chất lượng truyền dẫn, cũng như việc lựa chọn giao thức định tuyến phù hợp với từng mô hình mạng cụ thể. Đồng thời, làm cơ sở cho việc đề xuất các thuật toán định tuyến đảm bảo chất lượng truyền dẫn ở các chương sau. Các kết quả nghiên cứu cụ thể được trình bày trong 6 phần. Phần 2.1 đi sâu phân tích các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu của mạng MANET. Phần 2.2 trình bày các độ đo về hiệu năng của mạng MANET. Phần 2.3 và 2.4 đi sâu phân tích chất lượng truyền dẫn của các lộ trình khi sử dụng các giao thức định tuyến theo yêu cầu và định tuyến cân bằng tải. Phần 2.5 trình bày các kết quả đánh giá chất lượng truyền dẫn và hiệu năng mạng sử dụng phương pháp mô phỏng. Cuối cùng là kết luận chương, được trình bày chi tiết trong Phần 2.6.

### 2.1. Các hiệu ứng vật lý xảy ra trên lộ trình truyền dữ liệu

#### 2.1.1. Các yếu tố kỹ thuật liên quan

Các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET phụ thuộc vào các giải pháp kỹ thuật được sử dụng tại lớp vật lý và lớp liên kết dữ liệu, cơ bản như các kỹ thuật điều chế tín hiệu, các chuẩn truyền thông không dây. Điều chế là quá trình mã hóa số liệu vào sóng mang để truyền qua môi trường truyền dẫn. Trong mạng truyền thông không dây, các kỹ thuật điều chế khóa dịch pha và khóa dịch biên độ của sóng mang thường được sử dụng. Tùy theo phương thức biến đổi pha và biên độ mà ta có các kỹ thuật điều chế khác nhau như điều chế dịch pha hai mức (Binary



Phase Shift Keying - BPSK), điều chế dịch pha vi sai (Differential Phase Shift Keying - DPSK), điều chế dịch pha 4 mức (Quadrature Phase Shift Keying - QPSK), điều chế biên độ cầu phương (Quadrature Amplitude Modulation - QAM). Các kỹ thuật điều chế này hiện đang được sử dụng phổ biến trong các chuẩn truyền thông không dây IEEE 802.11 [57]. Tùy theo kỹ thuật điều chế được sử dụng mà tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, tỷ lệ lỗi bit là khác nhau.

Ngoài sự phụ thuộc vào kỹ thuật điều chế, các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu còn phụ thuộc vào chuẩn truyền thông được sử dụng. Với mạng MANET, các chuẩn truyền thông được sử dụng là IEEE 802.11a/b/g/n/ac [56]. Đặc tính kỹ thuật cơ bản của các chuẩn này được tóm tắt như trong Bảng 2.1. Ta thấy rằng, tùy theo chuẩn truyền thông được sử dụng mà băng thông kênh có thể khác nhau. Chính vì vậy, nhiễu phát sinh trên các kênh truyền sẽ khác nhau.

**Bảng 2.1.** So sánh các tham số lớp vật lý theo chuẩn IEEE 802.11a/b/g/n/ac [20]

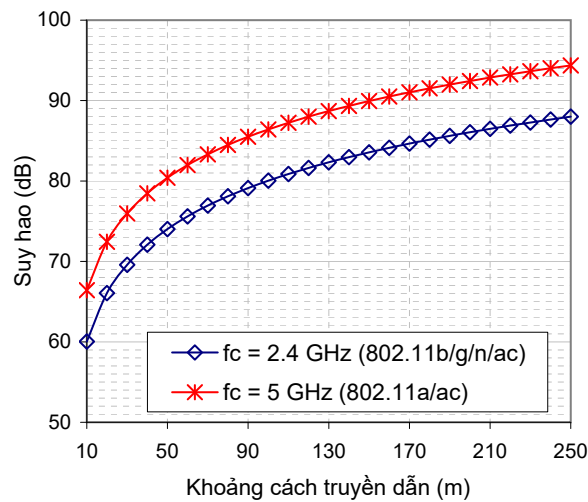
Chuẩn	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	802.11ac
Tần số	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4, 5 GHz
Vùng phủ sóng	124 m	120 m	140 m	250 m	70 - 100 m
Băng thông kênh	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20, 40 MHz	20, 40, 80, 160 MHz
Tốc độ tổ đa	11 Mbit/s	54 Mbit/s	54 Mbit/s	600 Mbit/s	1.73 Gbit/s
Kỹ thuật điều chế	DBPSK, DQPSK, CCK	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	DBPSK, DQPSK, 16-QAM, 64-QAM	64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Kỹ thuật trải phổ	DSSS	OFDM	OFDM	OFDM	OFDM

### 2.1.2. Suy hao công suất qua môi trường dẫn

Khi truyền dữ liệu qua môi trường không gian tự do, công suất tín hiệu suy giảm theo phương trình [20]:

$$L_f = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi f_c d}{c}\right)^2 \quad (2.1)$$

trong đó,  $f_c$  là tần số sóng mang của kỹ thuật điều chế được sử dụng,  $c$  là vận tốc của ánh sáng ( $\approx 3 \times 10^8 m/s$ ) và  $d$  là khoảng cách giữa thiết bị phát và thiết bị thu. Từ phương trình (2.1) ta thấy rằng, suy hao công suất tỷ lệ thuận với bình phương khoảng cách truyền dẫn vì  $f_c$  và  $c$  đều là hằng số. Điều này cho thấy rõ từ kết quả tính toán ở Hình 2.1. Ta thấy rằng, khi khoảng cách truyền dẫn càng lớn thì suy hao công suất càng tăng. Ví dụ, khi dữ liệu truyền qua khoảng cách 90 m, công suất tín hiệu suy hao 79.13 dB nếu tần số sóng mang là 2.4 GHz, tương ứng với các chuẩn IEEE 802.11b/g/n/ac. Nếu sử dụng tần số sóng mang 5 GHz, tương ứng với các chuẩn IEEE 802.11a/ac, suy hao công suất là 85.5 dB. Trong trường hợp khoảng cách truyền dẫn là 250 m, suy hao công suất tín hiệu tăng lên đến 88 dB và 94.38 dB tương ứng với các trường hợp tần số sóng mang là 2.4 GHz và 5 GHz. Từ các kết quả tính toán thu được trên Hình 2.1 ta có thể kết luận rằng, nếu kỹ thuật điều chế sử dụng sóng mang với tần số càng cao thì suy hao công suất tín hiệu càng lớn.



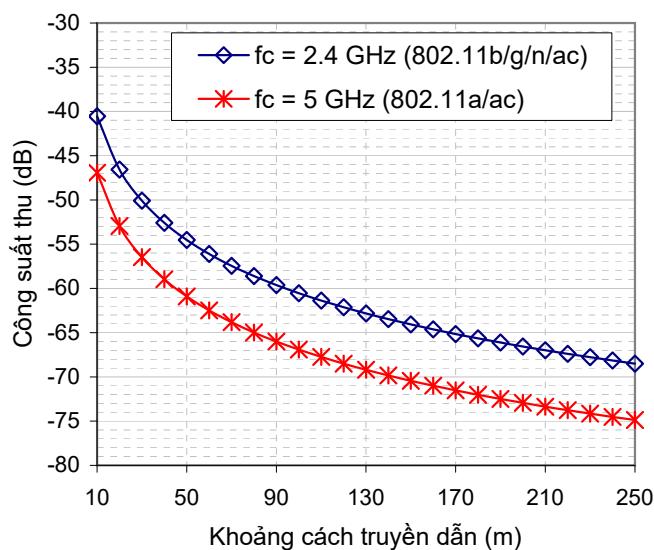
**Hình 2.1.** Suy hao công suất tín hiệu theo khoảng cách truyền dẫn

Vì suy hao tăng dần theo khoảng cách truyền dẫn, nên công suất tín hiệu sẽ giảm dần. Mối quan hệ giữa công suất tín hiệu tại thiết bị phát và thiết bị thu được xác định bởi [20, 42]:

$$P_r = \frac{P_t}{L_f} \quad (2.2)$$

trong đó,  $P_r$  là công suất tín hiệu nhận được tại thiết bị thu,  $P_t$  là công suất phát. Nếu công suất phát và công suất thu được xác định bằng đơn vị dB hoặc dBm thì phương trình (2.2) được viết lại thành:

$$P_r(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{L_f} \right) = 10 \log_{10}(P_t) - 10 \log_{10}(L_f) = P_t(dB) - L_f(dB) \quad (2.3)$$



**Hình 2.2.** Suy hao công suất thu theo khoảng cách truyền dẫn

Xét trường mạng không dây tùy biến sử dụng thiết bị có công suất phát là 19.5 dBm. Từ phương trình (2.3) ta xác định được công suất tín hiệu nhận được tại thiết bị thu theo khoảng cách truyền dẫn như cho thấy trên Hình 2.2. Ta thấy rằng, tùy theo tần số sóng mang được sử dụng mà độ nhạy thu yêu cầu của các thiết bị là khác nhau. Ví dụ, trong trường hợp dữ liệu được truyền qua khoảng cách 250 m, nếu sử dụng tần số sóng mang 2.4 GHz thì độ nhạy thu yêu cầu tối thiểu là -68.5 dBm, nhưng nếu sử dụng sóng mang có tần số 5 GHz thì độ nhạy thu tối thiểu của các thiết bị phải là -75 dBm. Đây là cơ sở cho việc thiết kế hệ thống mạng trong thực tế, cũng như việc thiết lập các tham số để phân tích, mô phỏng ở các phần sau.

### 2.1.3. Nhiễu tích lũy trên đường truyền

Khi truyền dữ liệu qua môi trường truyền thông, các thành phần tín hiệu không mong muốn tác động vào tín hiệu dữ liệu, làm sai lệch tín hiệu, gây ra lỗi trong quá trình truyền dẫn. Các thành phần tín hiệu không mong muốn này được gọi là nhiễu.

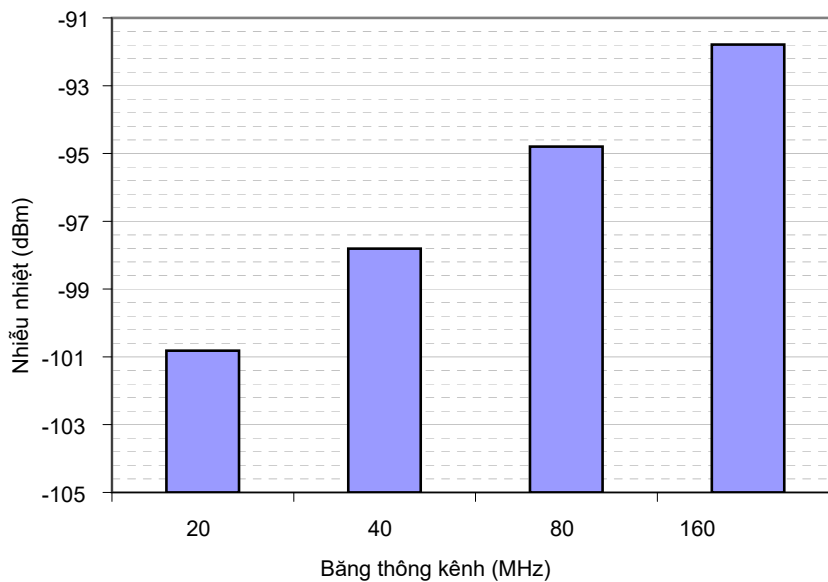
Có bốn thành phần nhiễu thường xuất hiện trong quá trình truyền dữ liệu. Đó là nhiễu nhiệt (thermal noise), nhiễu tạp âm (intermodulation noise), nhiễu xuyên âm (crosstalk) và nhiễu xung [3]. Trong mạng MANET sử dụng chuẩn truyền thông IEEE 802.11, thành phần nhiễu có ảnh hưởng lớn nhất đến chất lượng truyền dẫn của các kênh truyền là nhiễu nhiệt. Nhiễu nhiệt gây ra do sự chuyển động nhiệt của các electron, xuất hiện trên tất cả các thiết bị điện và phương tiện truyền dẫn. Nhiễu nhiệt được phân bố đều trên toàn bộ băng thông của kênh truyền và còn được gọi là nhiễu

trắng (white noise). Công suất nhiễu nhiệt của một kênh truyền được xác định bởi:

$$P_n = K \times T \times B \quad (2.4)$$

trong đó,  $P_n$  (W) là công suất nhiễu nhiệt,  $K = 1.3803 \times 10^{-23} J/K$  là hằng số Boltzmann,  $T$  là nhiệt độ Kelvin và  $B$  (Hz) là băng thông kênh.

Để thấy rõ mức công suất nhiễu nhiệt xuất hiện trên các kênh truyền trong mạng MANET, tác giả tính toán công suất nhiễu trong trường hợp nhiệt độ môi trường ( $300^\circ K$ ) với các kênh truyền có băng thông kênh 20, 40, 80 và 160 MHz. Đây là các kênh truyền được hỗ trợ trong các chuẩn IEEE 802.11a/b/g/n/ac. Kết quả thu được như ở Hình 2.3. Ta thấy rằng, băng thông kênh càng lớn thì công suất nhiễu càng cao. Nếu sử dụng kênh với độ rộng băng thông 20 MHz thì công suất nhiễu nhiệt phát sinh là -101 dBm. Trong trường hợp sử dụng kênh với độ rộng băng thông 160 MHz của chuẩn IEEE 802.11ac, công suất nhiễu nhiệt tăng lên đến -91.7 dBm. Về mặt lý thuyết, một trong những giải pháp để tăng tốc độ truyền dẫn là sử dụng kênh có băng thông lớn. Tuy nhiên, kết quả phân tích trên Hình 2.3 đã cho thấy rằng, băng thông kênh càng lớn thì nhiễu phát sinh càng nhiều. Mặt khác, nhiễu phát sinh càng nhiều thì QoS của kênh truyền càng suy giảm. Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của nhiễu phát sinh trên kênh truyền đến hiệu năng mạng là điều cần thiết nhằm đảm bảo QoS của hệ thống mạng, đặc biệt là hệ thống mạng sử dụng kênh có băng thông lớn.



**Hình 2.3.** Công suất nhiễu nhiệt phát sinh trên các kênh với độ rộng băng thông khác nhau

## 2.2. Hiệu năng mạng MANET

Theo nghĩa chung, hiệu năng mạng là hiệu quả, năng lực và chất lượng hoạt động của một hệ thống mạng. Đánh giá hiệu năng mạng là việc xác định các độ đo phản ánh hiệu quả, năng lực và chất lượng của một hệ thống mạng bằng các phương pháp mô phỏng, mô hình giải tích hoặc thực nghiệm. Trong mạng MANET, các độ đo thường được sử dụng để đánh giá hiệu năng bao gồm xác suất chặn gói dữ liệu, thời gian trễ từ nguồn đến đích, thông lượng, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tỷ lệ bit lỗi.

Trong kỹ thuật định tuyến cân bằng tải, các độ đo về xác suất chặn gói dữ liệu và thông lượng mạng thường được các nhóm nghiên cứu quan tâm. Với kỹ thuật định tuyến đảm bảo chất lượng truyền dẫn, các nhóm nghiên cứu thường tập trung phân tích các độ đo về tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tỷ lệ bit lỗi, vì các độ đo này phản ánh chất lượng truyền dẫn của hệ thống mạng. Trong luận án này, tác giả tập trung nghiên cứu kỹ thuật định tuyến cân bằng tải, đồng thời đảm bảo chất lượng truyền dẫn trong mạng. Vì vậy, các độ đo được tập trung phân tích bao gồm xác suất chặn gói dữ liệu, thông lượng mạng, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tỷ lệ bit lỗi. Việc lựa chọn các độ đo này vừa phản ánh được hiệu quả của việc cân bằng tải, vừa phản ánh được chất lượng truyền dẫn trong toàn mạng.

### 2.2.1. Xác suất chặn gói dữ liệu

Xác suất chặn gói dữ liệu trong toàn mạng (Blocking Probability of Data packets - BPD) được xác định như sau:

$$BPD = \frac{N_b}{N_g} \quad (2.5)$$

trong đó,  $N_g$  là tổng số gói dữ liệu phát sinh trên toàn mạng,  $N_b$  là tổng số gói dữ liệu bị chặn.  $N_b$  gồm hai thành phần chính, đó là chặn do lưu lượng bị nghẽn và chặn do QoS không đảm bảo.

### 2.2.2. Thời gian trễ

Theo lý thuyết, thời gian trễ của một gói dữ liệu là tổng thời gian cần thiết để gói dữ liệu đó truyền thành công từ nút nguồn đến nút đích. Khi dữ liệu truyền qua mạng, thời gian trễ phụ thuộc vào nhiều yếu tố, cơ bản như thời gian xử lý tại các nút mà gói dữ liệu đi qua, trễ hàng đợi, trễ truyền dẫn qua các bước truyền, trễ truyền tải qua môi trường truyền dẫn.

Trong một hệ thống mạng MANET, thời gian trễ là một trong những tham số cơ bản phản ánh hiệu năng mạng. Tùy theo dịch vụ được sử dụng mà yêu cầu về thời gian trễ là khác nhau.

### 2.2.3. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu

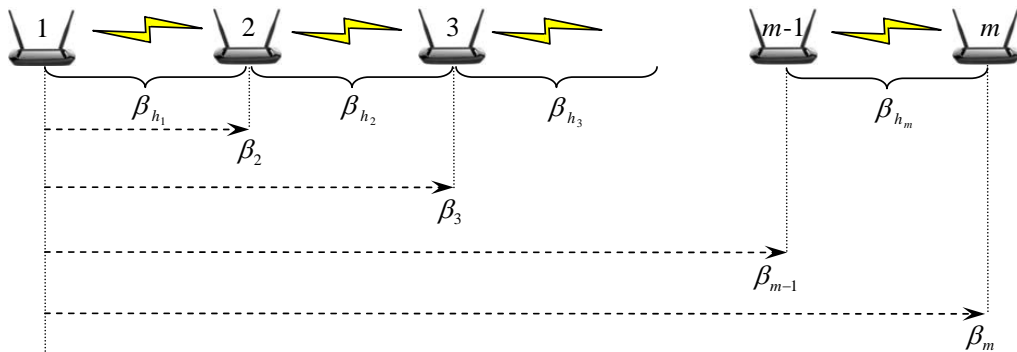
Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (Signal to Noise Ratio - SNR) là một trong những tham số quan trọng để đánh giá chất lượng kênh truyền dữ liệu trong mạng viễn thông, sử dụng cho cả mạng có dây và không dây, được định nghĩa như sau [58]:

$$\beta = 10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_n} \right) \quad (dB) \quad (2.6)$$

trong đó,  $P_s$  là công suất tín hiệu và  $P_n$  là công suất nhiễu. Trong mạng không dây tùy biến, khi dữ liệu truyền qua nhiều nút trung gian, công suất nhiễu tích lũy dọc theo lộ trình truyền dẫn tăng lên làm cho SNR giảm theo phương trình (2.6), nghĩa là chất lượng truyền dẫn (Quality of Transmission - QoT) suy giảm. Để thấy rõ điều này, tác giả phân tích một lộ trình truyền dữ liệu từ nguồn đến đích qua  $m$  nút trung gian ( $m - 1$  bước truyền) với cấu trúc như cho thấy trên Hình 2.4. Trong trường hợp này, các nút trung gian thực hiện chức năng chuyển tiếp các gói dữ liệu để đến đích. Việc chuyển tiếp các gói dữ liệu có thể thực hiện bằng một trong hai cách, có tái tạo tín hiệu (regenerative) hoặc không tái tạo tín hiệu (nonregenerative) [9, 65]. SNR tại nút đích của một lộ trình truyền dữ liệu phụ thuộc vào dạng chuyển tiếp được sử dụng tại các nút trung gian.

#### (i) Trường hợp có tái tạo tín hiệu

Trong trường hợp này, kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (Decode and Forward - DF) được sử dụng [9]. Tín hiệu nhận được tại các nút trung gian được tái tạo trước khi



**Hình 2.4.** Cấu trúc của một lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET qua nhiều bước truyền

truyền đến nút tiếp theo. Để tái tạo tín hiệu, trước tiên, kỹ thuật giải điều chế và giải mã kênh được sử dụng để khôi phục dữ liệu gốc. Sau đó, dữ liệu được mã hóa và điều chế trở lại để tiếp tục truyền đi. Vì tín hiệu được tái tạo tại các nút trung gian, nên vấn đề suy hao công suất và nhiễu trên các bước truyền được xử lý tại các nút này. Vì vậy, SNR tại nút đích của lộ trình truyền dữ liệu được xác định bởi:

$$\beta_m = \min(\beta_{h_1}, \beta_{h_2}, \beta_{h_2}, \dots, \beta_{h_{m-1}}) \quad (2.7)$$

trong đó,  $\beta_m$  là SNR thu được tại nút đích (nút  $m$  trong Hình 2.4),  $\beta_{h_j}$  là SNR của bước truyền thứ  $j$ . Kỹ thuật DF có ưu điểm là giảm nhiễu và suy hao công suất tín hiệu trên lộ trình. Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất của kỹ thuật này là tăng trễ xử lý tại mỗi nút trung gian do tín hiệu phải xử lý nhiều khâu trước khi truyền đi. Do vậy, kỹ thuật DF không phù hợp với các hệ thống mạng tốc độ cao.

(ii) *Trường hợp không tái tạo tín hiệu*

Trong trường hợp này, kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp (Amplify and Forward - AF) được sử dụng [9]. Tín hiệu truyền dẫn được khuếch đại tại mỗi nút trung gian để tiếp tục truyền đi, không thực hiện giải điều chế và giải mã tại các nút này. So với kỹ thuật DF, kỹ thuật AF có ưu điểm là giảm trễ xử lý tại các nút trung gian, nên kỹ thuật này phù hợp với các hệ thống mạng tốc độ cao. Tuy nhiên, vì các nút trung gian thực hiện chức năng khuếch đại tín hiệu trước khi truyền đến nút tiếp theo, nên cả công suất tín hiệu và công suất nhiễu đều được khuếch đại. Vì vậy, kỹ thuật AF có thể làm tăng nhiễu tích lũy trên lộ trình truyền dẫn, dẫn đến SNR giảm dần. Đây là nhược điểm lớn nhất của kỹ thuật này.

Để thấy rõ sự suy giảm của SNR khi sử dụng kỹ thuật AF, tác giả phân tích lộ trình truyền dữ liệu từ nguồn đến đích qua  $m$  nút trung gian với cấu trúc như cho thấy trên Hình 2.4. Theo định nghĩa ta có SNR tại nút đích được xác định bởi:

$$\beta_n = \frac{P_m^{(s)}}{P_m^{(n)}} \quad (2.8)$$

trong đó,  $P_m^{(s)}$  là công suất tín hiệu thu được tại nút đích (nút  $m$  trong Hình 2.4),  $P_m^{(n)}$  là công suất nhiễu tích lũy từ nút nguồn đến nút đích. Tại mỗi nút trên lộ trình ngoại trừ nút nguồn,  $P_m^{(n)}$  gồm có hai thành phần, công suất nhiễu tích lũy từ các bước truyền trước đó ( $P_{m-1}^{(n)}$ ) và công suất nhiễu phát sinh trên bước truyền đang xét ( $P_{h_{m-1}}^{(n)}$ ).  $P_{m-1}^{(n)}$

cũng được khuếch đại tại nút  $m - 1$  và suy hao qua bước truyền  $h_{m-1}$ , do vậy ta có:

$$P_m^{(n)} = P_{m-1}^{(n)} \frac{G_{m-1}}{L_{h_{m-1}}} + P_{h_{m-1}}^{(n)} \quad (2.9)$$

trong đó,  $G_{m-1}$  là hệ số khuếch đại của anten nút  $m - 1$  và  $L_{h_{m-1}}$  là suy hao công suất qua bước truyền  $h_{m-1}$ . Thay (2.9) vào (2.8) ta có:

$$\beta_n = \frac{P_m^{(s)}}{P_{m-1}^{(n)} \frac{G_{m-1}}{L_{h_{m-1}}} + P_{h_{m-1}}^{(n)}} \quad (2.10)$$

Mặt khác, công suất tín hiệu thu được tại nút  $m$  được xác định bởi:

$$P_m^{(s)} = P_{m-1}^{(s)} \frac{G_{m-1}}{L_{h_{m-1}}} \Rightarrow \frac{G_{m-1}}{L_{h_{m-1}}} = \frac{P_m^{(s)}}{P_{m-1}^{(s)}} \quad (2.11)$$

Thay (2.11) vào (2.10) ta có:

$$\beta_n = \frac{P_m^{(s)}}{P_{m-1}^{(n)} \frac{P_m^{(s)}}{P_{m-1}^{(s)}} + P_{h_{m-1}}^{(n)}} \quad (2.12)$$

$$\Leftrightarrow \beta_n = \frac{1}{\frac{P_{m-1}^{(n)}}{P_{m-1}^{(s)}} + \frac{P_{h_{m-1}}^{(n)}}{P_m^{(s)}}} \quad (2.13)$$

$$\Leftrightarrow \beta_n = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{m-1}} + \frac{1}{\beta_{h_{m-1}}}} \quad (2.14)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\beta_n} = \frac{1}{\beta_{m-1}} + \frac{1}{\beta_{h_{m-1}}} \quad (2.15)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\beta_n} = \left( \frac{1}{\beta_{m-2}} + \frac{1}{\beta_{h_{m-2}}} \right) + \frac{1}{\beta_{h_{m-1}}} \quad (2.16)$$

Từ phương trình (2.16), bằng phương pháp truy hồi ta có:

$$\frac{1}{\beta_n} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_{h_1}} + \frac{1}{\beta_{h_2}} + \frac{1}{\beta_{h_3}} + \dots + \frac{1}{\beta_{h_{m-1}}} \quad (2.17)$$

Vì  $\beta_1$  là SNR tại nút nguồn, mà công suất nhiễu tại nút nguồn bằng 0, nên  $\frac{1}{\beta_1} = 0$ . Do vậy, từ (2.17) ta có:

$$\frac{1}{\beta_n} = \frac{1}{\beta_{h_1}} + \frac{1}{\beta_{h_2}} + \frac{1}{\beta_{h_3}} + \dots + \frac{1}{\beta_{h_{m-1}}} \quad (2.18)$$



$$\Leftrightarrow \beta_n = \left( \sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{\beta_{h_i}} \right)^{-1} \quad (2.19)$$

Phương trình (2.19) cho phép xác định SNR của một lộ trình truyền dữ liệu qua  $m$  nút trong trường hợp không có tái tạo tín hiệu tại các nút trung gian. Từ (2.19) ta thấy rằng, SNR tại nút đích giảm dần theo số bước truyền mà các gói dữ liệu đi qua.

#### 2.2.4. Tỷ lệ lỗi bit

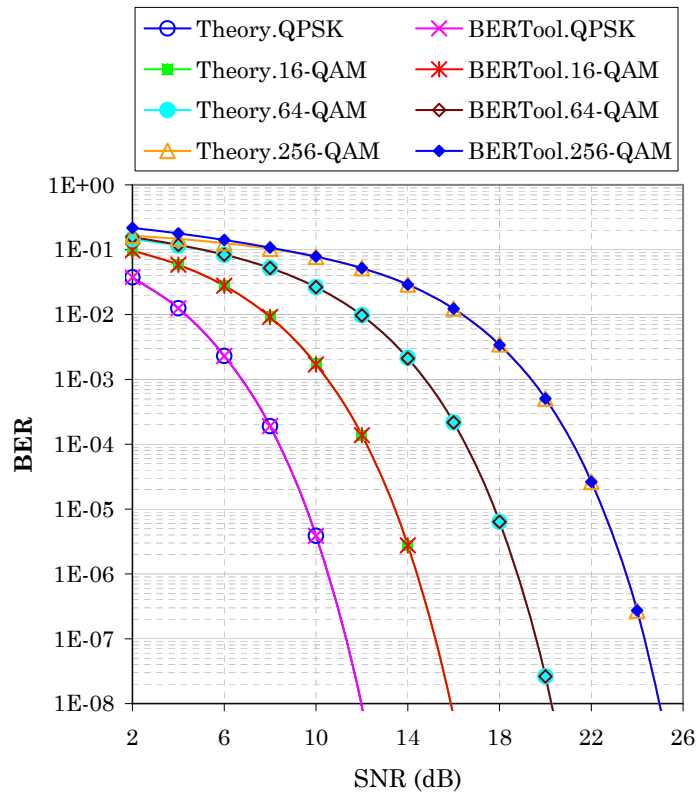
Tỷ lệ lỗi bit (Bit Error Rate - BER) là một trong những tham số hiệu năng quan trọng để đánh giá chất lượng của một kênh truyền dẫn, được xác định bằng tổng số bit lỗi trên tổng số bit truyền. Trong môi trường truyền dẫn không dây, BER phụ thuộc vào nhiều yếu tố, như nhiễu phát sinh kênh truyền, SNR và kỹ thuật điều chế được sử dụng. Sự phụ thuộc của BER theo SNR đối với các kỹ thuật điều chế sử dụng trong mạng không dây được xác định như sau [11]:

$$P_b = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) & \text{Nếu BPSK và QPSK} \\ \frac{2(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_o}} \right) & \text{Nếu M-QAM} \end{cases} \quad (2.20)$$

trong đó,  $P_b$  là tỷ lệ lỗi bit,  $\frac{E_b}{N_o}$  là tỷ số giữa năng lượng của một bit và công suất nhiễu. Trong điều chế số,  $\frac{E_b}{N_o}$  tương đương với SNR.  $\operatorname{erfc}$  là hàm lỗi bù, được xác định như sau:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (2.21)$$

Theo lý thuyết, để xác định BER của một kênh truyền khi biết SNR và kỹ thuật điều chế được sử dụng, ta có thể sử dụng của phương trình (2.20), hoặc sử dụng công cụ BERTool trong phần mềm MATLAB [45]. Trong chuyên đề này, tác giả sử dụng đồng thời cả hai phương pháp, tính toán theo phương trình (2.20) và sử dụng công cụ BERTool, kết quả thu được như trên Hình 2.5. Các kỹ thuật điều chế được xem xét là QPSK, 16-QAM, 64-QAM và 256-QAM. Đây là các kỹ thuật điều chế được sử dụng trong các chuẩn IEEE 802.11a/b/g/n/ac như đã phân tích ở Phần 2.1. Các đồ thị trên Hình 2.5 cho thấy rằng, SNR càng tăng thì BER càng giảm. Ngoài ra, với cùng một giá trị SNR thì BER sẽ khác nhau tùy theo kỹ thuật điều chế được sử dụng. Ví dụ, xét trường hợp SNR là 10 dB, nếu sử dụng kỹ thuật điều chế QPSK thì BER là



**Hình 2.5.** Quan hệ giữa BER và SNR theo các kỹ thuật điều chế khác nhau

$3.87 \times 10^{-6}$ , nhưng nếu sử dụng các kỹ thuật điều chế 6-QAM, 64-QAM và 256-QAM thì các giá trị BER tương ứng là  $1.75 \times 10^{-3}$ ,  $2.65 \times 10^{-2}$  và  $7.85 \times 10^{-2}$ . Như vậy, với các kỹ thuật điều chế đa mức, khi số mức điều chế càng cao thì BER càng tăng, đây là vấn đề cần lưu ý trong các hệ thống mạng không dây tốc độ cao.

### 2.2.5. Một số kết quả tính toán và thảo luận

Trong phần này, tác giả phân tích một lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET qua nhiều nút trung gian để thấy rõ ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đến chất lượng tín hiệu truyền dẫn. Các kết quả đánh giá được thực hiện theo các chuẩn truyền thông không dây khác nhau.

#### 2.2.5.1. Mô hình phân tích

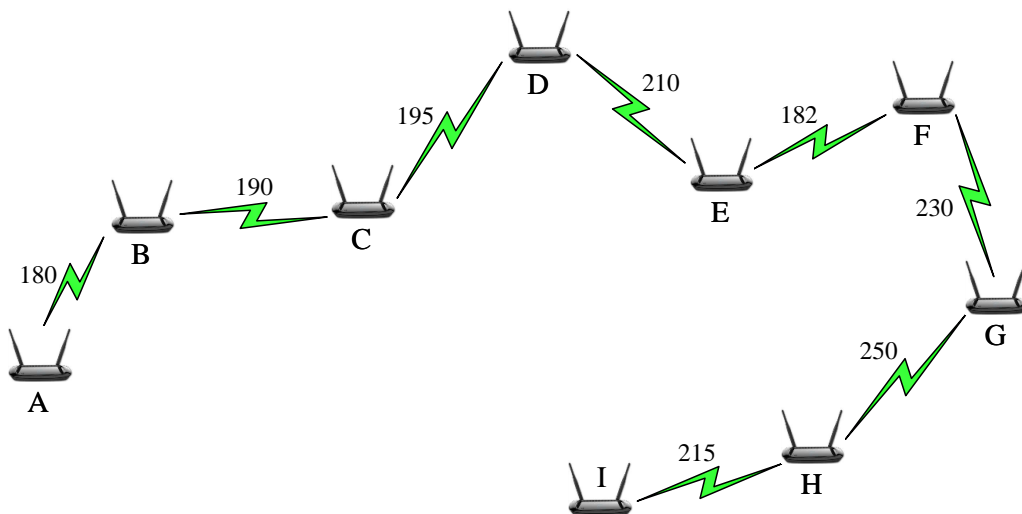
Xét một lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET, từ nút A đến nút I qua 7 nút trung gian là B, C, D, E, F, G và H với cấu trúc như ở Hình 2.6. Các con số ghi trên các kết nối minh họa khoảng cách giữa các nút, được tính bằng mét. Các giả thiết của mô hình được thiết lập như ở Bảng 2.2.

**Bảng 2.2.** Các giả thiết phân tích một lộ trình trong mạng MANET

Tham số	Giá trị
Công suất phát	17 dBm
Độ nhạy thu	-71 dBm
Tần số sóng mang của kỹ thuật điều chế	2.4 và 5 GHz
Băng thông kênh	20, 40, 80 và 160 MHz
Mô hình nhiễu	Nhiều nhiệt
Nhiệt độ phân tích	300 <sup>0</sup> K
Ngưỡng BER	10 <sup>-9</sup>
Giao thức MAC	802.11a/b/g/n/ac

#### 2.2.5.2. Trường hợp sử dụng sóng mang có tần số 2.4 GHz

Như đã phân tích ở Phần 2.1.1, sóng mang có tần số 2.4 GHz được sử dụng trong các chuẩn IEEE 802.11b/g/n/ac. Với các giả thiết như ở Bảng 2.2, theo phương trình (2.6) ta dễ dàng xác định được SNR trên các bước truyền của lộ trình ở Hình 2.6. Kết quả thu được như ở Bảng 2.3. Ta thấy rằng, băng thông của kênh truyền càng lớn thì SNR càng giảm. Cụ thể, nếu sử dụng kênh truyền có băng thông 20 MHz thì SNR lớn nhất là 32.7 dB tương ứng với bước truyền từ A đến B, SNR nhỏ nhất là 29.8 dB tương ứng với bước truyền từ G đến H. Nhưng nếu sử dụng kênh với độ rộng băng thông là



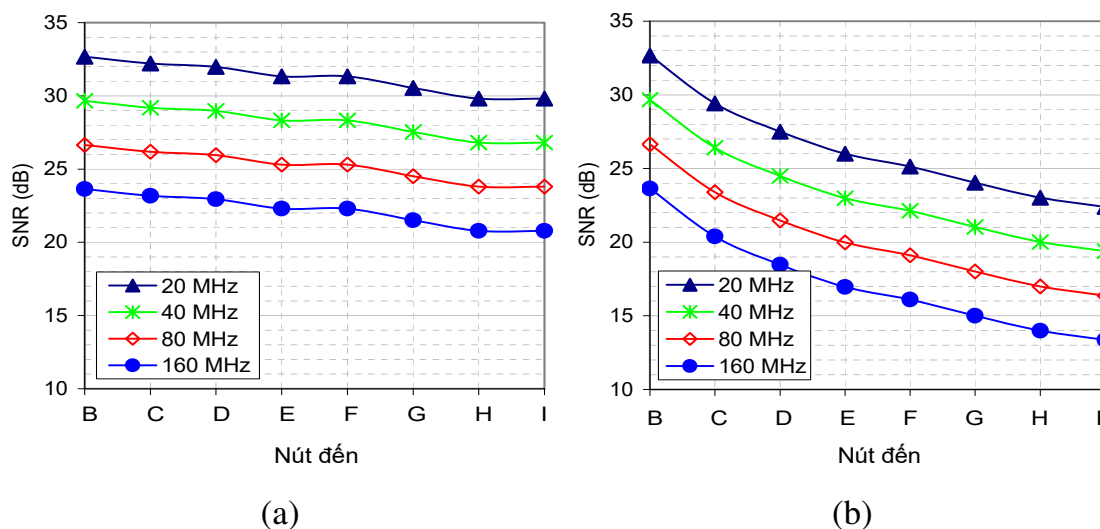
**Hình 2.6.** Một lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET qua 9 nút

**Bảng 2.3.** SNR trên các bước truyền của lộ trình ở Hình 2.6 trong trường hợp sóng mang có tần số 2.4 GHz

Bước truyền	SNR (dB)			
	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
AB	32.7	29.7	26.7	23.6
BC	32.2	29.2	26.2	23.2
CD	32.0	29.0	26.0	22.9
DE	31.3	28.3	25.3	22.3
EF	32.6	29.6	26.6	22.5
FG	30.5	27.5	24.5	21.1
GH	29.8	26.8	23.8	20.8
HI	31.1	28.1	25.1	22.1

40 MHz thì các giá trị này giảm xuống còn 29.7 và 27.5 dB. SNR tiếp tục giảm khi băng thông kênh tăng lên 80 MHz. Đặc biệt, nếu sử dụng kênh 160 MHz thì SNR giảm rất nhiều, giá trị lớn nhất chỉ là 23.6 dB, giá trị nhỏ nhất là 22.1 dB. Nguyên nhân của sự suy giảm này là do khi băng thông kênh càng lớn thì công suất nhiễu nhiệt phát sinh trên kênh truyền càng lớn. Mặt khác, theo phương trình (2.6), SNR tỷ lệ nghịch với công suất nhiễu, nên khi công suất nhiễu càng tăng thì SNR càng suy giảm.

Từ các kết quả thu được trên Bảng 2.3, ta dễ dàng xác định được SNR của lộ trình truyền dữ liệu từ nút A đến nút I. Trong trường hợp nút trung gian có tái tạo tín hiệu, SNR của lộ trình được xác định theo phương trình (2.7), kết quả thu được như cho thấy trên Hình 2.7(a). Ta thấy rằng, SNR giảm dần theo tổng số bước truyền mà dữ liệu đi qua. Cụ thể, xét trường hợp kênh có băng thông 20 MHz, khi mới truyền qua một bước truyền (đến nút B), SNR là 32.67 dB. Nhưng nếu truyền qua 3 bước truyền (đến nút D), SNR giảm xuống 31.97 dB. SNR tiếp tục giảm xuống còn 29.8 dB khi dữ liệu truyền qua 8 bước truyền, nghĩa là đến nút I. Kết quả cũng hoàn toàn tương tự cho các trường hợp băng thông kênh 40 MHz, 80 MHz và 160 MHz. Trong trường hợp các nút trung gian không tái tạo tín hiệu, theo phương trình (2.19) ta xác định được SNR khi truyền qua lộ trình từ A đến I, kết quả thu được như trên Hình 2.7(b). Trong trường hợp này, SNR suy giảm nhiều hơn so với trường hợp có tái tạo tín hiệu (kết quả ở Hình



**Hình 2.7.** Suy giảm SNR qua các bước truyền khi (a) Nút trung gian có tái tạo tín hiệu và (b) Nút trung gian không tái tạo tín hiệu sử dụng sóng mang 2.4 GHz

2.7(a)). Khi truyền đến nút đích (nút I), SNR chỉ còn 22.39, 19.38, 16.37 và 13.36 dB tương ứng với các trường hợp băng thông kênh 20, 40, 80 và 160 MHz.

Xét trường hợp kỹ thuật điều chế 256-QAM được sử dụng. Giả sử ngưỡng BER cho phép là  $10^{-6}$ . Theo kết quả tính toán ở Hình 2.5, SNR yêu cầu tối thiểu để đạt được  $BER = 10^{-6}$  là 23.5 dB. Như vậy, với các kết quả phân tích ở Hình 2.7, có một số trường hợp không thỏa mãn điều kiện ràng buộc về QoT. Cụ thể, trong trường hợp các nút trung gian có tái tạo tín hiệu (kết quả ở Hình 2.7(a)), nếu sử dụng các kênh có băng thông 20, 40 hoặc 80 MHz thì điều kiện ràng buộc về QoT luôn thỏa mãn, nghĩa là SNR luôn lớn hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Tuy nhiên, nếu sử dụng kênh có băng thông 160 MHz, điều kiện ràng buộc về QoT chỉ thỏa mãn khi truyền đến nút F. Nếu truyền đến nút G, SNR giảm xuống còn 21.5 dB, giá trị này nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu. Nếu truyền đến nút H và I, SNR còn giảm nhiều hơn. Phân tích tương tự ta thấy rằng, trong trường hợp các nút trung gian không tái tạo tín hiệu (kết quả ở Hình 2.7(b)), để thỏa mãn ràng buộc về QoT, dữ liệu chỉ được phép truyền đến nút E, D hoặc B tương ứng với các trường hợp kênh truyền có băng thông 40, 80 hoặc 160 MHz.

### 2.2.5.3. Trường hợp sử dụng sóng mang có tần số 5 GHz

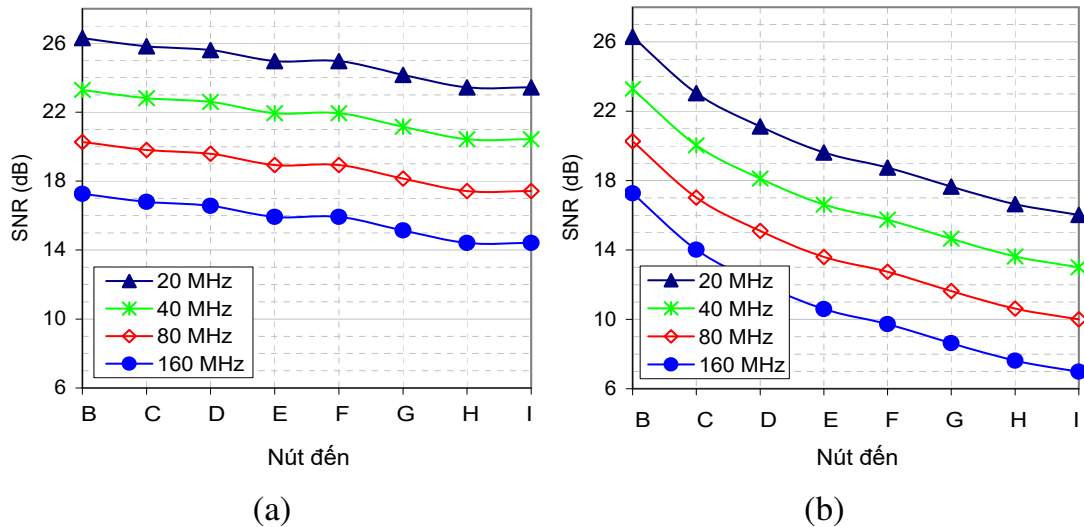
Sóng mang có tần số 5 GHz được sử dụng trong các chuẩn IEEE 802.11a và IEEE 802.11ac như đã phân tích ở Phần 2.1. Trong trường hợp này, suy hao công suất tín

**Bảng 2.4.** SNR trên các bước truyền của lộ trình ở Hình 2.6, sử dụng sóng mang có tần số 5 GHz

Bước truyền	SNR (dB)			
	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz
AB	26.30	23.29	20.28	17.27
BC	25.83	22.82	19.81	16.80
CD	25.60	22.59	19.58	16.57
DE	24.96	21.95	18.94	15.93
EF	26.20	23.19	20.18	17.17
FG	24.17	21.16	18.15	15.14
GH	23.44	20.43	17.42	14.41
HI	24.75	21.74	18.73	15.72

hiệu qua môi trường truyền dẫn lớn hơn so với trường hợp sử dụng sóng mang có tần số 2.4 GHz, nên SNR trên các bước truyền giảm. Theo phương trình (2.6) ta xác định được SNR trên các bước truyền của lộ trình ở Hình 2.6. Các kết quả thu được trong ở Bảng 2.4 cho thấy rằng, băng thông của kênh truyền càng lớn thì SNR càng giảm. Cụ thể, nếu sử dụng kênh truyền có băng thông 20 MHz thì SNR lớn nhất là 26.3 dB tương ứng với bước truyền từ A đến B, SNR nhỏ nhất là 23.44 dB tương ứng với bước truyền từ G đến H. Nhưng nếu sử dụng kênh với độ rộng băng thông là 40 MHz thì các giá trị này giảm xuống còn 23.29 và 20.43 dB. SNR tiếp tục giảm khi băng thông kênh tăng lên 80 MHz. Đặc biệt, nếu sử dụng kênh 160 MHz thì SNR giảm rất nhiều, giá trị lớn nhất chỉ là 17.27 dB, giá trị nhỏ nhất là 14.41 dB. Như vậy, so với trường hợp sử dụng sóng mang có tần số 2.4 GHz, SNR trên các bước truyền giảm trung bình gần 6 dB. Vì vậy, các chuẩn mạng không dây sử dụng sóng mang có tần số 5 GHz thường có phạm vi phủ sóng nhỏ hơn các chuẩn mạng không dây sử dụng sóng mang có tần số 2.4 GHz.

Từ các kết quả thu được trên Bảng 2.4, ta dễ dàng xác định được SNR của lộ trình truyền dữ liệu từ nút A đến nút I theo các phương trình (2.7) và (2.19). Kết quả thu được trên Hình 2.8(a) tương ứng với trường hợp nút trung gian có tái tạo tín hiệu. Ta thấy rằng, SNR giảm dần theo tổng số bước truyền mà dữ liệu đi qua. Cụ thể, xét trường hợp kênh có băng thông 20 MHz, SNR giảm từ 26.29 dB xuống còn 23.44 dB



**Hình 2.8.** Suy giảm SNR qua các bước truyền khi (a) Nút trung gian có tái tạo tín hiệu và (b) Nút trung gian không tái tạo tín hiệu sử dụng sóng mang 5 GHz

khi dữ liệu truyền từ nút A đến nút I. Khi băng thông kênh tăng lên, SNR giảm nhiều hơn. Đặc biệt, nếu sử dụng kênh 160 MHz, SNR chỉ còn 14.41 dB khi truyền đến nút I. Trong trường hợp các nút trung gian không tái tạo tín hiệu, kết quả thu được như trên Hình 2.8(b). Trong trường hợp này, SNR suy giảm nhiều hơn so với trường hợp có tái tạo tín hiệu. Khi truyền đến nút I, SNR chỉ còn 16.01, 13.00, 9.98 và 6.98 dB tương ứng với các trường hợp băng thông kênh 20, 40, 80 và 160 MHz. Với các giá trị SNR này, đảm bảo yêu cầu BER không vượt ngưỡng  $10^{-6}$ , kỹ thuật điều chế có thể sử dụng là QPSK (hay 4-QAM). Còn với các kỹ thuật điều chế QAM ở mức cao hơn không thể sử dụng, vì BER sẽ tăng cao.

### 2.3. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình khi sử dụng các giao thức định tuyến theo yêu cầu

Các kết quả tính toán và phân tích SNR và BER trên một lộ trình ở Phần 2.2.5 đã cho thấy rằng, tùy theo cấu trúc của một lộ trình truyền dữ liệu, tần số sóng mang được sử dụng và băng thông của kênh truyền mà SNR của một lộ trình sẽ khác nhau. Có một số trường hợp, SNR không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS. Vì vậy, việc nghiên cứu, phân tích QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET theo các giao thức định tuyến khác nhau là điều cần thiết, làm cơ sở cho việc xác định các điều kiện ràng buộc của QoS cũng như việc cải tiến các giao thức định tuyến nhằm đảm bảo hiệu năng của hệ thống mạng. Nội dung phần này trình bày các kết quả nghiên cứu

về việc phân tích QoT trên các lộ trình truyền dữ liệu khi sử dụng các giao thức định tuyến DSR và AODV, đánh giá ảnh hưởng của nó đến hiệu năng mạng. Các kết quả nghiên cứu này đã được công bố trong [B8]<sup>1</sup> và [B3]<sup>2</sup>.

### 2.3.1. Nguyên lý cơ bản của các giao thức định tuyến theo yêu cầu

Định tuyến theo yêu cầu (On-Demand Routing Protocol) là lớp giao thức định tuyến hiện đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong mạng tùy biến di động. Theo nguyên lý hoạt động của lớp giao thức định tuyến này, các lộ trình truyền dữ liệu sẽ được tạo ra khi có yêu cầu [3]. Khi một nút yêu cầu một lộ trình mới để đến đích, nút đó phải khởi đầu một quá trình khám phá lộ trình (Route Discovery). Quá trình này chỉ hoàn tất khi đã tìm ra một lộ trình sẵn sàng hoặc tất cả các lộ trình khả thi đều đã được kiểm tra. Khi một lộ trình đã được khám phá và thiết lập, nó được duy trì thông số định tuyến bởi một số dạng thủ tục cho đến khi hoặc là lộ trình đó không thể truy nhập được từ nút nguồn hoặc là không còn khả thi nữa. Với nguyên lý đó, các giao thức định tuyến điều khiển theo yêu cầu không phát quảng bá đến các nút láng giềng về các thay đổi của bảng định tuyến theo thời gian, điều này tiết kiệm được tài nguyên mạng. Vì vậy, lớp giao thức định tuyến theo yêu cầu này có thể sử dụng trong các mạng tùy biến di động với cấu trúc phức tạp, các nút di chuyển nhiều.

Trong lớp giao thức định tuyến điều khiển theo yêu cầu, có hai giao thức hiện đang được nghiên cứu và ứng dụng phổ biến trong mạng MANET, đó là giao thức DSR (Dynamic Source Routing) và giao thức AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector). Đây cũng là hai giao thức được tập trung nghiên cứu trong luận án này.

#### 2.3.1.1. Giao thức DSR

Opt. type	Opt. Data Length	Identification
	Target Address	
	Address [1]	
	Address [2]	
	...	
	Address [n]	

(a)

Opt. type	Opt. Data Len	Last Hop Ext.	Reserved
	Address [1]		
	Address [2]		
	Address [3]		
	...		
	Address [n]		

(b)

**Hình 2.9.** Cấu trúc của gói (a) RREQ và (b) RREP trong giao thức DSR [22]

<sup>1</sup> *Kỷ yếu Hội thảo FAIR'8*, 2015, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, trang 111 - 118.

<sup>2</sup> *Kỷ yếu Hội thảo @ lần thứ XXI*, Thanh Hóa, 27-28/7/2018, trang 162 - 169



Theo nguyên lý hoạt động của giao thức định tuyến DSR [22], khi nút nguồn muốn truyền dữ liệu đến nút đích, trước tiên nút nguồn kiểm tra trong bảng định tuyến của

---

**Thuật toán 2.1:** Thuật toán khám phá lộ trình của giao thức DSR

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một yêu cầu khám phá lộ trình mới từ nút nguồn (S) đến nút đích (D).

**Output:** Một lộ trình mới từ S đến D, hoặc từ chối yêu cầu nếu không tìm được lộ trình.

**Method:**

(1) Bắt đầu tiến trình khám phá lộ trình mới tại nút nguồn (nút  $s$ );

(2) **repeat**

(3)     Phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng;

      //*Tại các nút nhận được gói RREQ (nút  $i$ );*

(4)     **if** (*Trước đó  $i$  chưa nhận gói RREQ này*) **then**

(5)         Thêm một bản ghi vào bảng định tuyến của  $i$  chứa lộ trình ngược về  $s$ ;

(6)         **if** ( *$i$  chưa phải là nút đích (nút  $d$ )*) **then**

(7)             **if** (*Bảng định tuyến của  $i$  không có lộ trình đến  $d$* ) **then**

(8)                 Cập nhật đường ngược về  $s$  trong bảng định tuyến của  $i$ ;

(9)                 Cập nhật lộ trình từ  $s$  đến  $i$  trong gói RREQ;

(10)             **else**

(11)                 Nối lộ trình  $s \rightarrow i$  trong gói RREQ với lộ trình  $i \rightarrow d$  trong bảng định tuyến của  $i$ ;

(12)                 Tạo gói RREP;

(13)                 Cập nhật lộ trình  $s \rightarrow d$  vào gói RREP;

(14)                 Xóa gói RREQ;

(15)                 Gửi gói RREP về  $s$  theo đường ngược;

(16)             **end**

(17)             **else**

(18)                 Tạo gói RREP;

(19)                 Cập nhật lộ trình  $s \rightarrow d$  vào gói RREP;

(20)                 Xóa gói RREQ;

(21)                 Gửi gói RREP về  $s$  theo đường ngược;

(22)             **end**

(23)             **else**

(24)                 Xóa gói RREQ;

(25)                 Kết thúc tiến trình xử lý gói RREQ vừa nhận;

(26)             **end**

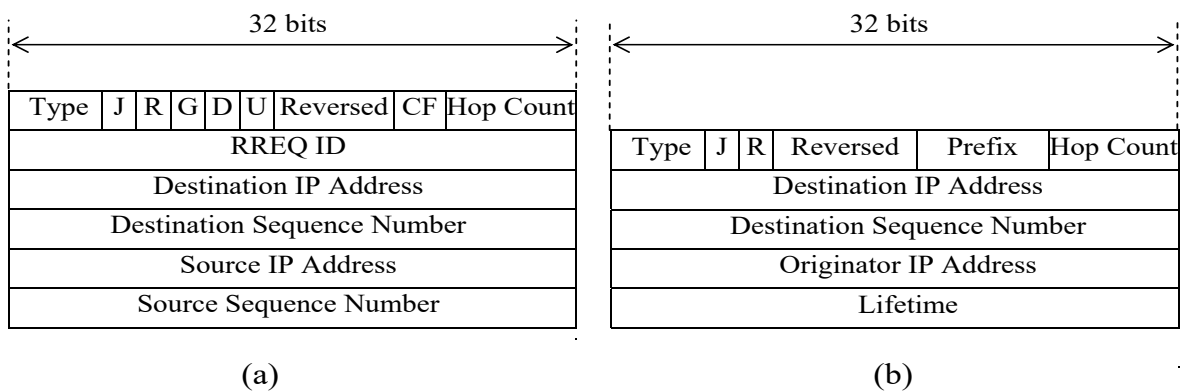
(27) **until** ( *$i$  nhận được gói RREP*) **or** (*Quá thời gian chờ*);

---

nó xem có tồn tại một lộ trình để đến đích hay không. Nếu có, sử dụng lộ trình này để truyền dữ liệu. Ngược lại, thuật toán khám phá lộ trình được thực thi để tìm lộ trình mới cho việc truyền dữ liệu.

Nguyên lý khám phá lộ trình mới được thực thi theo thuật toán 2.1. Để khám phá lộ trình mới, nút nguồn gửi quảng bá gói yêu cầu lộ trình (Route Request Packet - RREQ) với khuôn dạng như ở Hình 2.10a đến tất cả các nút láng giềng của nó. Tại mỗi nút nhận được gói RREQ, các nút này kiểm tra xem gói RREQ này đã được nhận trước đó hay chưa dựa trên giá trị của trường Identification và địa chỉ nút nguồn. Nếu như trước đó đã nhận gói RREQ này thì nút đó sẽ loại bỏ gói RREQ mà không xử lý gì thêm. Ngược lại, nếu trong bảng định tuyến của nút đang xét có thông tin lộ trình để đến đích, nút đang xét gửi gói phản hồi lộ trình (Route Reply Packet - RREP) với khuôn dạng như ở Hình 2.10b về nút nguồn. Ngược lại, gói RREQ được tiếp tục gửi quảng bá đến các nút láng giềng của nút đang xét. Quá trình lặp lại cho đến khi tìm được lộ trình đến nút đích, hoặc quá thời gian chờ cho phép.

Đặc trưng cơ bản của giao thức định tuyến DSR là mỗi nút lưu trữ toàn bộ thông tin lộ trình đến các nút đích. Để thực hiện được điều này, thông tin lộ trình luôn được cập nhật vào gói RREQ và RREP mỗi khi các gói này được xử lý tại các nút mạng. Giao thức DSR sử dụng các trường Address[x] ( $x = 1$  đến  $n$ ) trong các gói RREQ và RREP (Hình 2.10) để lưu trữ thông tin lộ trình. Khi nút nguồn nhận được gói RREP, thông tin toàn bộ lộ trình được cập nhật vào bảng định tuyến của nó. Việc xác định lộ trình để truyền dữ liệu được thực hiện tại nút nguồn. Thông tin lộ trình được lưu trữ vào phần tiêu đề (header) của các gói dữ liệu để truyền đi. Các nút trung gian chỉ cần đọc thông tin định tuyến trong phần tiêu đề gói dữ liệu để xác định nút tiếp theo cần chuyển mạch đến.



**Hình 2.10.** Cấu trúc gói (a) RREQ và (b) RREP trong giao thức AODV [16]

### 2.3.1.2. Giao thức AODV

Tương tự như giao thức DSR, AODV cũng sử dụng cơ chế phát quảng bá gói RREQ để khám phá lộ trình mới khi có yêu cầu [16]. Tuy nhiên điểm khác biệt cơ bản

---

**Thuật toán 2.2:** Thuật toán khám phá lộ trình của giao thức AODV

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một yêu cầu khám phá lộ trình mới từ S đến D.

**Output:** Một lộ trình mới từ S đến D, hoặc từ chối yêu cầu nếu không tìm được.

**Method:**

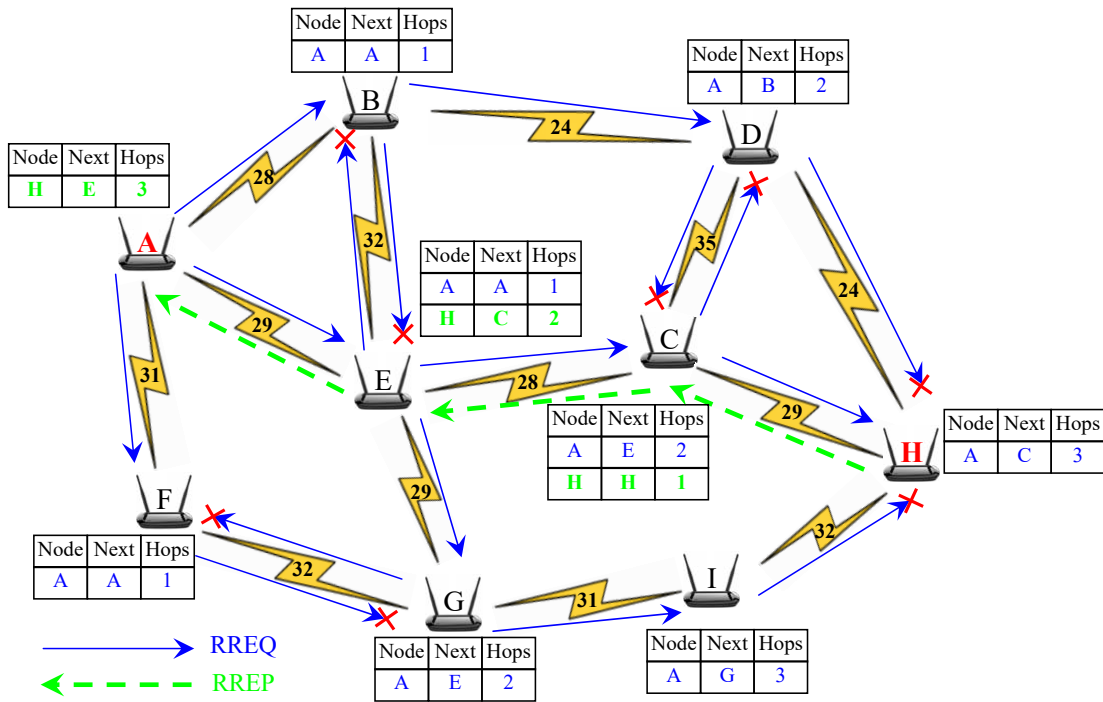
- (1) Bắt đầu tiến trình khám phá lộ trình mới tại nút nguồn (nút  $s$ );
  - (2) **repeat**
  - (3)     Phát gói RREQ đến các nút láng giềng;  
      //Tại các nút nhận được gói RREQ (nút  $i$ );
  - (4)     **if** (Trước đó  $i$  chưa nhận gói RREQ này) **then**
  - (5)         Thêm một bản ghi vào bộ nhớ tạm của  $i$  chứa thông tin lộ trình ngược về  $s$ ;
  - (6)         **if** ( $i$  chưa phải là nút đích (nút  $d$ )) **then**
  - (7)             **if** (Bộ nhớ tạm của  $i$  không có lộ trình đến  $d$ ) **or** (Có lộ trình nhưng DSN trong bộ nhớ tạm nhỏ hơn DSN của RREQ) **then**
  - (8)                 Cập nhật thông tin đường ngược về  $s$  vào bộ nhớ tạm của  $i$ ;
  - (9)                 HopCount  $\leftarrow$  HopCount + 1;
  - (10)             **else**
  - (11)                 Nối lộ trình  $s \rightarrow i$  trong RREQ với lộ trình  $i \rightarrow d$  trong bộ nhớ tạm của  $i$ ;
  - (12)                 Tạo gói RREP;
  - (13)                 Cập nhật đường ngược về  $s$  trong bộ nhớ tạm của  $i$ ;
  - (14)                 Xóa gói RREQ;
  - (15)                 Gửi gói RREP về  $s$  theo đường ngược;
  - (16)             **end**
  - (17)         **else**
  - (18)             Tạo gói RREP;
  - (19)             Cập nhật thông tin đường ngược về  $s$  trong bảng định tuyến của  $i$ ;
  - (20)             Xóa gói RREQ;
  - (21)             Gửi gói RREP về  $s$  theo đường ngược;
  - (22)         **end**
  - (23)     **else**
  - (24)         Xóa gói RREQ;
  - (25)         Kết thúc tiến trình xử lý gói RREQ vừa nhận;
  - (26)     **end**
  - (27) **until** ( $i$  nhận được gói RREP) **or** (Quá thời gian chờ);
-

của giao thức AODV so với DSR là việc lưu trữ thông tin định tuyến tại mỗi nút mạng. Bảng định tuyến của mỗi nút chỉ lưu trữ thông tin đến nút tiếp theo, mà không lưu trữ toàn bộ lộ trình đến đích như DSR. Ngoài ra, AODV sử dụng thêm trường số thứ tự đích (Destination Sequence Number - DSN) để biểu diễn “độ mới” của mỗi lộ trình, tránh định tuyến lặp. DSN được cập nhật khi một nút nhận được thông tin mới hơn từ các gói điều khiển. Mỗi nút sẽ duy trì một DSN độc lập. Để đảm bảo rằng thông tin về lộ trình đến đích là mới, mỗi nút chỉ cập nhật thông tin từ các gói RREQ, RREP và RRER khi giá trị DSN lưu trữ trong gói lớn hơn giá trị DSN hiện tại của nó.

Nguyên lý khám phá lộ trình sử dụng giao thức AODV được thực thi theo thuật toán 2.2. Trước tiên, nút nguồn tạo và truyền quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng của nó. Tại mỗi nút nhận được gói RREQ, dựa trên giá trị của trường RREQ\_ID và địa chỉ nút nguồn để xác định xem gói RREQ này đã được nhận trước đó hay chưa. Nếu trước đó đã nhận gói RREQ này thì gói RREQ bị loại bỏ. Ngược lại, nếu trong bảng định tuyến của nó có thông tin lộ trình đến đích, nút đang xét gửi gói phản hồi lộ trình RREP về nút nguồn. Ngược lại, gói RREQ được tiếp tục gửi quảng bá đến các nút láng giềng của nút đang xét. Khác với giao thức DSR, giao thức AODV sử dụng trường DSN để đảm bảo “độ mới” của lộ trình. Một nút sẽ tăng DSN của nó trước khi gửi gói RREQ, trước khi gửi gói RREP hoặc khi nhận được thông tin về trạng thái kết nối đến bước truyền tiếp theo của lộ trình đến đích bị lỗi.

### 2.3.2. *Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình*

Theo nguyên lý khám phá lộ trình của các giao thức định tuyến theo yêu cầu như mô tả ở Phần 2.4.1, trọng số của các lộ trình tìm được là tổng số bước truyền. Vì vậy, trong một số trường hợp, lộ trình tìm được chưa phải là lộ trình có QoS tốt nhất. Thậm chí có một số trường hợp lộ trình tìm được không thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS. Để thấy rõ điều này, tác giả xét một ví dụ như ở Hình 2.11 với giao thức định tuyến AODV được sử dụng. Xét trường hợp nút A muốn khám phá lộ trình mới đến nút H. Giả sử rằng ở thời điểm hiện tại, bảng định tuyến của tất cả các nút là rỗng. Để khám phá lộ trình mới, nút A phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng của nó là B, E và F. Khi nhận được gói RREQ, các nút B, E và F sẽ cập nhật đường ngược về nút nguồn (nút A) vào bảng định tuyến của nó. Ví dụ, nút B sẽ cập nhật thêm một bản ghi [A, A, 1] vào bảng định tuyến của nó. Bản ghi này có ý nghĩa nút nguồn là A, nút tiếp theo để đi đến nút nguồn là A, tổng số bước truyền là 1. Vì các nút B,



**Hình 2.11.** Một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng giao thức định tuyến AODV

E và F chưa nhận gói RREQ này trước đó, nên các nút này sẽ tiếp tục chuyển tiếp gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng của nó, ngoại trừ nút A là nút đã gửi gói RREQ cho các nút này. Tại nút E, khi nút này nhận được gói RREQ từ nút B, nút E sẽ loại bỏ gói RREQ vì trước đó, nút E đã nhận gói RREQ này từ nút A. Tại nút D, khi nút này nhận được gói RREQ từ nút B, nút D sẽ cập nhật thêm bản ghi [A, B, 2] để lưu trữ lộ trình ngược về nút A vào bảng định tuyến của nó. Bản ghi này có ý nghĩa nút nguồn là A, nút tiếp theo để đi đến nút nguồn là B, tổng số bước truyền là 2. Hoàn toàn tương tự cho tất cả các nút còn lại. Đến khi nút H nhận được gói RREQ từ nút C, vì H là nút đích nên gói RREP được tạo và gửi phản hồi về nút nguồn theo lộ trình ngược lại. Kết quả là lộ trình  $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$  được tìm thấy với tổng số bước truyền là 3.

Giả sử ở thời điểm hiện tại, nút F muốn khám phá lộ trình mới đến nút H. Nút F phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng của nó, đó là các nút A và G. Tại nút A, khi nút này nhận được gói RREQ từ nút F, vì nút A tìm thấy một bản ghi chứa lộ trình đang còn khả thi để đến H trong bảng định tuyến của nó là [H, E, 3], nên nút A sẽ tạo gói RREP và gửi phản hồi về nút F để trả lời đã tìm thấy lộ trình để đến H. Kết quả là lộ trình  $F \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$  được tìm thấy với 4 bước truyền.

Với kết quả khám phá lộ trình như trên, giả sử rằng nguyên lý hoạt động của tất cả các nút là khuếch đại và chuyển tiếp [7, 8, 37]. Theo phương trình (2.19) ta có, SNR

của lộ trình  $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$  là 23.87 dB và SNR của lộ trình  $F \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$  là 21.1 dB. Xét trường hợp kỹ thuật điều chế 128-QAM được sử dụng và BER yêu cầu là  $10^{-9}$ . Theo lý thuyết về mối quan hệ giữa BER và SNR như đã phân tích ở Phần 2.2.4, để BER đạt được  $10^{-9}$  thì SNR yêu cầu tối thiểu phải là 24 dB. Như vậy, cả hai lộ trình tìm được ở trên đều không thỏa mãn điều kiện ràng buộc về chất lượng truyền dẫn, vì SNR của các lộ trình này đều nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu (24 dB). Với tô-pô ở Hình 2.11 ta thấy rằng, từ A đến H có thể sử dụng lộ trình  $A \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow H$ . Mặc dù tổng số bước truyền của lộ trình này là 4, nhưng SNR là 24.1 dB. Giá trị này thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT, đồng thời tốt hơn SNR của lộ trình 3 bước truyền mà  $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$  mà giao thức AODV đã tìm thấy.

Các kết quả phân tích ở trên cho ta thấy rằng, với các giao thức định tuyến theo yêu cầu, có một số trường hợp lộ trình tìm được không thỏa mãn QoT theo yêu cầu. Vì vậy, QoT của các lộ trình tìm được là điều cần phải được xem xét trong các thuật toán định tuyến. Đặc biệt là trong các hệ thống mạng MANET với vùng diện tích rộng, mật độ nút cao. Ảnh hưởng của QoT đến hiệu năng mạng được thấy rõ thông qua phương pháp mô phỏng, được trình bày chi tiết ở các phần tiếp theo dưới đây.

## **2.4. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình khi sử dụng các giao thức định tuyến cân bằng tải**

### **2.4.1. Nguyên lý cơ bản của kỹ thuật định tuyến cân bằng tải**

Nếu xét về mục tiêu, định tuyến cân bằng tải là kỹ thuật định tuyến mà trong đó tiêu chí phân phối tải lưu lượng đồng đều giữa tất cả các kết nối trong mạng được sử dụng làm tiêu chí lựa chọn lộ trình. Mục tiêu của kỹ thuật định tuyến cân bằng tải là giảm thiểu tình trạng nghẽn cục bộ tại một số kết nối, cũng như tại một số nút trung gian trong mạng.

Hiện nay, kỹ thuật định tuyến cân bằng tải được sử dụng phổ biến trong hệ thống mạng có dây cũng như mạng không dây để nâng cao hiệu quả khai thác tài nguyên mạng, đặc biệt là đối với các mô hình mạng có cấu trúc theo tô-pô mắt lưới.

### **2.4.2. Các phương pháp định tuyến cân bằng**

Có hai phương pháp để thực hiện kỹ thuật định tuyến cân bằng tải. Đó là phương pháp cân bằng tải đơn đường và cân bằng tải đa đường [64].

#### 2.4.2.1. Cân bằng tải đơn đường

Với phương pháp này, bảng định tuyến của mỗi nút chỉ lưu trữ thông tin của một lộ trình đến mỗi nút đích. Lộ trình này là lộ trình duy nhất được sử dụng cho việc truyền dữ liệu. Như vậy, việc cân bằng tải phải được thực hiện trong quá trình khám phá lộ trình, thiết lập bảng định tuyến. Phương pháp này thường được thực hiện bằng cách thiết lập các hàm trọng số phản ánh được tải lưu lượng trên các kết nối. Sau đó, thuật toán định tuyến dựa trên hàm trọng số này để lựa chọn lộ trình cân bằng tải.

#### 2.4.2.2. Cân bằng tải đa đường

Cân bằng tải đa đường là phương pháp phổ biến, thường được sử dụng trong các thuật toán định tuyến cân bằng tải. Với phương pháp này, thuật toán định tuyến sẽ tìm  $K$  lộ trình có trọng số nhỏ nhất giữa mỗi cặp nút nguồn - đích. Sau đó, lựa chọn một trong số  $K$  lộ trình này để truyền dữ liệu. Tùy theo phương thức chọn lộ trình để truyền dữ liệu mà phương pháp cân bằng tải đa đường được phân thành các loại khác nhau. Đó là phương pháp chọn lộ trình ngẫu nhiên, chọn lộ trình tuần tự và chọn lộ trình theo một quy luật định trước.

Với phương pháp chọn lộ trình ngẫu nhiên, thuật toán định tuyến tìm  $K$  lộ trình giữa mỗi cặp nút nguồn - đích. Khi có yêu cầu truyền dữ liệu, một lộ trình trong số  $K$  lộ trình được chọn ngẫu nhiên để truyền dữ liệu. Ưu điểm chính của phương pháp này là thực thi đơn giản, nhưng ngược lại, nhược điểm của nó là hiệu quả cân bằng tải không cao. Vì lộ trình truyền dữ liệu được chọn ngẫu nhiên nên sẽ có trường hợp, lộ trình được chọn có bước truyền nào đó đang bận, hoặc tải lưu lượng cao, dẫn đến tình trạng gói dữ liệu bị chặn.

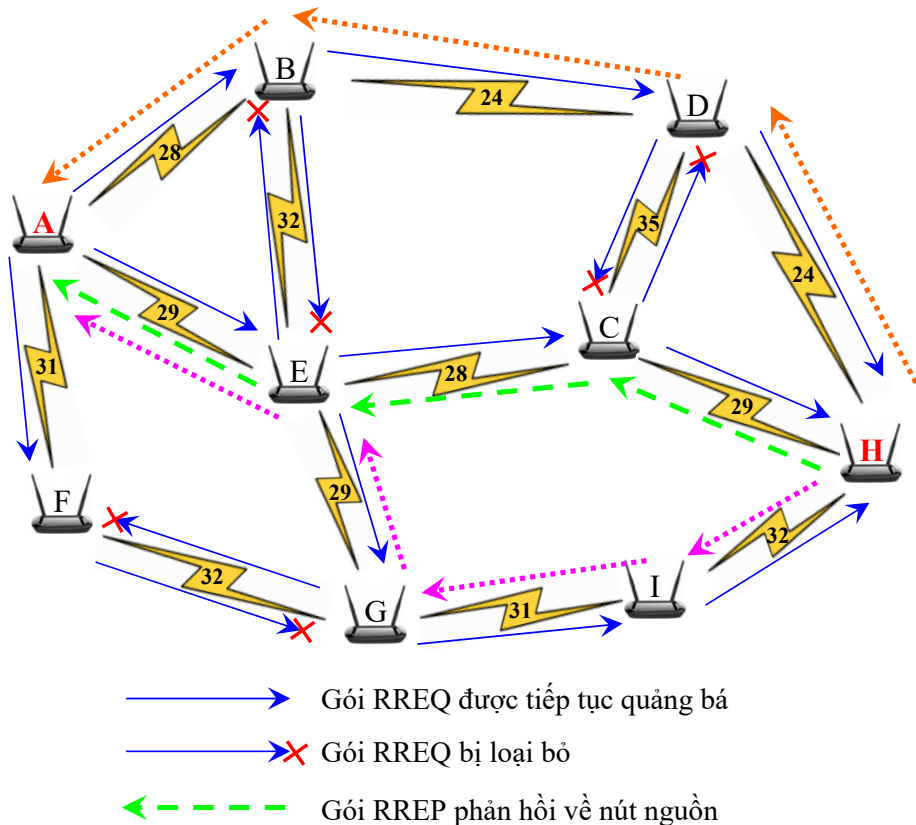
Với phương pháp chọn lộ trình tuần tự,  $K$  lộ trình giữa mỗi cặp nút nguồn - đích được gán số thứ tự từ 1 đến  $k$ . Việc lựa chọn lộ trình để truyền dữ liệu được thực hiện theo trình tự từ 1 đến  $k$ . Như vậy, với phương pháp chọn lộ trình tuần tự, tất cả  $K$  lộ trình có vai trò như nhau, cùng được phân phối tải lưu lượng giống nhau mà không quan tâm đến đặc điểm, cấu trúc của mỗi lộ trình. Phương pháp này cũng có ưu điểm là thực thi đơn giản. Tuy nhiên, nhược điểm của nó là không hiệu quả trong trường hợp tồn tại các lộ trình qua nhiều bước truyền trong số  $K$  lộ trình. Các lộ trình này tiêu tốn nhiều tài nguyên mạng, vì phải sử dụng nhiều kết nối hơn cho việc truyền dữ liệu.

Với phương pháp chọn lộ trình theo một quy luật định trước, thuật toán định tuyến

đưa ra một quy luật để phân phối tải lưu lượng lên các lộ trình. Ví dụ như, lộ trình có ít bước truyền hơn được ưu tiên sử dụng nhiều hơn, hoặc là gán tỷ lệ định trước cho mỗi lộ trình để phân phối lưu lượng. Đây là phương pháp được nhiều nhà nghiên cứu về kỹ thuật định tuyến cân bằng đặc biệt quan tâm. Vì hiệu quả của nó cao hơn các phương pháp trước.

### 2.4.3. Chất lượng truyền dẫn của các lộ trình

Định tuyến cân bằng tải là một trong những kỹ thuật định tuyến tối ưu để nâng cao hiệu năng mạng. Với kỹ thuật định tuyến cân bằng tải, tình trạng nghẽn cục bộ tại một số kết nối cũng như tại một số trung gian được giảm thiểu nhờ lưu lượng được phân phối đồng đều cho tất cả các kết nối trong mạng. Các công trình nghiên cứu [44, 39, 34, 59, 70] đã chứng minh rõ điều này. Tuy nhiên, trong trường hợp hệ thống mạng có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, kỹ thuật định tuyến cân bằng có thể làm giảm chất lượng truyền dẫn trên một số lộ trình, do có nhiều lộ trình đi qua nhiều nút trung gian, nhiều bước truyền.



**Hình 2.12.** Một ví dụ về định tuyến đa đường cân bằng tải trong mạng MANET



Để thấy rõ nhận định trên, tác giả xét một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng kỹ thuật định tuyến cân bằng tải như ở Hình 2.12. Xét trường hợp thuật toán định tuyến cân bằng tải FMLB [70] được sử dụng. Nguyên lý hoạt động của thuật toán FMLB là tìm  $K$  lộ trình khả dụng giữa mỗi cặp nút nguồn - đích. Sau đó, các lộ trình được chọn để truyền dữ liệu theo quy luật của dãy Fibonacci [71]. Xét trường hợp nút A muốn truyền dữ liệu đến nút H, thuật toán định tuyến FMLB được sử dụng với  $K$  bằng 3. Theo nguyên lý khám phá lộ trình bằng cách phát quảng bá gói RREQ, nhận phản hồi gói RREP như minh họa ở ví dụ phần 2.4.3, 3 lộ trình khả dụng được tìm thấy là  $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$ ,  $A \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow H$  và  $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow H$ . SNR của các lộ trình này lần lượt là 23.86, 24.04 và 20.2 dB. Xét trường hợp kỹ thuật điều chế 128-QAM được sử dụng và BER yêu cầu là  $10^{-9}$ . Theo lý thuyết về mối quan hệ giữa BER và SNR như đã phân tích ở Phần 2.2.4, để BER đạt được  $10^{-9}$  thì SNR yêu cầu tối thiểu phải là 24 dB. Như vậy, trong 3 lộ trình trên, chỉ có lộ trình thứ hai ( $A \rightarrow E \rightarrow G \rightarrow I \rightarrow H$ ) thỏa mãn điều kiện ràng buộc của chất lượng truyền dẫn. Trong khi đó, cả 3 lộ trình đều được thuật toán FMLB sử dụng để truyền dữ liệu. Điều này dẫn đến các gói dữ liệu được truyền trên lộ trình thứ nhất ( $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow H$ ) và lộ trình thứ ba ( $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow H$ ) có chất lượng truyền dẫn không đảm bảo khi truyền đến đích.

Kết quả phân tích ở trên cho ta thấy rằng, việc xét các điều kiện ràng buộc về chất lượng truyền dẫn trong các thuật toán định tuyến cân bằng tải là hết sức cần thiết, nhằm đảm bảo chất lượng truyền dẫn cho các lộ trình truyền dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng. Vấn đề này được giải quyết bởi các thuật toán định tuyến ràng buộc QoT kết hợp với cân bằng tải mà tác giả đề xuất ở Chương 3 và Chương 4.

## **2.5. Đánh giá chất lượng truyền dẫn và hiệu năng mạng thông qua mô phỏng**

### **2.5.1. Kịch bản mô phỏng**

Để đánh giá chất lượng truyền dẫn của các lộ trình truyền dữ liệu khi sử dụng các giao thức định tuyến theo yêu cầu và ảnh hưởng của nó đến việc truyền dữ liệu qua mạng MANET, tác giả đã tiến hành mô phỏng để phân tích SNR, BER của các lộ trình truyền dữ liệu, xác suất gói dữ liệu bị chặn và thông lượng mạng. Mô phỏng được triển khai trên OMNeT++ [10], đây là một phần mềm mô phỏng mạng viễn thông hiện đang được sử dụng phổ biến trong các trường đại học, viện nghiên cứu, phòng thí nghiệm trên thế giới. Các giả thiết mô phỏng được thiết lập như trong Bảng 2.5, trong đó, một

**Bảng 2.5.** Các tham số mô phỏng

Tham số	Thiết lập	Tham số	Thiết lập
Vùng mô phỏng	$1000 \times 1000m$	Vùng phủ sóng	250 m
Giao thức MAC	802.11ac	Dạng điều chế	256-QAM
Công suất phát	19.5 dBm	Độ nhạy thu	-68 dBm
Ngưỡng trên của BER	$10^{-6}$	SNR yêu cầu	23.5 dB
Mô hình nhiễu	Nhiều nhiệt	Nhiệt độ	$300^0K$
Tốc độ di chuyển	0 - 20 m/s	Tổng số nút	10 - 50
Thời gian mô phỏng	40 phút	Mô hình truyền sóng	Không gian tự do
Tổng số nguồn phát	30% tổng số nút	Tần số sóng mang	2.4 GHz
Mô hình di chuyển	Random - WP	Loại lưu lượng	Poisson

số tham số được mô tả chi tiết như sau:

(i) Mô phỏng được thực hiện trong thời gian 40 phút. Đây là khoảng thời gian đủ để cho hệ thống mạng đi vào trạng thái ổn định.

(ii) Tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là từ 0 đến 20 m/s, được thiết lập theo 5 trường hợp khác nhau: 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 20 m/s. Trường hợp 0 m/s tương đương với trường hợp các nút đứng yên.

(iii) Các tham số kỹ thuật về công suất phát, độ nhạy thu và vùng phủ sóng được thiết lập dựa trên cơ sở khoa học về suy hao công suất qua môi trường trường truyền dẫn không khí, theo phương trình (2.1). Theo kết quả đã được tính toán ở Hình 2.2, trong trường hợp sóng mang có tần số 2.4 GHz, công suất phát là 19.5 dBm, vùng phủ sóng là 250 m, từ đồ thị về sự phụ thuộc giữa khoảng cách truyền dẫn và công suất thu ở Hình 2.2, ta xác định được độ nhạy thu của thiết bị là -68 dBm.

(iv) Tổng số nguồn phát được thiết lập bằng 30% tổng số nút mạng, số nút còn lại là các nút nhận dữ liệu. Ví dụ, với kịch bản mô phỏng có 30 nút thì tổng số nguồn phát là 9 nút, còn lại 21 nút là các nút nhận dữ liệu. Bảng 2.6 trình bày chi tiết về việc lựa chọn các nút làm nguồn phát của các kịch bản mô phỏng.

(v) Để có sự đồng nhất các giả thiết đầu vào cho việc so sánh các thuật toán định tuyến khác nhau ở các phần sau, ở thời điểm khởi tạo, vị trí của các nút mạng được phân bố đều trong vùng diện tích mô phỏng. Các cặp  $(x, y)$  trong Bảng 2.6 là tọa độ

**Bảng 2.6.** Tọa độ vị trí khởi tạo và lựa chọn nguồn phát của các kịch bản mô phỏng

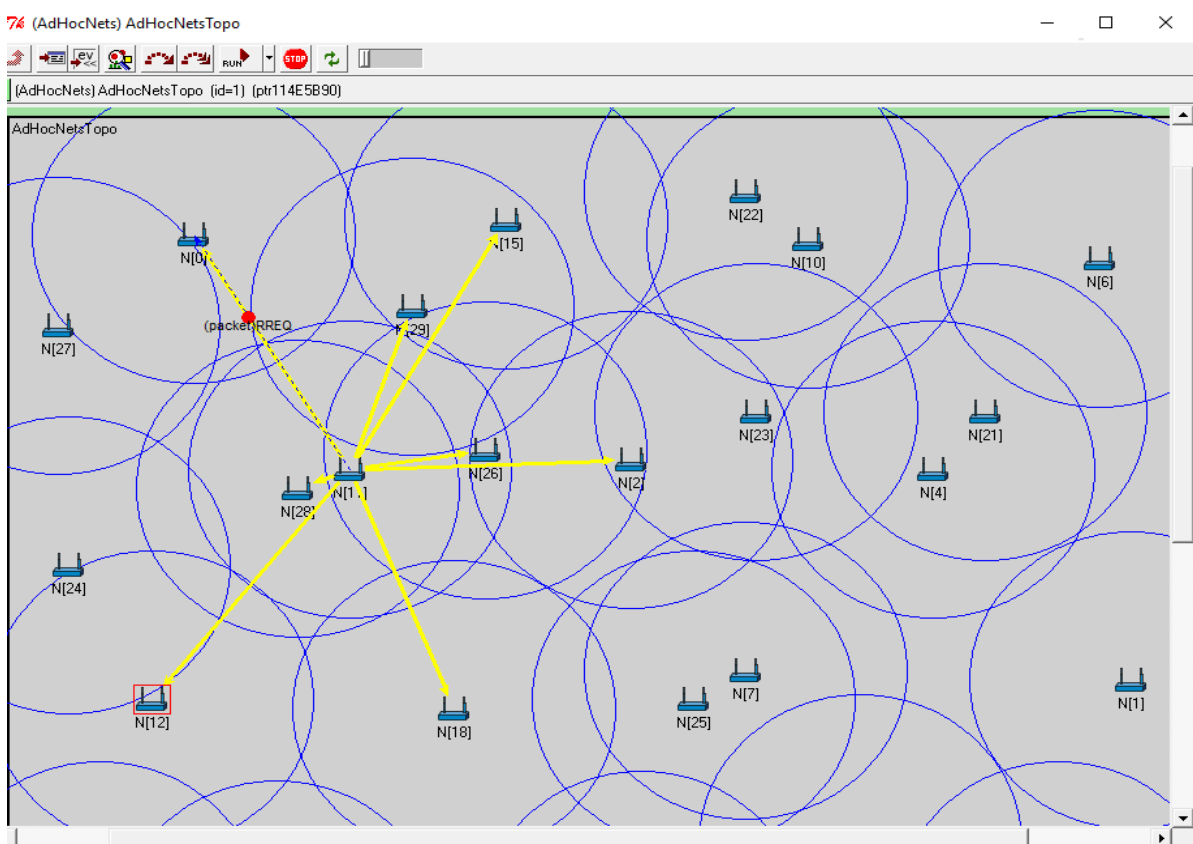
ID	10 Nút		15 Nút		20 Nút		25 Nút		30 Nút		35 Nút		40 Nút		45 Nút		50 Nút	
	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát	Vị trí khởi tạo	Nút phát
1	(76,80)	✓	(64,108)		(64,108)	✓	(56,68)		(176,164)	✓	(56,68)		(56,68)	✓	(56,68)		(56,68)	
2	(44,216)		(488,168)	✓	(488,168)		(344,408)	✓	(920,320)		(920,320)	✓	(920,320)		(920,320)	✓	(920,320)	✓
3	(76,320)		(184,200)		(664,416)		(664,192)		(992,440)		(992,440)		(992,440)		(992,440)		(992,440)	
4	(290,30)		(264,304)		(640,120)		(560,184)		(560,168)	✓	(952,40)		(952,40)	✓	(952,40)		(952,40)	✓
5	(172,140)		(392,248)	✓	(544,488)	✓	(752,528)	✓	(752,528)		(752,528)	✓	(752,528)		(752,528)	✓	(752,528)	
6	(212,288)	✓	(232,480)		(232,480)		(400,528)		(400,528)	✓	(400,528)		(400,528)	✓	(400,528)		(400,528)	
7	(276,200)		(472,56)	✓	(472,56)	✓	(784,72)		(784,72)		(784,72)	✓	(784,72)		(784,72)	✓	(784,72)	✓
8	(428,68)		(288,160)		(288,160)		(448,200)		(448,200)		(448,200)		(448,200)		(448,200)		(448,200)	
9	(412,190)	✓	(376,504)		(376,504)		(600,488)		(600,488)	✓	(600,488)		(600,488)	✓	(600,488)		(600,488)	✓
10	(332,331)		(200,64)		(200,64)		(200,64)	✓	(200,64)	✓	(200,64)	✓	(200,64)	✓	(200,64)	✓	(200,64)	
11	N/A		(344,56)	✓	(344,56)		(376,56)		(376,56)		(376,56)	✓	(376,56)		(376,56)	✓	(376,56)	
12	N/A		(72,264)		(72,264)	✓	(136,240)		(136,240)		(136,240)		(136,240)		(136,240)		(136,240)	✓
13	N/A		(144,384)		(144,384)		(112,512)	✓	(112,512)		(112,512)		(112,512)		(112,512)		(112,512)	✓
14	N/A		(520,344)	✓	(728,264)	✓	(376,288)		(832,432)	✓	(1048,336)		(1144,520)	✓	(1080,120)		(1184,560)	
15	N/A		(376,384)		(616,240)		(48,184)		(960,176)		(848,424)	✓	(1132,88)		(496,32)	✓	(1132,88)	
16	N/A		N/A		(520,344)		(232,320)		(344,392)		(1048,216)		(1048,216)		(1048,216)		(1048,216)	
17	N/A		N/A		(376,384)		(640,392)	✓	(896,520)	✓	(896,520)		(896,520)	✓	(896,520)		(896,520)	✓
18	N/A		N/A		(264,304)	✓	(456,416)	✓	(456,416)		(456,416)	✓	(456,416)		(456,416)	✓	(456,416)	
19	N/A		N/A		(392,248)		(744,344)		(744,344)		(744,344)		(744,344)		(744,344)		(744,344)	
20	N/A		N/A		(184,200)	✓	(248,472)		(248,472)		(248,472)		(248,472)		(248,472)		(248,472)	✓
21	N/A		N/A		N/A		(288,168)		(744,264)	✓	(376,128)		(1104,360)	✓	(568,584)		(1192,384)	
22	N/A		N/A		N/A		(784,224)	✓	(848,192)		(848,192)	✓	(848,192)		(848,192)	✓	(848,192)	
23	N/A		N/A		N/A		(576,72)		(576,72)		(576,72)		(576,72)		(576,72)		(576,72)	
24	N/A		N/A		N/A		(568,312)		(568,312)		(568,312)		(568,312)		(568,312)		(568,312)	✓
25	N/A		N/A		N/A		(56,384)	✓	(56,384)		(56,384)		(56,384)		(56,384)		(56,384)	
26	N/A		N/A		N/A		N/A		(664,192)	✓	(664,192)		(664,192)	✓	(664,192)		(664,192)	
27	N/A		N/A		N/A		N/A		(376,288)		(376,288)	✓	(376,288)		(376,288)	✓	(376,288)	
28	N/A		N/A		N/A		N/A		(48,184)		(48,184)		(48,184)		(48,184)		(48,184)	
29	N/A		N/A		N/A		N/A		(232,320)		(232,320)		(232,320)		(232,320)		(232,320)	✓
30	N/A		N/A		N/A		N/A		(288,168)	✓	(288,168)		(288,168)	✓	(288,168)		(288,168)	
31	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(768,248)	✓	(768,248)		(768,248)	✓	(768,248)	
32	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(960,176)		(1048,40)		(1048,40)		(1048,40)	
33	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(664,400)		(664,400)	✓	(664,400)		(664,400)	✓
34	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(344,400)	✓	(344,400)		(344,400)	✓	(344,400)	
35	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(552,152)	✓	(1040,544)		(832,584)		(1040,544)	
36	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(848,424)		(848,424)		(848,424)	✓
37	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(1048,336)		(1048,336)		(1048,336)	
38	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(960,176)		(960,176)		(960,176)	
39	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(552,152)	✓	(552,152)		(552,152)	
40	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(376,128)	✓	(376,128)	✓	(376,128)	
41	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(168,416)	✓	(168,416)	
42	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(160,144)		(160,144)	✓
43	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(896,16)	✓	(896,16)	✓
44	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(680,16)		(680,16)	
45	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(256,584)	✓	(256,584)	✓
46	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(1192,216)	
47	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(1080,464)	✓
48	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(832,584)	
49	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(568,584)	✓
50	N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		N/A		(496,32)	

của các nút ở thời điểm khởi tạo. Sau đó, các nút di chuyển ngẫu nhiên theo mô hình di chuyển Random - Waypoint [24, 26, 36].

Trong kịch bản mô phỏng, tác giả sử dụng mô hình di chuyển Random - Waypoint

với lý do mô hình di chuyển này hiện đang được sử dụng rộng rãi trong các công trình nghiên cứu về MANET [24, 26, 36]. Ngoài ra, việc chọn mô hình di chuyển Random - Waypoint là để thống nhất như trong [24], để thực hiện việc so sánh kết quả của của các thuật toán được đề xuất với thuật toán trong [24] ở các chương sau. Nguyên lý cơ bản của mô hình di chuyển Random - Waypoint được tóm tắt như sau: Tại thời điểm khởi tạo, mỗi nút có một vị trí ngẫu nhiên trong vùng mô phỏng và đứng yên tại đó một khoảng thời gian, được gọi là thời gian tạm dừng (pause time), ký hiệu bởi  $T_p$ . Sau khoảng thời gian  $T_p$ , nút đó chọn ngẫu nhiên một vị trí trong vùng mô phỏng rồi di chuyển đến vị trí đó với tốc độ  $v_n$ , trong đó  $v_n$  được phân bố đồng đều trong đoạn  $[v_{max}, v_{min}]$ , với  $v_{max}$  và  $v_{min}$  là tốc độ di chuyển lớn nhất và nhỏ nhất của các nút. Khi đã di chuyển đến vị trí mới, nút dừng một khoảng thời gian  $T_p$ , với  $T_p$  được phân phối đồng đều trong đoạn  $[T_p^{(max)}, T_p^{(min)}]$ , với  $T_p^{(max)}$  và  $T_p^{(min)}$  là thời gian tạm dừng lớn nhất và nhỏ nhất. Quá trình lặp lại cho đến hết thời gian mô phỏng.

Hình 2.13 là giao diện chính của chương trình mô phỏng. Ở thời điểm hiện tại, nút  $N_{11}$  đang gửi quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng của nó để khám phá lộ trình mới.



**Hình 2.13.** Một tô-pô mạng MANET được chụp trong quá trình mô phỏng

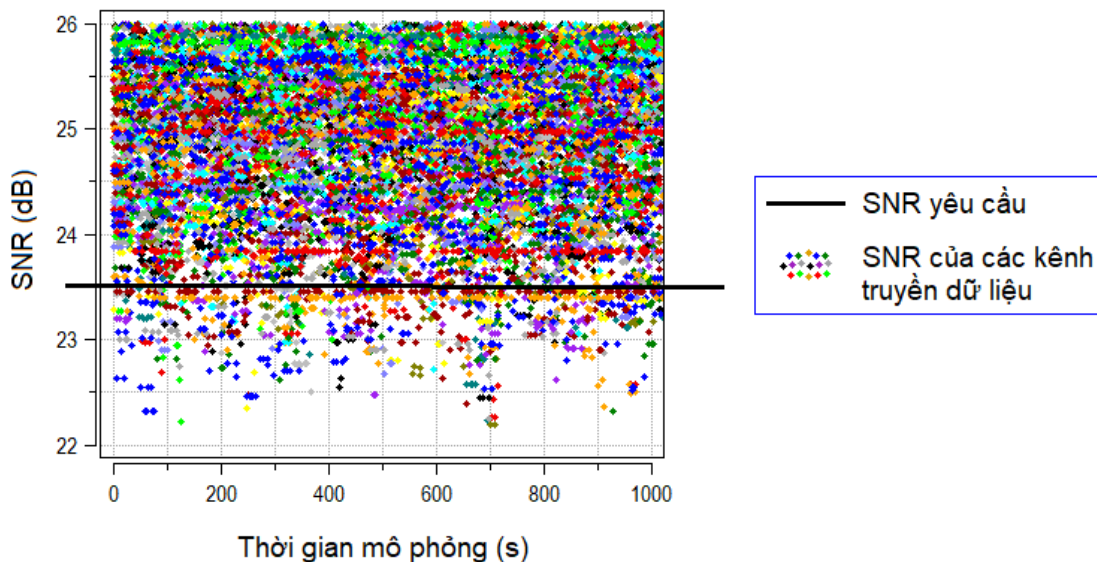
### 2.5.2. Trường hợp sử dụng giao thức DSR

#### (i) Phân tích SNR

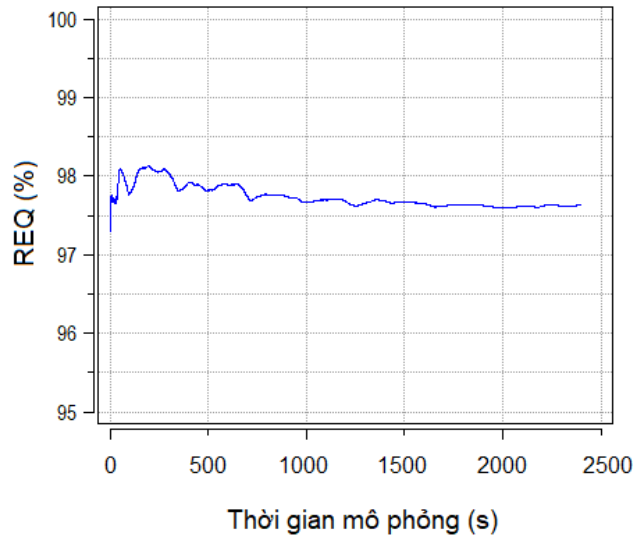
Trong phần này, tác giả phân tích giá trị SNR trên các kênh truyền dữ liệu khi sử dụng giao thức định tuyến DSR. Kết quả thu được ở Hình 2.14 cho ta thấy giá trị SNR tại đầu thu của nút đích. Kết quả này được thực thi trên tô-pô 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 20 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Mỗi điểm màu trên Hình 2.14 là giá trị SNR đo được tại nút nhận của một kênh truyền dữ liệu. Theo như kịch bản mô phỏng đã được thiết lập ở Phần 2.5.1, để đảm bảo QoS của hệ thống mạng thì SNR nhỏ nhất của mỗi lộ trình phải là 23.5 dB. Biểu đồ trên Hình 2.14 cho thấy rằng, có nhiều kênh truyền dữ liệu mà SNR của nó không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS, do SNR nhỏ hơn SNR yêu cầu tốt thiểu (23.5 dB). Tỷ lệ kênh đảm bảo QoS như cho thấy trên Hình 2.15. Trong hình này, độ đo REQ (Ratio of channels Ensuring QoS) trên trục tung biểu diễn tỷ lệ kênh đảm bảo QoS, được định nghĩa như sau:

$$REQ = \frac{C_{QoS}}{C_{all}} \times 100\% \quad (2.22)$$

trong đó,  $C_{QoS}$  là tổng số kênh đảm bảo QoS theo yêu cầu. Trong kịch bản mô phỏng này,  $C_{QoS}$  chính là tổng số kênh có SNR lớn hơn SNR yêu cầu (23.5 dB).  $C_{all}$  là tổng số kênh trong toàn mạng. Đồ thị trên Hình 2.15 cho thấy rằng, khi thời gian



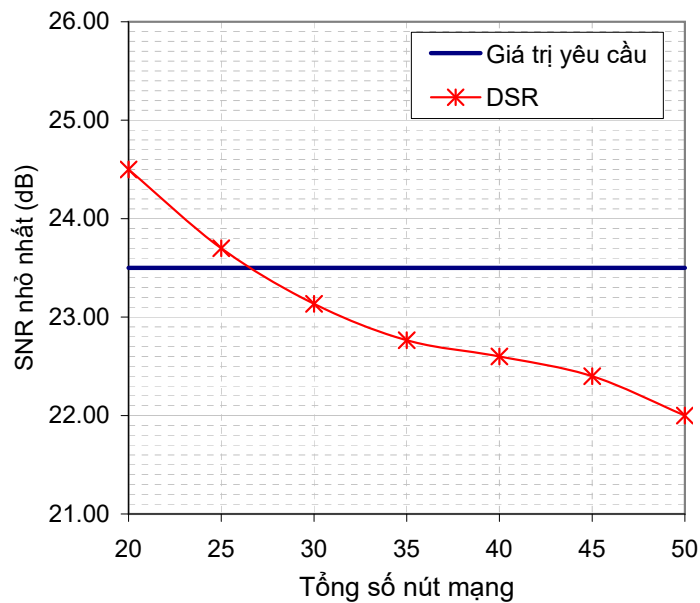
**Hình 2.14.** SNR trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến DSR



**Hình 2.15.** Tỷ lệ kênh đảm bảo QoS khi sử dụng giao thức định tuyến DSR

mô phỏng nhỏ hơn 100 giây, REQ thay đổi rất lớn do hệ thống mạng chưa đi vào trạng thái ổn định. Khi thời gian mô phỏng đạt từ 500 giây trở lên, REQ dần ổn định. Đến thời điểm từ 2000 giây thì REQ gần như một đường nằm ngang, vì lúc này hệ thống mạng đã đi vào trạng thái ổn định. Vì vậy, trong kịch bản mô phỏng được thiết lập, thời gian mô phỏng được chọn là 40 phút (2400 giây).

Về giá trị REQ, đồ thị trên Hình 2.15 cho thấy rằng, REQ trung bình là 97.73%, nghĩa là có trung bình 97.73% số kênh đảm bảo QoS, còn lại 2.27% số kênh không



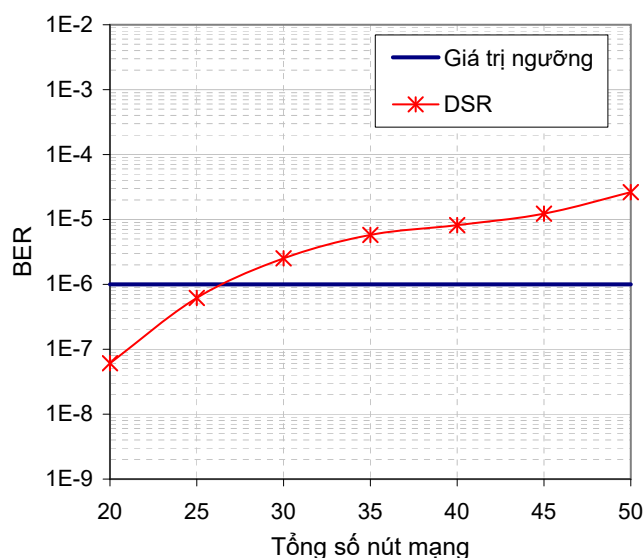
**Hình 2.16.** Sự thay đổi SNR nhỏ nhất theo tổng số nút mạng khi sử dụng giao thức định tuyến DSR

đảm bảo QoT theo yêu cầu. Đây là nguyên nhân làm tăng xác suất gói chặn gói dữ liệu do QoT không đảm bảo.

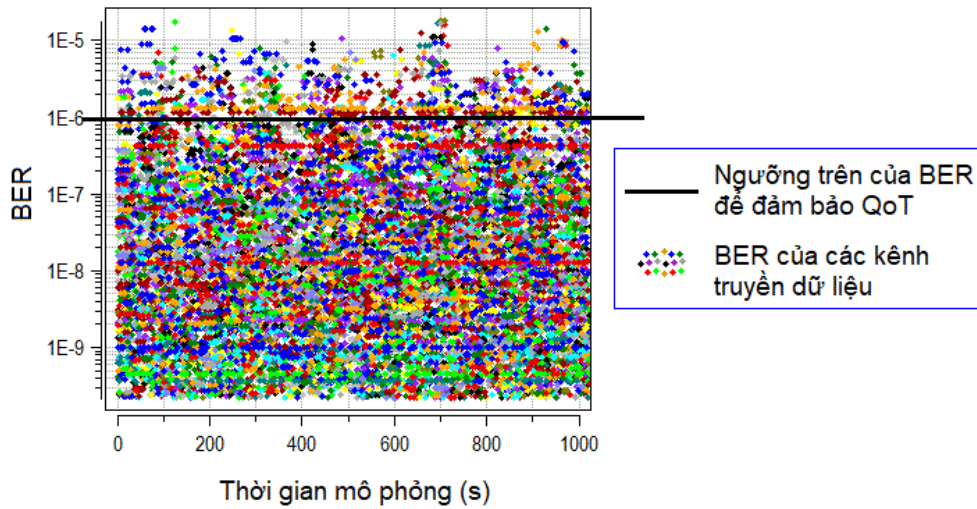
Với các mô hình mạng có tổng số nút khác nhau thì giá trị SNR nhỏ nhất cũng khác nhau. Điều này được thể hiện rõ trên Hình 2.16, tương ứng với 7 kịch bản mô phỏng khác nhau, tổng số nút mạng của mỗi kịch bản tương ứng là 20, 25, 30, 35, 40, 45 và 50. Ta thấy rằng, giá trị SNR nhỏ nhất giảm dần theo tổng số nút mạng. Khi tổng số nút mạng nhỏ hơn 30, thì SNR luôn đạt giá trị SNR yêu cầu để đảm bảo QoT (lớn hơn 23.5 dB). Nhưng khi tổng số nút mạng từ 30, SNR bắt đầu giảm xuống dưới giá trị tối thiểu yêu cầu. Ví dụ như, trường hợp 40 nút, giá trị SNR nhỏ nhất là 22.6 dB. Giá trị này không thỏa mãn điều kiện ràng buộc về QoT.

### (ii) Phân tích BER

Về mặt lý thuyết, BER phụ thuộc vào SNR theo (2.20). Với sự phụ thuộc này thì SNR càng giảm, BER càng tăng. Kết quả mô phỏng trên Hình 2.17 cũng thể hiện rõ điều này, trong đó, giá trị BER trên trục tung là giá trị BER lớn nhất trong số các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng. Ta thấy rằng, với ngưỡng BER yêu cầu là  $10^{-6}$ , hệ thống mạng chỉ đảm bảo yêu cầu này khi tổng số nút nhỏ hơn 30. Còn khi tổng số nút tăng từ 30 đến 50, BER tăng dần từ  $2.5 \times 10^{-6}$  đến  $2.6 \times 10^{-5}$ . Các giá trị này vượt ngưỡng BER yêu cầu.



**Hình 2.17.** Sự thay đổi BER theo tổng số nút mạng khi sử dụng giao thức định tuyến DSR



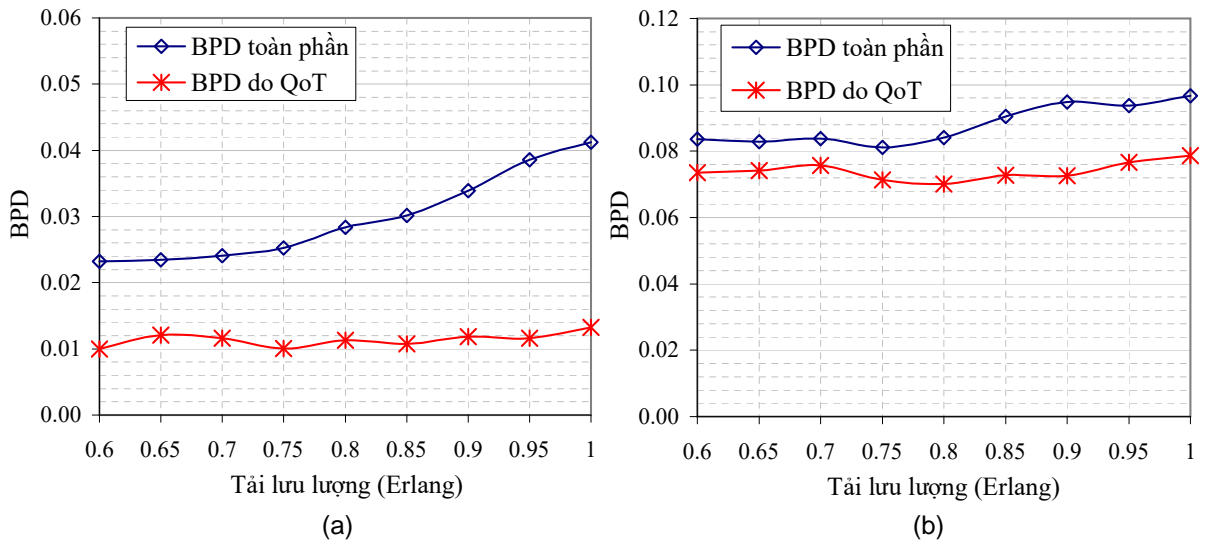
**Hình 2.18.** BER trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến DSR

Trong trường hợp tổng số nút mạng là 50, giá trị BER trên các kênh truyền dữ liệu như cho thấy trên Hình 2.18. Trong hình này, mỗi điểm màu là giá trị BER đo được tại nút nhận của một kênh truyền dữ liệu. Ta thấy rằng, giá trị BER lớn nhất trong mạng là  $2 \times 10^{-5}$ , đồng thời có nhiều lộ trình mà giá trị BER lớn hơn giới hạn cho phép để đảm bảo ( $10^{-6}$ ). Nguyên nhân là do có nhiều lộ trình truyền dữ liệu mà SNR của nó không đạt giá trị tối thiểu theo yêu cầu như đã phân tích ở Hình 2.14, điều này làm cho giá trị BER trên các lộ trình này tăng lên.

(iii) *Phân tích xác suất chặn gói dữ liệu*

Trong phần này, tác giả phân tích xác suất chặn gói dữ liệu trong toàn mạng (Blocking Probability of Data packets - BPD). BPD được xác định theo phương trình (2.5) ở Phần 2.2. Kết quả thu được trên Hình 2.19 cho ta thấy sự thay đổi của BPD theo tải lưu lượng trong trường hợp tổng số nút mạng là 50, tốc độ di chuyển trung bình 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz (Hình 2.19a) và 80 MHz (Hình 2.19b). Trên trục hoành, tác giả sử dụng độ đo tải lưu lượng (Traffic Load) được tính bằng Erlang để biểu diễn lưu lượng phát sinh trên toàn mạng. Khái niệm Erlang có nguồn gốc xuất phát từ mạng chuyển mạch kênh, được sử dụng như là đơn vị đo mật độ lưu lượng trên các kênh truyền [38]. Khi công nghệ chuyển mạch gói phát triển, Erlang đã được mở rộng để sử dụng cho việc mô tả lưu lượng phát sinh trong mạng chuyển mạch gói. Trong đề tài này, tác giả sử dụng Erlang để mô tả lưu lượng phát sinh tại các nút là nguồn phát của mạng MANET, được xác định bằng tỷ lệ giữa lưu lượng phát sinh trung bình tại mỗi





**Hình 2.19.** Sự thay đổi của BPD theo tải lưu lượng sử dụng giao thức DSR khi tổng số nút mạng là 50, tốc độ di chuyển trung bình 5 m/s, băng thông kênh (a) 40 MHz và (b) 80 MHz

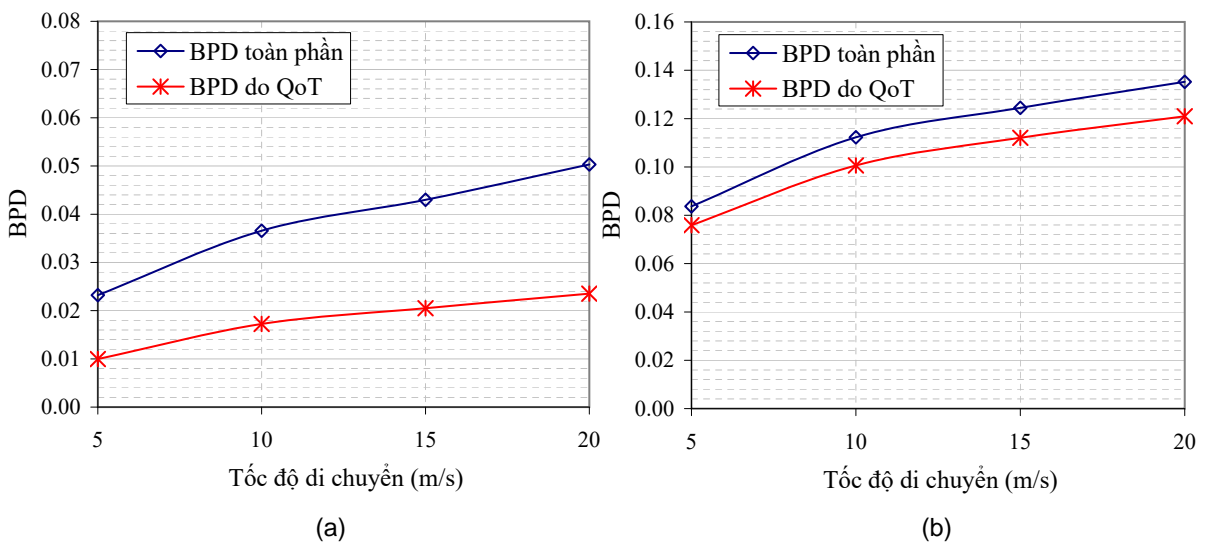
nút là nguồn phát trên dung lượng của một kênh truyền. 1 Erlang tương ứng với tải lưu lượng mà nó chiếm hoàn toàn một kênh trong mạng MANET. Ví dụ, giả sử tốc độ dữ liệu của một kênh là 54 Mbit/s, 1 Erlang tương đương mỗi nút phát sinh lưu lượng 54 Mbit/s. Hay nói cách khác, nếu kích thước gói dữ liệu trung bình là 1472 bytes, 1 Erlang tương đương với mỗi nút phát trung bình  $(54e+6)/(1472*8) = 4585.6$  gói/s.

Các đồ thị trên Hình 2.19 cho thấy rằng, BPD tăng dần theo tải lưu lượng. Khi tải lưu lượng đạt ở mức cao nhất (1 Erlang) thì BPD trên toàn mạng là 0.042. Sở dĩ BPD trên toàn mạng không tăng cao khi tải lưu lượng phát sinh ở mỗi nút đạt đến 1 Erlang là vì trong các kịch bản mô phỏng để thu được kết quả ở Hình 2.19, tổng số nút mạng là 50 trong vùng diện tích 1000 x 1000 m, vùng phủ sóng là 250 m nên thông thường thì mỗi nút có nhiều cổng ra được kết nối đến nhiều nút khác tạo thành tô-pô mắt lưới (mesh). Trong lúc đó, tải lưu lượng phát sinh được tính dựa trên Erlang, tương đương như “tải chuẩn hóa trên 1 kênh”, vì vậy, mặc dù tải lưu lượng tiến đến 1 Erlang nhưng với tô-pô mạng mắt lưới thì chưa tiến đến năng lực vận chuyển của đường truyền. Do vậy, BPD trên toàn mạng không tăng cao.

Vấn đề cần quan tâm trong kết quả ở Hình 2.19 là thành phần BPD do không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS. Xét trường hợp hệ thống mạng sử dụng kênh có băng thông 40 MHz (kết quả trên Hình 2.19a), khi tải lưu lượng tăng từ 0.6 Erlang đến 1 Erlang, BPD tăng từ 0.023 đến 0.041. Trong đó, BPD do không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS từ 0.011 đến 0.013. Ta thấy rằng, giá trị BPD chiếm gần 50%

trong tổng số BPD của toàn mạng khi tải lưu lượng thấp, nhỏ hơn 0.75 Erlang. Khi tải lưu lượng tăng cao, BPD do QoT gần như ổn định. BPD toàn mạng tăng là do nghẽn lưu lượng.

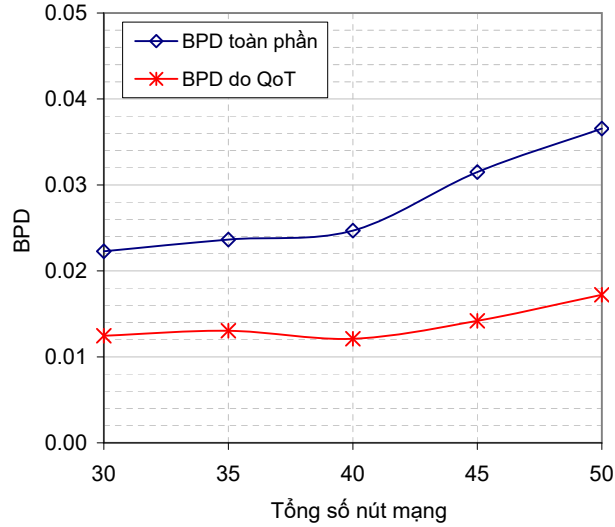
Trong trường hợp hệ thống mạng sử dụng kênh có băng thông 80 MHz (kết quả trên Hình 2.19b), BPD toàn mạng tăng lên rất lớn so với trường hợp sử dụng kênh có băng thông 80 MHz, trong đó thành phần BPD do không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT chiếm thành phần chủ yếu. Nguyên nhân của BPD tăng là do khi hệ thống mạng sử dụng kênh có băng thông lớn, nhiễu phát sinh trên các kênh truyền dữ liệu tăng lên, làm cho QoT giảm.



**Hình 2.20.** Sự thay đổi của BPD theo tốc độ di chuyển sử dụng giao thức DSR khi tổng số nút mạng là 50, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh (a) 40 MHz và (b) 80 MHz

Tiếp theo, tác giả phân tích sự đổi của BPD theo tốc độ di chuyển và theo tổng số nút mạng. Kết quả thu được như ở Hình 2.20 và Hình 2.21. Khi tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút tăng dần, BPD cũng tăng dần như cho thấy ở Hình 2.20. Xét trường hợp tải lưu lượng là 0.6 Erlang và băng thông kênh 40 MHz (Hình 2.20a), BPD tăng từ 0.025 đến 0.05 khi tốc độ di chuyển tăng từ 5 m/s đến 20 m/s. Trong đó, thành phần BPD do không đảm bảo QoT chiếm từ 44% đến 47% trong tổng số BPD của toàn mạng. Trong trường hợp sử dụng kênh với băng thông 80 MHz (Hình 2.20b), BPD toàn phần tăng lên đến giá trị từ 0.08 đến 0.13, trong đó chủ yếu là BPD do không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT.

Khi tổng số nút mạng tăng thì BPD cũng tăng như cho thấy ở Hình 2.21. Nguyên

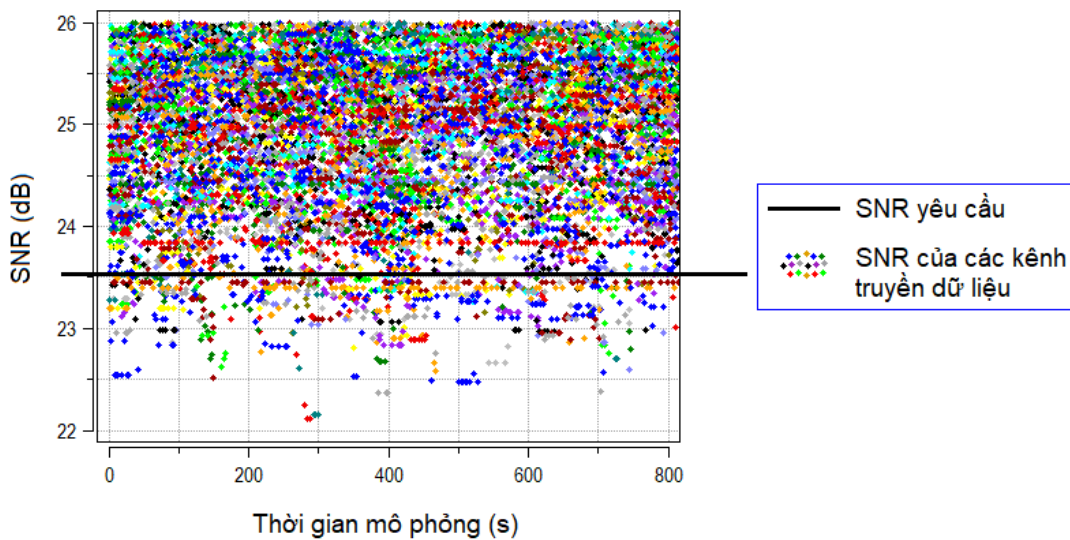


**Hình 2.21.** Sự thay đổi của BPD theo tổng số nút của giao thức DSR khi tốc độ di chuyển trung bình 10 m/s, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh 40 MHz

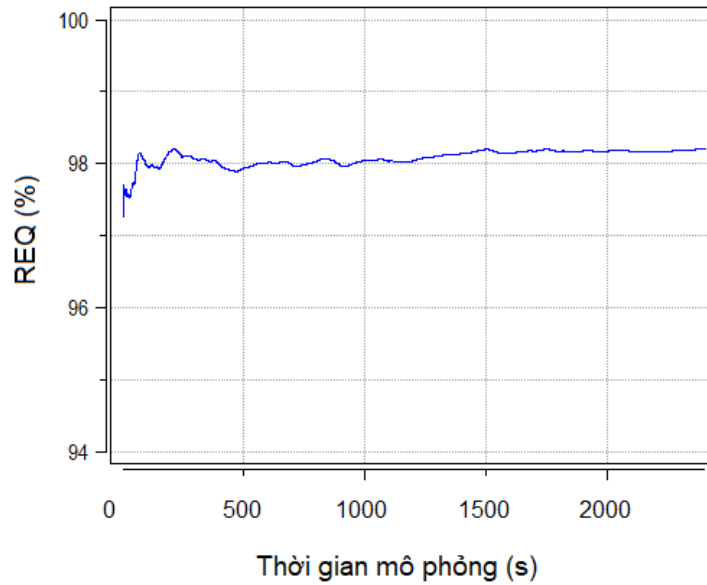
nhân là do khi tổng số nút mạng tăng thì ảnh hưởng của các hiệu ứng cũng tăng lên, làm cho thành phần BPD do không đảm bảo QoS tăng lên. Các đồ thị trên Hình 2.21 cho thấy BPD do QoS chiếm gần 50% trong tổng số BBP của toàn mạng.

### 2.5.3. Trường hợp sử dụng giao thức AODV

Trong phần này, tác giả tiếp tục phân tích QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu và ảnh hưởng của nó đến hiệu năng mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến AODV. Kết quả thu được ở Hình 2.22 cho ta thấy giá trị SNR tại đầu thu của nút đích

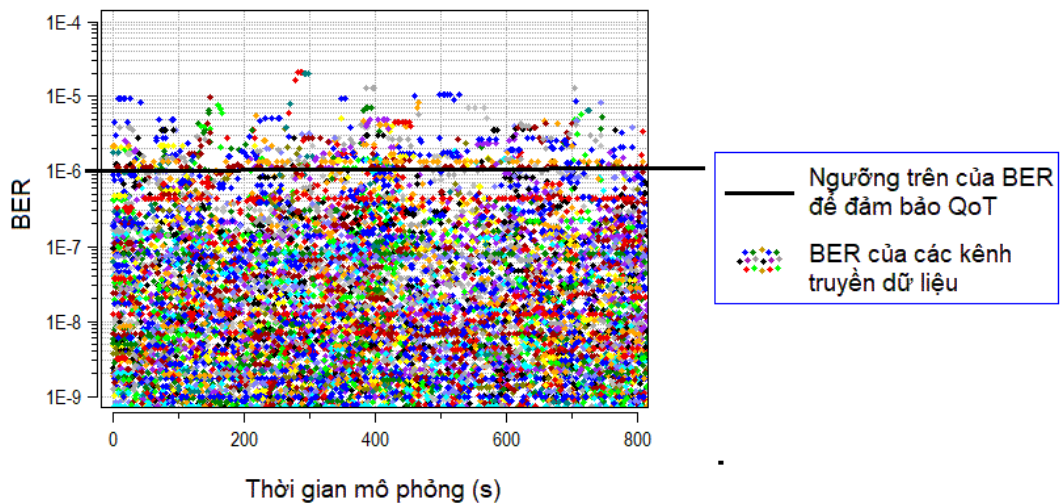


**Hình 2.22.** SNR trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến AODV



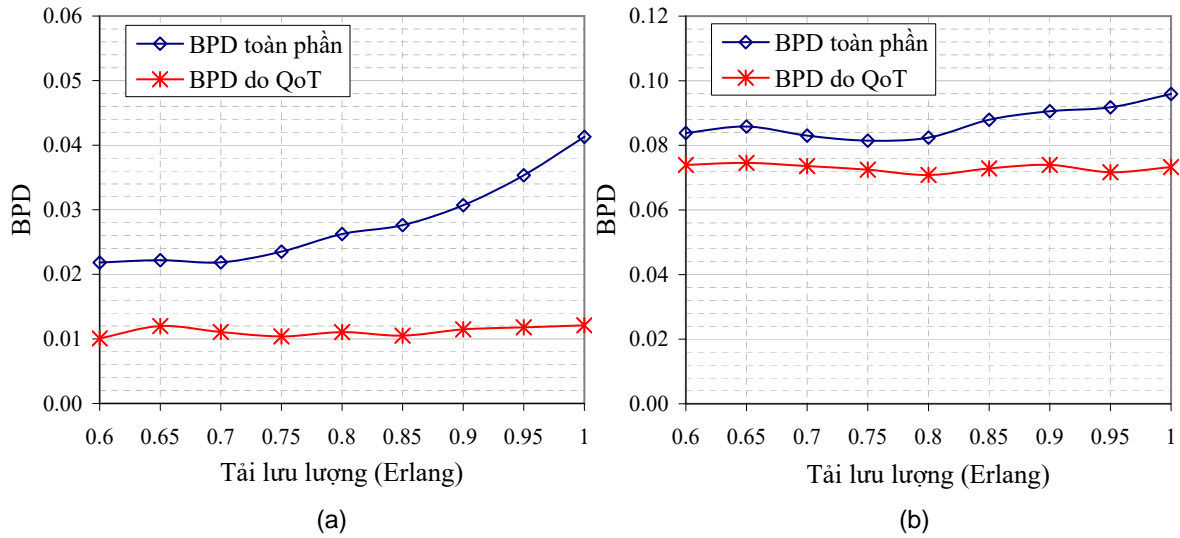
**Hình 2.23.** Tỷ lệ kênh đảm bảo QoS khi sử dụng giao thức định tuyến AODV

của các lộ trình truyền dữ liệu. Kết quả này được thực thi trên tô-pô 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 10 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Biểu đồ trên Hình 2.22 cho thấy rằng, giá trị SNR nhỏ nhất của tất cả các lộ trình truyền dữ liệu là 22.3 dB. Giá trị này không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS do nhỏ hơn SNR yêu cầu tốt thiểu (23.5 dB). Ngoài ra, có nhiều lộ trình mà SNR của nó không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS. Để thấy rõ hơn điều này, tác giả phân tích tỷ lệ kênh đảm bảo QoS qua thời gian mô phỏng. Kết quả thu được như cho thấy trên Hình 2.23. Ta thấy rằng, có trung bình 98.07% số kênh đảm bảo QoS, nghĩa là còn lại 1.93% số kênh không đảm bảo QoS theo yêu cầu.



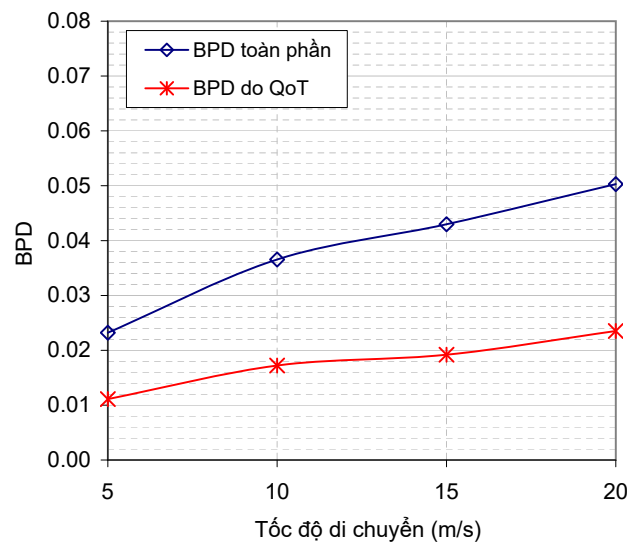
**Hình 2.24.** BER trên các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng MANET khi sử dụng giao thức định tuyến AODV

Vì có nhiều lộ trình mà SNR của nó nhỏ hơn giá trị yêu cầu tối thiểu như đã phân tích ở Hình 2.22, nên tồn tại nhiều lộ trình mà BER lớn hơn giới hạn cho phép ( $10^{-6}$ ). Kết quả mô phỏng trên Hình 2.24 thể hiện rõ điều này. Giá trị BER lớn nhất là  $10^{-5}$ , ngoài ra còn có nhiều lộ trình mà giá trị BER lớn hơn giới hạn cho phép.



**Hình 2.25.** Sự thay đổi của BPD theo tải lưu lượng của giao thức AODV khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển trung bình 5 m/s, băng thông kênh (a) 40 MHz và (b) 80 MHz

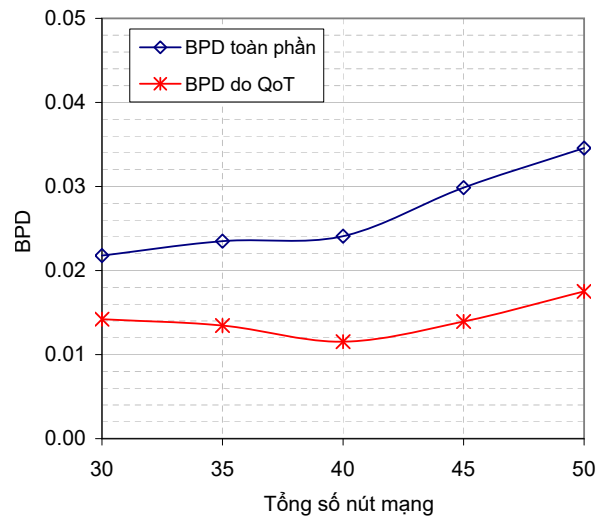
SNR và BER của một số lộ trình không thỏa mãn điều kiện ràng buộc về QoS theo yêu cầu là một trong những nguyên nhân làm tăng BPD trên toàn mạng. Kết quả mô phỏng trên các Hình 2.25, 2.26 và 2.27 thể hiện rõ điều này. Hình 2.25 cho ta thấy sự



**Hình 2.26.** Sự thay đổi của BPD theo tốc độ di chuyển của giao thức AODV khi tổng số nút mạng là 50, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh 40 MHz

thay đổi của BPD theo tải lưu lượng trong trường hợp tổng số nút mạng là 50, tốc độ di chuyển trung bình 5 m/s và băng thông kênh 40 MHz và 80 MHz. Ta thấy rằng, BPD tăng dần theo tải lưu lượng. Trong đó, thành phần BPD do không đảm bảo QoS chiếm tỷ lệ khá cao trong tổng số BPD của toàn mạng, đặc biệt là trường hợp sử dụng kênh có băng thông 80 MHz (Hình 2.25b).

Khi thay đổi tốc độ di chuyển của các nút mạng, kết quả thu được như ở Hình 2.26. Ta thấy rằng, PDB càng tăng khi tốc độ di chuyển càng cao. Ngoài sự phụ thuộc vào tốc độ di chuyển, BPD còn phụ thuộc vào tổng số nút mạng. Điều này thể hiện rõ qua kết quả ở Hình 2.27. Khi tổng số nút mạng tăng thì ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý tăng lên, làm tăng BPD do không đảm bảo QoS, dẫn đến tăng BPD toàn mạng.



**Hình 2.27.** Sự thay đổi của BPD theo tổng số nút của giao thức AODV khi tốc độ di chuyển trung bình 10 m/s, tải lưu lượng 0.6 Erlang, băng thông kênh 40 MHz

Qua các kết quả mô phỏng ở trên ta có thể kết luận rằng, trong trường hợp hệ thống mạng MANET có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, sử dụng kênh có băng thông lớn, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý làm tăng BPD trên toàn mạng. Điều này làm suy giảm hiệu năng mạng. Vì vậy, việc xem xét các điều kiện ràng buộc về QoS trong các thuật toán định tuyến là điều cần thiết, nhằm đảm bảo QoS của hệ thống mạng.

## 2.6. Kết luận chương

Để nâng cao chất lượng tín hiệu truyền dẫn trong mạng MANET có vùng diện tích rộng, sử dụng kênh có băng thông cao, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đến hiệu năng mạng là điều cần thiết. Trong chương này, tác giả đã tập trung nghiên cứu các hiệu ứng vật lý xảy ra trên lộ trình truyền truyền dữ liệu, tập trung

vào các tham số cơ bản phản ảnh chất lượng truyền dẫn của một lộ trình, đó là suy hao công suất qua môi trường truyền dẫn, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, tỷ lệ bit lỗi. Thông qua việc phân tích một lộ trình cụ thể, tác giả đã cho thấy rằng, tùy theo chuẩn truyền thông không dây, kỹ thuật điều chế và độ rộng của băng thông kênh được sử dụng, mà các điều kiện ràng buộc về chất lượng truyền dẫn cần phải được xác định phù hợp để đảm bảo chất lượng tín hiệu truyền dẫn, nhằm đảm bảo hiệu năng của hệ thống mạng. Ngoài ra, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý đến hiệu năng mạng khi sử dụng các giao thức định tuyến DSR và AODV cũng đã được phân tích trong chương này. Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý làm tăng BPD, dẫn đến suy giảm hiệu năng của hệ thống mạng. Vì vậy, để đảm bảo hiệu năng mạng, cần phải xem xét đến các điều kiện ràng buộc về QoS trong các thuật toán định tuyến. Đồng thời, việc nghiên cứu cải tiến các thuật toán định tuyến nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý, nâng cao hiệu năng mạng là điều hết sức cần thiết. Các kết quả nghiên cứu về vấn đề này được trình bày chi tiết trong chương tiếp theo.

Các kết quả nghiên cứu trong chương này đã được công bố trong 03 bài báo khoa học chuyên ngành. Trong đó, có 02 bài báo công bố trong Kỷ yếu Hội thảo Nghiên cứu cơ bản và ứng dụng công nghệ thông tin - FAIR 2015 [B8] và FAIR 2017 [B6], 01 bài báo công bố trong Kỷ yếu Hội thảo Một số vấn đề chọn lọc trong Công nghệ thông tin và Truyền thông - @ 2018 [B3].

## CHƯƠNG 3

# ĐỊNH TUYẾN CÂN BẰNG TẢI ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN DỰA TRÊN TẢI LƯU LƯỢNG QUA MỖI LỘ TRÌNH

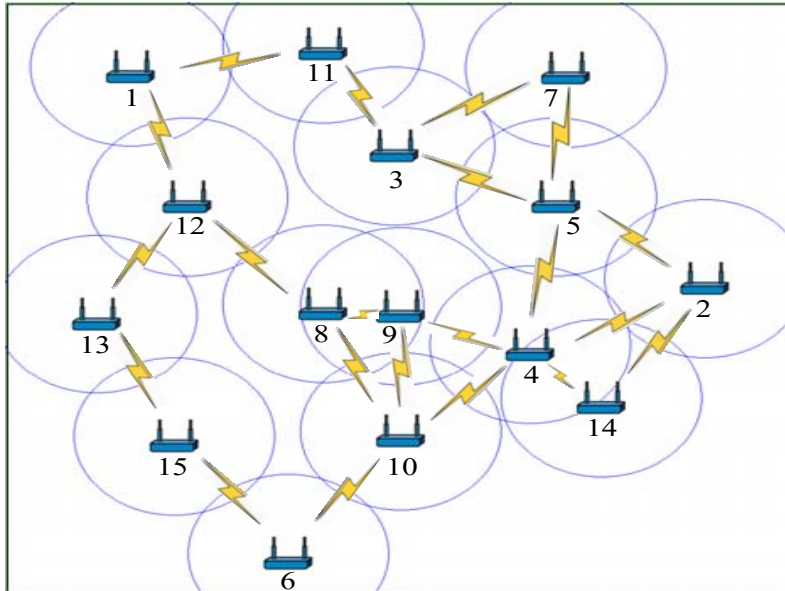
Nội dung chương này trình bày thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoT được đề xuất cho mạng MANET nhằm cải thiện QoT của các kênh truyền dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng MANET. Các kết quả nghiên cứu cụ thể được trình bày với bố cục như sau: Phần 3.1 phân tích vấn đề nghiên cứu. Phần 3.2 trình bày các cơ sở lý thuyết liên quan được sử dụng trong việc đề xuất thuật toán. Phần 3.3 đi sâu phân tích ý tưởng và phát biểu thành mô hình giải tích của thuật toán được đề xuất. Phần 3.4 trình bày nguyên lý hoạt động của thuật toán. Phần 3.5 và 3.6 trình bày việc áp dụng thuật toán định tuyến được đề xuất để cải tiến cơ chế khám phá lộ trình của các giao thức DSR và AODV. Các kết quả mô phỏng thử nghiệm được trình bày chi tiết trong Phần 3.7. Cuối cùng là kết luận chương, được trình bày chi tiết trong Phần 3.8.

### 3.1. Đặt vấn đề

Các kết quả nghiên cứu về hiệu năng của mạng MANET khi sử dụng các giao thức định tuyến cân bằng tải ở Chương 2 đã chứng minh rằng, định tuyến cân bằng tải cho phép giảm tình trạng nghẽn cục bộ tại các nút trung gian nhờ tải lưu lượng phân phối đồng đều qua các kết nối. Tuy nhiên, kỹ thuật định tuyến này cũng làm giảm QoT do các lộ trình truyền dữ liệu có thể đi qua nhiều nút trung gian, nhiều bước truyền. Để thấy rõ điều này, chúng tôi phân tích QoT trên các lộ trình truyền dữ liệu khi sử dụng thuật toán định tuyến cân bằng tải FMLB [70] cho tô-pô mạng MANET có 15 nút như ở Hình 3.1. Các tham số kỹ thuật của hệ thống mạng được thiết lập như ở Bảng 2.5 của Phần 2.5.1 (kịch bản mô phỏng ở Chương 2). SNR (dB) của tất cả các lộ trình trong mạng được biểu diễn bởi ma trận  $Q$  như cho thấy ở phương trình (3.1). Ta thấy rằng, có nhiều lộ trình với SNR rất thấp. Ví dụ, SNR của lộ trình từ nút 6 đến nút 11 chỉ 21.0 dB, từ nút 13 đến nút 7 cũng chỉ 21.4 dB. Giả sử hệ thống mạng sử dụng giao thức MAC 802.11 với dạng điều chế 256-QAM, ngưỡng BER yêu cầu là  $10^{-6}$ . Theo lý thuyết về sự phụ thuộc giữa BER và SNR, giá trị SNR yêu cầu tối thiểu phải là 23.5



dB. Như vậy, hai lộ trình trên không đảm bảo QoT do giá trị SNR của nó nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu.



**Hình 3.1.** Một ví dụ về mạng MANET có 15 nút.

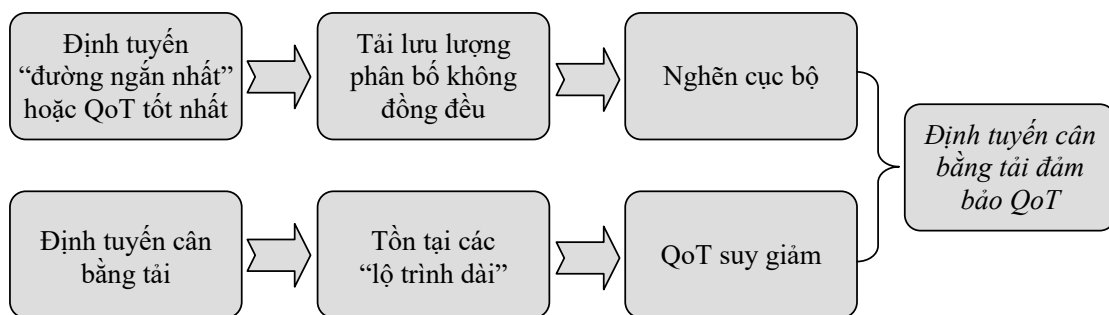
$$Q = \begin{bmatrix} - & 22.5 & 25.7 & 22.4 & 23.9 & 22.1 & 23.5 & 25.1 & 24.8 & 23.4 & 27.6 & 28.6 & 25.6 & 21.5 & 23.8 \\ 22.5 & - & 25.4 & 27.7 & 28.3 & 23.3 & 25.7 & 25.4 & 25.9 & 25.2 & 24.1 & 23.4 & 22.3 & 28.1 & 22.0 \\ 25.7 & 25.4 & - & 25.2 & 28.6 & 22.2 & 27.5 & 23.8 & 24.1 & 23.6 & 30.0 & 23.9 & 22.6 & 23.6 & 21.2 \\ 22.4 & 27.7 & 25.2 & - & 27.9 & 25.3 & 25.5 & 29.4 & 30.6 & 28.8 & 24.0 & 25.5 & 23.8 & 33.6 & 23.4 \\ 23.9 & 28.3 & 28.6 & 27.9 & - & 23.4 & 29.1 & 25.6 & 26.0 & 25.3 & 26.3 & 22.6 & 21.6 & 25.2 & 22.1 \\ 22.1 & 23.3 & 22.2 & 25.3 & 23.4 & - & 22.3 & 25.0 & 25.5 & 27.8 & \mathbf{21.0} & 23.2 & 25.3 & 24.7 & 28.0 \\ 23.5 & 25.7 & 27.5 & 25.5 & 29.1 & 22.3 & - & 24.0 & 24.3 & 23.8 & 25.6 & 22.3 & 21.4 & 23.7 & 21.3 \\ 25.1 & 25.4 & 23.8 & 29.4 & 25.6 & 25.0 & 24.0 & - & 35.6 & 28.3 & 23.2 & 27.8 & 25.1 & 28.0 & 23.3 \\ 24.8 & 25.9 & 24.1 & 30.6 & 26.0 & 25.5 & 24.3 & 35.6 & - & 29.4 & 23.0 & 27.1 & 24.8 & 28.8 & 23.6 \\ 23.4 & 25.2 & 23.6 & 28.8 & 25.3 & 27.8 & 23.8 & 28.3 & 29.4 & - & 22.0 & 25.0 & 23.4 & 27.6 & 24.9 \\ 27.6 & 24.1 & 30.0 & 24.0 & 26.3 & 21.6 & 25.6 & 23.2 & 23.1 & 22.7 & - & 25.1 & 23.5 & 22.7 & 22.3 \\ 28.6 & 23.4 & 23.9 & 25.5 & 22.6 & 23.2 & 22.3 & 27.8 & 27.1 & 25.0 & 25.1 & - & 28.6 & 24.9 & 25.6 \\ 25.6 & 22.3 & 22.6 & 23.8 & 21.6 & 25.3 & \mathbf{21.4} & 25.1 & 24.8 & 23.3 & 23.5 & 28.6 & - & 23.3 & 28.6 \\ 21.5 & 28.1 & 23.6 & 33.6 & 25.2 & 24.7 & 23.7 & 28.0 & 28.8 & 27.6 & 22.7 & 24.9 & 23.3 & - & 23.0 \\ 23.8 & 22.0 & 21.2 & 23.4 & 22.1 & 28.0 & 21.3 & 23.3 & 23.6 & 24.9 & 22.3 & 25.6 & 28.6 & 23.0 & - \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Để đảm bảo QoT trên các lộ trình truyền dữ liệu, một số công trình nghiên cứu đã công bố trong thời gian gần đây đã đề xuất các thuật toán định tuyến có xét đến các điều kiện ràng buộc của QoT [24, 46, 58, 5]. Mục tiêu của các thuật toán định tuyến ràng buộc QoT đã được đề xuất là lựa chọn lộ trình có QoT tốt nhất để truyền dữ liệu.

Tuy nhiên, với các mô hình mạng có tô-pô mắt lưới như MANET, kỹ thuật định tuyến theo QoT tốt nhất có thể làm tăng tình trạng nghẽn cục bộ do tải lưu lượng phân bố không đồng đều trong mạng. Điều này cho ta thấy rõ từ ma trận lưu lượng  $T$  như ở phương trình (3.2), trong đó  $T$  (Erlang) là ma trận biểu diễn tải lưu lượng được phân phối qua tất cả các kết nối trong mạng MANET có cấu trúc như ở Hình 3.1, sử dụng thuật toán định tuyến DSR-SNR [24]. Ta thấy rằng, tải lưu lượng phân phối không đồng đều cho tất cả các kết nối. Một số kết nối chịu tải lưu lượng lớn hơn 1.3 Erlang như các kết nối  $3 \rightarrow 5$ ,  $5 \rightarrow 4$  và  $10 \rightarrow 6$ , nhưng cũng có một số kết nối chỉ chịu tải lưu lượng khoảng 0.32 Erlang như các kết nối  $3 \rightarrow 7$  và  $15 \rightarrow 13$ . Điều này cho thấy rằng, tài nguyên mạng được khai thác không hiệu quả.

$$T = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & 1.26 & 1.07 & - & - & - \\ - & - & - & 0.50 & 0.63 & - & - & - & - & - & - & - & - & 0.38 & - \\ - & - & - & - & \mathbf{1.39} & - & \mathbf{0.32} & - & - & - & 1.13 & - & - & - & - \\ - & 0.50 & - & - & 1.26 & - & - & - & 1.20 & 1.26 & - & - & - & 0.50 & - \\ - & 0.63 & 1.20 & \mathbf{1.45} & - & - & 0.57 & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & 1.39 & - & - & - & - & 0.69 \\ - & - & 0.32 & - & 0.57 & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & 1.01 & 0.44 & - & 1.32 & - & - & - \\ - & - & - & 1.13 & - & - & - & - & 1.07 & - & 0.19 & - & - & - & - \\ - & - & - & 1.13 & - & \mathbf{1.32} & - & - & 0.63 & 0.19 & - & - & - & - & - \\ 1.07 & - & 1.32 & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 1.26 & - & - & - & - & - & - & - & 1.07 & - & - & - & - & 0.95 & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & 0.88 & - & 0.38 \\ - & 0.38 & - & 0.50 & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & 0.76 & - & - & - & - & - & - & - & \mathbf{0.32} & - \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Từ các kết quả phân tích ở trên ta thấy rằng, một vấn đề đặt ra là làm thế nào để kết hợp hài hòa giữa kỹ thuật định tuyến cân bằng tải và kỹ thuật định tuyến đảm bảo QoT, để tìm ra tập lộ trình mà tải lưu lượng phân phối đồng đều cho tất cả các kết



**Hình 3.2.** Mô hình đề xuất ý tưởng định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS

nổi trong mạng, đồng thời thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS như minh họa ở Hình 3.2. Với ý tưởng này, tác giả đề xuất một thuật toán định tuyến cân bằng tải, đồng thời đảm bảo QoS của các lộ trình truyền dữ liệu. Giải pháp đề xuất được cải tiến từ thuật toán khám phá lộ trình của giao thức định tuyến theo yêu cầu trong mạng MANET. Lộ trình cân bằng tải được lựa chọn dựa trên thông tin về xác suất chặn gói dữ liệu từ nguồn đến đích. Thuật toán đề xuất được đặt tên LBRQT (Load Balancing Routing ensuring Quality of Transmission).

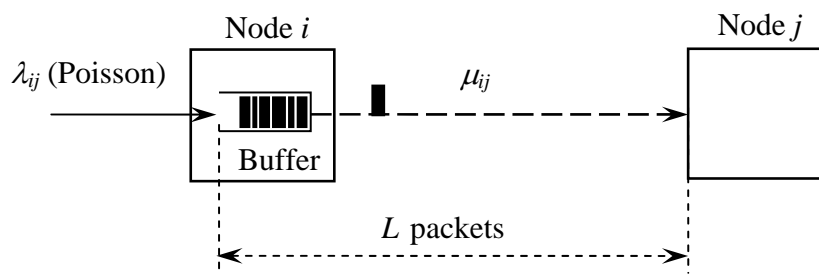
### 3.2. Cơ sở lý thuyết liên quan

Để có cơ sở xác định mục tiêu và các điều kiện ràng buộc trong quá trình khám phá lộ trình của giải pháp định tuyến LBRQT, nội dung phần này trình bày các cơ sở lý thuyết liên quan đến việc phân tích, tính toán các độ đo hiệu năng dựa trên lý thuyết hàng đợi và lý thuyết xác suất thống kê, bao gồm xác suất chặn gói dữ liệu và thời gian trễ từ nguồn đến đích.

#### 3.2.1. Phân tích xác suất chặn gói dữ liệu dựa trên lý thuyết hàng đợi

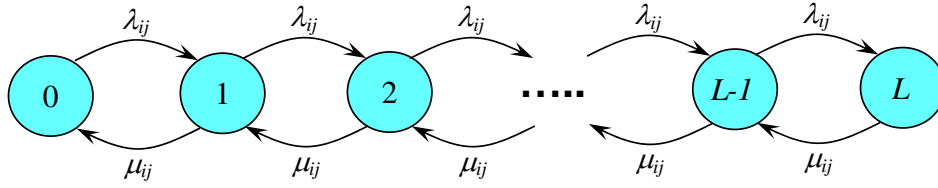
##### 3.2.1.1. Xác suất chặn gói dữ liệu trên một bước truyền

Xét một kết nối không dây từ nút  $I$  đến nút  $J$  trong mạng không dây tùy biến ( $c_{ij}$ ), trong trường hợp lưu lượng yêu cầu đến kết nối  $c_{ij}$  tuân theo phân bố Poisson [12, 23, 52], thời gian truyền gói trên kênh truyền theo phân phối hàm mũ, khi đó một kết nối  $c_{ij}$  trong mạng không dây tùy biến tương đương với một mô hình hàng đợi M/M/1/L [6, 63, 68] như cho thấy trong Hình 3.3, với  $L$  là tổng số gói dữ liệu tối đa trong hệ thống, bao gồm tổng số gói trong bộ đệm và gói đang truyền trên kênh truyền.



**Hình 3.3.** Mô hình một cổng ra của nút mạng không dây tùy biến

Gọi  $\lambda_{ij}$  là tốc độ đến trung bình của các gói dữ liệu muốn truyền qua kênh  $c_{ij}$ , thời gian phục vụ các gói dữ liệu theo phân phối hàm mũ với tốc độ trung bình là  $\mu_{ij}$ . Từ đó



**Hình 3.4.** Lược đồ chuyển đổi trạng thái một cổng ra của nút mạng tùy biến theo mô hình hàng đợi M/M/1/L

ta có lược đồ chuyển đổi trạng thái của hệ thống được minh họa như ở Hình 3.4 [15]. Gọi  $P_{ij}^{(n)}$  là xác suất hệ thống ở trạng thái  $n$ , nghĩa là xác suất có  $n$  gói dữ liệu trong hệ thống, ta có hệ phương trình cân bằng trạng thái sau đây [54]:

$$\begin{cases} \lambda_{ij}P_{ij}^{(0)} = \mu_{ij}P_{ij}^{(1)} & n = 0 \\ (\lambda_{ij} + \mu_{ij})P_{ij}^{(n)} = \lambda_{ij}P_{ij}^{(n-1)} + \mu_{ij}P_{ij}^{(n+1)} & n \in [1, K-1] \\ \lambda_{ij}P_{ij}^{(K-1)} = \mu_{ij}P_{ij}^{(K)} & n = K \end{cases} \quad (3.3)$$

Bằng cách giải hệ phương trình trạng thái (3.3) ta xác định được  $P_{ij}^{(n)}$ . Đối với các gói dữ liệu muốn truyền từ nút  $i$  đến nút  $j$ , gói dữ liệu sẽ bị chặn trong trường hợp gói đến tại thời điểm bộ đệm đầy và kênh truyền  $c_{ij}$  đang ở trạng thái bận, nghĩa là trong hệ thống đang có  $L$  gói dữ liệu. Vì vậy, xác suất gói dữ liệu bị chặn (BPD) được xác định như sau:

$$B_{ij}^{(h)} \equiv P_{ij}^{(L)} = \begin{cases} \frac{\rho_{ij}^L(1 - \rho_{ij})}{1 - \rho_{ij}^{L+1}} & \text{nếu } \rho_{ij} \neq 1 \\ \frac{1}{L+1} & \text{nếu } \rho_{ij} = 1 \end{cases} \quad (3.4)$$

trong đó,  $\rho_{ij} = \lambda_{ij}/\mu_{ij}$  là mật độ lưu lượng phân phối đến kết nối từ nút  $I$  đến nút  $J$ .

### 3.2.1.2. Xác suất chặn gói dữ liệu trên một lộ trình

Gọi  $B_{sd}^{(r)}$  là xác suất gói dữ liệu bị chặn (BPD) trên lộ trình  $r_{sd}$ ,  $\bar{B}_{sd}^{(r)}$  là xác suất gói dữ liệu được truyền thành công (không bị chặn) qua lộ trình  $r_{sd}$ . Theo lý thuyết xác suất thông kê ta có:

$$B_{sd}^{(r)} = 1 - \bar{B}_{sd}^{(r)} \quad (3.5)$$

Khi dữ liệu truyền trên lộ trình  $r_{sd}$ , một gói dữ liệu được truyền thành công từ nút nguồn S đến nút đích D khi và chỉ khi gói dữ liệu này truyền thành công qua tất cả các

bước truyền mà lộ trình  $r_{sd}$  đi qua. Do vậy ta có:

$$\bar{B}_{sd}^{(r)} = \prod_{\forall h_{ij} \in r_{sd}} \bar{B}_{ij}^{(h)} = \prod_{\forall h_{ij} \in r_{sd}} (1 - B_{ij}^{(h)}) \quad (3.6)$$

trong đó,  $B_{ij}^{(h)}$  là BPD trên bước truyền  $h_{ij}$ , được xác định theo (3.4). Thay (3.6) vào (3.5) ta có:

$$B_{sd}^{(r)} = 1 - \prod_{\forall h_{ij} \in r_{sd}} (1 - B_{ij}^{(h)}) \quad (3.7)$$

Phương trình (3.7) cho phép chúng ta xác định được BPD trên một lộ trình ( $B_{sd}^{(r)}$ ) khi biết BPD trên tất cả các bước truyền mà lộ trình đó đi qua ( $B_{ij}^{(h)}$ ). Mặt khác, theo (3.4),  $B_{ij}^{(h)}$  được xác định khi biết mật độ lưu lượng phân phối đến bước truyền  $h_{ij}$  và nguyên lý hàng đợi được sử dụng tại mỗi nút mạng. Trong giải pháp định tuyến được tác giả đề xuất cho luận án này, mật độ lưu lượng phân phối đến mỗi bước truyền trong mạng được xác định bằng phương pháp thống kê theo thời gian bởi tác tử ký sinh tại mỗi nút theo mô hình xuyên lớp. Cấu trúc nút mạng và nguyên lý hoạt động của tác tử được trình bày chi tiết trong Phần 3.3.2.1.

### 3.2.2. Phân tích thời gian trễ dựa trên lý thuyết hàng đợi

Theo lý thuyết, thời gian trễ từ nguồn đến đích (End-to-End Delay - EED) là tổng thời gian cần thiết mà một gói dữ liệu truyền thành công từ nút nguồn đến nút đích. Với mỗi bước truyền từ nút I đến nút J, tổng thời gian trễ gồm 4 thành phần. Đó là trễ xử lý tại nút I ( $\tau_p^{(i)}$ ), trễ hàng đợi tại nút I ( $\tau_q^{(i)}$ ), trễ truyền dẫn (transmission delay) từ nút I đến nút J ( $\tau_t^{(ij)}$ ) và trễ truyền tải qua môi trường vô tuyến (propagation delay) từ nút I đến nút J ( $\tau_r^{(ij)}$ ) [18]. Do vậy, tổng thời gian trễ của một bước truyền từ nút I đến nút J được xác định bởi:

$$\tau_{ij}^{(h)} = \tau_p^{(i)} + \tau_q^{(i)} + \tau_t^{(ij)} + \tau_r^{(ij)} \quad (3.8)$$

Trong trường hợp thời gian trễ xử lý tại mỗi nút và trễ truyền tải qua môi trường không khí là đủ nhỏ để có thể bỏ qua,  $\tau_{ij}(h)$  phụ thuộc vào hai thành phần chính, đó là  $\tau_t^{(ij)}$  và  $\tau_q^{(i)}$ .  $\tau_t^{(ij)}$  được xác định dựa trên băng thông kênh và kích thước gói dữ liệu,  $\tau_q^{(i)}$  được xác định dựa trên cơ chế hàng đợi được sử dụng tại mỗi nút. Như đã phân tích ở Phần 3.2.1.1, cơ chế hàng đợi M/M/1/L được sử dụng tại mỗi nút mạng [28, 31],

do vậy,  $\tau_q^{(i)}$  được xác định bởi [19]:

$$\tau_q^{(i)} = \frac{\bar{L}}{\lambda_{ij}(1 - B_{ij}^{(h)})} + \frac{1}{\mu_{ij}} \quad (3.9)$$

trong đó,  $B_{ij}^{(h)}$  là BPD trên bước truyền  $h_{ij}$ , được xác định theo (3.4).  $\bar{L}$  là tổng số gói dữ liệu trung bình trong hàng đợi, được xác định như sau[19]:

$$\bar{L} = \begin{cases} \frac{\rho_{ij}}{1 - \rho_{ij}} - \frac{\rho_{ij}(L\rho_{ij}^L + 1)}{1 - \rho_{ij}^{L+1}} & \text{nếu } \rho_{ij} \neq 1 \\ \frac{L(L-1)}{2(L+1)} & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (3.10)$$

Thay (3.10) vào (3.9) ta xác định được  $\tau_q^{(i)}$ , sau đó thay (3.9) vào (3.8) ta xác định được  $\tau_{ij}^{(h)}$ . Từ đó, EED của một lộ trình  $r_{sd}$  được xác định bởi:

$$\tau_{sd}^{(r)} = \sum_{\forall h_{ij} \in r_{sd}} \tau_{ij}^{(h)} \quad (3.11)$$

### 3.3. Ý tưởng đề xuất thuật toán

#### 3.3.1. Mô hình giải tích của thuật toán

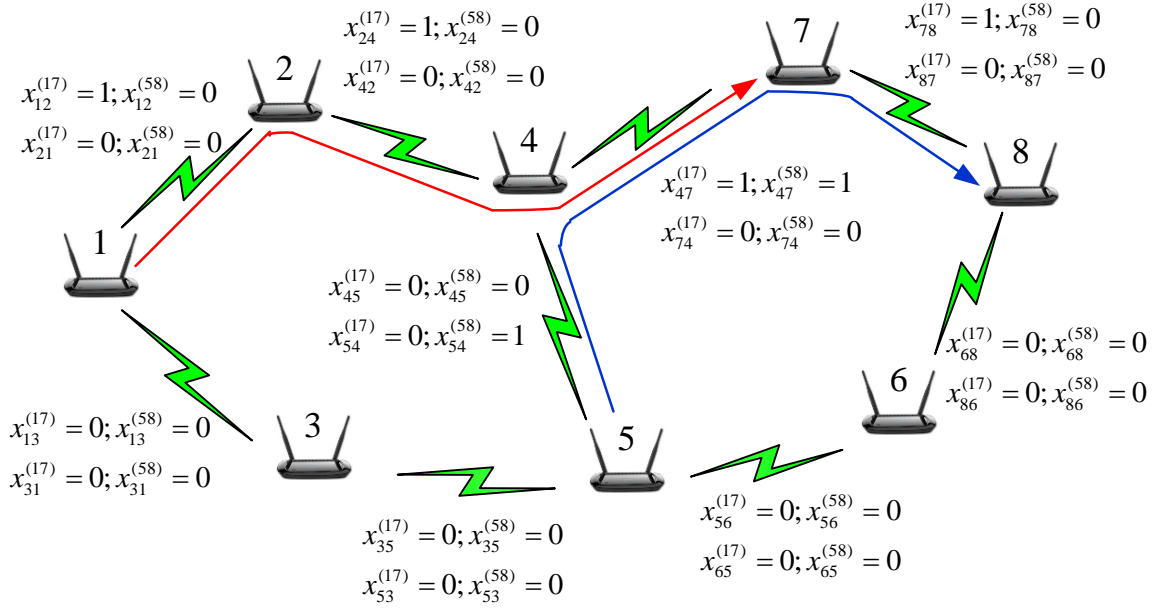
Ý tưởng đề xuất thuật toán định tuyến LBRQT là kết hợp kỹ thuật định tuyến ràng buộc QoT và định tuyến cân bằng tải. Để thực hiện điều này, hàm mục tiêu của giải pháp định tuyến được xây dựng là cực tiểu hóa BPD trên mỗi lộ trình. Các điều kiện ràng buộc được xác định là QoT và EED phải nằm trong giới hạn cho phép.

Để phát biểu thành mô hình giải tích của giải pháp định tuyến LBRQT, tác giả định nghĩa một ma trận  $X_{sd} = [x_{ij}^{(sd)}]_{n \times n}$  biểu diễn các kết nối được chọn cho lộ trình  $r_{sd}$ , trong đó, mỗi phần tử  $x_{ij}^{(sd)}$  được xác định bởi:

$$x_{ij}^{(sd)} = \begin{cases} 1 & \text{Nếu lộ trình } r_{sd} \text{ đi qua kết nối } c_{ij} \\ 0 & \text{Ngược lại} \end{cases} \quad (3.12)$$

khi đó, phương trình xác định BPD của lộ trình  $r_{sd}$  ở (3.7) được biểu diễn theo  $x_{ij}^{(sd)}$  như sau:

$$B_{sd}^{(r)} = 1 - \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (1 - x_{ij}^{(sd)} B_{ij}^{(h)}) \quad (3.13)$$



**Hình 3.5.** Một tô-pô mạng tùy biến đang có 2 lộ trình truyền dữ liệu

Để thấy rõ nguyên lý xác định BPD của một lộ trình trong mạng MANET theo (3.13), tác giả xét một ví dụ như ở Hình 3.5. Giả sử tại thời điểm đang xét có 2 lộ trình truyền dữ liệu là  $r_{17}$  ( $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 7$ ) và  $r_{58}$  ( $5 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ ). Theo định nghĩa ma trận biểu diễn lộ trình  $X_{sd}$  ở (3.12), lộ trình  $r_{17}$  được biểu diễn bởi ma trận  $X_{17}$ , trong đó các phần tử  $x_{12}^{(17)}$ ,  $x_{24}^{(17)}$  và  $x_{47}^{(17)}$  có giá trị bằng 1 do lộ trình này đi qua các kết nối  $1 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 4$  và  $4 \rightarrow 7$ . Tất cả các phần tử khác của ma trận  $X_{17}$  có giá trị bằng 0. Hoàn toàn tương tự cho ma trận  $X_{58}$ , là ma trận biểu diễn lộ trình  $r_{58}$ . Do vậy, các ma trận  $X_{17}$  và  $X_{58}$  được xác định như sau:

$$X_{17} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad X_{58} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Theo (3.13) ta có BPD trên các lộ trình từ 1 đến 7 và từ 5 đến 8 được xác định bởi:

$$B_{17}^{(r)} = 1 - \prod_{i=1}^8 \prod_{j=1}^8 (1 - x_{ij}^{(17)} B_{ij}^{(h)}) \quad (3.15)$$

$$= 1 - (1 - B_{12}^{(h)})(1 - B_{24}^{(h)})(1 - B_{47}^{(h)}) \quad (3.16)$$

$$B_{58}^{(r)} = 1 - \prod_{i=1}^8 \prod_{j=1}^8 (1 - x_{ij}^{(58)} B_{ij}^{(h)}) \quad (3.17)$$

$$= 1 - (1 - B_{54}^{(h)})(1 - B_{47}^{(h)})(1 - B_{78}^{(h)}) \quad (3.18)$$

Với việc định nghĩa biến biểu diễn lộ trình  $x_{ij}^{(sd)}$  theo (3.12), việc tìm lộ trình lộ trình cân bằng tải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED sử dụng giải pháp định tuyến LBRQT tương đương với việc giải bài toán quy hoạch phi tuyến sau:

$$\text{Minimize } (B_{sd}^{(r)}) \quad (3.19)$$

trong đó,  $B_{sd}^{(r)}$  là BPD trên lộ trình  $r_{sd}$ , được xác định theo (3.13). Các điều kiện ràng buộc của hàm mục tiêu (3.19) bao gồm:

(i) **Ràng buộc luồng dữ liệu:** Với mỗi nút  $j$  trong mạng, nếu  $j$  là nút nguồn ( $s$ ) thì chỉ có luồng đi ra nút  $j$ , nếu  $j$  là nút đích ( $d$ ) thì chỉ có luồng đi vào nút  $j$ . Ngược lại, nếu  $j$  không phải là nguồn và đích thì luồng đi vào nút  $j$  phải bằng luồng đi ra. Vì vậy, điều kiện ràng buộc luồng dữ liệu được xác định bởi [27]:

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^{(sd)} - \sum_{k \in N} x_{jk}^{(sd)} = \begin{cases} -1 & \text{Nếu } j = s \\ 1 & \text{Nếu } j = d \\ 0 & \text{Ngược lại} \end{cases} \quad (3.20)$$

trong đó,  $x_{ij}^{(sd)}$  là biến biểu diễn các kết nối được chọn cho lộ trình  $r_{sd}$ , được định nghĩa theo (3.12).

(ii) **Ràng buộc về độ trễ:** Trễ truyền tải của một gói dữ liệu từ nguồn đến đích phải nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn cho phép về độ trễ ( $\tau_{th}$ ). Khi gói dữ liệu truyền qua một lộ trình, thời gian trễ của gói dữ liệu được xác định bằng tổng thời gian trễ truyền qua tất cả các bước truyền mà lộ trình đó đi qua. Do vậy, ràng buộc về độ trễ được xác



định bởi:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{ij}^{(sd)} \tau_{ij}^{(h)}) \leq \tau_{th} \quad (3.21)$$

trong đó,  $\tau_{ij}^{(h)}$  là thời gian trễ khi gói dữ liệu truyền trên bước truyền  $h_{ij}$ .

(iii) **Ràng buộc QoT:** Để đảm bảo QoT, giá trị SNR tại mỗi nút đích phải lớn hơn hoặc bằng SNR yêu cầu. Như đã phân tích ở Phần 2.2.3 của Chương 2, SNR của một lộ trình phụ thuộc vào nguyên lý chuyển tiếp gói dữ liệu tại các nút trung gian. Cụ thể là có tái tạo tín hiệu hay không. Từ các phương trình xác định SNR của một lộ trình đã được chứng minh ở (2.7) và (2.19), điều kiện ràng buộc SNR được xác định bởi:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{\beta_{ij}^{(h)} x_{ij}^{(sd)}} \right) \leq \frac{1}{\beta_{req}} & \text{Nếu không tái tạo tín hiệu} \\ \min_{x_{ij}^{(sd)}=1} \left( \beta_{ij}^{(h)} \right) \geq \beta_{req} & \text{Ngược lại} \end{cases} \quad (3.22)$$

trong đó,  $\beta_{ij}^{(h)}$  là SNR của bước truyền  $h_{ij}$ ,  $\beta_{req}$  là SNR yêu cầu tối thiểu để đảm bảo QoT theo yêu cầu.

(iv) **Ràng buộc nguyên:** Giá trị của các biến  $x_{ij}^{(sd)}$  phải là số nguyên nhị phân (0 hoặc 1 theo định nghĩa (3.12)). Do vậy điều kiện ràng buộc nguyên được xác định bởi:

$$(x_{ij}^{(sd)} - 1)x_{ij}^{(sd)} = 0 \quad (3.23)$$

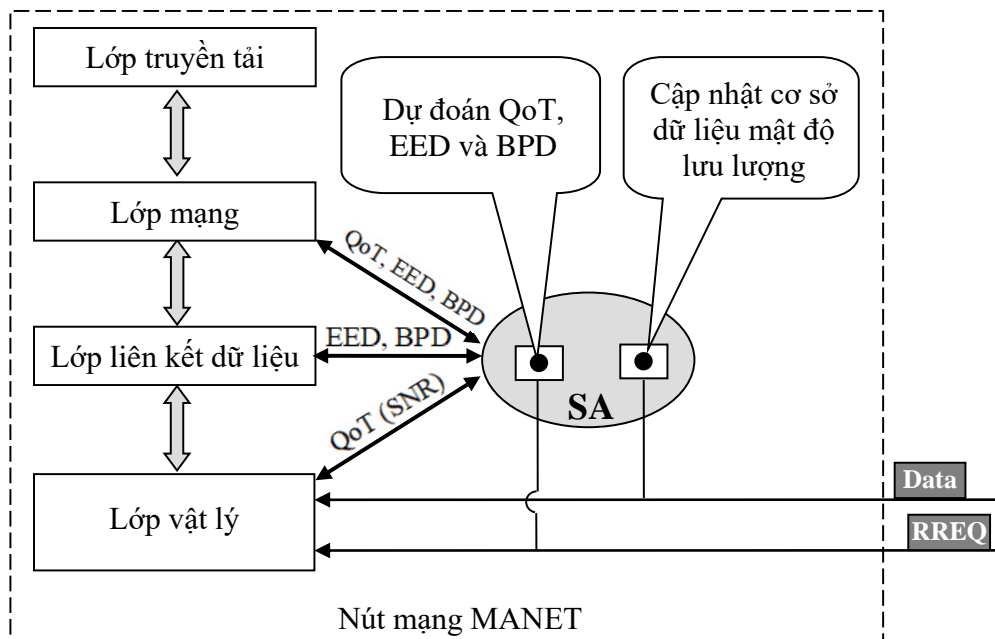
Bằng cách giải bài toán quy hoạch phi tuyến như mô tả ở (3.19) với các điều kiện ràng buộc từ (3.20) đến (3.23), ta thu được tập nghiệm  $\{x_{ij}^{(sd)}\}$ , nghĩa là tìm được lộ trình truyền dữ liệu từ nút nguồn ( $s$ ) đến nút đích ( $d$ ), thỏa mãn các điều kiện ràng buộc về chất lượng truyền dẫn.

### 3.3.2. Ý tưởng thực thi thuật toán trên mô hình xuyên lớp

Ý tưởng thực thi giải pháp định tuyến LBRQT được thể hiện qua ba công việc, (i) cải tiến cấu trúc nút mạng sử dụng mô hình xuyên lớp, (ii) cải tiến cơ chế xử lý gói RREQ và RREP tại mỗi nút mạng và (iii) cải tiến cơ chế lựa chọn lộ trình tại nút nguồn.

### 3.3.2.1. Cải tiến cấu trúc nút mạng sử dụng mô hình xuyên lớp

Để có thể sử dụng các thông tin về QoT làm điều kiện ràng buộc định tuyến, lớp mạng phải truy cập trực tiếp được các thông tin từ lớp vật lý. Điều này chỉ có thể thực hiện thông qua mô hình xuyên lớp [5, 26, 50, 2]. Với giải pháp định tuyến LBRQT, tác giả đề xuất một mô hình xuyên lớp với cấu trúc như ở Hình 3.6, trong đó, một tác tử được sử dụng để trao đổi và xử lý thông tin xuyên lớp giữa lớp vật lý và lớp mạng. Tác tử này được gọi là tác tử tĩnh (Stationary Agent - SA). SA cư trú tại mỗi nút và thực hiện các nhiệm vụ của nó trong quá trình khám phá lộ trình cũng như trong quá trình truyền dữ liệu.



**Hình 3.6.** Cấu trúc mô hình xuyên lớp sử dụng tác tử cho mạng MANET

Trong quá trình truyền dữ liệu, nhiệm vụ của SA là cập nhật tải lưu lượng phân phối cho tất cả các kết nối của mỗi nút mỗi khi có gói dữ liệu đến. Trong quá trình khám phá lộ trình, SA thực hiện các nhiệm vụ thu thập và xử lý các thông tin về QoT ở lớp vật lý, dự đoán trước các thông tin về QoT, EED và BPD để chuyển cho lớp mạng. Các nhiệm vụ này được thực hiện mỗi khi có gói RREQ đến. Các thông tin về QoT và EED được sử dụng cho các điều kiện ràng buộc định tuyến theo các phương trình (3.21) và (3.22). Thông tin về BPD sử dụng cho nút nguồn làm tiêu chí lựa chọn lộ trình cân bằng tải theo hàm mục tiêu (3.19). Nguyên lý thu thập và dự đoán các thông tin về QoT, EED và BPD bởi SA được trình bày trong các phần tiếp theo dưới đây.

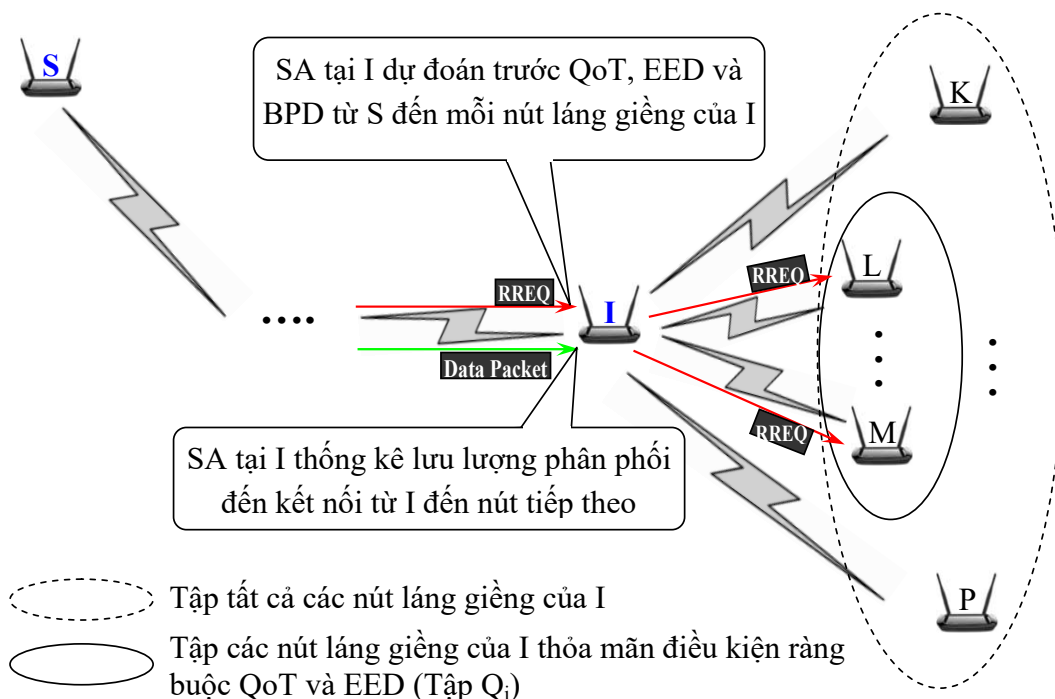
### 3.3.2.2. Cải tiến cơ chế xử lý gói RREQ và RREP tại mỗi nút mạng

Theo nguyên lý hoạt động của các giao thức định tuyến theo yêu cầu, khi cần khám phá một lộ trình mới, nút nguồn gửi quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút giềng của nó. Tại mỗi nút nhận được gói RREQ, nếu như trước đó đã nhận gói RREQ này rồi thì nút đó sẽ loại bỏ gói RREQ mà không xử lý gì thêm. Ngược lại, gói RREQ được tiếp tục gửi quảng bá đến các nút láng giềng của nút đang xét. Quá trình lặp lại cho đến khi tìm được lộ trình đến nút đích, hoặc quá thời gian chờ cho phép.

Để sử dụng các thông tin về QoS và EED làm điều kiện ràng buộc định tuyến, cũng như sử dụng thông tin BPD làm tiêu chí lựa chọn lộ trình cân bằng tải, tác giả cải tiến cơ chế xử lý gói RREQ và RREP tại mỗi nút mạng. Ý tưởng cải tiến này được thể hiện qua hai trường hợp xử lý gói RREQ tại các nút trung gian. Đó là các trường hợp bộ nhớ tạm của nút trung gian có và không có lộ trình khả dụng đến nút đích.

(i) Trường hợp bộ nhớ tạm của nút trung gian không có lộ trình khả dụng đến nút đích

Ý tưởng cải tiến cơ chế xử lý gói RREQ tại mỗi nút mạng trong trường hợp bộ nhớ tạm của nút trung gian không có lộ trình khả dụng đến nút đích được minh họa như ở Hình 3.7, trong đó, mỗi nút mạng có cấu trúc theo mô hình xuyên lớp như đã trình bày



**Hình 3.7.** Nguyên lý chuyển tiếp gói RREQ trong trường hợp nút trung gian không có lộ trình khả dụng đến đích

ở Phần 3.3.2.1. Giả sử nút đang xét là nút I, khi nút I nhận được một gói RREQ của yêu cầu khám phá lộ trình mới từ nút nguồn (S) đến nút đích (D), SA tại nút I dự đoán trước các độ đo QoT và EED từ S đến mỗi nút láng giềng của I. Trên cơ sở đó, SA xác định tập  $Q_i$  là tập các nút láng giềng của I thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED. Với ý tưởng này, khi một lộ trình được tìm thấy, lộ trình này luôn thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED. Ngoài ra, sau khi xác định được tập  $Q_i$ , SA tại nút I cũng dự đoán BPD từ S đến mỗi nút thuộc tập  $Q_i$ . Thông tin BPD này được

---

**Thuật toán 3.1:** Xác định các nút láng giềng của nút I thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED (Tập  $Q_i$ )

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một gói RREQ đến nút I; bộ nhớ tạm của I không có lộ trình đến D.

**Output:** Tập  $Q_i$ .

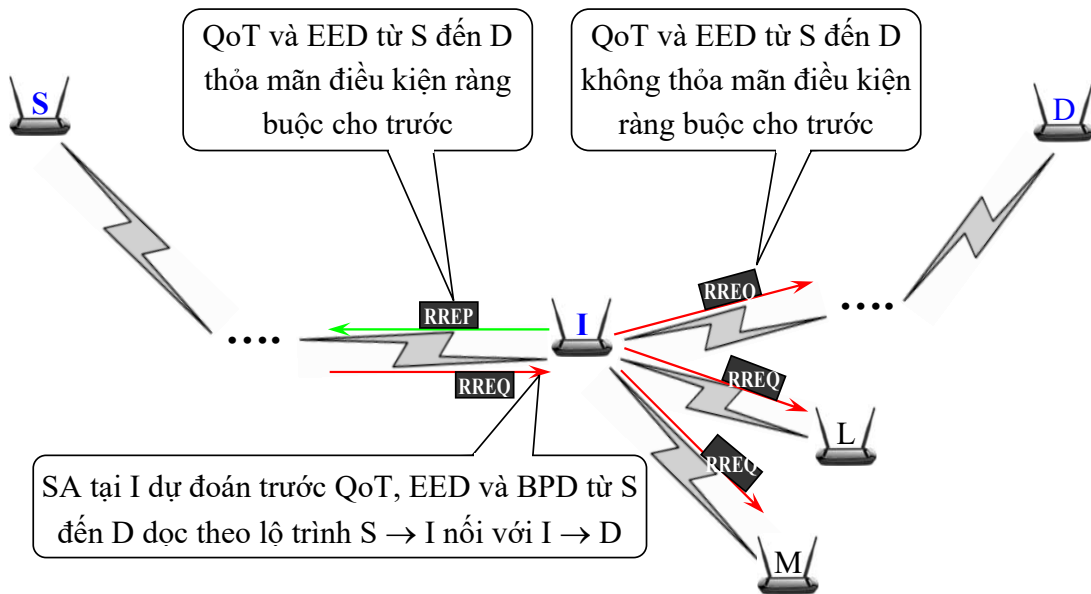
**Method:**

- (1) Đọc các thông tin về QoT và EED từ S đến I ( $\beta_{si}^{(r)}$  và  $\tau_{si}^{(r)}$ ) được lưu trữ trong gói RREQ;
  - (2)  $Q_i \leftarrow \emptyset$  ;
  - (3) **for** (Mỗi nút J là láng giềng của I) **do**
  - (4)     Thu thập thông tin SNR từ I đến J ( $\beta_{ij}^{(h)}$ ) tại lớp vật lý;
  - (5)     Dự đoán thời gian trễ từ I đến J ( $\tau_{ij}^{(h)}$ ) theo (3.8);
  - (6)      $\tau_{sj}^{(r)} \leftarrow \tau_{si}^{(r)} + \tau_{ij}^{(h)}$ ;
  - (7)     **if** (Nguyên lý hoạt động của các nút mạng là DF) **then**
  - (8)          $\beta_{sj}^{(r)} \leftarrow \min(\beta_{si}^{(r)}, \beta_{ij}^{(h)})$ ;
  - (9)     **else**
  - (10)          $\beta_{sj}^{(r)} \leftarrow \left( \frac{1}{\beta_{si}^{(r)}} + \frac{1}{\beta_{ij}^{(h)}} \right)^{-1}$ ;
  - (11)     **end**
  - (12)     **if** ( $(\tau_{sj}^{(h)} \leq \tau_{th})$  **and** ( $\beta_{sj}^{(h)} \geq \beta_{req}$ )) **then**
  - (13)         Đọc thông tin BPD từ S đến I ( $B_{si}^{(r)}$ ) trong gói RREQ;
  - (14)         Dự đoán BPD trên bước truyền từ I đến J ( $B_{ij}^{(h)}$ ) theo (3.7);
  - (15)          $B_{sj}^{(r)} = 1 - (1 - B_{si}^{(r)})(1 - B_{ij}^{(h)})$ ;
  - (16)          $Q_i \leftarrow Q_i \cup J$ ;
  - (17)     **end**
  - (18) **end**
-

sử dụng cho nút nguồn lựa chọn lộ trình cân bằng tải. Quy trình dự đoán các độ đo về QoT, EED và BPD trong trường hợp này được thực thi theo Thuật toán 3.1.

(ii) Trường hợp bộ nhớ tạm của nút trung gian có lộ trình khả dụng đến nút đích

Hình 3.8 minh họa ý tưởng cải tiến cơ chế xử lý gói RREQ tại mỗi nút mạng trong trường hợp bộ nhớ tạm của nút trung gian có lộ trình khả dụng đến nút đích. Giả sử nút đang xét là nút I, trong trường hợp này, nút I không tạo ngay gói RREP và gửi phản hồi về S như cơ chế khám phá lộ trình của giao thức định tuyến theo yêu cầu. Thay vào đó thì trước khi thực hiện điều này, SA tại nút I dự đoán trước QoT và EED từ S đến D dọc theo lộ trình từ S đến I nối với từ I đến D. Nếu QoT và EED dự đoán được thỏa mãn điều ràng buộc cho trước, gói RREP mới được tạo và gửi phản hồi về nút nguồn để trả lời kết quả khám phá lộ trình. Ngược lại, nút I xử lý gói RREQ như trường hợp bộ nhớ tạm của I không có lộ trình khả dụng đến nút đích. Quy trình dự đoán các độ đo về QoT, EED và BPD trong trường hợp này được thực thi theo Thuật toán 3.2.



**Hình 3.8.** Nguyên lý chuyển tiếp gói RREQ trong trường hợp nút trung gian có lộ trình khả dụng đến đích

### 3.3.2.3. Cải tiến cơ chế lựa chọn lộ trình tại nút nguồn

Với cơ chế xử lý gói RREQ và RREP được cải tiến như đã trình bày ở Phần 3.3.2.2, nếu một lộ trình được tìm thấy thì lộ trình này luôn thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED. Vấn đề còn lại của thuật toán định tuyến LBRQT là lựa chọn lộ trình cân bằng tải để truyền dữ liệu. Điều này được thực hiện tại nút nguồn.

---

**Thuật toán 3.2:** Dự đoán các độ đo QoT và hiệu năng mạng bởi SA khi bộ nhớ tạm của I có lộ trình đến D.

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một gói RREQ đến nút I; bộ nhớ tạm của I có lộ trình đến D.

**Output:** Gói RREP để trả lời kết quả khám phá lộ trình, hoặc Tập  $Q_i$ .

**Method:**

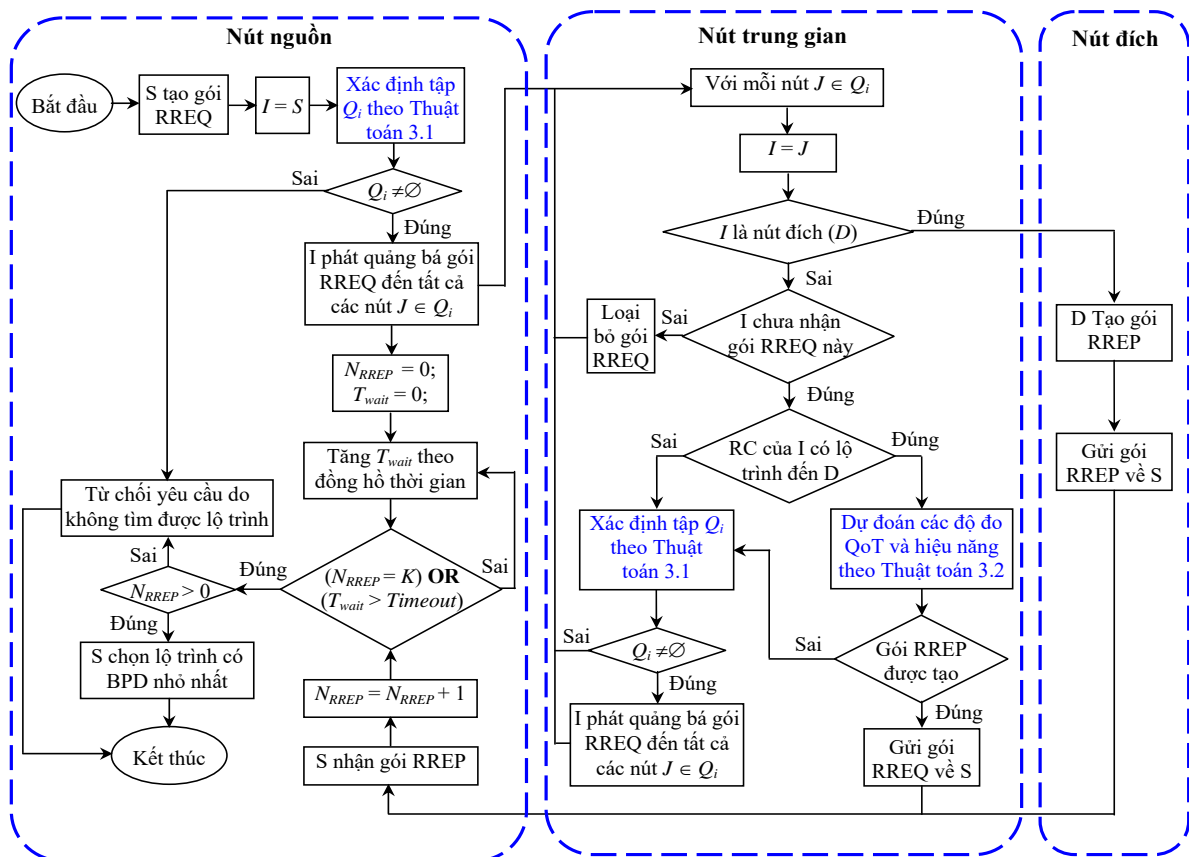
- (1) Đọc các thông tin về QoT và EED từ S đến I ( $\beta_{si}^{(r)}$  và  $\tau_{si}^{(r)}$ ) được lưu trữ trong gói RREQ;
  - (2) Đọc các thông tin QoT và EED từ I đến D ( $\beta_{id}^{(r)}$  và  $\tau_{id}^{(r)}$ ) lưu trữ trong bộ nhớ tạm của I;
  - (3)  $\tau_{sd}^{(r)} \leftarrow \tau_{si}^{(r)} + \tau_{id}^{(r)}$ ;
  - (4) **if** (Nguyên lý hoạt động của các nút mạng là DF) **then**
  - (5) |  $\beta_{sd}^{(r)} \leftarrow \min(\beta_{si}^{(r)}, \beta_{id}^{(r)})$ ;
  - (6) **else**
  - (7) |  $\beta_{sd}^{(r)} \leftarrow \left( \frac{1}{\beta_{si}^{(r)}} + \frac{1}{\beta_{id}^{(r)}} \right)^{-1}$ ;
  - (8) **end**
  - (9) **if** ( $(\tau_{sj}^{(h)} \leq \tau_{rh})$  **and** ( $\beta_{sj}^{(h)} \geq \beta_{req}$ )) **then**
  - (10) | Đọc thông tin BPD từ S đến I ( $B_{si}^{(r)}$ ) trong gói RREQ;
  - (11) | Đọc thông tin BPD từ I đến D ( $B_{id}^{(r)}$ ) trong bộ nhớ tạm của I;
  - (12) |  $B_{sd}^{(r)} = 1 - (1 - B_{si}^{(r)})(1 - B_{id}^{(r)})$ ;
  - (13) | Tạo gói RREP;
  - (14) | Lưu thông tin  $B_{sd}^{(r)}$  vào gói RREP;
  - (15) **else**
  - (16) | Tìm tập  $Q_i$  theo Thuật toán 3.1;
  - (17) **end**
- 

Theo nguyên lý hoạt động của giao thức định tuyến theo yêu cầu, khi nút nguồn nhận được nhiều gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, nút nguồn sẽ lựa chọn lộ trình có tổng số bước truyền (hopcount) nhỏ nhất để truyền dữ liệu. Với giải pháp định tuyến LBRQT, tiêu chí để lựa chọn lộ trình là cực tiểu hóa BPD theo hàm mục tiêu (3.19). Theo nguyên lý dự đoán các độ đo QoT và hiệu năng mạng bởi SA ở Thuật toán 3.1, khi một nút láng giềng được đưa vào tập  $Q_i$ , SA dự đoán BPD từ nút nguồn đến nút đó. Kết quả dự đoán BPD của một lộ trình được đưa vào gói RREP để chuyển

về nút nguồn. Nút nguồn dựa trên thông tin này để lựa chọn lộ trình cân bằng tải, sử dụng cho việc truyền dữ liệu.

### 3.4. Nguyên lý hoạt động của thuật toán

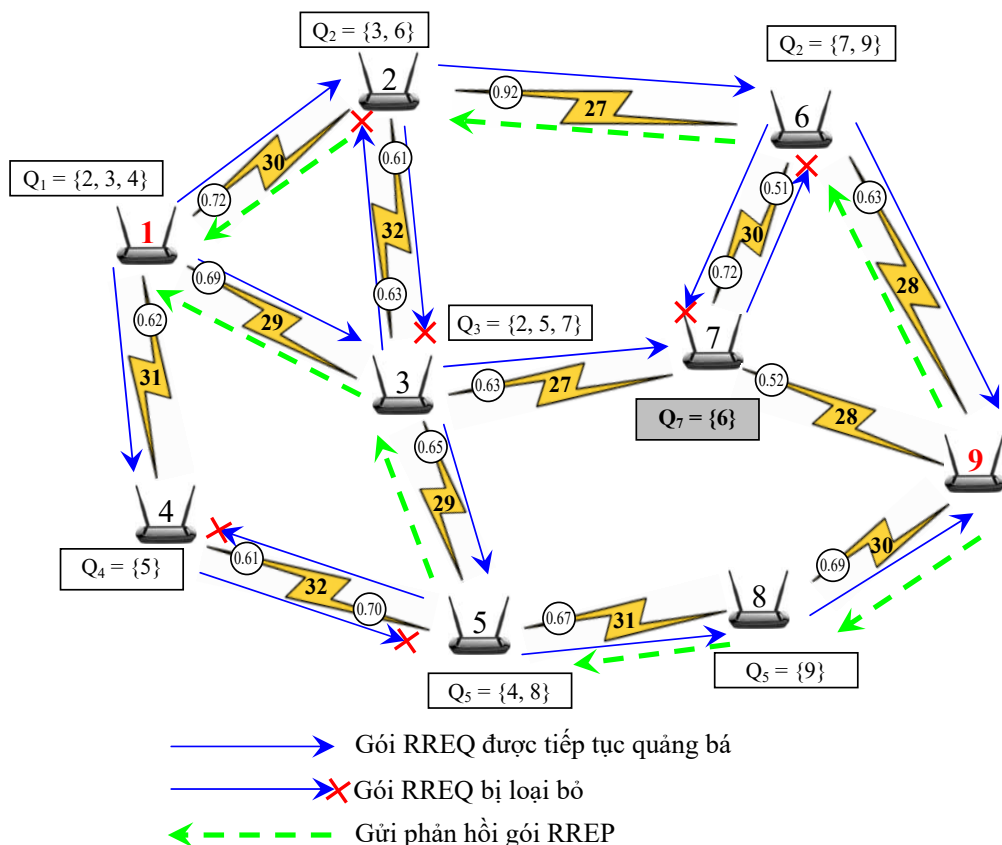
Hình 3.9 mô tả nguyên lý hoạt động của giải pháp định tuyến LBRQT. Khi nút nguồn (S) muốn khám phá một lộ trình mới đến nút đích (D), nút S tạo một gói yêu cầu lộ trình (RREQ). Trước khi phát quảng bá gói RREQ, SA tại nút S dự đoán các độ đo về QoT và EED để xác định tập  $Q_i$  theo Thuật toán 3.1. Nếu tập  $Q_i$  không rỗng, nghĩa là tồn tại các nút láng giềng của S thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED, nút S sẽ phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút trong tập này để tiếp tục quá trình khám phá lộ trình. Tại các nút trung gian, quy trình xử lý gói RREQ cũng diễn ra tương tự. Khi một nút trung gian nhận được gói RREQ mà trong bộ nhớ tạm của nó có thông tin lộ trình đến D, điều kiện ràng buộc về QoT và EED từ S đến D sẽ được kiểm tra theo Thuật toán 3.2 để quyết định tạo gói RREP để trả lời hay là tiếp tục quảng bá gói RREQ để tìm lộ trình khác thỏa mãn các ràng buộc về QoT và EED.



Hình 3.9. Lưu đồ mô tả nguyên lý hoạt động của giải pháp định tuyến LBRQT

Khi nút nguồn đã nhận được  $K$  gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, nghĩa là  $K$  lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED đã được tìm thấy, nút nguồn sẽ lựa chọn lộ trình có giá trị BPD nhỏ nhất để truyền dữ liệu. Trong trường hợp thời gian chờ kết quả khám phá lộ trình đã quá giới hạn cho phép mà nút nguồn vẫn chưa nhận được gói RREP nào, yêu cầu khám phá lộ trình sẽ bị từ chối.

Để thấy rõ nguyên lý hoạt động của giải pháp định tuyến LBRQT, tác giả xét một ví dụ khám phá lộ trình với tô-pô mạng MANET như ở Hình 3.10, trong đó, các giá trị ghi ở đầu và giữa các kết nối không dây tương ứng với mật độ lưu lượng và SNR của kết nối đó ở thời điểm đang xét. Ví dụ, với kết nối từ nút 1 đến nút 2, tải lưu lượng phân phối đến kết nối này là 0.72, SNR là 30 dB. Xét trường hợp nút 1 muốn khám phá lộ trình mới đến nút 9 để truyền dữ liệu. Giả sử ở thời điểm hiện tại, bộ nhớ tạm của tất cả các nút đều rỗng, kích thước hàng đợi tại mỗi nút là 20 gói, kích thước gói dữ liệu trung bình là 1472 bytes, hệ thống mạng sử dụng chuẩn 802.11g với băng thông kênh là 20 MHz, tương ứng với tốc độ dữ liệu 54 Mbit/s. SNR yêu cầu tối thiểu ( $\beta_{req}$ ) là 23.5 dB, thời gian trễ từ nguồn đến đích cho phép ( $\tau_{th}$ ) là 0.01s. Quy trình khám



**Hình 3.10.** Một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng giải pháp định tuyến LBRQT



phá lộ trình mới từ nút 1 đến nút 9 sử dụng giải pháp định tuyến LBRQT được thực hiện theo các bước như sau:

**- Bước 1: Nút 1 tạo và quảng bá gói RREQ:**

Để khởi đầu quá trình khám phá lộ trình, nút 1 tạo gói RREQ. Trước khi phát quảng bá gói RREQ, SA tại nút 1 dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD đến các nút láng giềng của nó để xác định tập  $Q_1$ , là tập các nút láng giềng của nút 1 thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED. Theo Thuật toán 3.1, SA dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD như Bảng 3.1. Ta thấy rằng, các giá trị SNR và EED từ nút 1 đến các nút 2, 3, và 4 đều thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS và EED ( $\beta_{sj} > \beta_{req}$  và  $\tau_{sj} < \tau_{th}, s = 1, j = 2, 3, 4$ ), nên tập  $Q_1 = \{2, 3, 4\}$ . Sau khi xác định được tập  $Q_1$ , nút 1 phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút thuộc tập này, cụ thể là các nút 2, 3 và 4.

**Bảng 3.1.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút 1 bởi SA

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)		
			2	3	4
-	1	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	30.00	29.00	31.00
		$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00099079	0.00091893	0.00079165
		$B_{sj}^{(h)}$	0.00039287	0.00018558	0.00002677
		Tập $Q_1$	✓	✓	✓

**- Bước 2: Các nút nhận gói RREQ ở bước 1 tiếp tục xử lý gói RREQ:**

Các nút nhận được gói RREQ ở bước 1 bao gồm nút 2, 3 và 4 tiếp tục xử lý gói RREQ. SA tại các nút này dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD theo Thuật toán 3.1. Cụ thể, nút 2 dự đoán SNR, EED và BPD từ nút 1 đến tất cả các nút láng giềng của nó là 3 và 6. Tương tự cho các nút 3 và 4. Kết quả dự đoán như ở Bảng 3.2. Từ kết quả này, SA tại các nút 2, 3, và 4 xác định được tập các nút láng giềng của nó thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED tương ứng là:  $Q_2 = \{3, 6\}$ ,  $Q_3 = \{2, 5, 7\}$  và  $Q_4 = \{5\}$ . Các nút 2, 3 và 4 tiếp tục quảng bá gói RREQ đến các nút trong tập  $Q_j$  tương ứng của nó.

**- Bước 3: Các nút nhận gói RREQ ở bước 2 tiếp tục xử lý gói RREQ:**

Các nút nhận được gói RREQ ở bước 2 bao gồm: (i) các nút 3, 6 nhận được từ nút 2, (ii) các nút 2, 5, 7 nhận được từ nút 3 và (iii) nút 5 nhận được từ nút 4. Khi nút 3

**Bảng 3.2.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 1

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			3	6		
(a)	1	2	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	27.88	25.24	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00176780	0.00292039	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00041271	0.01865218	
			Tập $Q_2$	✓	✓	

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			2	5	7	
(b)	1	3	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	27.24	25.99	24.88
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00172597	0.00175928	0.00172597
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00022147	0.00024901	0.00022147
			Tập $Q_3$	✓	✓	✓

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			5			
(c)	1	4	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	28.46		
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00156866		
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00004662		
			Tập $Q_4$	✓		

**Bảng 3.3.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 2

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			4	8		
(a)	1 → 3	5	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	25.01	24.80	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00270078	0.00263673	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00048846	0.00035866	
			Tập $Q_5$	✓	✓	

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			7	9		
(b)	1 → 2	6	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	23.98	<b>23.71</b>	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00358350	<b>0.00372743</b>	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.01865286	<b>0.01868741</b>	
			Tập $Q_6$	✓	✓	

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			6	9		
(c)	1 → 3	7	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	23.71	<b>23.15</b>	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00271675	<b>0.00239835</b>	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00061425	<b>0.00022247</b>	
			Tập $Q_7$	✓	<b>X</b>	

nhận được gói RREQ từ nút 2, gói RREQ này sẽ bị hủy bỏ do nút 3 đã nhận gói RREQ này trước đó từ nút 1 (ở bước 1), tương tự như vậy cho các nút khác. Các nút tiếp tục xử lý gói RREQ ở bước này bao gồm 5, 6 và 7. Kết quả dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD như ở Bảng 3.3. Với kết quả này, trường hợp nút 7 dự đoán SNR từ nút nguồn (nút 1) đến nút 9 (Bảng 3.3c), giá trị dự đoán được là 23.15 dB. Giá trị này không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT, do nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu là 23.5 dB. Vì vậy, nút 9 không được đưa vào tập  $Q_7$ , mặc dù nút 9 là láng giềng của nút 7. Từ kết quả này, SA tại các nút 5, 6, và 7 xác định được tập các nút láng giềng của nó thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED tương ứng là:  $Q_5 = \{4, 8\}$ ,  $Q_6 = \{7, 9\}$  và  $Q_7 = \{6\}$ . Các nút 5, 6 và 7 tiếp tục quảng bá gói RREQ đến các nút trong tập  $Q_j$  tương ứng của nó.

**- Bước 4: Các nút nhận gói RREQ ở bước 3 tiếp tục xử lý gói RREQ:**

Các nút nhận được gói RREQ ở bước 3 bao gồm: (i) các nút 4, 8 nhận được từ nút 5, (ii) các nút 7, 9 nhận được từ nút 6 và (iii) nút 6 nhận được từ nút 7. Trong đó, các gói RREQ nhận được tại các nút 4, 6 và 7 sẽ bị loại bỏ, do trước đó các nút này đã nhận được gói RREQ này. Chỉ còn lại các nút 8 và 9 tiếp tục xử lý gói RREQ.

Tại nút 8, gói RREQ được tiếp tục xử lý tương tự như các nút trên. Kết quả dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD như ở Bảng 3.4. Tập  $Q_8$  được xác định là:  $Q_8 = \{9\}$ . Tại nút 9, khi nhận được gói RREQ từ nút từ nút 6, vì 9 là nút đích, nên nút 9 tạo gói RREP và gửi phản hồi về nút 1. Kết quả là lộ trình đầu tiên được tìm thấy:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9$ .

**Bảng 3.4.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 3

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)		
			9		
1 → 3 → 5	8	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	23.65		
		$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00355565		
		$B_{sj}^{(h)}$	0.00054417		
		Tập $Q_8$	✓		

**- Bước 5: Các nút nhận gói RREQ ở bước 4 tiếp tục xử lý gói RREQ:**

Tại bước này, chỉ còn lại nút 9 nhận được gói RREQ từ nút 8. Vì 9 là nút đích, nên nút 9 tạo gói RREP và gửi phản hồi về nút 1. Kết quả là lộ trình thứ 2 được tìm thấy:  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ .

### - Bước 6: Xử lý gói RREP tại nút nguồn:

Qua quá trình phát quảng bá gói RREQ, nút nguồn nhận được 2 gói phản hồi RREP, tương ứng với 2 lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED được tìm thấy là  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9$  và  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ . Dựa trên kết quả dự đoán BPD của SA trong quá trình khám phá lộ trình, BPD của lộ trình  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9$  là 0.01868741 (kết quả ở các Bảng 3.3b), BPD của các lộ trình  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$  là 0.00054417 (kết quả ở Bảng 3.4). Như vậy, theo nguyên lý của giải pháp định tuyến LBQT-R, lộ trình có giá trị BPD nhỏ nhất sẽ được chọn, đó là  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ .

Bằng việc chọn lộ trình  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ , giải pháp định tuyến LBQT-R đã tránh được các bước truyền đang có tải lưu lượng lớn (các bước truyền  $1 \rightarrow 2$  và  $2 \rightarrow 6$  ở tô-pô Hình 3.10). Kết quả này cho thấy rằng, giải pháp định tuyến LBQT-R đã tìm được lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED, đồng thời cân bằng tải lưu lượng trên các kết nối.

### 3.5. Áp dụng cho giao thức AODV

Trong phần này, tác giả áp dụng giải pháp định tuyến ràng buộc QoS kết hợp với cân bằng tải (LBRQT) được đề xuất ở Chương 2 để cải tiến thuật toán khám phá lộ trình của giao thức định tuyến AODV [16]. Thuật toán cải tiến được đặt tên là LBRQT-AODV (Load Balancing Routing ensuring Quality of Transmission based on AODV). Đề xuất này của tác giả đã được công bố trong [B2]<sup>1</sup>.

#### 3.5.1. Đặt vấn đề

AODV là giao thức định tuyến thuộc nhóm định tuyến theo yêu cầu [66]. Nguyên lý khám phá lộ trình của giao thức AODV là phát quảng bá gói RREQ và nhận phản hồi gói RREP, tiêu chí để lựa chọn lộ trình là tổng số bước truyền (hopcount) nhỏ nhất.

Với nguyên lý khám phá lộ trình của giao thức AODV, tồn tại một số trường hợp lộ trình tìm được không phải là lộ trình có QoS tốt nhất, thậm chí có trường hợp lộ trình tìm được không thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS. Vì lộ trình có tổng số bước truyền nhỏ nhất chưa hẳn là QoS tốt nhất. QoS của một lộ trình không chỉ phụ thuộc vào tổng số bước truyền, mà còn phụ thuộc vào một số yếu tố khác, như suy hao công suất tín hiệu trên mỗi bước truyền, nhiễu phát sinh trên mỗi bước truyền, dạng chuyển

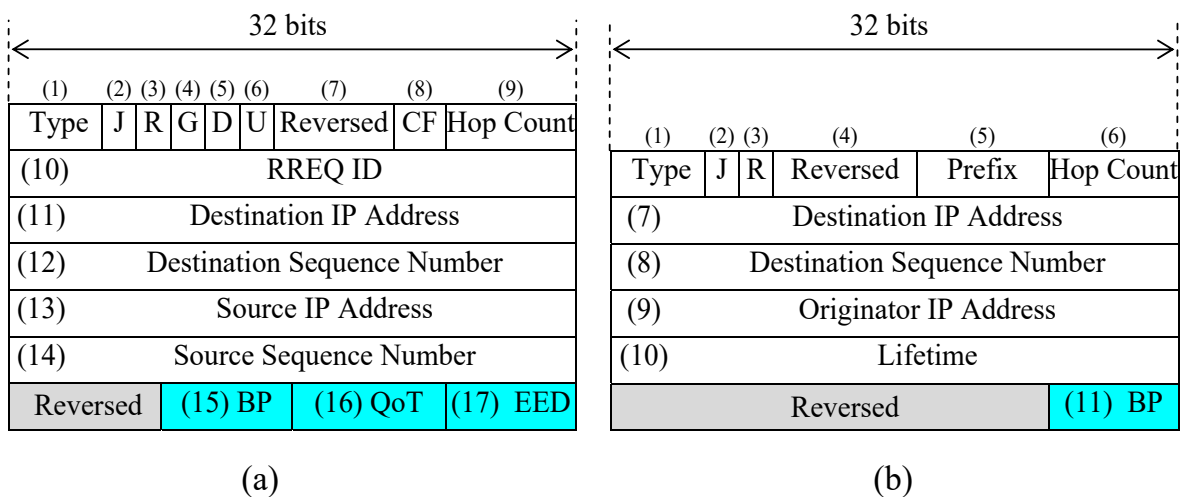
<sup>1</sup>Journal of Communications, Vol.13, No.7, 2018, pp. 338-349 (SCOPUS).

tiếp tín hiệu tại các nút mạng. Kết quả nghiên cứu ở Phần 2.4.3 của Chương 2 cũng đã chỉ rõ một ví dụ cụ thể về việc giao thức AODV không tìm được lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT, mặc dù trong hệ thống mạng vẫn tồn tại lộ trình này.

Để giải quyết vấn đề trên, tác giả áp dụng giải pháp định tuyến LBRQT được trình bày ở Chương 2 để cải tiến thuật toán khám phá lộ trình của giao thức AODV, nhằm tìm ra lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT, nâng cao hiệu năng mạng.

### 3.5.2. *Chỉnh sửa khuôn dạng gói RREQ và RREP*

Theo nguyên lý hoạt động của giải pháp định tuyến LBRQT, để SA tại mỗi nút mạng có thể dự đoán được các tham số hiệu năng, các nút mạng phải trao đổi với nhau các thông tin liên quan đến các tham số hiệu năng cần dự đoán. Đối với mạng MANET, việc trao đổi thông tin với nhau giữa các nút được thực hiện thông qua các gói điều khiển. Trong thuật toán khám phá lộ trình LBRQT-AODV, tác giả sử dụng các gói RREQ và RREP để trao đổi các thông tin về QoT, EED giữa các nút và xác suất nghẽn trên mỗi kết nối. Để thực hiện điều này, tác giả chỉnh sửa cấu trúc gói RREQ và RREP của giao thức AODV như cho thấy ở Hình 3.11. Đối với gói RREQ (Hình 3.11a), các trường từ (1) đến (14) là các trường nguyên bản của gói RREQ trong giao thức AODV, các trường (15), (16) và (17) là các trường mà tác giả thêm vào để lưu trữ các thông tin về xác suất chặn gói dữ liệu, QoT và EED. Đối với gói RREP (Hình 3.11b), các trường từ (1) đến (10) là các trường nguyên bản của gói RREP trong giao thức AODV. Tác giả thêm vào trường (11) xác suất chặn gói dữ liệu trên một lộ trình.



**Hình 3.11.** Cấu trúc của các gói điều khiển sử dụng trong thuật toán LBRQT-AODV:

(a) RREQ và (b) RREP

### 3.5.3. Thuật toán định tuyến LBRQT-AODV

Cơ chế khám phá lộ trình ràng buộc QoT kết hợp với cân bằng tải cải tiến của giao thức AODV (LBRQT-AODV) được thực thi theo các bước như ở Thuật toán 3.3 và 3.4. Có ba điểm khác nhau cơ bản giữa thuật toán LBRQT-AODV và thuật toán khám phá lộ trình của giao thức AODV, đó là (i) quy trình xử lý gói RREQ và RREP tại nút nguồn (Thuật toán 3.3), (ii) quy trình xử lý gói RREQ khi nút trung gian không có một lộ trình khả dụng đến đích (các bước (5) đến (11) của Thuật toán 3.4), và (iii) quy trình xử lý gói RREQ khi nút trung gian có một lộ trình khả dụng đến đích (các bước (13) đến (19) của Thuật toán 3.4).

(i) Quy trình xử lý gói RREQ và RREP tại nút nguồn: Xét trường hợp một nút nguồn cần khám phá lộ trình mới đến nút đích. Để thực hiện điều này, nút nguồn tạo gói RREQ để khởi đầu quá trình khám phá lộ trình. Với thuật toán AODV, gói RREQ được truyền quảng bá đến tất cả các nút láng giềng của nó. Trong khi đó, thuật toán

---

#### Thuật toán 3.3: Thuật toán định tuyến LBRQT-AODV tại nút nguồn

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một yêu cầu khám phá lộ trình mới từ nút nguồn (S) đến nút đích (D).

**Output**: Một lộ trình cân bằng tải từ S đến D thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT và EED, hoặc từ chối yêu cầu nếu không tìm được lộ trình.

**Method**:

- (1) S tạo gói RREQ;
  - (2) SA xác định tập  $Q_s$  theo Thuật toán 3.1;
  - (3) **if** ( $Q_i \neq \emptyset$ ) **then**
  - (4)     Phát gói quảng bá gói RREQ đến các nút thuộc tập  $Q_s$ ;
  - (5)     Chờ đến khi nhận được  $K$  gói RREP hoặc hết thời gian chờ cho phép;
  - (6)     **if** (*Số gói RREP nhận được* > 0) **then**
  - (7)         Chọn lộ trình có giá trị trong trường BPD của gói RREP nhỏ nhất để cập nhật vào bộ nhớ tạm của S;
  - (8)     **else**
  - (9)         // Không tìm được lộ trình nào thỏa mãn điều kiện ràng buộc QoT và EED;
  - (9)         Từ chối yêu cầu khám phá lộ trình;
  - (10)     **end**
  - (11) **else**
  - (12)     Từ chối yêu cầu khám phá lộ trình;
  - (13) **end**
-

---

**Thuật toán 3.4:** Thuật toán LBRQT-AODV tại nút trung gian hoặc đích

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một gói RREQ đến nút I.

**Output:** Tập  $Q_i$  hoặc gói RREP để trả lời kết quả khám phá lộ trình.

**Method:**

```
(1) Nút I nhận gói RREQ;
(2) if (I là nút trung gian) then
(3)   if (I chưa nhận gói RREQ này trước đó) then
(4)     Cập nhật đường ngược về S vào bộ nhớ tạm của I;
(5)     if (bộ nhớ tạm của I không có lộ trình khả dụng đến D) then
(6)       SA xác định tập  $Q_i$  theo Thuật toán 3.1;
(7)       if ( $Q_i \neq \emptyset$ ) then
(8)         | Phát quảng bá gói RREQ đến các nút thuộc tập  $Q_s$ ;
(9)       else
(10)        | Loại bỏ RREQ; Kết thúc tiến trình xử lý gói RREQ;
(11)      end
(12)     else
(13)       if (DSN của lộ trình  $I \rightarrow D$  lớn hơn DSN trong gói RREQ) then
(14)         SA dự đoán các độ đo QoT và hiệu năng dọc theo lộ trình  $S \rightarrow I$  nối với  $I \rightarrow D$  theo Thuật toán 3.2;
(15)         if (Gói RREP được tạo) then
(16)           | Gửi gói RREP về S theo đường ngược;
(17)         else
(18)           | Thực hiện các bước 6 đến 11;
(19)         end
(20)       else
(21)         | Thực hiện các bước 6 đến 11;
(22)       end
(23)     end
(24)   else
(25)     Loại bỏ gói RREQ;
(26)     Kết thúc tiến trình xử lý gói RREQ vừa nhận;
(27)   end
(28) else
(29)   Cập nhật đường ngược về S vào bộ nhớ tạm của I;
(30)   Tạo gói RREP; Gửi gói RREP về S theo đường ngược;
(31) end
```

---

LBRQT-AODV chỉ quảng bá gói RREQ đến các nút thuộc tập  $Q_s$ , là tập các nút láng giềng của nút nguồn thỏa mãn các điều kiện ràng buộc QoT và EED. Tập  $Q_i$  được xác định theo Thuật toán 3.1. Đối với quy trình xử lý gói RREP, để xét đến điều kiện cân bằng tải trong thuật toán LBRQT-AODV, khi tìm được một lộ trình, xác suất gói dữ

liệu bị chặn nếu sử dụng lộ trình này để truyền dữ liệu sẽ được dự đoán trước bởi SA tại mỗi nút. Giá trị này được lưu trữ trong gói RREP. Khi nút nguồn nhận được các gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, nút nguồn sẽ chọn lộ trình mà xác suất chặn gói dữ liệu nhỏ nhất để cập nhật vào bảng định tuyến.

(ii) Quy trình xử lý gói RREQ khi bộ nhớ tạm của nút trung gian không có một lộ trình khả dụng đến đích: Theo nguyên lý của giao thức AODV, nếu như trước đó nút trung gian I chưa nhận gói RREQ này thì I sẽ phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút láng giềng của nó, ngoại trừ nút đã gửi gói RREQ cho I để tiếp tục quá trình khám phá lộ trình. Với thuật toán LBRQT-AODV, nút I chỉ quảng bá gói RREQ đến các nút thuộc tập  $Q_i$ , là các nút láng giềng của nút I thỏa mãn các điều kiện ràng buộc QoT và EED. Tập  $Q_i$  được xác định theo Thuật toán 3.1.

(iii) Quy trình xử lý gói RREQ khi nút trung gian có một lộ trình khả thi để đến đích: Theo nguyên lý của giao thức AODV, khi bộ nhớ tạm của nút I có một lộ trình khả dụng đến đích, gói RREP sẽ được tạo và gửi phản hồi về nguồn để trả lời kết quả khám phá lộ trình. Với thuật toán LBRQT-AODV, điều kiện ràng buộc về QoT từ nguồn đến đích phải được kiểm tra trước khi quyết định trả lời về nguồn bằng gói RREP, hay tiếp tục khám phá lộ trình mới có QoT tốt hơn.

### 3.6. Áp dụng cho giao thức DSR

Trong phần này, tác giả tiếp tục áp dụng giải pháp định tuyến ràng buộc QoT kết hợp với cân bằng tải (LBRQT) để cải tiến thuật toán khám phá lộ trình của giao thức định tuyến DSR [22]. Thuật toán cải tiến được đặt tên là LBRQT-DSR (Load Balancing Routing ensuring Quality of Transmission based on DSR). Đề xuất này của tác giả đã được công bố trong [B4]<sup>2</sup> và [B7]<sup>3</sup>.

#### 3.6.1. Đặt vấn đề

DSR là một giao thức định tuyến theo yêu cầu [66], cơ chế khám phá lộ trình của giao thức DSR cũng thực hiện theo nguyên lý phát quảng bá gói RREQ và nhận phản hồi gói RREP. DSR là giao thức định tuyến nguồn. Khi có yêu cầu truyền dữ liệu, nút nguồn sẽ kiểm tra lộ trình trong bộ nhớ tạm của nó. Nếu có lộ trình khả dụng thì sử dụng lộ trình này để truyền dữ liệu. Ngược lại, nút nguồn thực hiện khám

<sup>2</sup>Journal of Computer Science and Cybernetics, Vol.32, No.4, 2016, pp. 351-366

<sup>3</sup>Kỷ yếu Hội thảo FAIR'9, 2016, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, trang 480-487



phá lộ trình mới.

Theo kết quả nghiên cứu về QoT của các lộ trình trong mạng MANET khi sử dụng các giao thức định tuyến theo yêu cầu ở Chương 2, việc khám phá lộ trình mới theo nguyên lý của giao thức DSR sẽ tồn tại một số trường hợp lộ trình tìm được không phải là lộ trình có QoT tốt nhất, thậm chí có trường hợp lộ trình tìm được không thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT, mặc dù trong hệ thống mạng vẫn tồn tại lộ trình này. Vì vậy, việc cải tiến cơ chế khám phá lộ trình để có thể tìm được lộ trình thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT là điều cần thiết. Một trong những giải pháp để thực hiện điều này là áp dụng giải pháp định tuyến LBRQT mà tác giả đã đề xuất ở Chương 2. Mục tiêu của việc cải tiến là tìm ra lộ trình thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT, đồng thời có xét đến tiêu chí cân bằng tải lưu lượng trong toàn mạng nhằm giảm xác suất chặn gói dữ liệu, nâng cao hiệu năng mạng.

### 3.6.2. *Chỉnh sửa khuôn dạng gói RREQ và RREP*

Theo nguyên lý hoạt động của giải pháp định tuyến LBRQT đã được trình bày ở Phần 3.4, để SA tại các nút mạng có thể dự đoán được các độ đo về QoT và hiệu năng mạng, các nút mạng phải trao đổi với nhau các thông tin về SNR, EED và BPD. Đối với mạng MANET, việc trao đổi thông tin giữa các nút chỉ có thể thực hiện thông qua các gói điều khiển. Trong thuật toán LBRQT-DSR, tác giả sử dụng các gói RREQ và RREP để trao đổi các thông tin về QoT, EED và BPD giữa các nút. Để thực hiện điều này, tác giả chỉnh sửa khuôn dạng của gói RREQ và RREP của giao thức DSR như cho thấy ở Hình 3.12. Trong đó, các trường được đánh dấu (\*) là các trường nguyên bản của gói RREQ trong giao thức DSR. Các trường được đánh dấu (\*\*) là các trường

Opt. type (*)	Opt. Data Length (*)	Identification (*)	
Target Address (*)			
Address [1] (*)			
Address [2] (*)			
... (*)			
Address [n] (*)			
Reserved	BP (**)	QoT (**)	E2E (**)

(a)

Opt. type (*)	Opt. Data Len (*)	Last Hop Ext. (*)	Reserved (*)
Address [1] (*)			
Address [2] (*)			
Address [3] (*)			
... (*)			
Address [n] (*)			
Reserved			BP (**)

(b)

**Hình 3.12.** Cấu trúc của các gói điều khiển sử dụng trong thuật toán LBRQT-DSR: (a) RREQ và (b) RRREP

được thêm vào để lưu trữ các thông tin về QoT, EED và BPD, sử dụng cho quá trình khám phá lộ trình.

### 3.6.3. Thuật toán định tuyến LBRQT-DSR

Thuật toán định tuyến LBRQT-DSR được thực thi theo các bước như ở Thuật toán 3.5. So với thuật toán khám phá lộ trình của giao thức DSR, thuật toán LBRQT-DSR có ba điểm khác biệt, đó là (i) quy trình xử lý gói RREQ tại nút nguồn và nút trung gian (các bước (4) và (5)), (ii) quy trình xử lý khi nút trung gian có một lộ trình khả thi để đến đích (các bước từ (14) đến (23)) và (iii) quy trình xử lý gói RREP tại nút nguồn (các bước từ (36) đến (40)).

#### (i) Quy trình xử lý gói RREQ tại nút nguồn và nút trung gian

Xét trường hợp một nút nguồn hoặc nút trung gian cần chuyển tiếp gói RREQ để khám phá lộ trình. Với thuật toán DSR, gói RREQ được truyền quảng bá đến tất cả các nút láng giềng của nó. Trong khi đó, thuật toán LBRQT-DSR chỉ quảng bá gói RREQ đến các nút thuộc tập  $Q_I$ , là các nút láng giềng của nút I (I là nút nguồn hoặc nút trung gian) thỏa mãn các điều kiện ràng buộc QoT và EED. Tập  $Q_i$  được SA ký sinh tại mỗi nút xác định theo Thuật toán 3.1.

#### (ii) Quy trình xử lý khi nút trung gian có một lộ trình khả thi để đến đích

Theo nguyên lý khám phá lộ trình của giao thức DSR, khi bảng định tuyến của một nút trung gian có một lộ trình khả thi để đến đích, nút trung gian sẽ tạo gói RREP và gửi phản hồi về nguồn để trả lời kết quả khám phá lộ trình. Với thuật toán định tuyến LBRQT-DSR, điều kiện ràng buộc về QoT và EED từ nút nguồn đến nút đích phải được kiểm tra trước khi trả lời về nút nguồn bằng gói RREP. Điều này thể hiện rõ ở các bước từ (14) đến (23) của Thuật toán 3.5.

#### (iii) Quy trình xử lý gói RREP tại nút nguồn

Để thực hiện chức năng chọn lộ trình cân bằng tải, sau khi tạo và gửi quảng bá gói RREQ, nút nguồn sẽ chờ một khoảng thời gian cho phép để nhận  $K$  gói phản hồi RREP, tương ứng với  $K$  lộ trình từ nguồn đến đích có thể sử dụng cho việc truyền dữ liệu. Sau đó, nút nguồn sẽ chọn lộ trình mà giá trị BPD trong gói RREP nhỏ nhất trong số  $K$  lộ trình khả dụng để truyền dữ liệu.

---

**Thuật toán 3.5:** Thuật toán định tuyến LBRQT-DSR

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET; Một yêu cầu khám phá lộ trình mới từ S đến D.

**Output:** Một lộ trình cân bằng tải từ S đến D thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED.

**Method:**

```
(1) S tạo gói RREQ;
(2)  $I \leftarrow S$ ;  $N_{RREP} = 0$ ;
(3) repeat
(4)   Xác định tập  $Q_i$  theo Thuật toán 3.1 (Chương 2);
(5)   Phát gói quảng bá gói RREQ đến các nút J thuộc tập  $Q_i$ ;
      //Tại các nút nhận được gói RREQ (nút J);
(6)   if (Trước đó J chưa nhận gói RREQ này) then
(7)     Thêm một bản ghi vào bảng định tuyến của J chứa lộ trình ngược về S;
(8)     if (J chưa phải là nút đích (nút D)) then
(9)       if (Bảng định tuyến của J không có lộ trình đến D) then
(10)        Cập nhật đường ngược về S vào bảng định tuyến của J;
(11)        Cập nhật lộ trình từ S đến J trong gói RREQ;
(12)         $I \leftarrow J$ ;
(13)       else
(14)        SA tại J dự đoán các độ đo QoT và hiệu năng dọc theo lộ trình  $S \rightarrow$ 
          I nối với  $I \rightarrow D$  theo Thuật toán 3.2 (Chương 2);
(15)        if (Gói RREP được tạo) then
(16)          Nói lộ trình  $S \rightarrow J$  với lộ trình  $J \rightarrow D$ ;
(17)           $N_{RREP} \leftarrow N_{RREP} + 1$ ;
(18)          Gửi gói RREP về S theo đường ngược;
(19)        else
(20)          Cập nhật đường ngược về S trong bảng định tuyến của J;
(21)          Cập nhật lộ trình từ S đến J trong gói RREQ;
(22)           $I \leftarrow J$ ;
(23)        end
(24)       end
(25)     else
(26)       Tạo gói RREP;
(27)       Cập nhật lộ trình  $S \rightarrow D$  vào gói RREP;
(28)        $N_{RREP} \leftarrow N_{RREP} + 1$ ;
(29)       Gửi gói RREP về S theo đường ngược;
(30)     end
(31)   else
(32)     Xóa gói RREQ;
(33)     Kết thúc tiến trình xử lý gói RREQ vừa nhận;
(34)   end
(35) until ( $N_{RREP} = K$ ) or (Quá thời gian chờ);
(36) if ( $N_{RREP} > 0$ ) then
(37)   | Nút S chọn một lộ trình có giá trị BPD trong gói RREP nhỏ nhất;
(38) else
(39)   | // Không tìm được lộ trình nào thỏa mãn điều kiện ràng buộc QoT và EED;
      | Từ chối yêu cầu khám phá lộ trình mới từ S đến D;
(40) end
```

---

### 3.7. Mô phỏng và phân tích kết quả

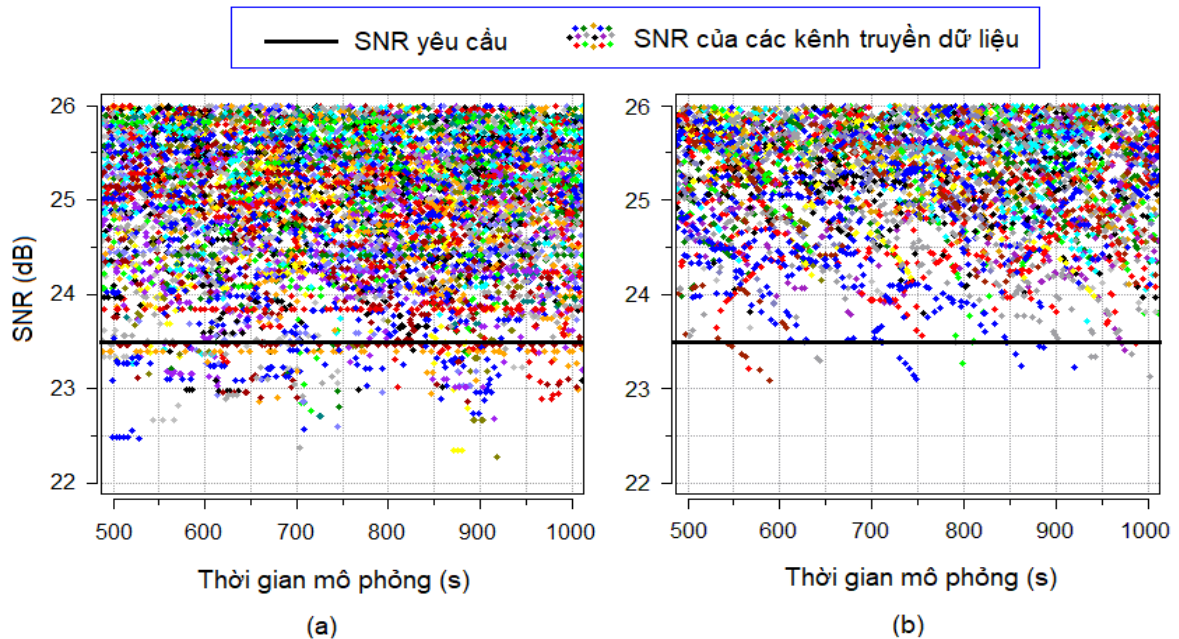
#### 3.7.1. Xây dựng kịch bản mô phỏng

Hiệu quả thực thi của các thuật toán định tuyến LBRQT-AODV và LBRQT-DSR được đánh giá bằng phương pháp mô phỏng, tác giả đã tiến hành mô phỏng trên phần mềm mô phỏng OMNeT++ [10]. Thuật toán LBRQT-AODV và LBRQT-DSR được so sánh với thuật toán khám phá lộ trình của giao thức AODV [16] và giao thức DSR [22] về SNR, BER, xác suất chặn gói dữ liệu và thông lượng trên toàn mạng. Ngoài ra, các thuật toán được đề xuất cũng được so sánh với thuật toán DSR-SNR của nhóm tác giả trong [24]. Các kịch bản mô phỏng được thiết lập như ở Phần 2.5.1 của Chương 2.

#### 3.7.2. Kết quả mô phỏng thuật toán LBRQT-AODV

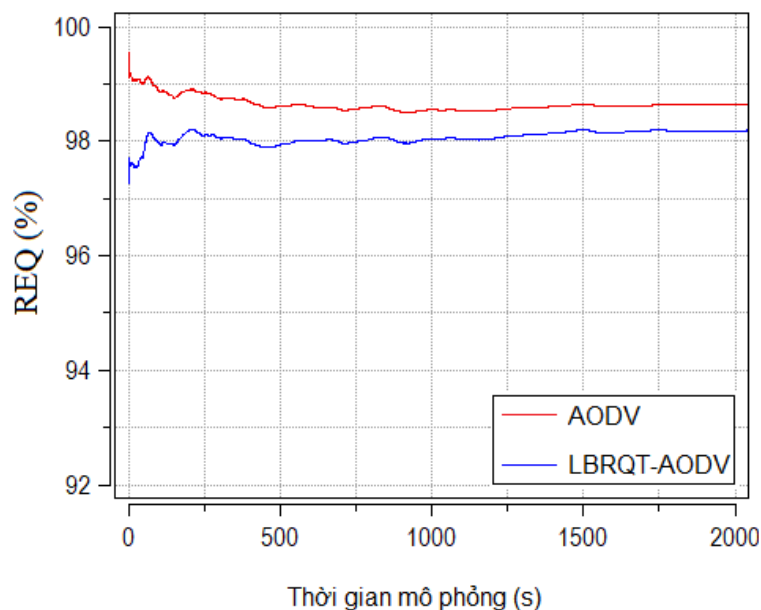
##### 3.7.2.1. Phân tích SNR

Kết quả thu được trên Hình 3.13 cho ta thấy sự khác biệt về SNR trên các lộ trình truyền dữ liệu khi sử dụng thuật toán định tuyến AODV và LBRQT-AODV. Kết quả này được thực thi trên tô-pô 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 10 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Theo như kịch bản mô phỏng đã xây dựng ở Phần 2.5.1 của Chương 2, để đảm bảo QoS của hệ thống mạng thì SNR nhỏ nhất của mỗi lộ trình

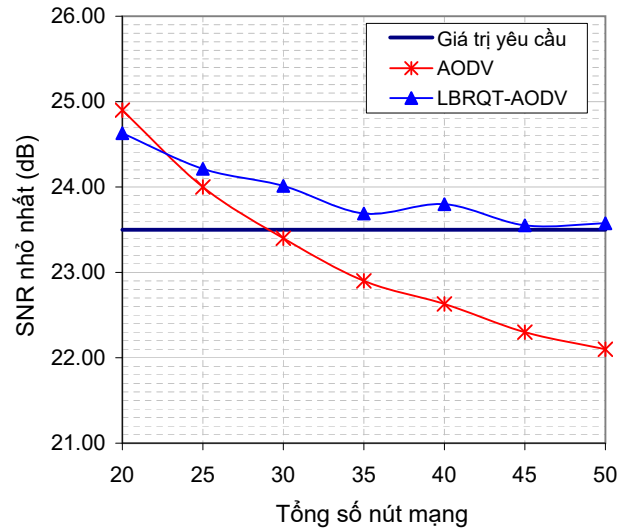


**Hình 3.13.** So sánh SNR của thuật toán (a) AODV và (b) LBRQT-AODV khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 10 m/s, băng thông kênh 40 MHz

phải là 23.5 dB. Các đồ thị điểm trên Hình 3.13 cho thấy rằng, với thuật toán AODV, có nhiều lộ trình mà SNR của nó nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Các lộ trình này không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS theo yêu cầu. Đây là nguyên nhân làm tăng xác suất gói chặn gói dữ liệu do QoS không đảm bảo. Với thuật toán LBRQT-AODV, SNR của các lộ trình trong mạng đã được cải thiện một cách đáng kể so với thuật toán AODV. Hầu hết các giá trị SNR lớn hơn hoặc bằng SNR yêu cầu tối thiểu, chỉ còn một số ít trường hợp nằm trong khoảng từ 23 đến 23.5 dB. Nguyên nhân của việc còn tồn tại một số ít lộ trình mà SNR của nó nhỏ hơn 23.5 dB là do sự di chuyển của các nút. Khi khám phá lộ trình bởi thuật toán LBRQT-AODV, điều kiện ràng buộc về SNR đã được xem xét, nên SNR của các lộ trình tìm được luôn đạt giá trị SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Tuy nhiên, trong quá trình truyền dữ liệu, các nút di chuyển đến vị trí khác, làm cho SNR của một số bước truyền thay đổi, nên SNR của toàn lộ trình thay đổi. Mặc dù vậy, số trường hợp SNR không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS đã giảm rất nhiều so với thuật toán AODV. Các đồ thị trên Hình 3.14 cho thấy rõ điều này. Tỷ lệ kênh truyền đảm bảo QoS (REQ) của thuật toán AODV trung bình là 97.08%, trong khi đó, giá trị này là 98.65% đối với thuật toán LBRQT-AODV. Như vậy, với thuật toán được đề xuất LBRQT-AODV, QoS trên các kênh truyền dữ liệu đã được cải thiện.



**Hình 3.14.** So sánh tỷ lệ kênh đảm bảo QoS khi sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT-DSR và DSR

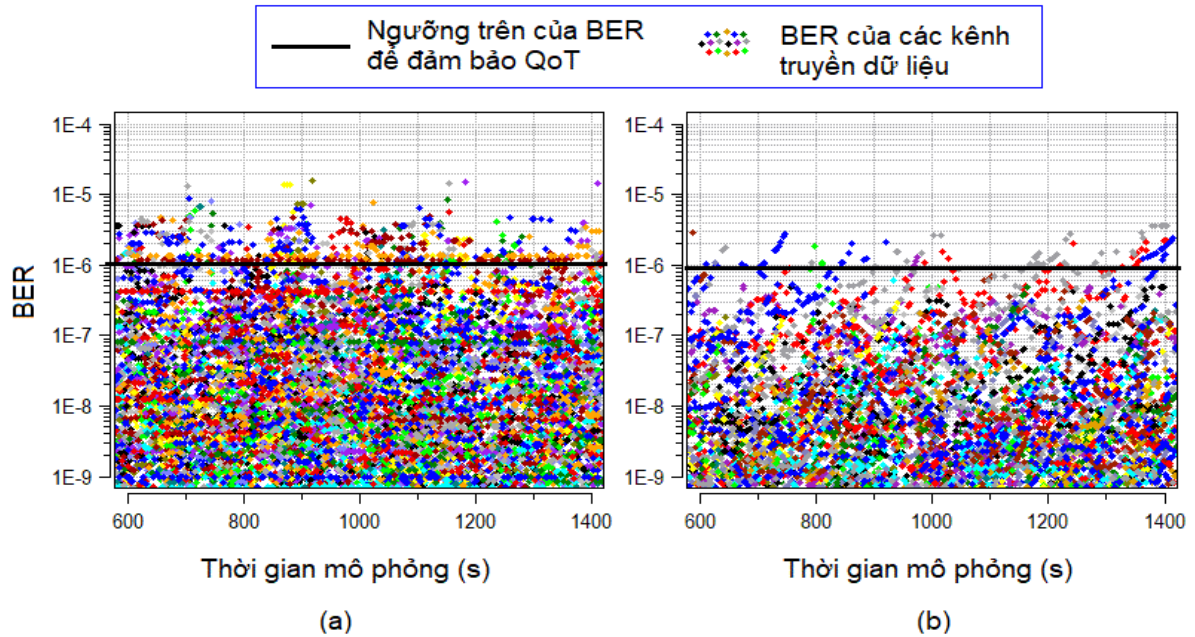


**Hình 3.15.** So sánh SNR khi sử dụng thuật toán LBRQT-AODV và AODV

Một yếu tố có ảnh hưởng lớn đến SNR của các lộ trình là tổng số nút mạng, điều này thể hiện rõ trên Hình 3.15, giá trị SNR ở đây được đo tại thời điểm khám phá lộ trình. Ta thấy rằng, SNR giảm dần khi tổng số nút mạng tăng. Với thuật toán AODV, giá trị SNR lớn hơn SNR yêu cầu khi tổng số nút mạng nhỏ hơn 30. Tuy nhiên, nếu tổng số nút mạng lớn hơn 30, giá trị SNR nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Đây là nguyên nhân làm tăng xác suất gói dữ liệu bị chặn do không đảm bảo QoS. Với thuật toán LBRQT-AODV, giá trị SNR được cải thiện một cách đáng kể so với thuật toán AODV. Cụ thể, SNR nhỏ nhất luôn luôn lớn hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Đặc biệt, trong trường hợp tổng số nút mạng từ 30 đến 50, SNR tối thiểu giảm từ 22.9 xuống còn 22.1 dB nếu thuật toán AODV được sử dụng. Nhưng với thuật toán LBRQT-AODV, các giá trị này là từ 23.52 đến 23.9 dB. Các giá trị này lớn hơn SNR yêu cầu tối thiểu. Như vậy, thuật toán LBRQT-AODV tìm được các lộ trình luôn thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS.

### 3.7.2.2. Phân tích BER

Vì SNR của các lộ trình khi sử dụng thuật toán LBRQT-AODV tăng, nên BER giảm như cho thấy trên Hình 3.16. Kết quả này được thực thi trên mô phỏng 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 10 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Với thuật toán AODV, giá trị BER lớn nhất trong mạng là  $0.5 \times 10^{-4}$ , đồng thời có nhiều lộ trình mà giá trị BER lớn hơn giới hạn cho phép để đảm bảo ( $10^{-6}$ ), chiếm tỷ lệ 1.69%. Với thuật toán LBRQT-AODV (Hình 3.16b), BER trên các lộ trình truyền dữ liệu đã giảm



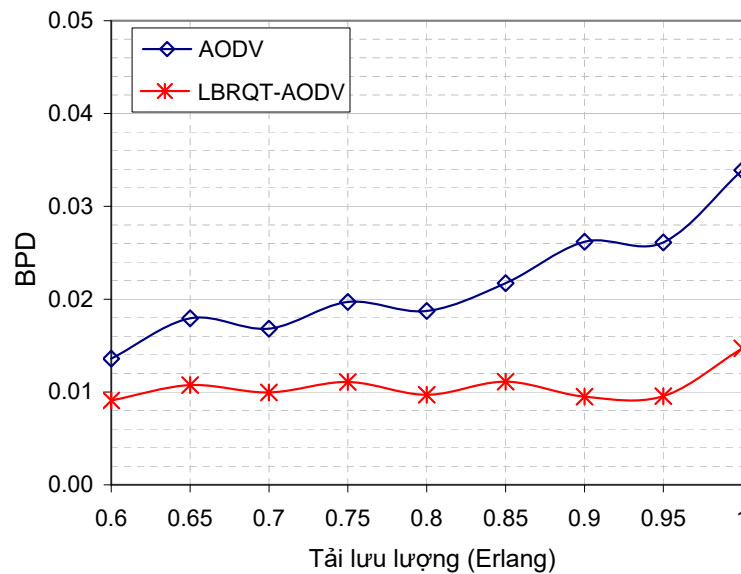
**Hình 3.16.** So sánh BER của thuật toán (a) AODV và (b) LBRQT-AODV khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 10 m/s, băng thông kênh 40 MHz

một cách đáng kể so với thuật toán AODV, hầu hết nhỏ hơn  $10^{-6}$ , là giới hạn cho phép để đảm bảo QoS theo như kịch bản mô phỏng đã thiết lập ở Phần 2.5.1 của Chương 2. Chỉ có một số rất ít trường hợp giá trị BER nằm trong khoảng  $10^{-6}$  đến  $2 \times 10^{-6}$ , chiếm tỷ lệ 0.28%. Các trường hợp này là do các nút mạng di chuyển trong quá trình truyền dữ liệu, dẫn đến SNR giảm, làm tăng BER. Tuy nhiên, nếu nhìn về tổng thể, BER của toàn mạng khi sử dụng thuật toán LBRQT-AODV đã cải thiện nhiều so với thuật toán AODV, hầu hết nằm trong giới hạn cho phép để đảm bảo QoS của hệ thống mạng.

### 3.7.2.3. Đánh giá xác suất chặn gói dữ liệu

Xác suất chặn gói dữ liệu (BPD) là một tham số hiệu năng quan trọng của hệ thống mạng. BPD được xác định bằng tổng số gói bị chặn trên tổng số gói phát sinh trong toàn bộ thời gian mô phỏng. Trong phần này, tác giả so sánh BPD của thuật toán LBRQT-AODV và AODV trong các kịch bản mô phỏng khác nhau. Kết quả thu được trên Hình 3.17 cho thấy sự khác nhau về BPD của thuật toán LBRQT-AODV và AODV khi tải lưu lượng thay đổi. Kết quả này được mô phỏng trên tô-pô 40 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 5 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Ta thấy rằng, với thuật toán LBRQT-AODV, BPD giảm một cách đáng kể so với thuật toán AODV.

Xét trường hợp tải lưu lượng là 0.6 Erlang, BPD của thuật toán AODV là 0.0136. Trong khi đó, giá trị này của thuật toán LBRQT-AODV chỉ là 0.0091. Như vậy, BPD của thuật toán QTA-AODV giảm 33.21% so với thuật toán AODV. Khi tải lưu lượng ở mức cao nhất, tức là 1 Erlang, BPD giảm 56.59%, từ 0.034 xuống còn 0.015. Với các trường hợp còn lại, BPD giảm trung bình 48.74% nếu thuật toán LBRQT-AODV được sử dụng.



**Hình 3.17.** So sánh BPD theo tải lưu lượng của các thuật toán AODV và LBRQT-AODV khi tổng số nút là 40, tốc độ di chuyển 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz

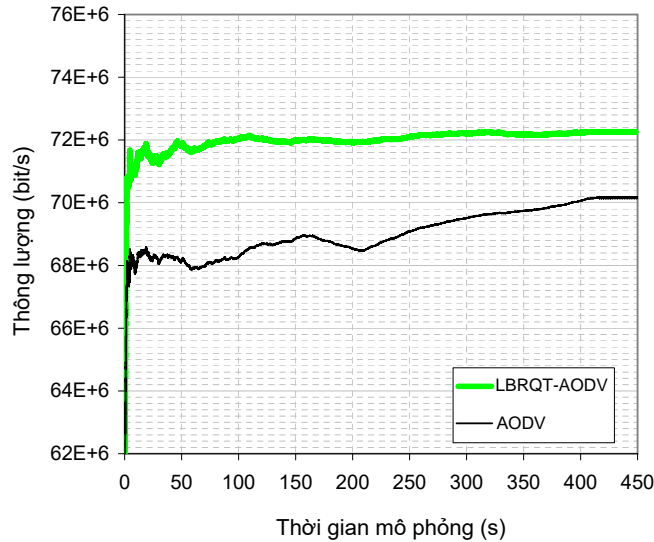
Các kết quả trên Hình 3.17 cũng cho thấy rằng, khi tải lưu lượng phát sinh tại các nút mạng càng lớn thì hiệu quả của thuật toán LBRQT-AODV càng cao. Vì thuật toán LBRQT-AODV lựa chọn lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS, đồng thời cân bằng tải lưu lượng của các kết nối trong toàn mạng. Vì vậy, trong trường hợp tải lưu lượng cao, thuật toán LBRQT-AODV giảm thiểu được tình trạng nghẽn cục bộ tại các nút, dẫn đến giảm BPD trên toàn mạng.

#### 3.7.2.4. Đánh giá thông lượng

Về mặt thông lượng, thuật toán LBRQT-AODV cũng mang lại hiệu quả cao hơn thuật toán AODV. Điều này được thể hiện rõ trên Hình 3.18. Đây là kết quả mô phỏng trong trường hợp tổng số nút là 40, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz và tải lưu lượng phát sinh tại mỗi nút phát là 0.95 Erlang. Ta thấy rằng, thông lượng trung bình của thuật toán AODV là 69.85 Mbit/s. Trong khi đó, giá



trị này của các thuật toán LBRQT-AODV tương ứng là 71.55 Mbit/s. Như vậy, nếu so sánh với thuật toán AODV, thông lượng trung bình của thuật toán LBRQT-AODV tăng 1.7 Mbit/s.



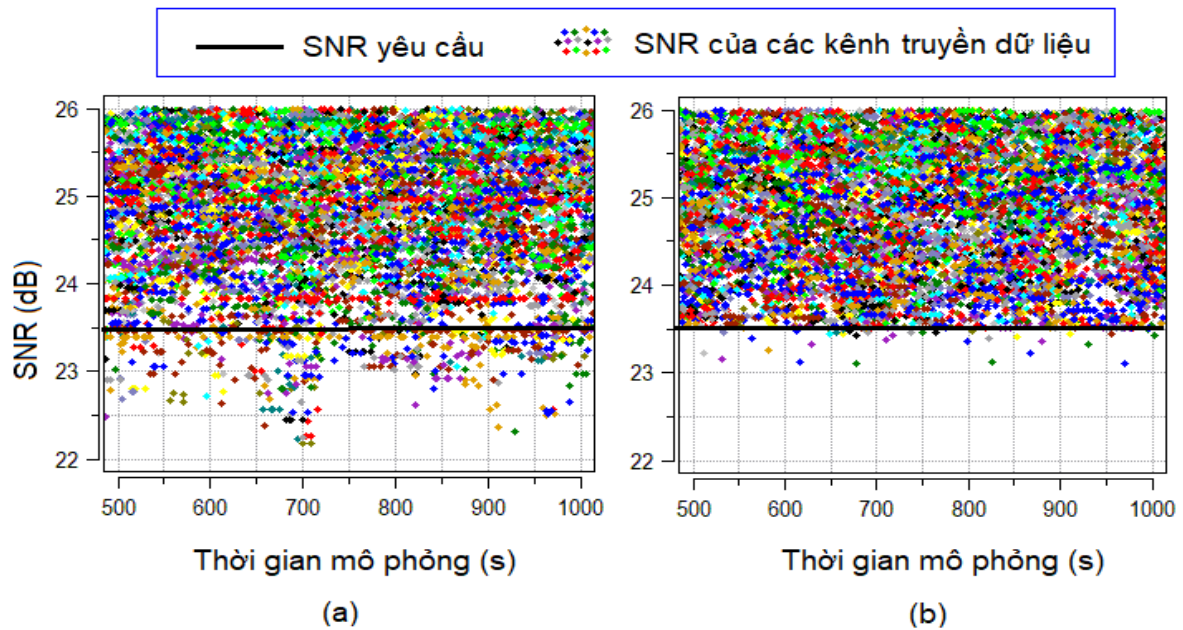
**Hình 3.18.** So sánh thông lưu lượng của các thuật toán AODV và LBRQT-AODV khi tổng số nút là 40, tốc độ di chuyển 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz và tải lưu lượng 0.95 Erlang

Từ các kết quả mô phỏng đã được trình bày ở trên, tác giả có thể kết luận rằng, thuật toán định tuyến được đề xuất LBRQT-AODV lựa chọn được các lộ trình cân bằng tải, đồng thời có xem xét đến các điều kiện ràng buộc về QoS và EED. Do vậy, hiệu năng của hệ thống mạng được cải thiện một cách đáng kể về mặt xác suất chặn gói dữ liệu, thông lượng mạng. Đặc biệt, thuật toán LBRQT-AODV mạng lại hiệu quả cao trong trường hợp tải lưu lượng phát sinh tại các nút mạng lớn nhờ kỹ thuật cân bằng tải được áp dụng trong thuật toán này.

### 3.7.3. Kết quả mô phỏng thuật toán LBRQT-DSR

#### 3.7.3.1. Phân tích SNR

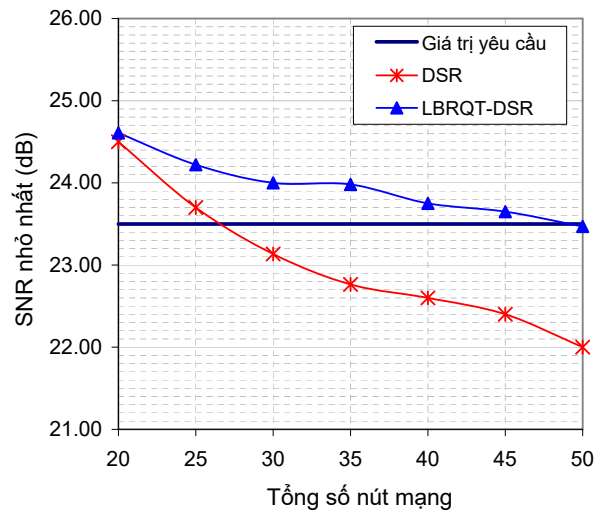
SNR là một tham số hiệu năng quan trọng của một hệ thống mạng, quyết định QoS của một lộ trình truyền dữ liệu. Kết quả thu được trên Hình 3.19 cho ta thấy sự khác biệt về SNR trên các lộ trình truyền dữ liệu khi sử dụng thuật toán định tuyến DSR và LBRQT-DSR. Kết quả này được thực thi trên tô-pô 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 20 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Theo như kịch bản mô phỏng đã xây dựng ở Phần 2.5.1 của Chương 2, để đảm bảo QoS của hệ thống mạng thì SNR nhỏ nhất của mỗi lộ trình phải là 23.5 dB. Biểu đồ trên Hình 3.19 cho thấy rằng, với



**Hình 3.19.** So sánh SNR của thuật toán (a) DSR và (b) LBRQT-DSR khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz

thuật toán DSR (Hình 3.19a), có nhiều lộ trình mà SNR của nó không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS, do SNR nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Đây là nguyên nhân làm tăng xác suất chặn gói dữ liệu do QoS không đảm bảo. Với thuật toán LBRQT-DSR (Hình 3.19b), SNR của các lộ trình trong mạng đã được cải thiện một cách đáng kể so với thuật toán DSR. Hầu hết các giá trị SNR lớn hơn hoặc bằng SNR yêu cầu tối thiểu, chỉ còn một số ít trường hợp nằm trong khoảng từ 23 đến 23.5 dB. Nguyên nhân của việc còn tồn tại một số ít lộ trình mà SNR của nó nhỏ hơn 23.5 dB là do sự di chuyển của các nút. Khi khám phá lộ trình bởi thuật toán LBRQT-DSR, điều kiện ràng buộc về SNR đã được xem xét, nên SNR của các lộ trình tìm được luôn đạt giá trị SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Vì trong quá trình truyền dữ liệu, các nút di chuyển đến vị trí khác, làm cho SNR của một số bước truyền thay đổi, nên SNR của toàn lộ trình thay đổi. Tuy nhiên, nếu nhìn về tổng thể, SNR của toàn mạng khi sử dụng thuật toán LBRQT-DSR đã cải thiện nhiều so với thuật toán DSR.

Khi tổng số nút mạng thay đổi, SNR nhỏ nhất của các lộ trình trong toàn mạng cũng thay đổi. Điều này thể hiện rõ trên Hình 3.20. Giá trị SNR trên trục tung của Hình 3.20 là SNR nhỏ nhất ở thời điểm lộ trình được khám phá. Như đã phân tích chi tiết ở phần thiết lập kịch bản mô phỏng (Phần 2.5.1 của Chương 2), để đạt được BER lớn nhất là  $10^{-6}$ , SNR yêu cầu tối thiểu phải là 23.5 dB. Các đồ thị trên Hình 3.20 cho

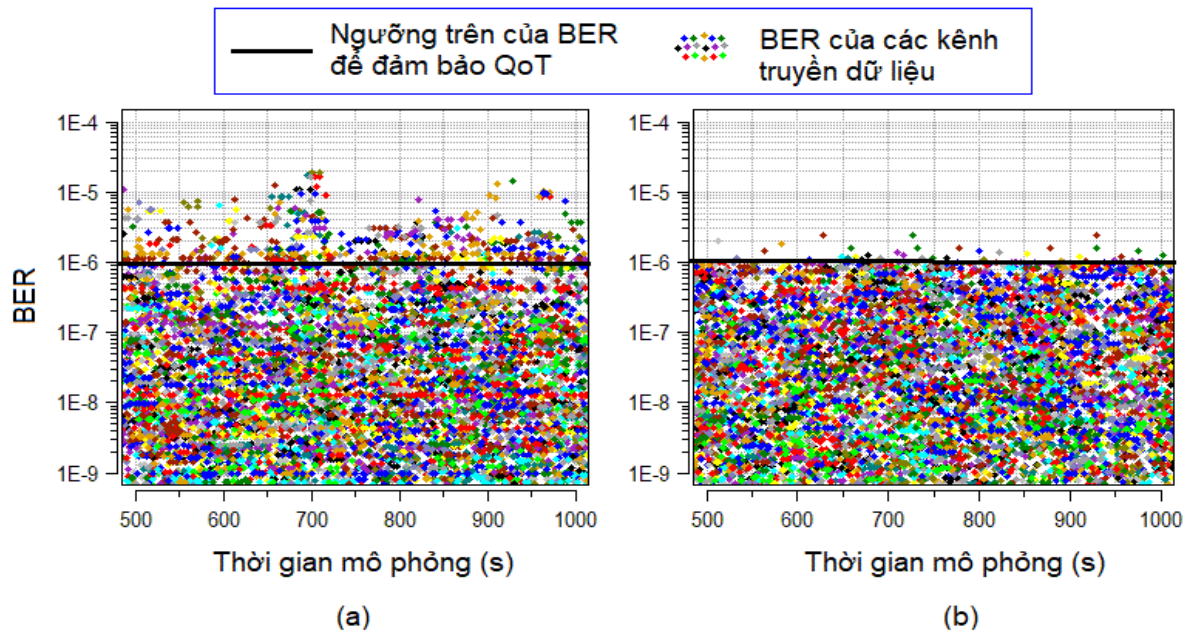


**Hình 3.20.** Sự thay đổi SNR nhỏ nhất khi sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT-DSR và DSR

thấy rằng, SNR giảm dần khi tổng số nút mạng tăng. Với thuật toán DSR, giá trị SNR lớn hơn SNR yêu cầu khi tổng số nút mạng nhỏ hơn 30. Tuy nhiên, nếu tổng số nút mạng lớn hơn 30, giá trị SNR nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB). Với thuật toán LBRQT-DSR, giá trị SNR được cải thiện một cách đáng kể so với thuật toán DSR, luôn lớn hơn SNR yêu cầu tối thiểu cho dù tổng số nút mạng lớn. Nguyên nhân là do điều kiện ràng buộc về QoT đã được xem xét trong quá trình khám phá lộ trình.

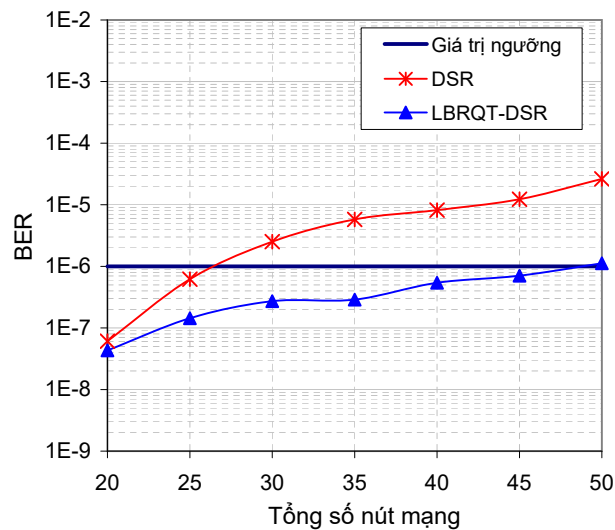
### 3.7.3.2. Phân tích BER

Trong một lộ trình dữ liệu, BER được xác định bằng tổng số bit lỗi trên tổng số bit truyền qua lộ trình đó. Kết quả mô phỏng trên Hình 3.21 cho ta thấy sự khác biệt về BER khi sử dụng thuật toán định tuyến DSR và LBRQT-DSR. Kết quả này được thực thi trên tô-pô 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 20 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Vì SNR khi sử dụng thuật toán LBRQT-DSR tăng so với thuật toán DSR như đã phân tích ở Hình 3.19, nên BER giảm trong trường hợp thuật toán LBRQT-DSR được sử dụng. Điều này thể hiện rõ trong Hình 3.21. Với thuật toán DSR, giá trị BER lớn nhất trong mạng là  $2 \times 10^{-5}$ , đồng thời có nhiều lộ trình mà giá trị BER lớn hơn giới hạn cho phép để đảm bảo ( $10^{-6}$ ). Với thuật toán LBRQT-DSR (Hình 3.21b), BER trên các lộ trình truyền dữ liệu đã giảm một cách đáng kể so với thuật toán DSR, hầu hết nhỏ hơn  $10^{-6}$ , là giới hạn cho phép để đảm bảo QoT theo như kịch bản mô phỏng đã thiết lập ở Phần 2.5.1 của Chương 2. Chỉ có một số rất ít trường hợp giá trị BER nằm trong khoảng  $10^{-6}$  đến  $3 \times 10^{-6}$ . Các trường hợp này là do các nút mạng di chuyển trong quá trình truyền dữ liệu, dẫn đến SNR giảm, làm tăng BER.



**Hình 3.21.** So sánh BER của thuật toán (a) DSR và (b) LBRQT-DSR khi tổng số nút là 50, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz

Trong trường hợp tổng số nút mạng thay đổi, vì SNR giảm dần theo tổng số nút mạng, nên BER tăng dần như cho thấy trên Hình 3.22. Giá trị BER ở đây là BER của lộ trình có QoT xấu nhất ở thời điểm lộ trình được khám phá. Ta thấy rằng, với ngưỡng BER yêu cầu là  $10^{-6}$ . Xét trường hợp thuật toán định tuyến DSR được sử dụng, hệ thống mạng chỉ đảm bảo yêu cầu này khi tổng số nút nhỏ hơn 30. Còn khi tổng số nút tăng từ 30 đến 50, BER tăng dần từ  $2.5 \times 10^{-6}$  đến  $2.6 \times 10^{-5}$ . Các giá trị này vượt ngưỡng BER yêu cầu. Trong trường hợp sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT-DSR, BER

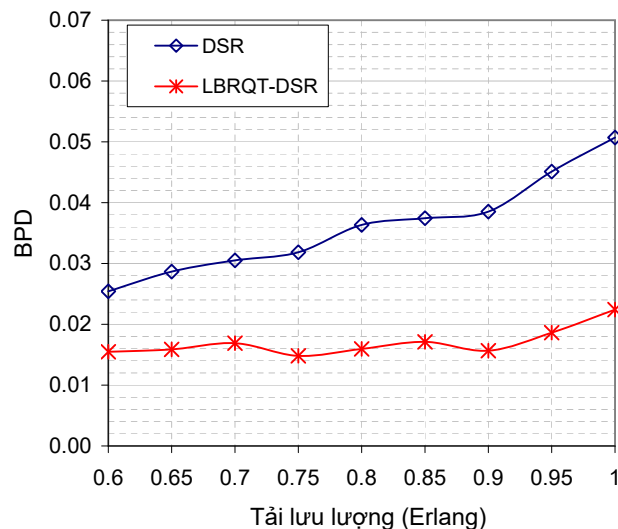


**Hình 3.22.** So sánh BER khi sử dụng các thuật toán định tuyến LBRQT-DSR và DSR

luôn luôn nhỏ hơn ngưỡng cho phép ( $10^{-6}$ ) vì điều kiện ràng buộc về QoT đã được xem xét trong quá trình khám phá lộ trình.

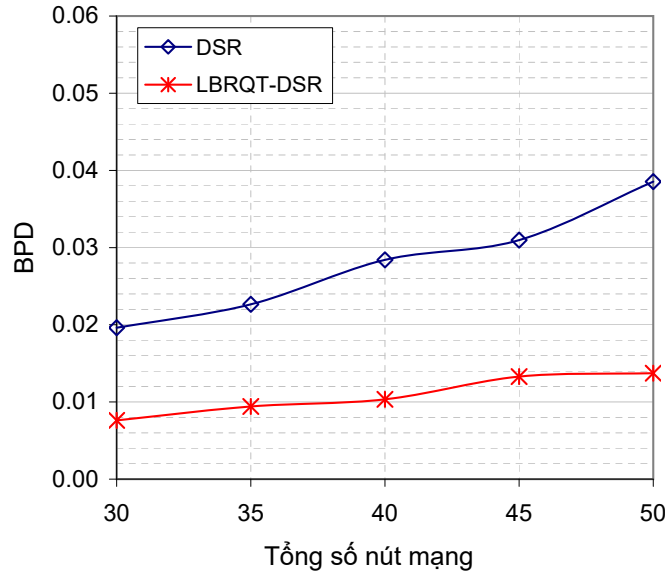
### 3.7.3.3. Phân tích xác suất chặn gói dữ liệu

Mục tiêu cơ bản của các thuật toán định tuyến cân bằng tải là giảm BPD. Đây là một tham số hiệu năng quan trọng của hệ thống mạng. BPD được xác định bằng tổng số gói bị chặn trên tổng số gói phát sinh trong toàn bộ thời gian mô phỏng. Trong phần này, tác giả so sánh BPD của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR theo các kịch bản mô phỏng khác nhau. Khi tải lưu lượng thay đổi, sự khác nhau về BPD của các thuật toán trên như cho thấy ở Hình 3.23. Kết quả này được mô phỏng trên tô-pô 30 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 20 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Ta thấy rằng, so với thuật toán DSR, BPD của thuật toán LBRQT-DSR giảm một cách đáng kể. Xét trường hợp tải lưu lượng là 0.6 Erlang, BPD của thuật toán DSR là 0.0254. Trong khi đó, giá trị này của thuật toán LBRQT-DSR chỉ là 0.0155, giảm 39.15% so với thuật toán DSR. Khi tải lưu lượng ở mức cao nhất, tức là 1 Erlang, BPD giảm từ 0.0510 xuống còn 0.0224, tương ứng với tỷ lệ giảm 55.82%. Với các trường hợp còn lại, BPD của thuật toán LBRQT-DSR giảm trung bình 51.79% so với thuật toán DSR.



**Hình 3.23.** So sánh BPD theo tải lưu lượng của thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 30, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz

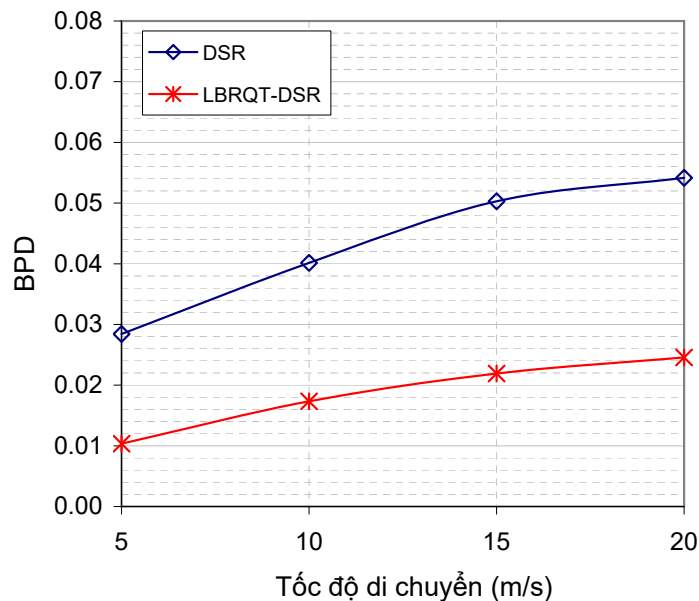
Trong trường hợp tổng số nút mạng thay đổi. BPD của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR như cho thấy ở Hình 3.24. Ta thấy rằng, đối với cả hai thuật toán, BPD càng cao khi tổng số nút mạng càng lớn. Tuy nhiên, BPD của thuật toán LBRQT-DSR luôn



**Hình 3.24.** So sánh BPD theo tổng số nút của thuật toán LBRQT-DSR và DSR, tốc độ di chuyển 5 m/s, tải lưu lượng là 0.95 Erlang, băng thông kênh 40 MHz

nhỏ hơn thuật toán DSR. Ví dụ, xét trường hợp tổng số nút mạng là 45, BPD của các thuật toán DSR và LBRQT-DSR lần lượt là 0.0309 và 0.0137. Như vậy, so với thuật toán DSR, BPD của thuật toán LBRQT-DSR giảm 57.07%.

Trong trường hợp tốc độ di chuyển trung bình của các nút mạng thay đổi, BPD của



**Hình 3.25.** So sánh BPD theo tốc độ di chuyển của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 40, tải lưu lượng là 0.95 Erlang, băng thông kênh 40 MHz

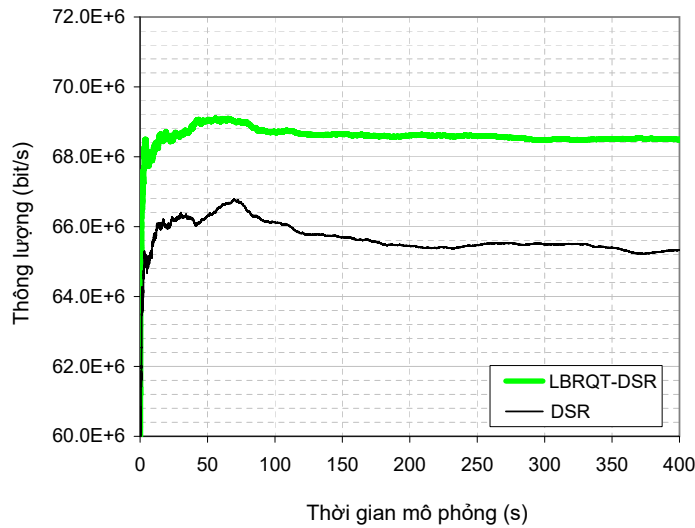
cả hai thuật toán tăng dần theo tốc độ di chuyển như cho thấy trên Hình 3.25. Kết quả này được thực hiện trên tô-pô 40 nút, tải lưu lượng là 0.95 Erlang với băng thông kênh 40 MHz. Ta thấy rằng, BPD giảm đáng kể khi sử dụng thuật toán LBRQT-DSR, tỷ lệ giảm trung bình lên đến 57.87% so với thuật toán DSR.

Qua các kết quả phân tích về BPD ở các Hình 3.23, 3.24 và 3.25 ta có thể kết luận rằng, thuật toán LBRQT-DSR cho phép giảm BPD so với thuật toán DSR, đặc biệt là trong trường hợp tải lưu lượng phát sinh tại các nút mạng lớn. Nguyên nhân đạt được kết quả này là vì thuật toán LBRQT-DSR tìm được các lộ trình thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoS, nên giảm thiểu thành phần BPD do QoS không đảm bảo. Ngoài ra, thuật toán LBRQT-DSR còn xét đến tiêu chí cân bằng tải khi lựa chọn lộ trình, nên giảm thiểu thành phần BPD do nghẽn cục bộ tại các nút mạng.

#### 3.7.3.4. Phân tích thông lượng

Kết quả thu được trên Hình 3.26 cho ta thấy thông lượng thu được trung bình tại các nút mạng theo thời gian của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR. Kết quả này được thực thi trên tô-pô mạng có 50 nút, tải lưu lượng phát sinh tại các nút phát là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển trung bình của các nút là 5 m/s. Các đồ thị trên Hình 3.26 cho thấy rằng, thuật toán LBRQT-DSR luôn đạt được thông lượng cao hơn thuật toán DSR. Với thuật toán DSR, thông lượng trung bình là 65.48 Mbit/s, trong khi đó thông lượng trung bình của thuật toán LBRQT-DSR là 68.47 Mbit/s. Như vậy, so với thuật toán DSR, thông lượng của thuật toán LBRQT-DSR tăng trung bình gần 3 Mbit/s.

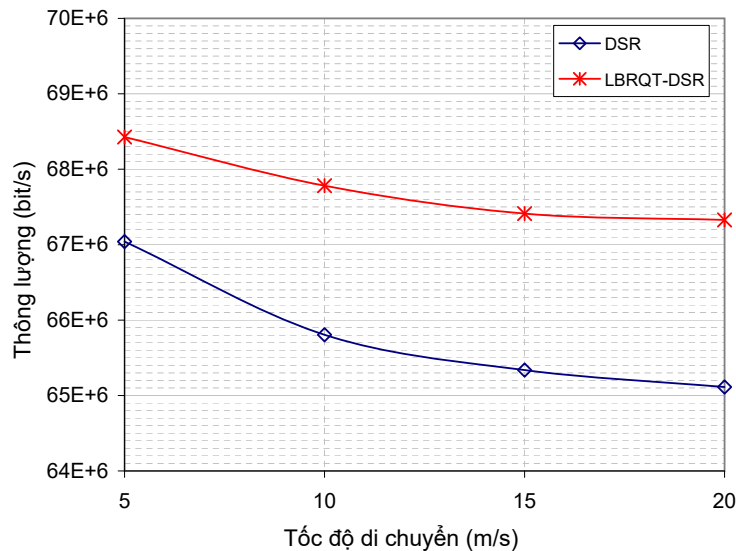
Trong trường hợp tốc độ di chuyển trung bình của các nút thay đổi, thông lượng mạng giảm dần vì BPD tăng như đã phân tích ở các phần trước. Kết quả này được thể hiện rõ trong Hình 3.27, tương ứng với kịch bản mô phỏng 50 nút, tải lưu lượng phát sinh tại các nút nguồn phát là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz. Mặc dù thông lượng của cả hai thuật toán đều giảm dần, nhưng thuật toán LBRQT-DSR luôn có thông lượng trung bình lớn hơn thuật toán DSR. Xét trường hợp tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 5 m/s, thông lượng trung bình của các thuật toán DSR và LBRQT-DSR tương ứng là 67.04 và 68.43 Mbit/s. Như vậy, nếu so với thuật toán DSR thì thông lượng của thuật toán LBRQT-DSR tăng trung bình là 1.39 Mbit/s. Kết quả cũng hoàn toàn tương tự cho các trường hợp khác. Xét trung bình của tất cả các trường hợp thì thuật toán định tuyến LBRQT-DSR cải thiện thông lượng lên đến 1.93 Mbit/s



**Hình 3.26.** So sánh thông lượng của các thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 50, tải lưu lượng là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển trung bình của các nút là 5 m/s

so với thuật toán DSR.

Từ các kết quả mô phỏng đã được trình bày ở trên, tác giả có thể kết luận rằng, thuật toán định tuyến được đề xuất LBRQT-DSR lựa chọn được các lộ trình đảm bảo chất lượng truyền dẫn, đồng thời có xem xét đến các điều kiện ràng buộc về QoS. Do vậy, hiệu năng của hệ thống mạng được cải thiện một cách đáng kể về mặt xác suất chặn gói dữ liệu, thông lượng mạng. Đặc biệt, thuật toán LBRQT-DSR mạng lại hiệu



**Hình 3.27.** So sánh thông lượng của thuật toán LBRQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 50, tải lưu lượng là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển thay đổi

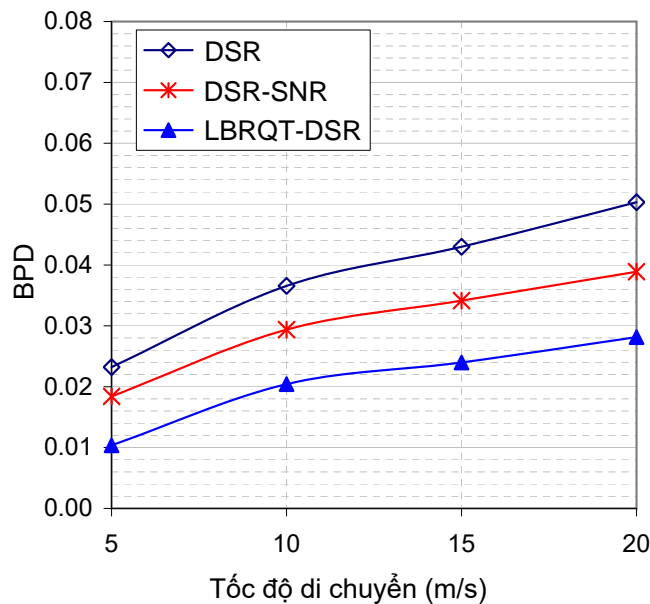


quả cao trong trường hợp tải lưu lượng phát sinh tại các nút mạng lớn.

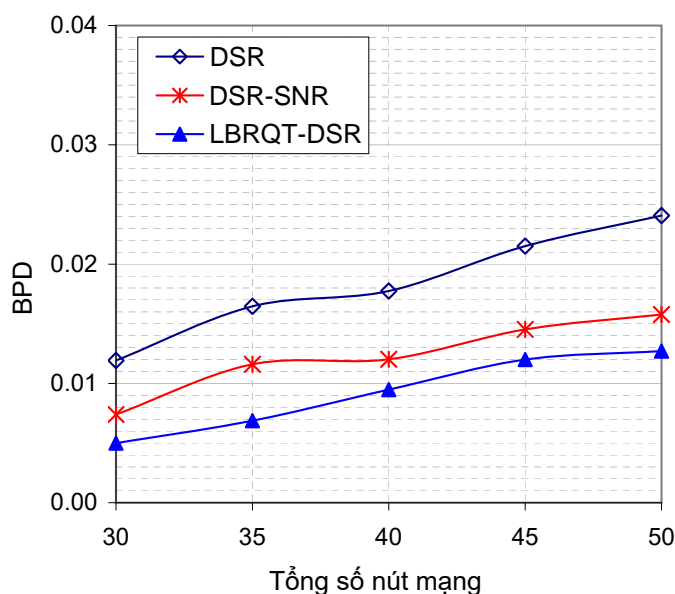
#### 3.7.4. So sánh các thuật toán được đề xuất với các công trình nghiên cứu liên quan

Trong phần này, tác giả so sánh hiệu quả thực thi của thuật toán LBRQT-DSR mà tác giả đã đề xuất với thuật toán DSR-SNR của nhóm tác giả trong [24]. Ngoài ra, các thuật toán này cũng được so sánh với thuật toán DSR để thấy rõ hiệu quả của các thuật toán cải tiến. Nguyên lý của thuật toán DSR-SNR được các tác giả đề xuất trong [24] là tích hợp thêm hai trường vào gói RREP, với độ dài của mỗi trường là 8 bits để chứa thông tin SNR và RP (Received Power). Khi nút nguồn nhận được các gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, dựa trên thông tin của các trường SNR và RP, nút nguồn sẽ lựa chọn lộ trình có QoS tốt nhất. Về mô phỏng, các tác giả trong [24] đã mô phỏng thuật toán DSR-SNR trên OPNET simulator 14.5. Trong phần này, để đồng nhất môi trường mô phỏng nhằm đảm bảo độ tin cậy của các kết quả so sánh, tác giả luận án cài đặt thuật toán DSR-SNR trên cùng phần mềm mô phỏng với các thuật toán LBRQT-DSR và DSR, đó là OMNeT++, đồng thời sử dụng cùng bộ tham số đầu vào như đã mô tả ở xây dựng kịch bản mô phỏng (Phần 2.5.1 của Chương 2).

Kết quả mô phỏng trên Hình 3.28 cho thấy rõ sự khác biệt về BPD của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR trường hợp tốc độ di chuyển của các nút thay



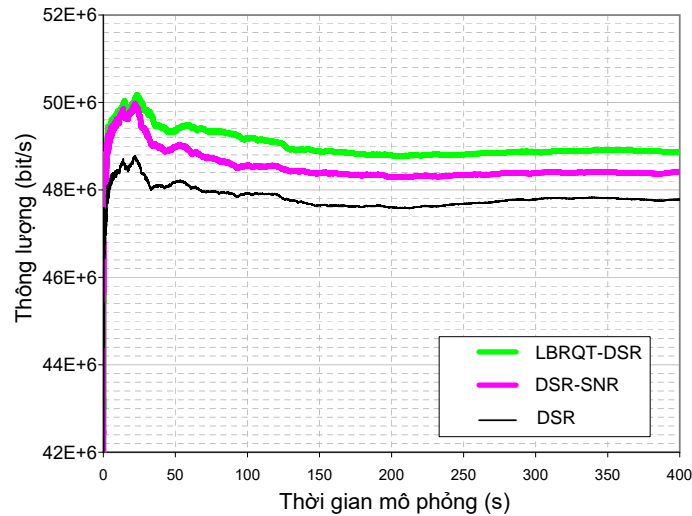
**Hình 3.28.** So sánh BPD theo tốc độ di chuyển của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR



**Hình 3.29.** So sánh BPD theo tổng số nút mạng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR

đối, tổng số nút mạng là 50, băng thông kênh 40 MHz và tải lưu lượng 0.6 Erlang. Ta thấy rằng, đối với cả ba thuật toán, BPD càng cao khi tốc độ di chuyển của các nút mạng càng lớn. Tuy nhiên, trong cả 3 thuật toán, LBRQT-DSR là thuật toán mang lại giá trị BPD nhỏ nhất. Ví dụ, xét trường hợp tốc độ di chuyển trung bình của các nút là 15 m/s, BPD của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR lần lượt là 0.0429, 0.0341 và 0.0239. Như vậy, nếu so với thuật toán DSR, BPD của thuật toán DSR-SNR giảm 20.56%, thuật toán LBRQT-DSR giảm 44.24%. Khi thay đổi tổng số nút mạng, thuật toán LBRQT-DSR cũng mang lại hiệu quả cao nhất nếu xét về BPD, điều này cho thấy rõ ở Hình 3.29. Trong trường hợp này, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 5 m/s, băng thông kênh 40 MHz và tải lưu lượng 0.7 Erlang. Các đồ thị trên Hình 3.29 đã cho thấy rằng, nếu so với BPD của thuật toán DSR, BPD của các thuật toán DSR-SNR và LBRQT-DSR giảm trung bình tương ứng là 33.34% và 50.88%. Như vậy, thuật toán LBRQT-DSR giảm nhiều hơn 17.54% so với thuật toán DSR-SNR.

Tiếp theo, chúng tôi phân tích thông lượng của cả 3 thuật toán. Xét trường hợp tải lưu lượng là 0.65 Erlang, tổng số nút mạng là 50, tốc độ di chuyển trung bình của các nút là 15m/s và băng thông kênh 40MHz. Thông lượng nhận được trung bình tại mỗi nút như cho thấy ở Hình 3.30. Thuật toán LBRQT-DSR cho thông lượng cao nhất, trung bình là 48.79 Mbit/s. Giá trị này của các thuật toán DSR-SNR và DSR tương



**Hình 3.30.** So sánh thông lượng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBRQT-DSR

ứng là 48.41 và 47.78 Mbit/s. Như vậy, thông lượng của thuật toán LBRQT-DSR tăng trung bình 380 Kbit/s và 1.1 Mbit/s nếu so với các thuật toán DSR-SNR và DSR.

Từ các kết quả mô phỏng ở trên, chúng tôi có thể kết luận rằng, với kỹ thuật định tuyến có xét đến điều kiện ràng buộc QoT (các thuật toán DSR-SNR và LBRQT-DSR), hiệu năng mạng cải thiện một cách đáng kể về mặt xác suất nghẽn mạng và thông lượng. Trong đó, thuật toán LBRQT-DSR mang lại hiệu quả cao nhất trong số 3 thuật toán được phân tích.

### 3.8. Kết luận chương

Việc nghiên cứu các giao thức định tuyến trong mạng MANET đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm trong thời gian gần đây. Mục tiêu của các công trình nghiên cứu về các giao thức định tuyến trong mạng MANET là tìm ra các giao thức tối ưu nhằm nâng cao hiệu năng mạng. Trong trường hợp mạng MANET có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu đến hiệu năng mạng là rất nghiêm trọng. Các hiệu ứng này làm suy giảm chất lượng tín hiệu truyền dẫn, tăng tỷ lệ lỗi bit, giảm hiệu năng mạng.

Trong chương này, tác giả đã trình bày thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn (LBRQT), được tác giả đề xuất cho mạng MANET. Thuật toán định tuyến LBRQT cho phép tìm được lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED, đồng thời cân bằng tải lưu lượng trên tất cả các kết nối trong toàn mạng.

Thuật toán định tuyến LBRQT đã được áp dụng để cải tiến các giao thức định tuyến theo yêu cầu, bao gồm giao thức AODV (LBRQT-AODV) và DSR (LBRQT-DSR). Bằng phương pháp mô phỏng trên OMNeT++, tác giả đã chứng minh rằng, các thuật toán định tuyến cải tiến LBRQT-AODV và LBRQT-DSR đã tìm được các lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED, nên QoS trên các lộ trình truyền dữ liệu luôn đảm bảo. Ngoài ra, các lộ trình cũng được chọn theo tiêu chí cân bằng tải lưu lượng trên tất cả các kết nối. Vì vậy, giảm thiểu tình trạng nghẽn cục bộ tại các nút mạng. Từ kết quả lựa chọn lộ trình như trên, hiệu năng của hệ thống mạng được cải thiện một cách đáng kể so với các thuật toán nguyên bản (DSR và AODV), cũng như so với các công trình nghiên cứu trước đó (thuật toán DSR-SNR trong [24]). Đặc biệt là trong trường hợp hệ thống mạng có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao.

Các kết quả nghiên cứu trong chương này đã được công bố trong 4 bài báo. Trong đó, có 01 bài báo đăng trên Tạp chí khoa học Quốc tế thuộc danh mục SCOPUS [B2], 01 bài báo trên *Tạp chí Tin học và Điều khiển học* [B4] và 02 bài báo trên Kỷ yếu hội thảo khoa học chuyên ngành [B3] và [B5].

## CHƯƠNG 4

# ĐỊNH TUYẾN CÂN BẰNG TẢI ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN DỰA TRÊN THÔNG TIN ĐỊNH TUYẾN CỦA NÚT NGUỒN

Nội dung chương này trình thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo chất lượng truyền dẫn được đề xuất cho mạng MANET nhằm nâng cao hiệu năng mạng. Thuật toán được đề xuất trong chương này được cải tiến từ thuật toán khám phá lộ trình của giao thức DSR. Lộ trình cân bằng tải được lựa chọn dựa trên thông tin định tuyến được lưu trữ trong bộ nhớ của nút nguồn. Thuật toán đề xuất được đặt tên là SLBQT-DSR (Source-based Load Balancing ensuring Quality of Transmission in DSR). Các nội dung cụ thể được trình bày trong 6 phần. Phần 4.1 phân tích ý tưởng để đề xuất thuật toán SLBQT-DSR. Phần 4.2 trình bày mô hình giải tích của Thuật toán SLBQT-DSR. Phần 4.3 trình bày nguyên lý hoạt động của thuật toán. Phần 4.4 đi sâu phân tích các kết quả mô phỏng. Phần 4.5 phân tích các ưu điểm và các nhược điểm của thuật toán được đề xuất. Cuối cùng là kết luận chương, được trình bày chi tiết trong Phần 4.6. Đề xuất này của tác giả đã được công bố trong [B1]<sup>1</sup>.

### 4.1. Ý tưởng đề xuất thuật toán

#### 4.1.1. Chọn lộ trình cân bằng tải

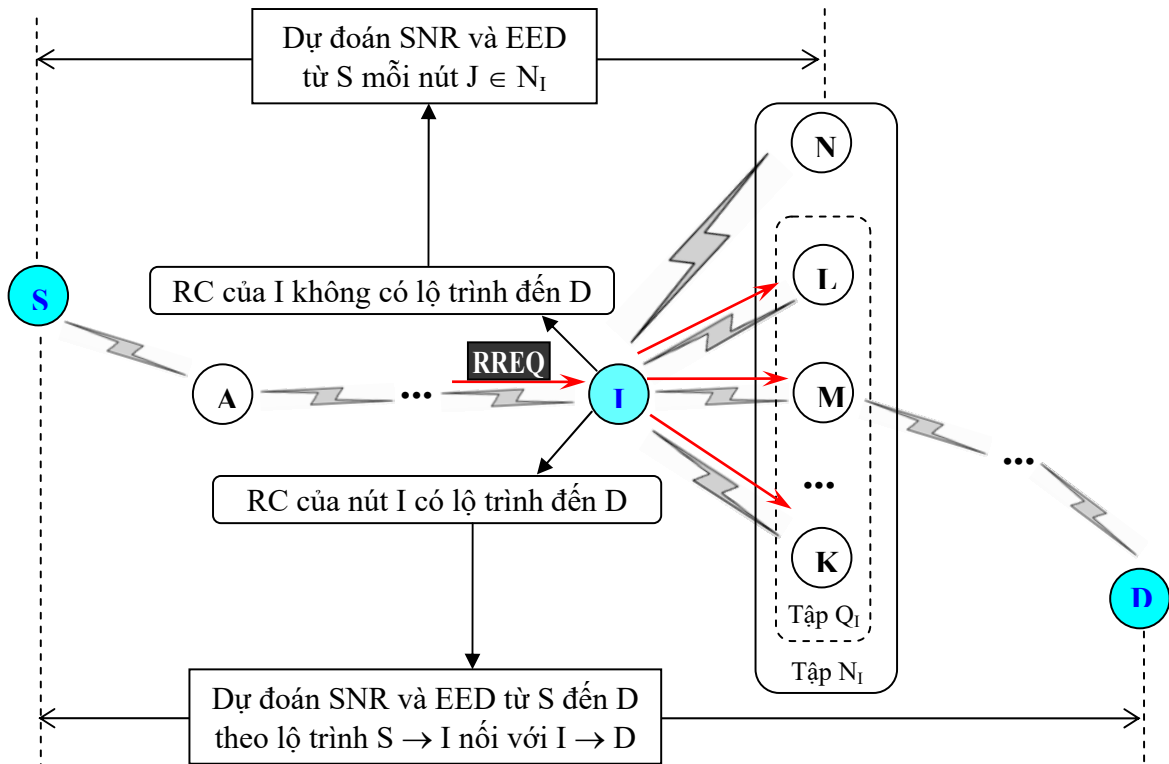
Đặc trưng cơ bản của giao thức định tuyến DSR là bộ nhớ đệm của mỗi nút lưu trữ đầy đủ thông tin lộ trình từ nút nguồn đến nút đích. Vì vậy, mỗi nút mạng có thể xác định được tải lưu lượng từ nó phân phối đến tất cả các kết nối trong mạng dựa trên thông tin lộ trình được lưu trữ trong bộ nhớ đệm của nó. Vì vậy, khi nhận được các gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, dựa trên thông tin về tải lưu lượng phân phối đến tất cả các kết nối ở thời điểm đang xét, nút nguồn có thể lựa chọn lộ trình sao cho tải lưu lượng phân phối đến tất cả các kết nối là cân bằng nhất. Đây chính là ý tưởng lựa chọn lộ trình cân bằng tải của thuật toán định tuyến cải tiến SLBQT-DSR.

---

<sup>1</sup>“SLBQT-DSR: Source-based Load Balancing Routing Algorithm under Constraints of Quality of Transmission for MANET”, *Journal of Computer Science and Cybernetics*, Vol.34, No.3, 2018, pp. 265-282.

#### 4.1.2. Xác định điều kiện ràng buộc QoT

Để đảm bảo QoT của các lộ trình tìm được bởi thuật toán định tuyến SLBQT-DSR, các điều kiện ràng buộc về QoT phải được xác định trong quá trình khám phá lộ trình. Ý tưởng xác định các điều kiện ràng buộc của QoT trong thuật toán định tuyến SLBQT-DSR được minh họa như ở Hình 4.1. Khi một nút trung gian (nút I) nhận được một gói RREQ về yêu cầu khám phá lộ trình mới từ nút nguồn (S) đến nút đích (D). Trong trường hợp thông tin định tuyến trong bộ nhớ của nút I không có lộ trình đến D, SA tại nút I dự đoán các thông tin về QoT từ nút S đến tất cả các nút láng giềng của nút I (các nút trong tập  $N_I$ ). Sau đó, gói RREQ chỉ được phát quảng bá đến các nút láng giềng của nút I thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT cho trước (các nút trong tập  $Q_I$ ). Trong trường hợp thông tin định tuyến trong bộ nhớ của nút I có lộ trình đến D, thay vì gửi ngay gói phản hồi RREP về nút nguồn như thuật toán DSR, SA tại nút I dự đoán các thông tin về QoT từ nút S đến nút D dọc theo lộ trình  $S \rightarrow I$  nối với  $I \rightarrow D$ . Nếu điều kiện ràng buộc QoT cho trước được thỏa mãn, nút I mới gửi phản hồi gói RREP về nguồn. Ngược lại, quá trình khám phá lộ trình được tiếp tục thực hiện như trường hợp thông tin định tuyến trong bộ nhớ của nút I không có lộ trình đến D.



**Hình 4.1.** Mô hình xác định điều kiện ràng buộc QoT của thuật toán SLBQT-DSR

Với nguyên lý này, các lộ trình được tìm thấy luôn luôn thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT. Nguyên lý dự đoán các tham số QoT tại nút I bởi SA được thực hiện dựa trên mô hình xuyên lớp như đã trình bày ở Phần 3.3.2.1 của Chương 3.

## 4.2. Mô hình giải tích của thuật toán

### 4.2.1. Xây dựng hàm mục tiêu và các điều kiện ràng buộc

Để mô hình hóa thuật toán SLBQT-DSR thành mô hình giải tích, tác giả định nghĩa một số ký hiệu toán học như sau:

Gọi  $N_{sx} = [n_{ij}^{(sx)}]_{n \times n}$  ( $n = 1..m$ , với  $m$  là tổng số nút mạng) là ma trận biểu diễn các kết nối được chọn cho lộ trình từ nút  $S$  đến nút  $X$  ( $r_{sx}$ ), trong đó, mỗi phần tử  $n_{ij}^{(sx)}$  được xác định bởi:

$$n_{ij}^{(sx)} = \begin{cases} 1 & \text{Nếu lộ trình } r_{sx} \text{ đi qua kết nối } c_{ij} \\ 0 & \text{Ngược lại} \end{cases} \quad (4.1)$$

Gọi  $\rho_{sx}$  là tải lưu lượng yêu cầu từ nút  $S$  đến nút  $X$ ,  $F_s = [f_{ij}^{(s)}]_{n \times n}$  là ma trận biểu diễn tải lưu lượng từ nút  $S$  phân phối đến tất cả các kết nối trong mạng. Khi đó,  $F_s$  được xác định bởi:

$$F_s = [f_{ij}^{(s)}]_{n \times n} = \sum_{u=1}^{m|u \neq s} \rho_{su} N_{su} \quad (4.2)$$

Xét trường hợp nút  $S$  cần khám phá một lộ trình mới đến nút  $D$ . Thuật toán định tuyến SLBQT-DSR sẽ phát quảng bá gói RREQ để tìm  $K$  lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED.  $K$  lộ trình này được biểu diễn bởi ma trận  $N_{sd}^{(k)} = [n_{ij}^{(sdk)}]_{n \times n}$ , trong đó, mỗi phần tử  $n_{ij}^{(sdk)}$  được xác định theo (4.1).

Để biểu diễn lộ trình cân bằng tải được chọn trong số  $K$  lộ trình khả dụng, tác giả định nghĩa biến  $x_{sd}^{(k)}$  như sau:

$$x_{sd}^{(k)} = \begin{cases} 1 & \text{Nếu lộ trình thứ } k \text{ được chọn} \\ 0 & \text{Ngược lại} \end{cases} \quad (4.3)$$

khi đó, ma trận biểu diễn tải lưu lượng từ nút  $S$  phân phối đến tất cả các kết nối trong

mạng được thay đổi thành:

$$F'_s = [f'_{ij}{}^{(s)}]_{n \times n} = F_s + \rho_{sd} \sum_{k=1}^K x_{sd}^{(k)} N_{sd}^{(k)} \quad (4.4)$$

Từ (4.4) ta có các phần tử  $f'_{ij}{}^{(s)}$  của ma trận  $F'_s$  được xác định bởi:

$$f'_{ij}{}^{(s)} = f_{ij}{}^{(s)} + \rho_{sd} \sum_{k=1}^K x_{sd}^{(k)} n_{sd}^{(k)} \quad (4.5)$$

Sau khi xác định được ma trận  $F'_s$ , thuật toán định tuyến SLBQT-DSR được mô hình hóa thành bài toán quy hoạch tuyến tính nguyên (ILP) sau đây:

$$\min \left( \max_{\forall f'_{ij}{}^{(s)} \in F'_s} f'_{ij}{}^{(s)} \right) \quad (4.6)$$

với các điều kiện ràng buộc:

$$x_{sd}^{(k)} (x_{sd}^{(k)} - 1) = 0 \quad (4.7)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{sd}^{(k)} = 1 \quad (4.8)$$

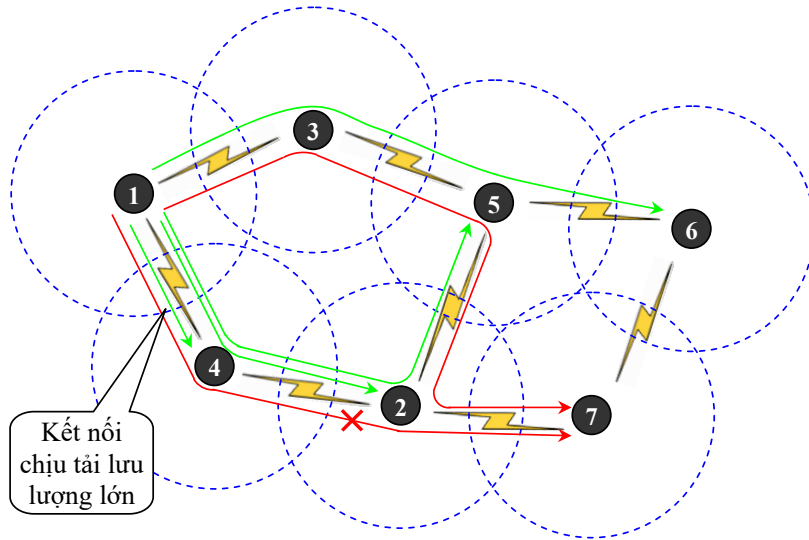
trong đó, (4.7) là ràng buộc nguyên và nhị phân theo định nghĩa của biến  $x_{sd}^{(k)}$  ở (4.3). (4.8) là ràng buộc lựa chọn lộ trình, chỉ cho phép chọn một trong số  $K$  lộ trình.

Bằng cách giải bài toán ILP mô tả ở (4.6) với các điều kiện ràng buộc (4.7) và (4.8), ta thu được tập nghiệm  $\{x_{sd}^{(k)}\}$ , nghĩa là tìm được lộ trình cân bằng tải từ nút nguồn ( $s$ ) đến nút đích ( $d$ ).

#### 4.2.2. Ví dụ minh họa

Để thấy rõ nguyên lý tìm lộ trình cân bằng tải theo mô hình giải tích ở trên, tác giả xét một ví dụ như ở Hình 4.2. Ở thời điểm hiện tại, bảng định tuyến của nút 1 chứa 4 bản ghi tương ứng với 4 lộ trình đến các nút đích 2, 4, 5 và 6. Các lộ trình này có cấu trúc chi tiết như sau:  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5$  và  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ . Theo (4.1), các lộ trình này được biểu diễn bởi các ma trận  $N_{sx}$  ( $s = 1, x = 2, 4, 5, 6$ ) như sau:





**Hình 4.2.** Một ví dụ tìm lộ trình cân bằng theo thuật toán SLBQT-DSR

$$N_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad N_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$N_{15} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad N_{16} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Để đơn giản trong việc tính toán, xét trường hợp tải lưu lượng yêu cầu từ nút 1 đến tất cả các nút là 1 Erlang ( $\rho_{1x} = 1$ ). Theo (4.2) ta có ma trận biểu diễn tải lưu lượng từ nút 1 phân phối đến tất cả các kết nối trong mạng ở thời điểm hiện tại như sau:

$$F_1 = [f_{ij}^{(1)}]_{7 \times 7} = \rho_{12}N_{12} + \rho_{14}N_{14} + \rho_{15}N_{15} + \rho_{16}N_{16} \quad (4.11)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Giả sử ở thời điểm hiện tại, nút 1 cần khám phá một lộ trình mới đến nút 7. Thuật toán định tuyến SLBQT-DSR sẽ phát quảng bá gói RREQ để tìm  $K$  lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS và EED có thể sử dụng cho việc truyền dữ liệu. Xét trường hợp  $K = 2$ . Sau quá trình phát quảng bá gói RREQ, nút 1 nhận được 2 gói RREP tương ứng với 2 lộ trình có thể sử dụng cho việc truyền dữ liệu là  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 7$  và  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 7$ . 2 lộ trình này được biểu diễn bởi ma trận  $N_{sd}^{(k)}$  như sau:

$$N_{17}^{(1)} = [n_{ij}^{(171)}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$N_{17}^{(2)} = [n_{ij}^{(172)}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Vấn đề còn lại của thuật toán SLBQT-DSR là chọn 1 trong số 2 lộ trình này để truyền dữ liệu. Từ (4.6) ta xác định được hàm mục tiêu của thuật toán SLBQT-DSR

như sau:

$$\min \left( \max_{\forall f_{ij}^{(1)} \in F_1'} f_{ij}^{\prime(1)} \right) \quad (4.15)$$

Theo (4.5),  $f_{ij}^{\prime(1)}$  được xác định bởi:

$$f_{ij}^{\prime(1)} = f_{ij}^{(1)} + \rho_{17} \sum_{k=1}^2 x_{17}^{(k)} n_{ij}^{(17k)} \quad (4.16)$$

$$= f_{ij}^{(1)} + x_{17}^{(1)} n_{ij}^{(171)} + x_{17}^{(2)} n_{ij}^{(172)} \quad (\text{vì } \rho_{17} = 1) \quad (4.17)$$

Từ (4.17), (4.13) và (4.12) ta xác định được các thành phần của hàm mục tiêu (4.15) như sau:

$$f_{13}^{\prime(1)} = 1 + x_{17}^{(2)} \quad (4.18)$$

$$f_{14}^{\prime(1)} = 3 + x_{17}^{(1)} \quad (4.19)$$

$$f_{25}^{\prime(1)} = 1 \quad (4.20)$$

$$f_{27}^{\prime(1)} = x_{17}^{(1)} + x_{17}^{(2)} \quad (4.21)$$

$$f_{35}^{\prime(1)} = 1 + x_{17}^{(2)} \quad (4.22)$$

$$f_{42}^{\prime(1)} = 2 + x_{17}^{(1)} \quad (4.23)$$

$$f_{52}^{\prime(1)} = x_{17}^{(2)} \quad (4.24)$$

$$f_{56}^{\prime(1)} = 1 \quad (4.25)$$

Các giá trị của  $f_{ij}^{\prime(1)}$  còn lại đều bằng 0. Theo (4.7) và (4.8), các điều kiện ràng buộc của thuật toán SLBQT-DSR trong trường hợp này được xác định bởi:

$$\begin{cases} x_{17}^{(1)}(x_{17}^{(1)} - 1) = 0 \\ x_{17}^{(2)}(x_{17}^{(2)} - 1) = 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

$$x_{17}^{(1)} + x_{17}^{(2)} = 1 \quad (4.27)$$

Bằng cách giải bài toán ILP với hàm mục tiêu (4.15) và các điều kiện ràng buộc (4.26) và (4.27), ta thu được nghiệm  $x_{17}^{(1)} = 0$  và  $x_{17}^{(2)} = 1$ . Giá trị của hàm mục tiêu (4.15) là:

$$\min \left( \max_{\forall f_{ij}^{\prime(1)} \in F_1'} f_{ij}^{\prime(1)} \right) = f_{14}^{\prime(1)} = 3 + x_{17}^{(1)} = 3 \quad (4.28)$$

Với kết quả trên thì lộ trình được chọn là  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 7$ . Khi chọn lộ trình này thì tải lưu lượng lớn nhất trên tất cả các kết nối trong mạng là 3 (kết nối từ nút 1 đến nút 4). Nếu chọn lộ trình  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 7$  thì tải lưu lượng lớn nhất là 4 (cũng trên kết nối từ nút 1 đến nút 4). Như vậy, thuật toán định tuyến SLBQT-DSR đã tìm được lộ trình cân bằng tải.

### 4.3. Thực thi thuật toán SLBQT-DSR

#### 4.3.1. *Chỉnh sửa khuôn dạng gói RREQ*

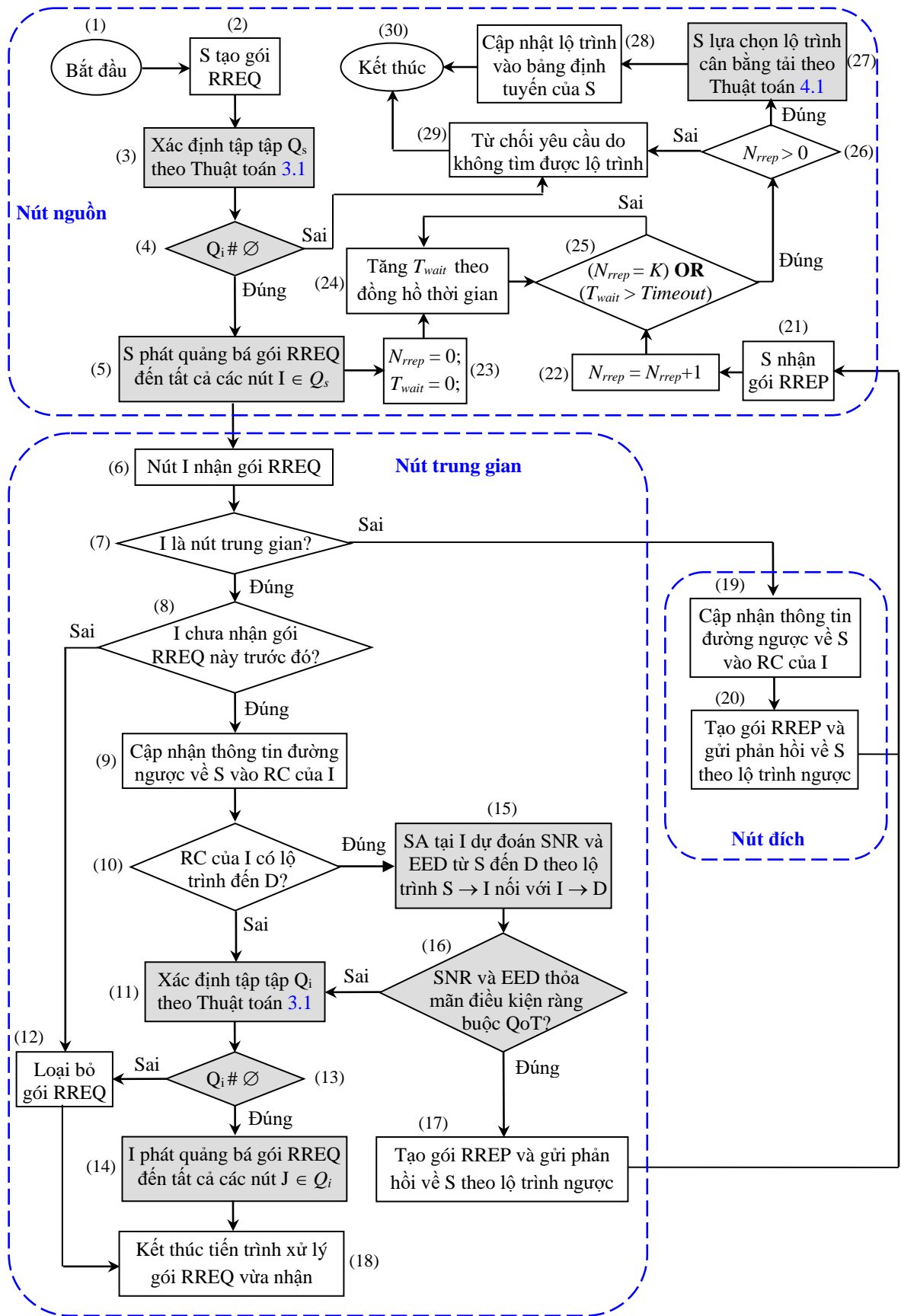
Để có thể xác định các điều kiện ràng buộc của QoT trong thuật toán định tuyến SLBQT-DSR, SA tại các nút mạng dự đoán trước các độ đo về QoT trong quá trình khám phá lộ trình như đã trình bày ở Phần 4.1.2. Để thực hiện điều này, các nút mạng phải trao đổi với nhau các thông tin về SNR và EED. Đối với mạng MANET, việc trao đổi thông tin giữa các nút chỉ có thể thực hiện thông qua các gói điều khiển. Trong thuật toán SLBQT-DSR, tác giả sử dụng gói RREQ để trao đổi các thông tin về QoT và EED giữa các nút. Cấu trúc gói RREQ sử dụng trong thuật toán SLBQT-DSR như cho thấy ở Hình 4.4. Gói RREQ này được chỉnh sửa từ gói RREQ của giao thức DSR bằng cách thêm vào các trường QoT và EED để lưu trữ các giá trị về chất lượng truyền dẫn và thời gian trễ, sử dụng cho việc xác định các điều kiện ràng buộc trong quá trình khám phá lộ trình.

Opt. type	Opt. Data Length	Identification
Target Address		
Address [1]		
Address [2]		
...		
Address [n]		
Reserved	QoT	EED

**Hình 4.3.** Cấu trúc gói RREQ sử dụng trong thuật toán SLBQT-DSR

#### 4.3.2. *Lưu đồ thuật toán SLBQT-DSR*

Nguyên lý khám phá lộ trình của thuật toán định tuyến SLBQT-DSR được thực hiện theo lưu đồ Hình 4.4. Các điều kiện ràng buộc QoT được xác định tại các bước (3) đến (5) đối với nút nguồn, các bước (11) đến (16) đối với nút trung gian, trong đó, việc xác định tập  $Q_i$  là tập các nút láng giềng của nút I thỏa mãn điều kiện ràng buộc



**Hình 4.4.** Lưu đồ thuật toán định tuyến SLBQT-DSR

của QoT được thực hiện theo Thuật toán 3.1 của Chương 3. Khi nút nguồn đã nhận được  $K$  gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, nghĩa là thuật toán SLBQT-DSR đã tìm được  $K$  lộ trình thỏa mãn điều kiện ràng buộc QoT, thuật toán SLBQT-DSR lựa chọn một trong số  $K$  lộ trình khả dụng sao cho tải lưu lượng được phân bố cân bằng đến tất cả các kết nối trong mạng. Công việc này được thực hiện tại bước (27) của nút nguồn, theo Thuật toán 4.1.

---

**Thuật toán 4.1:** Chọn một lộ trình cân bằng tải trong số  $K$  lộ trình khả dụng tại nút nguồn bởi thuật toán SLBQT-DSR

---

**Input** : Một tô-pô mạng MANET;  $K$  lộ trình khả dụng từ  $S$  đến  $D$ .

**Output:** Một lộ trình cân bằng tải từ  $S$  đến  $D$ .

**Method:**

- (1) Dựa trên thông tin bảng định tuyến của nút  $S$ , xây dựng ma trận phân phối lưu lượng  $F_s = [f_{ij}^{(s)}]_{n \times n}$  theo (4.2);
  - (2) Dựa trên thông tin của  $K$  lộ trình khả dụng, xây dựng ma trận phân phối lưu lượng  $F'_s = [f'_{ij}{}^{(s)}]_{n \times n}$  theo (4.4);
  - (3) Xây dựng bài toán ILP theo (4.6) với các điều kiện ràng buộc (4.7) và (4.8);
  - (4) Giải bài toán ILP;
  - (5) Chọn lộ trình cân bằng tải dựa trên kết quả giải bài toán ILP;
  - (6) Cập nhật thông tin lộ trình vào bảng định tuyến của  $S$ ;
- 

## 4.4. Mô phỏng và phân tích kết quả

### 4.4.1. Kịch bản mô phỏng

Hiệu quả thực thi của thuật toán định tuyến SLBQT-DSR được đánh giá bằng phương pháp mô phỏng trên OMNeT++ [10]. Thuật toán SLBQT-DSR được so sánh với thuật toán khám phá lộ trình của giao thức DSR [22] đối với các tham số hiệu năng SNR, BER, xác suất chặn gói dữ liệu và thông lượng trên toàn mạng. Mô phỏng được thực hiện trên 3 nhóm kịch bản khác nhau với các tham số kỹ thuật được thiết lập như Bảng 2.5 của Chương 2. Các nhóm kịch bản mô phỏng được cài đặt như sau:

(i) *Kịch bản 1: Phân tích các tham số hiệu năng theo sự thay đổi của tổng số nút mạng*

Trong kịch bản mô phỏng này, tác giả thay đổi tổng số nút mạng qua mỗi lần thực thi mô phỏng để phân tích các tham số hiệu năng. Tổng số nút mạng được thay đổi từ 30 đến 50 nút.

(ii) *Kịch bản 2: Phân tích các tham số hiệu năng theo sự thay đổi của tải lưu lượng*

Khác với kịch bản 1, tổng số nút mạng được giữ cố định trong kịch bản này. Tải lưu lượng phát sinh tại các nút là nguồn phát được thiết lập thay đổi động, từ 0.6 Erlang cho đến 1 Erlang.

(iii) *Kịch bản 3: Phân tích các tham số hiệu năng theo sự thay đổi của tốc độ di chuyển*

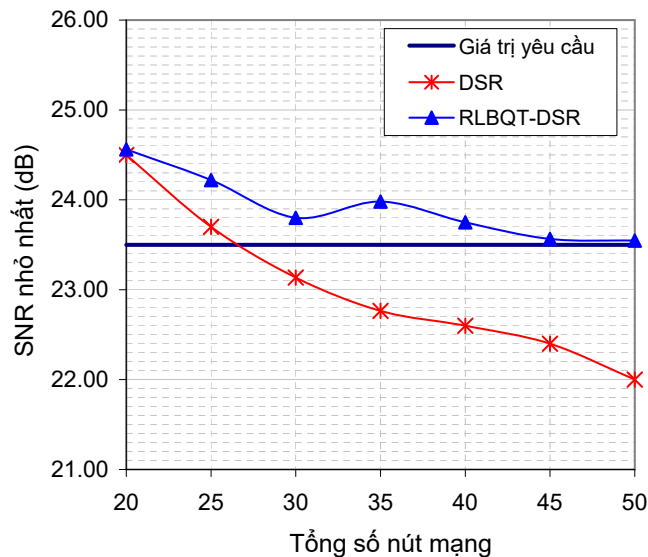
Trong kịch bản mô phỏng này, tổng số nút mạng và tải lưu lượng phát sinh tại các nút là nguồn phát được giữ cố định. Tốc độ di chuyển trung bình của tất cả các nút là thay đổi, từ 0 m/s (đứng yên) cho đến 20 m/s.

Ngoài ra, tất cả các kịch bản mô phỏng đều được thực hiện nhiều lần. Kết quả mô phỏng cuối cùng là giá trị trung bình của các lần mô phỏng.

#### 4.4.2. Kết quả mô phỏng

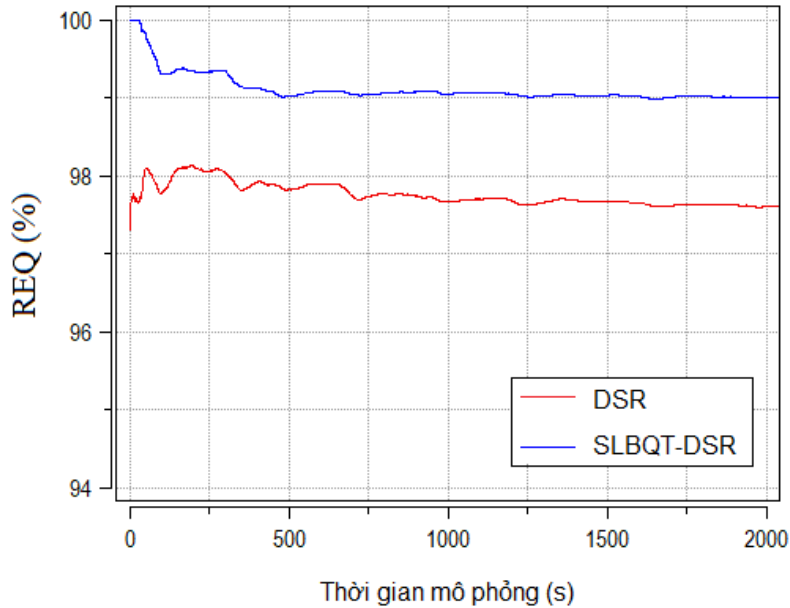
##### 4.4.2.1. Phân tích QoS

Trong phần này, tác giả phân tích QoS của các kênh truyền dữ liệu trong hệ thống mạng. Trong kịch bản mô phỏng được thiết lập, QoS được xác định thông qua độ đo về tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) của các kênh truyền. Kết quả mô phỏng trên Hình 4.5 cho thấy rõ sự thay đổi của SNR theo tổng số nút mạng. Giá trị SNR trên trục tung là SNR nhỏ nhất ở thời điểm lộ trình được khám phá. Ta thấy rằng, với thuật



**Hình 4.5.** Sự thay đổi SNR nhỏ nhất khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR

toán DSR, giá trị SNR chỉ lớn hơn SNR yêu cầu tối thiểu (23.5 dB) khi tổng số nút mạng nhỏ hơn 30. Với thuật toán SLBQT-DSR, giá trị SNR được cải thiện một cách đáng kể so với thuật toán DSR, luôn lớn hơn SNR yêu cầu tối thiểu cho dù tổng số nút mạng lớn. Nguyên nhân là do điều kiện ràng buộc về QoT đã được xem xét trong quá trình khám phá lộ trình.



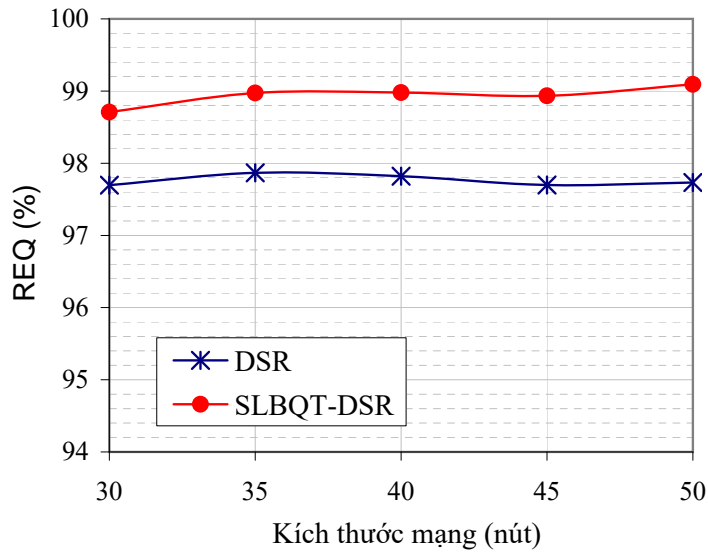
**Hình 4.6.** So sánh tỷ lệ kênh đảm bảo QoT khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR

Kết quả thu được trên Hình 4.6 cho thấy rõ sự khác biệt về tỷ lệ kênh truyền dữ liệu đảm bảo QoT (REQ - Ratio of channels Ensureing QoT) khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR. Kết quả này được thực hiện trên tô-pô 50 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 20 m/s, tải lưu lượng phát sinh trung bình tại mỗi nút là 1 Erlang. Trong các kịch bản mô phỏng của luận án, REQ được xác định như sau:

$$REQ = \frac{C_{QoT}}{C_{all}} \times 100\% \quad (4.29)$$

trong đó,  $C_{QoT}$  là tổng số kênh đảm bảo QoT theo yêu cầu,  $C_{all}$  là tổng số kênh trong toàn mạng. Các đồ thị trên Hình 4.6 cho thấy rằng, trong thời gian mô phỏng từ 0 đến 250 giây, REQ của cả hai thuật toán DSR và SLBQT-DSR biến động nhiều do hệ thống mạng chưa đi vào trạng thái ổn định. Trong khoảng thời gian từ 250 giây trở đi, giá trị này dần ổn định. Trong trường hợp sử dụng thuật toán DSR, REQ trung bình là 97.73%. Giá trị này tăng lên đến 99.09% nếu thuật toán SLBQT-DSR được sử dụng.





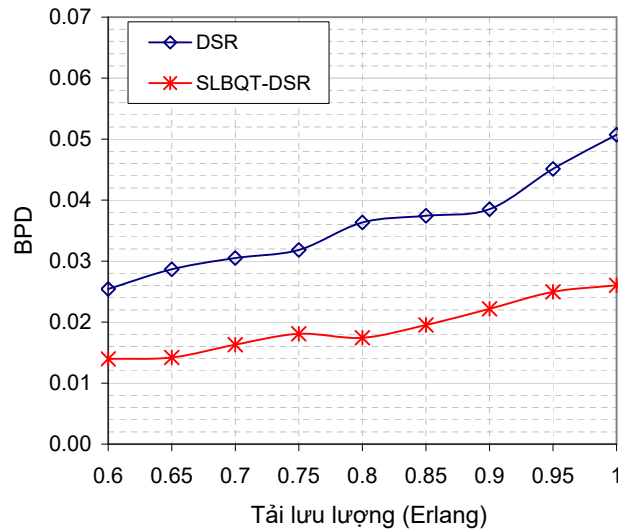
**Hình 4.7.** Sự thay đổi SNR nhỏ nhất khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR và DSR

Như vậy, QoS của hệ thống mạng đã được cải thiện trong trường hợp sử dụng thuật toán SLBQT-DSR.

Hình 4.7 là kết quả thu được khi thực hiện mô phỏng trên 5 kịch bản khác nhau, tổng số nút mạng của mỗi kịch bản tương ứng là 30, 35, 40, 45 và 50 nút. Ta thấy rằng, REQ của thuật toán SLBQT-DSR luôn cao hơn thuật toán DSR. Điều này chứng tỏ QoS của hệ thống mạng khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR luôn tốt hơn trường hợp sử dụng thuật toán DSR.

#### 4.4.2.2. Phân tích xác suất chặn gói dữ liệu

Vì QoS của hệ thống mạng tăng khi sử dụng thuật toán định tuyến SLBQT-DSR như đã phân tích ở Phần 4.4.2.1, nên xác suất **chặn** gói dữ liệu (BPD) trên toàn mạng giảm. Kết quả mô phỏng trên Hình 4.8 cho thấy rõ điều này. Kết quả này được mô phỏng trên tô-pô 30 nút, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 20 m/s và băng thông kênh 40 MHz. Ta thấy rằng, BPD khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR nhỏ hơn nhiều so với trường hợp sử dụng thuật toán DSR. Xét trường hợp tải lưu lượng là 0.6 Erlang, BPD của thuật toán DSR là 0.0254. Trong khi đó, giá trị này của thuật toán SLBQT-DSR chỉ là 0.0139. Khi tải lưu lượng ở mức cao nhất, tức là 1 Erlang, BPD giảm từ 0.0510 xuống còn 0.0260, tương ứng với tỷ lệ giảm 48.65%. Với các trường hợp còn lại, BPD của thuật toán SLBQT-DSR giảm trung bình 46.77% so với thuật

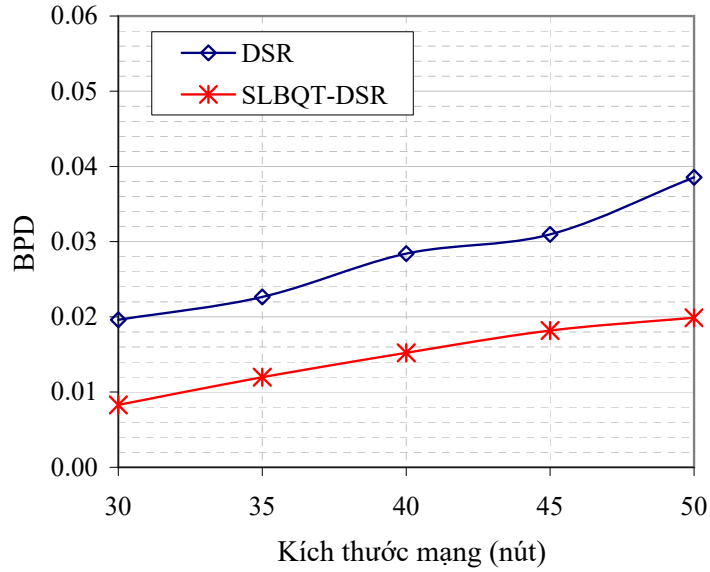


**Hình 4.8.** So sánh BPD theo tải lưu lượng của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 30, tốc độ di chuyển 20 m/s, băng thông kênh 40 MHz

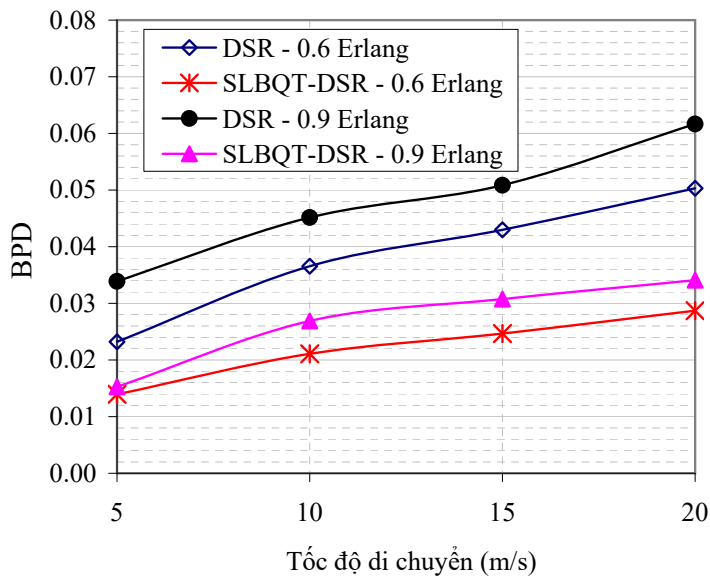
toán DSR.

Trong trường hợp tổng số nút mạng thay đổi, BPD trên toàn mạng khi sử dụng các thuật toán SLBQT-DSR và DSR như cho thấy ở Hình 4.9. Đây là kết quả của kịch bản mô phỏng với tải lưu lượng phát sinh tại mỗi nút là 0.95 Erlang, các nút di chuyển với tốc độ trung bình 5 m/s. Các đồ thị trên Hình 4.9 cho thấy rằng, đối với cả hai thuật toán, BPD càng cao khi tổng số nút mạng càng lớn. Tuy nhiên, BPD của thuật toán SLBQT-DSR luôn nhỏ hơn thuật toán DSR. Ví dụ, xét trường hợp tổng số nút mạng là 50, BPD của các thuật toán DSR và SLBQT-DSR lần lượt là 0.0385 và 0.0198. Như vậy, so với thuật toán DSR, BPD của thuật toán SLBQT-DSR giảm 48.4%. Với các trường hợp tổng số nút mạng là 30, 35, 40 và 45 nút, BPD giảm trung bình 48.2% khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR.

Ngoài sự phụ thuộc vào tải lưu lượng và tổng số nút mạng, BPD còn phụ thuộc vào tốc độ di chuyển của các các nút. Điều này thể hiện rõ trên Hình 4.10, trong đó tác giả vẽ đồ thị BPD theo tốc độ di chuyển trung bình của các nút, tổng số nút mạng được thiết lập là 50. Kết quả này được thực hiện trên 2 kịch bản khác nhau, một kịch bản với tải lưu lượng thấp (0.6 Erlang) và một kịch bản với tải lưu lượng cao (0.9 Erlang). Trong cả hai kịch bản, BPD trên toàn mạng khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR luôn luôn nhỏ thuật toán DSR. Xét trường hợp 0.6 Erlang và mỗi nút di chuyển với tốc độ trung bình 20 m/s, BPD của các thuật toán DSR và SLBQT-DSR tương ứng là 0.051 và 0.029. Như vậy, so với thuật toán DSR, BPD khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR

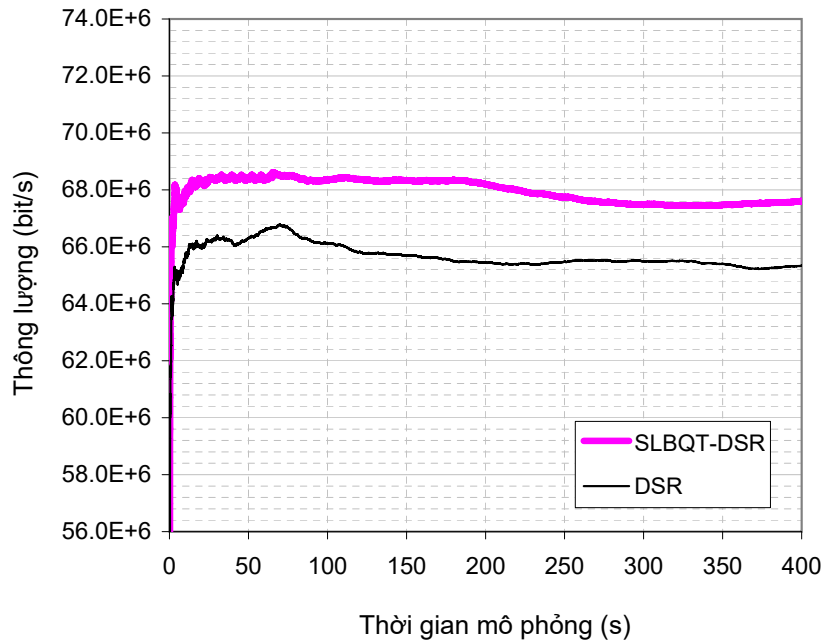


**Hình 4.9.** So sánh xác suất chặn gói dữ liệu của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tổng số nút mạng thay đổi



**Hình 4.10.** So sánh xác suất chặn gói dữ liệu của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tốc độ di chuyển trung bình của các nút thay đổi

giảm 42.9%. Cũng với trong trường hợp mỗi nút di chuyển với tốc độ trung bình 20 m/s, nhưng nếu tải lưu lượng phát sinh tại mỗi nút là 0.9 Erlang thì BPD trên toàn mạng khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR giảm 44.7%. Kết quả này đã chứng tỏ rằng, tải lưu lượng càng cao thì thuật toán SLBQT-DSR hoạt động càng hiệu quả.

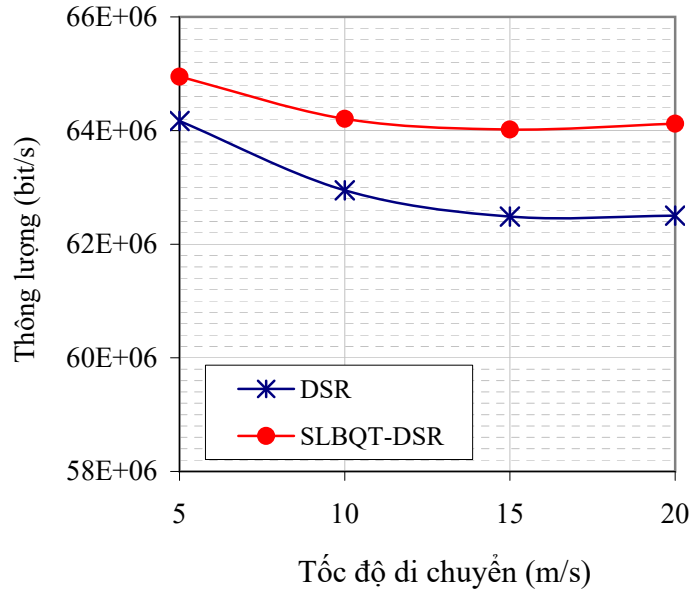


**Hình 4.11.** So sánh thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tổng số nút là 50, tải lưu lượng là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển 5 m/s

#### 4.4.2.3. Phân tích thông lượng

Về mặt thông lượng, vì PBD của thuật toán SLBQT-DSR giảm so với thuật toán DSR, nên thông lượng mạng khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR tăng lên. Điều này được thể hiện trên Hình 4.11. Kết quả này được thực thi trên tô-pô mạng có 50 nút, tải lưu lượng phát sinh tại các nút phát là 0.9 Erlang, băng thông kênh 40 MHz và tốc độ di chuyển 5 m/s. Các đồ thị trên Hình 4.11 cho thấy rằng, thông lượng tăng khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR. Với thuật toán DSR, thông lượng trung bình là 65.482 Mbit/s, trong khi đó thông lượng trung bình của thuật toán SLBQT-DSR là 67.385 Mbit/s. Như vậy, so với thuật toán DSR, thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR tăng trung bình gần 1.903 Mbit/s.

Trong trường hợp tốc độ di chuyển của các nút thay đổi, thông lượng mạng khi sử dụng các thuật toán định tuyến DSR và SLBQT-DSR như cho thấy trên Hình 4.12. Ta thấy rằng, tốc độ di chuyển của các nút càng cao thì thông lượng mạng càng giảm. Nguyên nhân là do khi các nút di chuyển nhiều thì xác suất gói chặn gói dữ liệu tăng (như đã phân tích ở kết quả Hình 4.10). Tuy nhiên, các đồ thị trên Hình 4.12 cho thấy, thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR luôn cao hơn thuật toán DSR. Cụ thể, xét trường hợp các nút di chuyển với tốc độ trung bình 20 m/s, thông lượng trung bình của

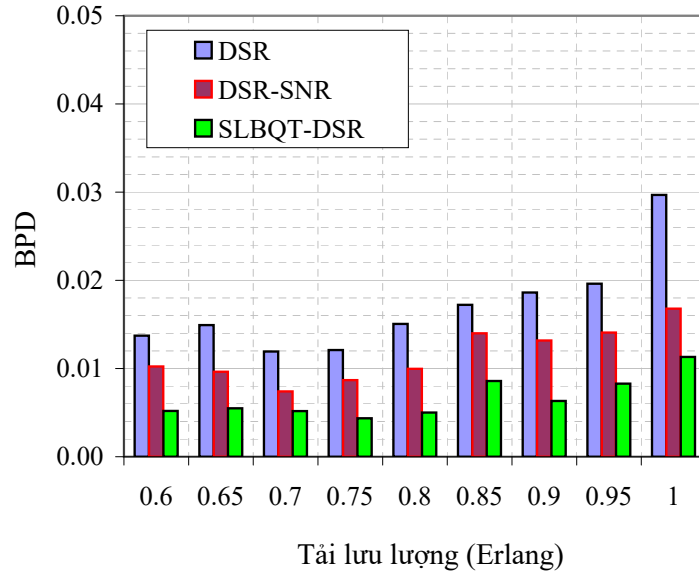


**Hình 4.12.** So sánh thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR và DSR khi tốc độ di chuyển của các nút thay đổi

thuật toán DSR là 62.50 Mbit/s, trong khi đó nếu sử dụng thuật toán SLBQT-DSR thì giá trị này là 64.12 Mbit/s. Như vậy, nếu so với thuật toán DSR, thông lượng mạng khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR tăng 1.62 Mbit/s. Với các trường hợp còn lại, thông lượng mạng tăng trung bình 1.29 Mbit/s nếu sử dụng thuật toán SLBQT-DSR.

#### 4.4.3. So sánh thuật toán được đề xuất với các công trình nghiên cứu liên quan

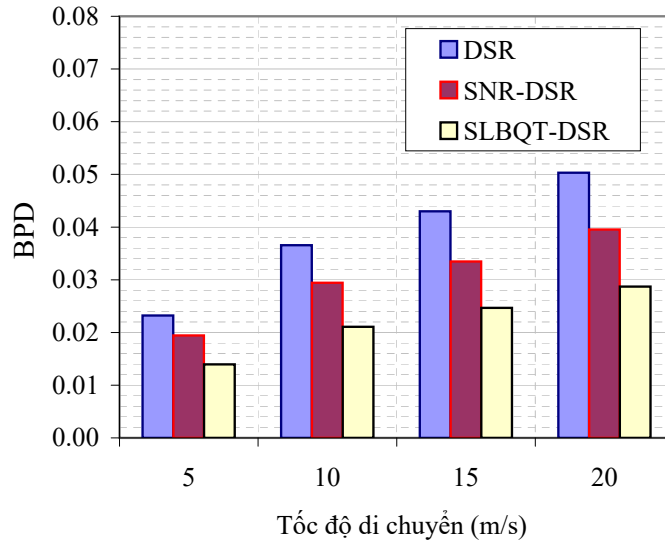
Trong phần này, tác giả so sánh hiệu quả thực thi của thuật toán định tuyến SLBQT-DSR mà tác giả đã đề xuất với thuật toán DSR-SNR của nhóm tác giả trong [24]. Ngoài ra, các thuật toán này cũng được so sánh với thuật toán DSR để thấy rõ hiệu quả của các thuật toán cải tiến. Nguyên lý của thuật toán DSR-SNR được các tác giả đề xuất trong [24] là tích hợp thêm hai trường vào gói RREP, với độ dài của mỗi trường là 8 bits để chứa thông tin SNR và RP (Received Power). Khi nút nguồn nhận được các gói RREP về kết quả khám phá lộ trình, dựa trên thông tin của các trường SNR và RP, nút nguồn sẽ lựa chọn lộ trình có QoS tốt nhất. Về mô phỏng, các tác giả trong [24] đã mô phỏng thuật toán DSR-SNR trên OPNET simulator 14.5 [55]. Trong phần này, để đồng nhất môi trường mô phỏng nhằm đảm bảo độ tin cậy của các kết quả so sánh, tác giả luận án cài đặt thuật toán DSR-SNR trên cùng phần mềm mô phỏng với các thuật toán SLBQT-DSR và DSR, đó là OMNeT++, đồng thời sử dụng cùng bộ tham số đầu vào và các kịch bản mô phỏng như đã phân tích ở Phần 4.4.1.



**Hình 4.13.** So sánh BPD theo tải lưu lượng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR

Trước tiên, tác giả phân tích tham số hiệu năng BPD khi tải lưu lượng phát sinh tại các nút mạng thay đổi. Kết quả thu được như ở Hình 4.13. Đây là kết quả của kịch bản mô phỏng với tổng số nút là 30, tốc độ di chuyển trung bình của mỗi nút là 5 m/s. Các biểu đồ trên Hình 4.13 cho thấy rằng, thuật toán SLBQT-DSR cho kết quả BPD nhỏ nhất trong cả 3 thuật toán. So với thuật toán DSR-SNR của nhóm tác giả trong [24], thuật toán SLBQT-DSR cải thiện BPD một cách đáng kể. Ví dụ, xét trường hợp tải lưu lượng 1 Erlang, BPD của các thuật toán DSR, SNR-DSR và SLBQT-DSR tương ứng là 0.029, 0.017 và 0.011. Như vậy, nếu so với thuật toán SNR-DSR, BPD khi sử dụng thuật toán SLBQT-DSR giảm 32.59%. Nếu so với thuật toán DSR, giá trị này giảm đến 61.89%.

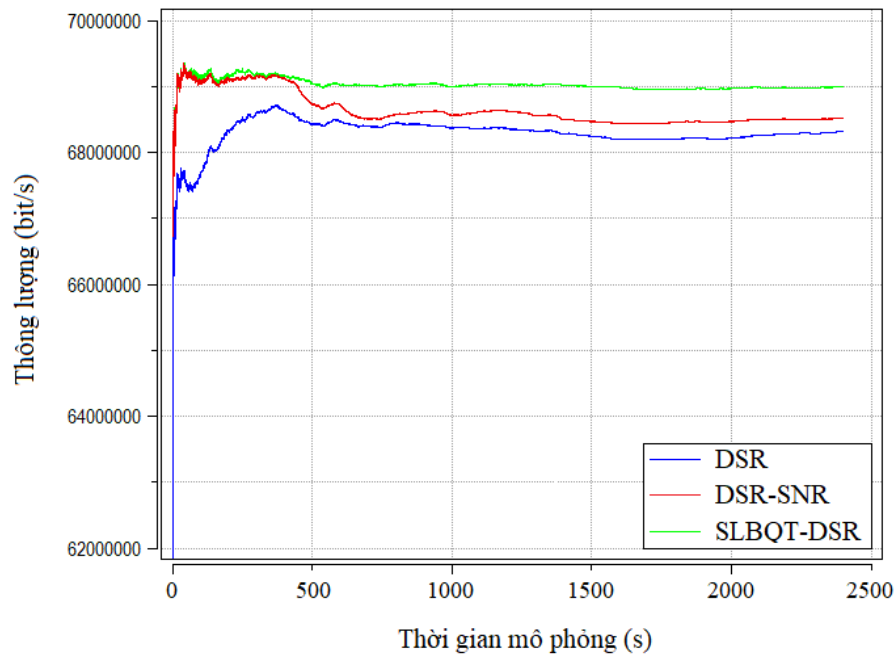
Tiếp theo, tác giả so sánh BPD của các thuật toán DSR, DSR-SNR và LBQT-DSR trường hợp tốc độ di chuyển của các nút thay đổi, tổng số nút mạng là 50, băng thông kênh 40 MHz và tải lưu lượng 0.6 Erlang. Kết quả thu được như ở Hình 4.14. Ta thấy rằng, đối với cả ba thuật toán, BPD càng cao khi tốc độ di chuyển của các nút mạng càng lớn. Tuy nhiên, trong cả 3 thuật toán, SLBQT-DSR là thuật toán mang lại giá trị BPD nhỏ nhất. Cụ thể, xét trường hợp tốc độ di chuyển trung bình của các nút là 20 m/s, BPD của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR lần lượt là 0.050, 0.039 và 0.028. Như vậy, nếu so với thuật toán DSR, BPD của thuật toán DSR-SNR giảm 21.38%, thuật toán SLBQT-DSR giảm 42.93%. Kết quả này cho thấy thuật toán



**Hình 4.14.** So sánh BPD theo tốc độ di chuyển của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR

SLBQT-DSR cải thiện một cách đáng kể đối với tham số hiệu năng BPD.

Về mặt thông lượng mạng, kết quả so sánh 3 thuật toán DSR, SNR-DSR và SLBQT-DSR như cho thấy trên Hình 4.15. Thông lượng được đo qua thời gian mô phỏng trong trường hợp tô-pô mạng có 30 nút, mỗi nút di chuyển với tốc độ trung bình 5 m/s, tải



**Hình 4.15.** So sánh thông lượng của các thuật toán DSR, DSR-SNR và SLBQT-DSR

lưu lượng phát sinh tại mỗi nút 0.9 Erlang. Các đồ thị trên Hình 4.15 cho thấy rằng, thuật toán SLBQT-DSR cho thông lượng cao nhất, trung bình là 68.99 Mbit/s. Giá trị này của các thuật toán DSR-SNR và DSR tương ứng là 68.52 và 68.31 Mbit/s. Như vậy, thông lượng của thuật toán SLBQT-DSR tăng trung bình 470 Kbit/s và 680 Kbit/s nếu so với các thuật toán DSR-SNR và DSR.

Từ các kết quả mô phỏng ở trên, chúng tôi có thể kết luận rằng, với kỹ thuật định tuyến có xét đến điều kiện ràng buộc QoT (các thuật toán DSR-SNR và SLBQT-DSR), hiệu năng mạng cải thiện một cách đáng kể về mặt xác suất nghẽn mạng và thông lượng. Trong đó, thuật toán SLBQT-DSR mang lại hiệu quả cao nhất trong số 3 thuật toán được phân tích. Nguyên nhân là do ngoài điều kiện ràng buộc QoT, thuật toán SLBQT-DSR còn xét đến mục tiêu cân bằng tải trong quá trình khám phá lộ trình. Vì vậy, thuật toán SLBQT-DSR giảm thiểu xác suất chặn gói dữ liệu trong toàn mạng.

#### **4.5. Đánh giá ưu nhược điểm của thuật toán được đề xuất**

##### **4.5.1. Ưu điểm**

Các kết quả mô phỏng được trình bày ở Phần 4.4 đã chứng minh rằng, thuật toán định tuyến được đề xuất SLBQT-DSR cải thiện hiệu năng mạng đối với các độ đo SNR, BER, xác suất chặn gói dữ liệu và thông lượng mạng. Các ưu điểm chính của thuật toán SLBQT-DSR bao gồm:

- Lựa chọn được lộ trình cân bằng tải, nhưng đồng thời đảm bảo chất lượng truyền dẫn theo yêu cầu.
- Giảm số gói RREQ cần thiết trong quá trình khám phá lộ trình. Nguyên nhân là do các nút trung gian chỉ phát quảng bá gói RREQ đến các nút láng giềng thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT, chứ không phát quảng bá đến tất cả các nút láng giềng như giao thức DSR.
- Việc lựa chọn lộ trình cân bằng tải được thực hiện đơn giản dựa trên thông tin định tuyến được lưu trữ trong bộ nhớ tạm của nút nguồn.

##### **4.5.2. Nhược điểm**

Bên cạnh những ưu điểm đã được đề cập ở trên, thuật toán SLBQT-DSR cũng có một số nhược điểm. Tuy nhiên, các nhược điểm này không ảnh hưởng đến hiệu năng mạng, cụ thể như sau:



*(i) Tăng kích thước gói điều khiển*

Với cấu trúc của gói RREQ được đề xuất cho thuật toán SLBQT-DSR như đã trình bày ở Phần 4.3.1, kích thước của gói RREQ này lớn hơn kích thước gói RREQ của thuật toán SLBQT-DSR hai trường, đó là các trường QoT và EED, độ dài của mỗi trường là 1 byte. Tuy nhiên, như đã phân tích trong phần ưu điểm ở trên, tổng số gói RREQ được sử dụng cho việc khám phá lộ trình trong thuật toán SLBQT-DSR là ít hơn thuật toán DSR. Vì vậy, việc gói RREQ của thuật toán SLBQT-DSR tăng thêm 2 bytes không ảnh hưởng đến hiệu năng của thuật toán SLBQT-DSR.

*(ii) Tăng thời gian xử lý tại các nút trung gian*

Để có thể xác định các điều kiện ràng buộc của QoT và EED trong quá trình khám phá lộ trình, SA tại các nút trung gian phải thu thập thông tin, tính toán và dự đoán trước các độ đo về QoT và EED mỗi khi xử lý gói RREQ. Điều này sẽ làm tăng thời gian xử lý. Tuy nhiên, các chương trình tính toán chỉ có độ phức tạp theo hàm đa thức. Cụ thể, theo lưu đồ thuật toán SLBQT-DSR ở Hình 4.4, các ràng buộc về QoT và EED trong quá trình khám phá lộ trình được thực hiện tại các bước (3) và (11), thực hiện theo Thuật toán 3.1 ở Chương 3, trong đó phương trình xác định ràng buộc QoT chỉ là phương trình nghịch đảo, phương trình xác định điều kiện ràng buộc EED là một đa thức bậc  $L + 1$ , với  $L$  là kích thước hàng đợi. Như vậy, mặc dù thuật toán SLBQT-DSR có tăng thời gian xử lý tại các nút trung gian. Tuy nhiên, các chương trình tính toán chỉ có độ phức tạp theo hàm đa thức nên hiệu năng mạng không bị ảnh hưởng nhiều.

#### **4.6. Kết luận chương**

Trong chương này, tác giả đã trình bày thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoT (SLBQT-DSR) được đề xuất cho mạng MANET nhằm cải thiện hiệu năng mạng. Thuật toán định tuyến SLBQT-DSR cho phép tìm được lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED, đồng thời cân bằng tải lưu lượng trên tất cả các kết nối trong toàn mạng. Nguyên lý tìm lộ trình cân bằng tải của thuật toán SLBQT-DSR là dựa trên thông tin định tuyến được lưu trữ trong bộ nhớ tạm của nút nguồn. Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, thuật toán SLBQT-DSR mang lại hiệu năng mạng tốt hơn so với thuật toán DSR và thuật toán DSR-SNR của nhóm tác giả trong [24].

Kết quả nghiên cứu trong chương này đã được công bố trong Tạp chí Tin học và Điều khiển học, tập 34, số 3, 2018 [B1].

## KẾT LUẬN VÀ NHỮNG ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

Việc nghiên cứu các giao thức định tuyến trong mạng MANET đã và đang được nhiều nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm trong thời gian gần đây. Mục tiêu của các công trình nghiên cứu về các giao thức định tuyến trong mạng MANET là tìm ra các giao thức tối ưu nhằm nâng cao hiệu năng mạng. Trong trường hợp mạng MANET có vùng diện tích rộng, mật độ nút cao, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý xảy ra trên các lộ trình truyền dữ liệu đến hiệu năng mạng là rất nghiêm trọng. Các hiệu ứng này làm suy giảm chất lượng tín hiệu truyền dẫn, tăng tỷ lệ lỗi bit, giảm hiệu năng mạng. Nội dung của luận án đã tập trung nghiên cứu kỹ thuật định tuyến dưới điều kiện ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý dựa trên mô hình xuyên lớp. Qua quá trình học tập, nghiên cứu thực hiện luận án, tác giả đã đạt được những kết quả chính sau đây:

### **1. Đề xuất phương pháp xác định các điều kiện ràng buộc của QoS dựa trên mô hình xuyên lớp**

Bằng cách giới hạn các nút láng giềng theo mỗi yêu cầu khám phá lộ trình mới, tác giả đã đề xuất phương pháp xác định các điều kiện ràng buộc của QoS dựa trên mô hình xuyên lớp, sử dụng cho chế khám phá lộ trình của các giao thức định tuyến theo yêu cầu trong mạng MANET. Bằng phương pháp này, thuật toán định tuyến luôn luôn tìm được lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS cho trước. Vì vậy, QoS của trên các lộ trình truyền dữ liệu được đảm bảo theo yêu cầu đề ra.

### **2. Đề xuất thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS dựa trên tải lưu lượng phân phối đến mỗi lộ trình (LBRQT) cho mạng MANET**

Bằng phương pháp sử dụng mô hình xuyên lớp kết hợp với công nghệ tác tử, tác giả đã đề xuất thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS (LBRQT). Thuật toán định tuyến LBRQT cho phép tìm ra các lộ trình truyền dữ liệu thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoS, đồng thời cân bằng tải lưu lượng phân phối đến tất cả các kết nối trong mạng. Sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT, tác giả đã đề xuất các thuật toán khám phá lộ trình cải tiến của các giao thức định tuyến theo yêu cầu. Các thuật

toán được đề xuất bao gồm LBRQT-AODV và LBRQT-DSR. Bằng phương pháp mô phỏng, tác giả đã chứng minh rằng, các thuật toán được đề xuất cải thiện QoS của các lộ trình, nâng cao hiệu năng mạng.

### **3. Đề xuất thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS dựa trên thông tin định tuyến được lưu trữ trong bộ nhớ của nút nguồn (SLBQT-DSR) cho mạng MANET**

Dựa trên đặc trưng của giao thức định tuyến nguồn động (DSR) là bộ nhớ tạm của mỗi nút lưu trữ đầy đủ thông tin lộ trình từ nguồn đến đích, tác giả đã đề xuất thuật toán định tuyến cân bằng tải đảm bảo QoS cho mạng MANET. Thuật toán đề xuất được đặt tên là SLBQT-DSR. Bằng phương pháp mô phỏng, tác giả đã chứng minh rằng, thuật toán SLBQT-DSR thực thi tốt hơn thuật toán DSR và thuật toán DSR-SNR của nhóm tác giả trong [24] đối với các tham số hiệu năng xác suất chặn gói dữ liệu, QoS của các kênh truyền dữ liệu và thông lượng mạng.

Toàn bộ các kết quả đạt được của luận án đã được công bố trên 8 bài báo trong các Tạp chí và Kỷ yếu Hội thảo Khoa học chuyên ngành trong nước và Quốc tế. Trong đó, có 01 bài báo đăng trên Tạp chí khoa học Quốc tế thuộc danh mục SCOPUS [B2], 02 bài báo trên *Tạp chí Tin học và Điều khiển học* [B1] và [B4], 01 bài báo trên *Tạp chí Công nghệ Thông tin và Truyền thông - Chuyên san các Công trình Nghiên cứu, Phát triển và Ứng dụng Công nghệ thông tin và Truyền thông* [B6], và 04 bài báo trên Kỷ yếu hội thảo khoa học chuyên ngành [B3], [B5], [B7], [B8].

## HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA ĐỀ TÀI LUẬN ÁN

Theo xu hướng phát triển của công nghệ mạng truyền thông không dây, mạng MANET sẽ được tiếp tục ứng dụng rộng rãi trong thời gian đến. Hiện nay, các nhà nghiên cứu trong nước cũng như trên thế giới đang rất quan tâm nghiên cứu về công nghệ tiên tiến này. Trong hướng phát triển của luận án, tác giả tập trung vào các hướng nghiên cứu sau đây:

1. Nghiên cứu mặt phẳng điều khiển tích hợp giữa lớp vật lý và lớp mạng để thực thi các giao thức định tuyến ở lớp mạng có xét đến ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý, sử dụng công nghệ SDN (Software-defined networking).

2. Nghiên cứu các giao thức định tuyến trong mạng MANET đa kênh, đa sóng mang có xét đến ràng buộc ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý.

3. Nghiên cứu để đánh giá thêm các độ đo về độ trễ định tuyến, chi phí định tuyến và một số độ đo khác đối với các thuật toán được đề xuất trong luận án.

4. Trong luận án, tác giả đã sử dụng mô hình phân bố Poisson để mô hình hóa tải lưu lượng đưa vào mạng. Ngoài mô hình phát sinh lưu lượng theo phân bố Poisson, vẫn còn một số mô hình khác đã và đang được nghiên cứu trong lĩnh vực điều khiển lưu lượng mạng. Vì vậy, trong thời gian tới, tác giả tiếp tục nghiên cứu sâu và áp dụng vào mô phỏng các mô hình sinh lưu lượng mới, theo xu hướng lưu lượng của dịch vụ đa phương tiện, lưu lượng trong thời đại IoT để đánh giá hiệu quả cân bằng tải của các thuật toán định tuyến được đề xuất.

## CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN

- [B1] Le Huu Binh, Vo Thanh Tu and Nguyen Van Tam, “SLBQT-DSR: Source-based Load Balancing Routing Algorithm under Constraints of Quality of Transmission for MANET”, *Journal of Computer Science and Cybernetics*, Vol.34, No.3, 2018, pp. 265-282.
- [B2] Le Huu Binh, Vo Thanh Tu, “QTA-AODV: An Improved Routing Algorithm to Guarantee Quality of Transmission for Mobile Ad Hoc Networks using Cross-Layer Model”, *Journal of Communications*, Vol 13, No. 7, 2018, pp.338-349. (SCOPUS).
- [B3] Lê Hữu Bình, Võ Thanh Tú, Nguyễn Văn Tam, “Khảo sát ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý và kỹ thuật định tuyến QoS trong mạng MANET”, *Kỷ yếu Hội thảo quốc gia lần thứ XXI: Một số vấn đề chọn lọc của Công nghệ thông tin và truyền thông*, Thanh Hóa, 27-28/7/2018, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2018, trang 162-169.
- [B4] Le Huu Binh, Vo Thanh Tu, Nguyen Van Tam, “Quality of Transmission Aware Routing in Adhoc networks based on Cross-Layer Model combined with the Static Agent”, *Journal of Computer Science and Cybernetics*, Vol.32, No.4, 2016, pp. 351-366.
- [B5] Lê Hữu Bình, Võ Thanh Tú, Nguyễn Văn Tam, “Một phương pháp phân tích hiệu năng mạng Adhoc sử dụng mô hình giải tích”, *Kỷ yếu Hội thảo Khoa học Quốc gia lần thứ X về Nghiên cứu cơ bản và ứng dụng công nghệ thông tin - FAIR’10*, Đà Nẵng, 17-18/08/2017, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2017, trang 577-584.
- [B6] Lê Hữu Bình, Nguyễn Đăng Khoa, Nguyễn Đình Hoàng Phương, “Thiết kế topology mạng không dây hình lưới: Một phương pháp mới sử dụng bài toán quy hoạch tuyến tính nguyên”, *Tạp chí Công nghệ Thông tin và Truyền thông - Chuyên san các Công trình Nghiên cứu, Phát triển và Ứng dụng Công nghệ thông tin và Truyền thông*, Tập V-3, Số 18 (38), 2017, trang 58-66.
- [B7] Lê Hữu Bình, Võ Thanh Tú, Nguyễn Văn Tam, “Một thuật toán định tuyến xuyên lớp đảm bảo QoS trong mạng MANET”, *Kỷ yếu Hội thảo Khoa học Quốc gia lần thứ IX về Nghiên cứu cơ bản và ứng dụng công nghệ thông tin - FAIR’9*, Cần Thơ, 04-05/08/2016, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2016, trang 480-487.
- [B8] Lê Hữu Bình, Võ Thanh Tú, “Đánh giá ảnh hưởng của nhiễu truyền dẫn trong mạng MANET dựa trên giao thức định tuyến theo yêu cầu”, *Kỷ yếu Hội thảo Khoa học Quốc gia lần thứ VIII về Nghiên cứu cơ bản và ứng dụng công nghệ thông tin - FAIR’8*, Hà Nội, 09-10/07/2015, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2015, trang 111-118.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### TIẾNG VIỆT

- [1] Cung Trọng Cường, Võ Thanh Tú, Nguyễn Thúc Hải, “Một giải pháp cải tiến cơ chế định tuyến DSR dựa trên tác tử di động trong mạng MANET,” *Tạp chí Tin học và Điều khiển học*, vol. 29, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [2] Nguyễn Trung Kiên, “Định tuyến xuyên lớp trong mạng Mobile Wireless,” [Online]. Available: <http://cdit.ptit.edu.vn/dinh-tuyen-xuyen-lop-trong-mang-mobile-wireless/>.
- [3] Phạm Thanh Giang, *Giáo trình Mạng máy tính nâng cao*. NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2016.
- [4] Võ Thanh Tú, Cung Trọng Cường, *Mạng MANET*. NXB Đại học Huế, 2017.

### TIẾNG ANH

- [5] A. Yadav and T. Sharma, “Cross-Layer Approach for Communication in MANET,” *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 4, pp. 285–292, March 2015.
- [6] A. Lee and I. Ra, “A Queuing Network Model Based on Ad Hoc Routing Networks for Multimedia Communications,” *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 271S–283S, 2012.
- [7] A. R. Nigara, M. Qin, and R. S. Blum, “On the Performance of Wireless Ad Hoc Networks Using Amplify-and-Forward Cooperative Diversity,” *IEEE Transactions On Wireless Communications*, vol. 5, no. 11, pp. 3204–3214, 2006.
- [8] A. Pandey and S. Yadav, “Performance evaluation of amplify-and-forward relaying cooperative vehicular networks under physical layer security,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, pp. 1–18, 2018.
- [9] A.-S. K. Pathan, M. M. Monowar, and S. Khan, *Simulation Technologies in Networking and Communications - Selecting the Best Tool for the Test*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2015.
- [10] A. Varga, *OMNeT++ Discrete Event Simulation System, Release 4.6*. 2015. [Online]. Available: <http://www.omnetpp.org>.
- [11] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [12] B. S. Kushwaha and P. K. Mishra, “Different traffic patterns over ad hoc network routing protocols,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 138, no. 11, pp. 1–5, 2016.

- [13] C. N. Kumar and N. Satyanarayana, "Multipath QoS Routing for Traffic Splitting in MANETs," *Procedia Computer Science*, vol. 40, p. 414 – 426, 2015.
- [14] C. T. Cuong, V. T. Tu, and N. T. Hai, "MAR-AODV: Innovative Routing Algorithm in MANET Based on Mobile Agent," in *International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, (Barcelona, Spain), 2013.
- [15] C. G. Cassandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems - Second Edition*. Springer Science+Business Media, LLC, 2008.
- [16] C. Perkins, E. B. Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," *RFC 3561*. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [17] D. A. Tran and H. Raghavendra, "Congestion Adaptive Routing in Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 17, no. 11, pp. 1294–1305, 2006.
- [18] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks, Second Edition*. Prentice-Hall, 1992.
- [19] D. Gross, J. F. Shortie, J. M. Thompson, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory, Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008.
- [20] D. P. A. Q.-A. Zeng, *Introduction to Wireless and Mobile Systems - Fourth Edition*. Boston, MA: Cengage Learning, 2016.
- [21] DARPA, *The Network Simulator NS2*. [Online]. Available: <http://www.isi.edu>.
- [22] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," *RFC4728*. [Online]. Available: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4728.txt>.
- [23] E. S. A. Ahmed, I. K. Altahir, A. Mohammed, and A. D. Salih, "Performance Analysis of Traffic Patterns over MANET Routing Protocols in Zigbee Personal Area Network," *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, vol. 6, no. 1, pp. 13–19, 2015.
- [24] F. Alnajjar, "SNR/RP Aware Routing Model for MANETs," *Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)*, pp. 40–48, 2011.
- [25] F. LAKRAMI, N. ELKAMOUN, and O. LAOUIDYA, "Performance comparison of Wireless IEEE 802.11a,b, g and n used for Ad-Hoc Networks in an ELearning Classrooms Network," *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, vol. 15, no. 9, pp. 229–235, 2017.

- [26] F. Alnajjar and Y. Chen, "SNR/RP aware Routing algorithm: Cross-layer Design for MANETs," *International Journal of Wireless and Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 1, no. 2, pp. 127–136, 2009.
- [27] G. B., D. Mukund, and N. Thapa, *Linear Programming*. Springer-Verlag New York LLC, 1997.
- [28] G. V. Lakshmi and C. S. Bindhu, "Congestion Control Avoidance in Ad-Hoc Network using Queuing Model," *International Journal of Computer Technology and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 750–760, 2011.
- [29] H. Y. Adarbah, S. Ahmad, and A. Duffy, "Impact of noise and interference on probabilistic broadcast schemes in mobile ad-hoc networks," *Journal of Computer Networks*, vol. 88, pp. 178–186, 2015.
- [30] H. T. Minh and H. Minh, "A novel interference aware routing metric for qos provision in 802.11 wireless mesh network," *Journal of Science and Technology*, vol. 1A, p. 3, 2013.
- [31] H. Naanani, H. Mouncif, and M. Rachik, "Improved AODV Routing Protocol for MANETs," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 7, pp. 1698–1701, 2014.
- [32] I. F. Akyildiz and XudongWang, *Wireless Mesh Networks*. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [33] Istikmal, A. Kurniawan, and Hendrawan, "Selective Route Based on SNR with Cross-Layer Scheme in Wireless Ad Hoc Network," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2017, pp. 1–13, 2017.
- [34] J. Y. Kim, G. S. Tomar, L. Shrivastava, S. S. Bhadauria, and W. H. Lee, "Load Balanced Congestion Adaptive Routing for Mobile Ad Hoc Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/532043>.
- [35] J. Katiravan, D. Sylvia, and D. S. Rao, "Energy efficient link aware routing with power control in wireless ad hoc networks," *The Scientific World Journal*, vol. 2015, Article ID 576754, pp. 1–7, 2015.
- [36] J. Yoon, M. Liu, and B. Noble, "Random waypoint considered harmful," in *IEEE INFOCOM, Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*, vol. 2, 2003.



- [37] J. Lee, H. Shin, J. T. Kim, and J. Heo, "Transmission capacity for dual-hop relaying in wireless ad hoc networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 58, pp. 1–10, 2012.
- [38] J. F. Hayes and T. V. J. G. Babu, *Modeling and Analysis of Telecommunications Networks*. John Wiley - Sons, Inc., 2004.
- [39] K. J. Dsouza and S. M., "MRA: Multi-level Routing Algorithm to Balance the Traffic Load in Wireless Ad hoc Network," in *Proceedings of National Conference on Parallel Computing Technologies (PARCOMPTECH)*, pp. 1–5, Feb 2015.
- [40] K. P. K. Rao and D. K. Kalaiaras, "A Survey on IEEE Standards for Mobile Ad Hoc Networks," *IOSR Journal of Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 55–64, 2015.
- [41] K. Mounagurusamy and K. Eswaramurthy, "A Novel Load Balancing Scheme for Multipath Routing Protocol in MANET," *Journal of Computing and Information Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 209–220, 2016.
- [42] K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, *Principles Wireless Networks*. Prentice-Hall, Inc., 2002.
- [43] K. Fall and K. Varadhan, *The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)*. 2011. [Online]. Available: <https://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/>.
- [44] L. K. Malviya and D. Tiwari, "LMP-DSR: Load Balanced Multi-Path Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad-Hoc Network," in *Proceedings of Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1–5, July 2013.
- [45] *MATLAB & Simulink Release Notes for R2010b*. The MathWorks, Inc., 2010.
- [46] M. Elshaikh, M. F. M. Fadzil, N. Kamel, and C. M. N. C. Isa, "Weighted Signal-to-Noise Ratio Average Routing Metric for Dynamic Sequence Distance Vector Routing Protocol in Mobile Ad-Hoc Networks," in *Proceedings of IEEE 8<sup>th</sup> International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA)*, pp. 329–334, 2012.
- [47] M. Boushaba, A. Hafid, and M. Gendreau, "Source-Based Routing in Wireless Mesh Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 262–270, 2014.
- [48] M. Piechowiak, P. Zwierzykowski, P. Owczarek, and M. Wasłowicz, "Comparative Analysis of Routing Protocols for Wireless Mesh Networks," in *10<sup>th</sup> International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 1–5, 2016.

- [49] M. Labraoui, M. M. Boc, and A. Fladenmuller, "Software Defined Networking-Assisted Routing In Wireless Mesh Networks," in *Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, (Paphos, Cyprus), pp. 377–382, 2016.
- [50] M. M. zoulikha and B. Amal, "Cross-layer approach among physical, MAC and routing layer in a shadowing environment," *Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, vol. 21, no. 1-2, pp. 101–119, 2014.
- [51] M. K. Islam and R. K. Liu, "Cross-Layer Optimization of AODV Routing Protocol For Mobile Ad-Hoc Network (MANET)," in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, (Los Angeles, CA, USA), pp. 1834 – 1837, Atlantis Press, Paris, France, July 2013.
- [52] Maysam and H. reza hoseiny, "Traffic load estimation and load balancing in multipath routing mobile ad-hoc networks," in *International Conerence on Mechanical and Electrical Technolog (ICMET)*, pp. 117–121, 2010.
- [53] M. Elshaikh, O. B. Lynn, M. N. bin Mohd Warip, P. L. Ehkan, F. F. Zakaria, and N. Yakoob, "SNR-Based Dynamic MANET On Demand Routing Protocol For VANET Networks," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 1099–1105, 2015.
- [54] N. T. Thomopoulos, *Fundamentals of Queuing Systems Statistical Methods for Analyzing Queuing Models*. Springer Science+Business Media, New York, 2012.
- [55] *OPNET*. [Online]. Available: <http://www.opnet.com/>.
- [56] Primer, *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements*. Tektronix, 2013.
- [57] R. Khanduri and S. S. Rattan, "Performance Comparison Analysis between IEEE 802.11a/b/g/n Standards," *International Journal of Computer Applications*, vol. 78, pp. 13–20, Sept. 2013.
- [58] S. Srivastava and A. K. Daniel, "An Efficient Routing Protocol under Noisy Environment for Mobile Ad Hoc Networks using Fuzzy Logic," *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, vol. 2, no. 6, pp. 34–39, 2013.
- [59] S. V. Mallapur, S. R. Patil, and J. V. Agarkhed, "Load Balancing Technique for Congestion Control Multipath Routing Protocol in MANETs," *Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 2, pp. 749–770, 2017.

- [60] S. Mallapur and S. R. Patil, "Route Stability Based on Demand Multipath Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," in *Proceedings of International Conference on Communication and Signal Processing*, (India), pp. 1859–1863, April 2014.
- [61] S. G. and R. A., "Efficient and Secure Routing Protocol for Wireless Sensor Networks through SNR Based Dynamic Clustering Mechanisms," *Journal of Communications and networks*, vol. 15, no. 4, pp. 422–429, 2013.
- [62] S. Khurana, S. Kumar, and D. Sharma, "Performance Evaluation of Congestion Control in MANETs using AODV, DSR and ZRP Protocols," *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 398–403, 2017.
- [63] S. B. Ch., K. G. Rao, B. B. Rao, and K. Chandan, "An Analytical Model for Evaluating Routing Performance of AODV Protocol for MANETs with Finite Buffer Capacity," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, no. 17, pp. 37960–37972, 2015.
- [64] S. Kaur and M. Kumar, "Review on Load Balancing in Mobile Ad-hoc Networks," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 5, no. 4, p. 5, 2018.
- [65] S. Khan, A.-S. K. Pathan, and N. A. Alrajeh, *Wireless Sensor Networks - Current Status and Future Trends*. CRC Press, 2012.
- [66] S. K. Sarkar, T. G. Basavaraju, and C. Puttamadappa, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks - Principles, Protocols, and Applications*. Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- [67] V. Kalaiyarasi and M. Tamilarasi, "Survey of load balancing routing protocols in MANET," *International Journal of communication and computer Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 58–62, 2015.
- [68] W. Ji-Lu, "Research on survivability evaluation of ad hoc network connectivity," in *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Nodeling (ICSEM-13)*, pp. 1092–1099, Atlantis Press, Paris, France, 2013.
- [69] Y. Peng, X. Gong, L. Guo, and D. Kong, "A Survivability Routing Mechanism in SDN Enabled Wireless Mesh Networks: Design and Evaluation," *China Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 32–38, 2016.
- [70] Y. Tashtoush, O. Darwish, and M. Hayajneh, "Fibonacci sequence based multipath load balancing approach for mobile ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 16, pp. 237–246, 2014.

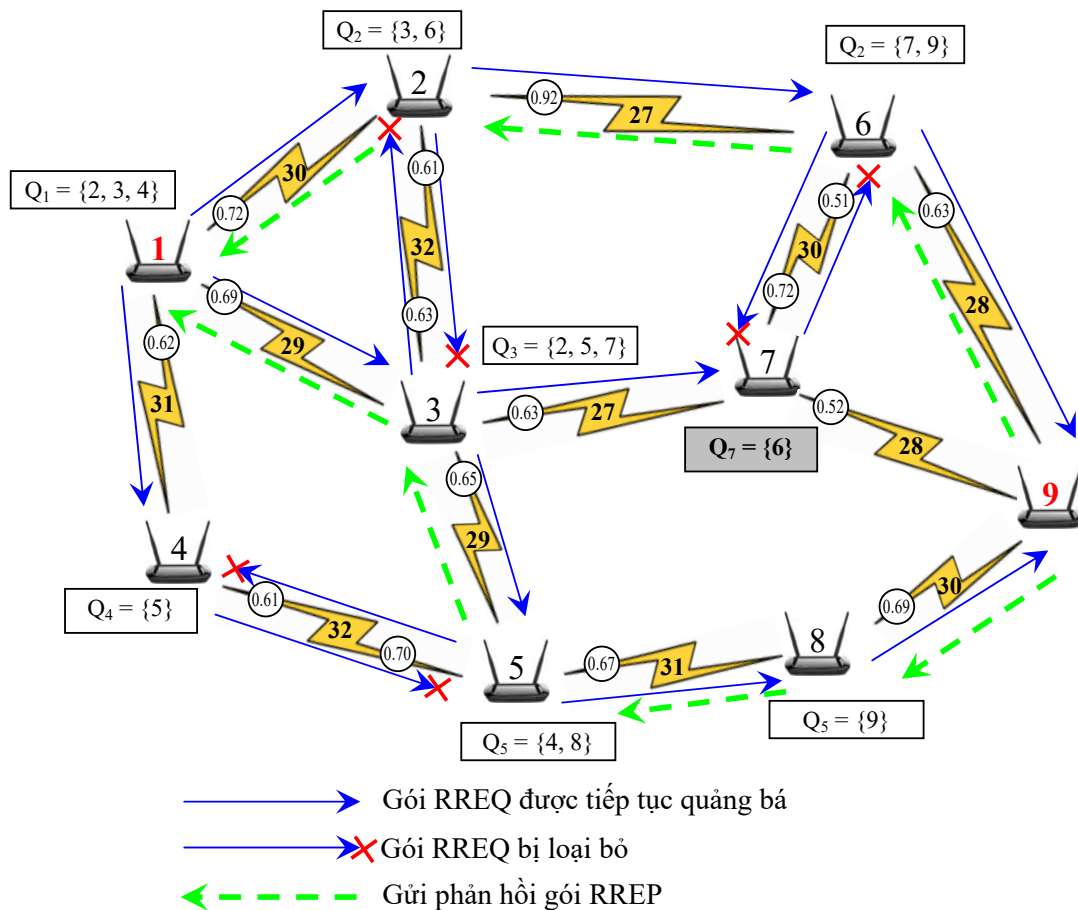
- [71] Y. M. Tashtoush and O. A. Darwish, "A Novel Multipath Load Balancing Approach Using Fibonacci Series for Mobile Ad Hoc Networks," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 220–225, 2012.
- [72] Y. Zhang, J. Luo, and H. Hu, *Wireless Mesh Networking - Architectures, Protocols and Standards*. Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

## PHỤ LỤC A

### TÍNH TOÁN CHI TIẾT VÍ DỤ MINH HỌA NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA THUẬT TOÁN LBRQT

Trong phụ lục này, tác giả trình bày chi tiết việc tính toán để thu được các số liệu trong các Bảng 3.1, 3.2, 3.3 và 3.4 của ví dụ khám phá lộ trình mới theo thuật toán LBRQT, đã được trình bày ở Phần 3.4.

Theo các giả thiết đã được trình bày ở Phần 3.4, tô-pô mạng được sử dụng như ở Hình A.1, trong đó, các giá trị ghi ở đầu và giữa các kết nối không dây tương ứng với mật độ lưu lượng và SNR của kết nối đó ở thời điểm đang xét. Ví dụ, với kết nối từ nút 1 đến nút 2, tải lưu lượng phân phối đến kết nối này là 0.72, SNR là 30 dB. Xét trường



Hình A.1. Một ví dụ khám phá lộ trình sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT

hợp nút 1 muốn khám phá lộ trình mới đến nút 9 để truyền dữ liệu. Giả sử ở thời điểm hiện tại, bộ nhớ tạm của tất cả các nút đều rỗng, các tham số kỹ thuật của hệ thống mạng được giả lập như sau:

- Hệ thống mạng sử dụng chuẩn 802.11g với băng thông kênh là 20 MHz, tương ứng với tốc độ dữ liệu 54 Mbit/s.
- SNR yêu cầu tối thiểu ( $\beta_{req}$ ) là 23.5 dB.
- Thời gian trễ từ nguồn đến đích cho phép ( $\tau_{th}$ ) là 0.01s.
- Kích thước hàng đợi tại mỗi nút là 20 gói.
- Kích thước gói dữ liệu trung bình là 1472 bytes.

Quy trình khám phá lộ trình mới từ nút 1 đến nút 9 sử dụng thuật toán định tuyến LBRQT (với nguyên lý hoạt động như ở Hình 3.9) được thực hiện theo các bước như sau:

**- Bước 1: Nút 1 (nút nguồn) tạo và quảng bá gói RREQ:**

Để khởi đầu quá trình khám phá lộ trình, nút 1 tạo gói RREQ. Trước khi phát quảng bá gói RREQ, SA tại nút 1 dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD đến các nút láng giềng của nó để xác định tập  $Q_1$ , là tập các nút láng giềng của nút 1 thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED. Các độ đo SNR, EED và BPD được SA tại nút 1 dự đoán theo các bước của Thuật toán 3.1 như sau:

**+ Bước 1.1:** Đọc các thông tin về QoT và EED từ nút S đến nút I ( $\beta_{si}^{(r)}$  và  $\tau_{si}^{(r)}$ ) được lưu trữ trong gói RREQ (Bước 1 của Thuật toán 3.1): S là nút nguồn (nút 1), I là nút đang xét. Hiện tại nút đang xét là nút nguồn, nên các giá trị  $\beta_{11}^{(r)}$  và  $\tau_{11}^{(r)}$  là các giá trị khởi tạo ban đầu để đưa vào gói RREQ.  $\beta_{11}^{(r)} = +\infty$  và  $\tau_{11}^{(r)} = 0$ .

**+ Bước 1.2:** Khởi tạo giá trị ban đầu là rỗng cho tập  $Q_1$ :  $Q_i = \emptyset$  (Bước 2 của Thuật toán 3.1).

**+ Bước 1.3:** Dự đoán các độ đo QoT, EED và BPD từ nút nguồn (nút 1) đến mỗi nút I là láng giềng của nút đang xét (hiện đang là nút 1), các độ đo này bao gồm: ( $\beta_{1i}^{(r)}$ ), ( $\tau_{1i}^{(r)}$ ) và ( $B_{1i}^{(r)}$ ). Công việc này được thực hiện bằng vòng lặp For (từ bước 3 đến bước 18 của thuật toán 3.1).

Theo tô-pô ở Hình A.1, nút 1 đang có 3 nút láng giềng là 2, 3 và 4. Xét nút láng giềng đầu tiên của nút 1, là nút 2. Việc dự đoán các độ đo  $(\beta_{12}^{(r)})$ ,  $(\tau_{12}^{(r)})$  và  $(B_{12}^{(r)})$  được thực hiện như sau:

• **Bước 1.3.1:** Thu thập thông tin SNR từ 1 đến 2 ( $\beta_{12}^{(h)}$ ) tại lớp vật lý (Bước 4 của Thuật toán 3.1): Theo trạng thái mạng hiện tại ở tô-pô Hình A.1, SA tại nút 1 thu thập thông tin SNR từ 1 đến 2 như sau:

$$\beta_{12}^{(h)} = 30 \text{ (dB)}. \quad (\text{A.1})$$

• **Bước 1.3.2:** Dự đoán thời gian trễ trên bước truyền từ nút 1 đến nút 2 ( $\tau_{12}^{(h)}$ ) (Bước 5 của Thuật toán 3.1). Theo phương trình (3.8) ta có:

$$\tau_{12}^{(h)} = \tau_p^{(1)} + \tau_q^{(1)} + \tau_t^{(12)} + \tau_r^{(12)} \quad (\text{A.2})$$

Như đã lập luận ở Phần 3.2.2,  $\tau_p^{(1)}$  và  $\tau_r^{(12)}$  là đủ nhỏ nên có thể bỏ qua. Do vậy, phương trình (A.2) trở thành:

$$\tau_{12}^{(h)} = \tau_q^{(1)} + \tau_t^{(12)} \quad (\text{A.3})$$

Theo phương trình (3.9) ta có:

$$\tau_q^{(1)} = \frac{\bar{L}}{\lambda_{12}(1 - B_{12}^{(h)})} + \frac{1}{\mu_{12}} \quad (\text{A.4})$$

trong đó,  $\bar{L}$  được xác định theo phương trình (3.10)

$$\bar{L} = \begin{cases} \frac{\rho_{12}}{1 - \rho_{12}} - \frac{\rho_{12}(L\rho_{12}^L + 1)}{1 - \rho_{12}^{L+1}} & \text{nếu } \rho_{12} \neq 1 \\ \frac{L(L-1)}{2(L+1)} & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Theo giả thiết được thiết lập ở tô-pô mạng Hình A.1, ở thời điểm hiện tại,  $\rho_{12} = 0.72$ , kích thước hàng đợi tại mỗi nút là  $L = 20$  gói. Do vậy, thay  $\rho_{12}$  và  $L$  vào (A.5) ta có:

$$\bar{L} = \frac{0.72}{1 - 0.72} - \frac{0.72 \times (20 \times 0.72^{20} + 1)}{1 - 0.72^{20+1}} = 1.8305 \quad (\text{A.6})$$

Theo phương trình (3.4) ta xác định được  $B_{12}^{(h)}$  như sau:

$$B_{12}^{(h)} = \begin{cases} \frac{\rho_{12}^L(1-\rho_{12})}{1-\rho_{12}^{L+1}} & \text{nếu } \rho_{12} \neq 1 \\ \frac{1}{L+1} & \text{nếu } \rho_{12} = 1 \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

$$= \frac{0.72^{20}(1-0.72)}{1-0.72^{20+1}} \quad (\text{A.8})$$

$$= 0.000392868 \quad (\text{A.9})$$

Theo giả thiết của ví dụ, kích thước gói dữ liệu trung bình là 1472 bytes, tốc độ dữ liệu của m kênh là 54 Mbit/s, do đó:

$$\mu_{12} = \frac{54 \times 10^6}{1472} = 4585.5978 \quad (\text{gói/giây}) \quad (\text{A.10})$$

Mặt khác ta có:

$$\rho_{12} = \frac{\lambda_{12}}{\mu_{12}} \Rightarrow \lambda_{12} = \rho_{12} \times \mu_{12} \quad (\text{A.11})$$

$$= 0.72 \times 4585.5978 \quad (\text{A.12})$$

$$= 3301.630435 \quad (\text{gói/giây}) \quad (\text{A.13})$$

Thay (A.6), (A.7), (A.10) và (A.11) vào (A.4) ta có:

$$\tau_q^{(1)} = \frac{\bar{L}}{\lambda_{12}(1-B_{12}^{(h)})} + \frac{1}{\mu_{12}} \quad (\text{A.14})$$

$$= \frac{1.830497}{3301.630435 \times (1-0.00039287)} + \frac{1}{4585.5978} \quad (\text{A.15})$$

$$= 0.000772714 \quad (\text{s}) \quad (\text{A.16})$$

Thay (A.14) vào (A.3) ta có:

$$\tau_{12}^{(h)} = \tau_q^{(1)} + \tau_t^{(12)} \quad (\text{A.17})$$

$$= 0.000772714 + \frac{1472 \times 8}{54 \times 10^6} \quad (\text{A.18})$$

$$= 0.000990788 \quad (\text{s}) \quad (\text{A.19})$$

- **Bước 1.3.3:** Xác định thời gian trễ (EED) trên lộ trình từ nút 1 đến nút 2 ( $\tau_{12}^{(r)}$ )



(Bước 6 của Thuật toán 3.1). Ta có:

$$\tau_{12}^{(r)} = \tau_{11}^{(r)} + \tau_{12}^{(h)} \quad (\text{A.20})$$

$$= 0 + 0.000990788 = 0.000990788 \quad (\text{s}) \quad (\text{A.21})$$

• **Bước 1.3.4:** Xác định SNR của lộ trình từ nút 1 đến nút 2 ( $\tau_{12}^{(r)}$ ) (Bước 7 đến 11 của Thuật toán 3.1). Vì nguyên lý chuyển tiếp dữ liệu tại các nút mạng là AF, nên theo phương trình xác định SNR của một lộ trình (Phương trình (2.19) ở Chương 2) ta có:

$$\beta_{12}^{(r)} = \left( \frac{1}{\beta_{11}^{(r)}} + \frac{1}{\beta_{12}^{(h)}} \right)^{-1} \quad (\text{A.22})$$

Vì phương trình (A.22) được sử dụng cho giá trị tuyến tính. Vì vậy, giá trị của các thành phần trong (A.22) cần phải đổi sang giá trị tuyến tính trước khi tính toán. Đổi  $\beta_{12}^{(r)}$  sang giá trị tuyến tính ta được:

$$\beta_{12}^{(h)} = 10^{\frac{\beta_{12}^{(h)}(\text{dB})}{10}} = 10^{\frac{30}{10}} = 1000 \quad (\text{A.23})$$

Thay (A.23) vào (A.22) ta có:

$$\beta_{12}^{(r)} = \left( \frac{1}{+\infty} + \frac{1}{1000} \right)^{-1} = 1000 \quad (\text{A.24})$$

Đổi giá trị  $\beta_{12}^{(r)}$  sang dB ta có:

$$\beta_{12}^{(r)}(\text{dB}) = 10 * \log_{10}(\beta_{12}^{(r)}) = 10 * \log_{10}(1000) = 30 \text{ (dB)} \quad (\text{A.25})$$

• **Bước 1.3.5:** Xác định các điều kiện ràng buộc của QoT, EED và dự đoán xác suất chặn gói dữ liệu trên lộ trình từ nút 1 đến nút 2 ( $B_{12}^{(r)}$ ) (Bước 12 đến 17 của Thuật toán 3.1). Từ (A.22) và (A.20) ta có:

$$\begin{cases} \beta_{12}^{(r)} \geq \beta_{req} \\ \tau_{12}^{(r)} \leq \tau_{th} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 30 \geq 23.5 \\ 0.000990788 \leq 0.01 \end{cases} \quad (\text{A.26})$$

Từ (A.26) ta thấy điều kiện ràng buộc của QoT và EED được thỏa mãn. Do vậy, nút 1 được đưa vào tập  $Q_1$ . Để có cơ sở lựa chọn lộ trình cân bằng tải, SA tiếp tục dự đoán xác suất chặn gói dữ liệu trên lộ trình từ nút 1 đến nút 2 ( $B_{12}^{(r)}$ ). Theo (3.7) ta có:

$$B_{12}^{(r)} = 1 - (1 - B_{11}^{(r)})(1 - B_{12}^{(h)}) \quad (\text{A.27})$$

$$= 1 - (1 - 0)(1 - 0.000392868) = 0.000392868 \quad (\text{A.28})$$

Từ (A.20), (A.25) và (A.27) ta có các độ đo QoT, EED và BPD mà SA tại nút 1 xác định được đối với nút 2 là:

$$\begin{cases} \beta_{12}^{(r)} = 30 \\ \tau_{12}^{(r)} = 0.000990788 \\ B_{12}^{(r)} = 0.000392868 \end{cases} \quad (\text{A.29})$$

Lặp lại các bước từ 1.1 đến 1.3 đối với các nút láng giềng còn lại của nút 1, (nút 2 và nút 3), ta xác định được các độ đo QoT, EED và BPD từ nút 1 đến các nút này như sau:

$$\begin{cases} \beta_{13}^{(r)} = 29 \\ \tau_{13}^{(r)} = 0.0009189274 \\ B_{13}^{(r)} = 0.0001855764 \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

$$\begin{cases} \beta_{14}^{(r)} = 31 \\ \tau_{14}^{(r)} = 0.0007916460 \\ B_{14}^{(r)} = 0.0000267693 \end{cases} \quad (\text{A.31})$$

Từ các kết quả thu được ở (A.29), (A.30) và (A.31) ta có kết quả dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD đối với các nút láng giềng của nút 1 như Bảng A.1. Ta thấy rằng, các giá trị SNR và EED từ nút 1 đến các nút 2, 3, và 4 đều thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT và EED ( $\beta_{sj} > \beta_{req}$  và  $\tau_{sj} < \tau_{th}, s = 1, j = 2, 3, 4$ ), nên tập  $Q_1 = \{2, 3, 4\}$ . Sau khi xác định được tập  $Q_1$ , nút 1 phát quảng bá gói RREQ đến tất cả các nút thuộc tập này, cụ thể là các nút 2, 3 và 4.

**Bảng A.1.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút 1 bởi SA

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)		
			2	3	4
-	1	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	30.00	29.00	31.00
		$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00099079	0.00091893	0.00079165
		$B_{sj}^{(h)}$	0.00039287	0.00018558	0.00002677
		Tập $Q_1$	✓	✓	✓

**- Bước 2: Các nút nhận gói RREQ ở bước 1 tiếp tục xử lý gói RREQ:**

Các nút nhận được gói RREQ ở bước 1 bao gồm nút 2, 3 và 4 tiếp tục xử lý gói RREQ. SA tại các nút này dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD theo Thuật toán 3.1. Cụ thể, SA tại nút 2 dự đoán SNR, EED và BPD từ nút 1 đến tất cả các nút láng giềng của nó là 3 và 6. Xét nút láng giềng đầu tiên của nút 2, đó là nút 3, việc dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD từ nút 1 đến nút 3 được thực hiện như sau:

+ **Bước 2.1:** Đọc các thông tin về QoT và EED từ nút S đến nút I ( $\beta_{si}^{(r)}$ ,  $\tau_{si}^{(r)}$  và  $B_{si}^{(r)}$ ) được lưu trữ trong gói RREQ (Bước 1 của Thuật toán 3.1). S là nút nguồn (nút 1), I hiện tại là nút 2. Kết quả đọc được từ gói RREQ là:

$$\begin{cases} \beta_{12}^{(r)} = 30 \\ \tau_{12}^{(r)} = 0.000990788 \\ B_{12}^{(r)} = 0.000392868 \end{cases} \quad (\text{A.32})$$

+ **Bước 2.2:** Khởi tạo giá trị ban đầu là rỗng cho tập  $Q_2$ :  $Q_2 = \emptyset$  (Bước 2 của Thuật toán 3.1).

+ **Bước 2.3:** Dự đoán các độ đo QoT, EED và BPD từ nút nguồn (nút 1) đến mỗi nút J là láng giềng của nút đang xét (hiện đang là nút 2), các độ đo này bao gồm: ( $\beta_{1j}^{(r)}$ ), ( $\tau_{1j}^{(r)}$ ) và ( $B_{1j}^{(r)}$ ). Công việc này được thực hiện bằng vòng lặp For (từ bước 3 đến bước 18 của thuật toán 3.1).

Theo tô-pô ở Hình A.1, nút 2 đang có 2 nút láng giềng là 3 và 6. Xét nút láng giềng đầu tiên của nút 2, là nút 3. Việc dự đoán các độ đo ( $\beta_{13}^{(r)}$ ), ( $\tau_{13}^{(r)}$ ) và ( $B_{13}^{(r)}$ ) được thực hiện như sau:

• **Bước 2.3.1:** Thu thập thông tin SNR từ 2 đến 3 ( $\beta_{23}^{(h)}$ ) tại lớp vật lý (Bước 4 của Thuật toán 3.1): Theo trạng thái mạng hiện tại ở tô-pô Hình A.1, SA tại nút 2 thu thập thông tin SNR từ 2 đến 3 như sau:

$$\beta_{23}^{(h)} = 32 \text{ (dB)}. \quad (\text{A.33})$$

• **Bước 2.3.2:** Dự đoán thời gian trễ trên bước truyền từ nút 2 đến nút 3 ( $\tau_{23}^{(h)}$ ) (Bước 5 của Thuật toán 3.1). Theo phương trình (3.8) ta có:

$$\tau_{23}^{(h)} = \tau_p^{(2)} + \tau_q^{(2)} + \tau_t^{(23)} + \tau_r^{(23)} \quad (\text{A.34})$$

Như đã lập luận ở Phần 3.2.2,  $\tau_p^{(2)}$  và  $\tau_r^{(23)}$  là đủ nhỏ nên có thể bỏ qua. Do vậy, phương trình (A.2) trở thành:

$$\tau_{23}^{(h)} = \tau_q^{(2)} + \tau_i^{(23)} \quad (\text{A.35})$$

Theo phương trình (3.9) ta có:

$$\tau_q^{(2)} = \frac{\bar{L}}{\lambda_{23}(1 - B_{23}^{(h)})} + \frac{1}{\mu_{23}} \quad (\text{A.36})$$

trong đó,  $\bar{L}$  được xác định theo phương trình (3.10)

$$\bar{L} = \begin{cases} \frac{\rho_{23}}{1 - \rho_{23}} - \frac{\rho_{23}(L\rho_{23}^L + 1)}{1 - \rho_{23}^{L+1}} & \text{nếu } \rho_{23} \neq 1 \\ \frac{L(L-1)}{2(L+1)} & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (\text{A.37})$$

Theo giả thiết được thiết lập ở tô-pô mạng Hình A.1, ở thời điểm hiện tại,  $\rho_{23} = 0.61$ , kích thước hàng đợi tại mỗi nút là  $L = 20$  gói. Do vậy, thay  $\rho_{23}$  và  $L$  vào (A.37) ta có:

$$\bar{L} = \frac{0.61}{1 - 0.61} - \frac{0.61 \times (20 \times 0.61^{20} + 1)}{1 - 0.61^{20+1}} = 0.9535 \quad (\text{A.38})$$

Theo phương trình (3.4) ta xác định được  $B_{23}^{(h)}$  như sau:

$$B_{23}^{(h)} = \begin{cases} \frac{\rho_{23}^L(1 - \rho_{23})}{1 - \rho_{23}^{L+1}} & \text{nếu } \rho_{23} \neq 1 \\ \frac{1}{L+1} & \text{nếu } \rho_{23} = 1 \end{cases} \quad (\text{A.39})$$

$$= \frac{0.61^{20}(1 - 0.61)}{1 - 0.61^{20+1}} \quad (\text{A.40})$$

$$= 0.0000198461 \quad (\text{A.41})$$

Theo giả thiết của ví dụ, kích thước gói dữ liệu trung bình là 1472 bytes, tốc độ dữ liệu của m kênh là 54 Mbit/s, do đó:

$$\mu_{23} = \frac{54 \times 10^6}{1472} = 4585.5978 \quad (\text{gói/giây}) \quad (\text{A.42})$$

Mặt khác ta có:

$$\rho_{23} = \frac{\lambda_{23}}{\mu_{23}} \Rightarrow \lambda_{23} = \rho_{23} \times \mu_{23} \quad (\text{A.43})$$

$$= 0.61 \times 4585.5978 \quad (\text{A.44})$$

$$= 2797.21467 \quad (\text{gói/giây}) \quad (\text{A.45})$$

Thay (A.38), (A.39), (A.42) và (A.43) vào (A.36) ta có:

$$\tau_q^{(2)} = \frac{\bar{L}}{\lambda_{23}(1 - B_{23}^{(h)})} + \frac{1}{\mu_{23}} \quad (\text{A.46})$$

$$= \frac{0.9535}{2797.21467 \times (1 - 0.0000198461)} + \frac{1}{4585.5978} \quad (\text{A.47})$$

$$= 0.0005589423 \text{ (s)} \quad (\text{A.48})$$

Thay (A.46) vào (A.35) ta có:

$$\tau_{23}^{(h)} = \tau_q^{(2)} + \tau_t^{(23)} \quad (\text{A.49})$$

$$= 0.0005589423 + \frac{1472 \times 8}{54 \times 10^6} \quad (\text{A.50})$$

$$= 0.0007770164 \text{ (s)} \quad (\text{A.51})$$

• **Bước 2.3.3:** Xác định thời gian trễ (EED) trên lộ trình từ nút 1 đến nút 3 ( $\tau_{13}^{(r)}$ ) (Bước 6 của Thuật toán 3.1). Ta có:

$$\tau_{13}^{(r)} = \tau_{12}^{(r)} + \tau_{23}^{(h)} \quad (\text{A.52})$$

$$= 0.000990788 + 0.0007770164 = 0.0017678044 \text{ (s)} \quad (\text{A.53})$$

• **Bước 2.3.4:** Xác định SNR của lộ trình từ nút 1 đến nút 3 ( $\tau_{13}^{(r)}$ ) (Bước 7 đến 11 của Thuật toán 3.1). Vì nguyên lý chuyển tiếp dữ liệu tại các nút mạng là AF, nên theo phương trình xác định SNR của một lộ trình (Phương trình (2.19) ở Chương 2) ta có:

$$\beta_{13}^{(r)} = \left( \frac{1}{\beta_{12}^{(r)}} + \frac{1}{\beta_{23}^{(h)}} \right)^{-1} \quad (\text{A.54})$$

Vì phương trình (A.54) được sử dụng cho giá trị tuyến tính. Vì vậy, giá trị của các thành phần trong (A.54) cần phải đổi sang giá trị tuyến tính trước khi tính toán. Theo (A.25) và (A.33) ta có  $\beta_{12}^{(r)} = 30 \text{ dB}$  và  $\beta_{23}^{(h)} = 32 \text{ dB}$ . Đổi các giá trị này sang giá trị tuyến tính ta được:

$$\beta_{12}^{(r)} = 10^{\frac{\beta_{12}^{(r)} \text{ (dB)}}{10}} = 10^{\frac{30}{10}} = 1000 \quad (\text{A.55})$$

$$\beta_{23}^{(h)} = 10^{\frac{\beta_{23}^{(h)} \text{ (dB)}}{10}} = 10^{\frac{32}{10}} = 1584.893 \quad (\text{A.56})$$

Thay (A.55) và (A.56) vào (A.54) ta có:

$$\beta_{13}^{(r)} = \left( \frac{1}{1000} + \frac{1}{1584.893} \right)^{-1} = 613.137 \quad (\text{A.57})$$

Đổi giá trị  $\beta_{13}^{(r)}$  sang dB ta có:

$$\beta_{12}^{(r)} \text{ (dB)} = 10 * \log_{10}(\beta_{12}^{(r)}) = 10 * \log_{10}(613.137) = 27.876 \text{ (dB)} \quad (\text{A.58})$$

• **Bước 2.3.5:** Xác định các điều kiện ràng buộc của QoT, EED và dự đoán xác suất chặn gói dữ liệu trên lộ trình từ nút 1 đến nút 3 ( $B_{13}^{(r)}$ ) (Bước 12 đến 17 của Thuật toán 3.1). Từ (A.58) và (A.52) ta có:

$$\begin{cases} \beta_{13}^{(r)} \geq \beta_{req} \\ \tau_{13}^{(r)} \leq \tau_{th} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 27.876 \geq 23.5 \\ 0.0017678044 \leq 0.01 \end{cases} \quad (\text{A.59})$$

Từ (A.59) ta thấy điều kiện ràng buộc của QoT và EED được thỏa mãn. Do vậy, nút 3 được đưa vào tập  $Q_2$ . Để có cơ sở lựa chọn lộ trình cân bằng tải, SA tiếp tục dự đoán xác suất chặn gói dữ liệu trên lộ trình từ nút 1 đến nút 3 ( $B_{13}^{(r)}$ ). Theo (3.7) ta có:

$$B_{13}^{(r)} = 1 - (1 - B_{12}^{(r)})(1 - B_{23}^{(h)}) \quad (\text{A.60})$$

$$= 1 - (1 - 0.000392868)(1 - 0.0000198461) = 0.0004127063 \quad (\text{A.61})$$

Từ (A.52), (A.58) và (A.60) ta có các độ đo QoT, EED và BPD mà SA tại nút 2 xác định được đối với nút 3 là:

$$\begin{cases} \beta_{13}^{(r)} = 27.876 \\ \tau_{13}^{(r)} = 0.0017678044 \\ B_{13}^{(r)} = 0.0004127063 \end{cases} \quad (\text{A.62})$$

Lặp lại các bước từ 2.1 đến 2.3 đối với các nút láng giềng còn lại của nút 2, (nút 6), ta xác định được các độ đo QoT, EED và BPD từ nút 1 đến nút 6 như sau:

$$\begin{cases} \beta_{16}^{(r)} = 25.236 \\ \tau_{16}^{(r)} = 0.0029203967 \\ B_{16}^{(r)} = 0.0186521816 \end{cases} \quad (\text{A.63})$$

Lặp lại bước 2 cho các nút láng giềng còn lại của nút 2 (nút 3 và nút 4). Kết quả dự đoán như ở Bảng A.2. Từ kết quả này, SA tại các nút 2, 3, và 4 xác định được tập các nút láng giềng của nó thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED tương ứng là:  $Q_2 = \{3, 6\}$ ,  $Q_3 = \{2, 5, 7\}$  và  $Q_4 = \{5\}$ . Các nút 2, 3 và 4 tiếp tục quảng bá gói RREQ đến các nút trong tập  $Q_j$  tương ứng của nó.

**Bảng A.2.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 1

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			3	6		
(a)	1	2	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	27.88	25.24	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00176780	0.00292039	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00041271	0.01865218	
			Tập $Q_2$	✓	✓	

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			2	5	7	
(b)	1	3	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	27.24	25.99	24.88
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00172597	0.00175928	0.00172597
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00022147	0.00024901	0.00022147
			Tập $Q_3$	✓	✓	✓

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			5			
(c)	1	4	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	28.46		
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00156866		
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00004662		
			Tập $Q_4$	✓		

### - Bước 3: Các nút nhận gói RREQ ở bước 2 tiếp tục xử lý gói RREQ:

Các nút nhận được gói RREQ ở bước 2 bao gồm: (i) các nút 3, 6 nhận được từ nút 2, (ii) các nút 2, 5, 7 nhận được từ nút 3 và (iii) nút 5 nhận được từ nút 4. Khi nút 3 nhận được gói RREQ từ nút 2, gói RREQ này sẽ bị hủy bỏ do nút 3 đã nhận gói RREQ này trước đó từ nút 1 (ở bước 1), tương tự như vậy cho các nút khác. Các nút tiếp tục xử lý gói RREQ ở bước này bao gồm 5, 6 và 7. Kết quả dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD như ở Bảng A.3. Với kết quả này, trường hợp nút 7 dự đoán SNR từ nút nguồn (nút 1) đến nút 9 (Bảng A.3c), giá trị dự đoán được là 23.15 dB. Giá trị này không thỏa mãn điều kiện ràng buộc của QoT, do nhỏ hơn SNR yêu cầu tối thiểu là 23.5 dB. Vì vậy, nút 9 không được đưa vào tập  $Q_7$ , mặc dù nút 9 là láng giềng của nút 7. Từ kết quả này, SA tại các nút 5, 6, và 7 xác định được tập các nút láng giềng của nó thỏa

mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED tương ứng là:  $Q_5 = \{4, 8\}$ ,  $Q_6 = \{7, 9\}$  và  $Q_7 = \{6\}$ . Các nút 5, 6 và 7 tiếp tục quảng bá gói RREQ đến các nút trong tập  $Q_j$  tương ứng của nó.

**Bảng A.3.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 2

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			4	8		
(a)	1 → 3	5	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	25.01	24.80	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00270078	0.00263673	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00048846	0.00035866	
			Tập $Q_5$	✓	✓	

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			7	9		
(b)	1 → 2	6	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	23.98	<b>23.71</b>	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00358350	<b>0.00372743</b>	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.01865286	<b>0.01868741</b>	
			Tập $Q_6$	✓	✓	

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)			
			6	9		
(c)	1 → 3	7	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	23.71	<b>23.15</b>	
			$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00271675	<b>0.00239835</b>	
			$B_{sj}^{(h)}$	0.00061425	<b>0.00022247</b>	
			Tập $Q_7$	✓	<b>X</b>	

**- Bước 4: Các nút nhận gói RREQ ở bước 3 tiếp tục xử lý gói RREQ:**

Các nút nhận được gói RREQ ở bước 3 bao gồm: (i) các nút 4, 8 nhận được từ nút 5, (ii) các nút 7, 9 nhận được từ nút 6 và (iii) nút 6 nhận được từ nút 7. Trong đó, các gói RREQ nhận được tại các nút 4, 6 và 7 sẽ bị loại bỏ, do trước đó các nút này đã nhận được gói RREQ này. Chỉ còn lại các nút 8 và 9 tiếp tục xử lý gói RREQ.

Tại nút 8, gói RREQ được tiếp tục xử lý tương tự như các nút trên. Kết quả dự đoán các độ đo SNR, EED và BPD như ở Bảng A.4. Tập  $Q_8$  được xác định là:  $Q_8 = \{9\}$ . Tại nút 9, khi nhận được gói RREQ từ nút từ nút 6, vì 9 là nút đích, nên nút 9 tạo gói RREP và gửi phản hồi về nút 1. Kết quả là lộ trình đầu tiên được tìm thấy:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9$ .

**- Bước 5: Các nút nhận gói RREQ ở bước 4 tiếp tục xử lý gói RREQ:**



**Bảng A.4.** Kết quả dự đoán SNR, EED và BPD tại nút nhận được gói RREQ ở bước 3

Các nút phía trước	Nút xử lý RREQ (I)	Các độ đo từ S đến láng giềng của I (J)	Nút láng giềng của I (nút J)		
			9		
1 → 3 → 5	8	$\beta_{sj}^{(h)}$ (dB)	23.65		
		$\tau_{sj}^{(h)}$ (s)	0.00355565		
		$B_{sj}^{(h)}$	0.00054417		
		Tập $Q_8$	✓		

Tại bước này, chỉ còn lại nút 9 nhận được gói RREQ từ nút 8. Vì 9 là nút đích, nên nút 9 tạo gói RREP và gửi phản hồi về nút 1. Kết quả là lộ trình thứ 2 được tìm thấy:  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ .

**- Bước 6: Xử lý gói RREP tại nút nguồn:**

Qua quá trình phát quảng bá gói RREQ, nút nguồn nhận được 2 gói phản hồi RREP, tương ứng với 2 lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED được tìm thấy là  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9$  và  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ . Dựa trên kết quả dự đoán BPD của SA trong quá trình khám phá lộ trình, BPD của lộ trình  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9$  là 0.01868741 (kết quả ở các Bảng A.3b), BPD của các lộ trình  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$  là 0.00054417 (kết quả ở Bảng A.4). Như vậy, theo nguyên lý của giải pháp định tuyến LBQT-R, lộ trình có giá trị BPD nhỏ nhất sẽ được chọn, đó là  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ .

Bằng việc chọn lộ trình  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ , thuật toán định tuyến LBRQT đã tránh được các bước truyền đang có tải lưu lượng lớn (các bước truyền  $1 \rightarrow 2$  và  $2 \rightarrow 6$  ở tô-pô Hình A.1). Kết quả này cho thấy rằng, giải pháp định tuyến LBQT-R đã tìm được lộ trình thỏa mãn các điều kiện ràng buộc của QoT và EED, đồng thời cân bằng tải lưu lượng trên các kết nối.