

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



NGUYỄN THỊ THU HẰNG

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP CẢI THIỆN
HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG
DÂY ĐA SỰ KIỆN**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2020

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



NGUYỄN THỊ THU HẰNG

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP CẢI THIỆN
HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG
DÂY ĐA SỰ KIỆN**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 9.52.02.08

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban
2. TS. Nguyễn Chiến Trinh

LỜI CAM ĐOAN

Nghiên cứu sinh xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn của PGS. TS. Nguyễn Tiến Ban và TS. Nguyễn Chiến Trinh. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được công bố trong bất cứ công trình của bất kỳ tác giả nào khác. Tất cả các kế thừa của các tác giả khác đã được trích dẫn.

Nghiên cứu sinh

Nguyễn Thị Thu Hằng

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, nghiên cứu sinh xin bày tỏ sự biết ơn sâu sắc tới hai Thầy hướng dẫn PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban và TS. Nguyễn Chiến Trinh, đã định hướng nghiên cứu và liên tục hướng dẫn nghiên cứu sinh thực hiện các nhiệm vụ nghiên cứu trong suốt quá trình thực hiện luận án này. Sự hướng dẫn tận tình và những ý kiến quý báu của hai thầy đã giúp nghiên cứu sinh rất nhiều trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Nghiên cứu sinh bày tỏ lòng cảm ơn Lãnh đạo Học viện, các thầy cô của Khoa Quốc tế và Đào tạo sau đại học, các thầy cô, đồng nghiệp Khoa Viễn thông 1 tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT) đã quan tâm giúp đỡ và tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Xin được chân thành ghi nhận những nhận xét của những người phản biện, người nhận xét của các bài và phiên hội thảo, các tạp chí trong và ngoài nước, các buổi bảo vệ Luận án các cấp, những ý kiến đóng góp của các thầy cô, nhà nghiên cứu đã giúp tôi có cái nhìn sâu rộng hơn về kiến thức chuyên ngành.

Tôi xin cảm ơn sự hỗ trợ một phần kinh phí của PTIT và học bổng Quỹ Motorola Solutions Foundation cho một số bài tạp chí, hội thảo trong nước và quốc tế.

Cuối cùng, xin bày tỏ lòng cảm ơn tới đại gia đình, đặc biệt là bố mẹ, chồng và con đã luôn cố vũ, kiên trì chia sẻ và động viên nghiên cứu sinh trong suốt quá trình thực hiện nội dung luận án.

Hà Nội, tháng ... năm 2020

Tác giả luận án

Nguyễn Thị Thu Hằng

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
MỤC LỤC	iii
BẢNG THUẬT NGỮ VIẾT TẮT	vii
BẢNG DANH MỤC KÝ HIỆU	xi
DANH MỤC HÌNH VẼ	xv
DANH MỤC BẢNG.....	xvii
MỞ ĐẦU	1
1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA LUẬN ÁN.....	1
2. MỤC TIÊU, ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU	2
3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	3
4. CÁC ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN.....	3
5. BỐ CỤC CỦA LUẬN ÁN	4
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	7
1.1 MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY ĐA SỰ KIỆN	7
1.1.1 Nút mạng	8
1.1.2 Mạng lưới liên kết.....	9
1.1.3 Mô hình năng lượng.....	10
1.1.4 Định tuyến trong mạng cảm biến không dây	10
1.1.4.1 Phân loại định tuyến trong mạng cảm biến không dây.....	11
1.1.4.2 Đặc điểm của định tuyến đa đường trong mạng cảm biến không dây.....	14
1.1.5 Giao thức MAC trong mạng cảm biến không dây	19
1.1.5.1 Phân loại theo đặc điểm xung đột.....	20
1.1.5.2 Cơ chế đa truy nhập cảm nhận sóng mang CSMA	22
1.1.6 Những yêu cầu chất lượng đặc biệt của mạng cảm biến không dây đa sự kiện	25

1.2 CÁC THAM SỐ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY	29
1.2.1 Hiệu quả sử dụng năng lượng.....	29
1.2.1.1 Thời gian sống	30
1.2.1.2 Năng lượng cho việc truyền một đơn vị dữ liệu.....	31
1.2.2 Trễ gói tin	31
1.2.3 Độ tin cậy	32
1.3 CÁC TIẾP CẬN LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU	33
1.3.1 Phân tích, đánh giá các tiếp cận ở Việt Nam	33
1.3.2 Phân tích, đánh giá các tiếp cận trên thế giới.....	34
1.3.2.1 Hạn chế trong các nghiên cứu về giao thức định tuyến.....	36
1.3.2.2 Hạn chế trong các nghiên cứu sử dụng hàng đợi ưu tiên....	36
1.3.2.3 Hạn chế trong các nghiên cứu về giao thức MAC.....	37
1.4 HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN.....	40
1.4.1 Các giải pháp để làm giảm độ trễ	40
1.4.2 Các giải pháp làm tăng độ tin cậy.....	41
1.4.3 Các giải pháp để tăng hiệu quả sử dụng năng lượng mạng	42
1.4.4 Sự trả giá cho các tham số hiệu năng trong WSN.....	43
1.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1	44
CHƯƠNG 2: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY ĐA SỰ	
KIỆN SỬ DỤNG GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN LINH HOẠT	45
2.1 ĐẶT VẤN ĐỀ.....	46
2.2 CÁC GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN ĐỊNH HƯỚNG SỰ KIỆN	48
2.2.1 Giao thức định tuyến GPSR.....	48
2.2.2 Giao thức định tuyến đa đường linh hoạt hướng theo sự kiện.....	50
2.2.3 Định tuyến đa đường nâng cao độ tin cậy và đảm bảo băng thông	52
2.3 GIẢI PHÁP DRPDS KẾT HỢP ĐỊNH TUYẾN ĐỘNG VỚI CƠ CHẾ TRUYỀN	
GÓI LINH HOẠT	53
2.3.1 Phân tích giải pháp chọn tuyến và cơ chế phân tải linh hoạt.....	54

2.3.2	Giải thuật định tuyến và cơ chế truyền gói linh hoạt DRPDS	55
2.3.3	Phân tích hiệu năng WSN đa sự kiện khi truyền đa đường	59
2.3.3.1	<i>Phân tích về độ tin cậy</i>	59
a)	<i>Độ tin cậy của gói tin khi truyền trên một đường</i>	59
b)	<i>Độ tin cậy của gói tin khi truyền sao chép trên nhiều đường ...</i>	60
2.3.3.2	<i>Phân tích tính trễ gói</i>	62
2.3.3.3	<i>Một số trường hợp đặc biệt làm ảnh hưởng tới lợi thế trễ và độ tin cậy của định tuyến đa đường</i>	65
2.3.4.	Đánh giá hiệu năng WSN đa sự kiện sử dụng DRPDS	66
2.3.4.1	<i>Kịch bản mô phỏng</i>	66
2.3.4.2	<i>Kết quả mô phỏng và đánh giá</i>	68
a)	<i>Tỷ lệ lỗi gói</i>	68
b)	<i>Thời gian trễ và hiệu quả trễ của gói loại C so với A và B.....</i>	70
2.4	GIẢI THUẬT ĐỊNH TUYẾN NHẬN THỨC NĂNG LƯỢNG EARPM.....	71
2.4.1	Phân tích giải pháp chọn tuyến EARPM	71
2.4.2	Giải thuật định tuyến EARPM	74
2.4.3	Đánh giá hiệu năng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM	76
2.4.3.1	<i>Kịch bản mô phỏng</i>	76
2.4.3.2	<i>Kết quả mô phỏng và đánh giá</i>	78
a)	<i>Thời gian sống và số lượng nút chết</i>	78
b)	<i>Tỷ lệ lỗi gói</i>	80
c)	<i>Thời gian trễ.....</i>	81
2.5	KẾT LUẬN CHƯƠNG 2	82
	CHƯƠNG 3: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY ĐA SỰ	
	KIỆN SỬ DỤNG GIAO THỨC MAC ƯU TIÊN.....	84
3.1	ĐẶT VẤN ĐỀ.....	84
3.2	GIAO THỨC MAC ƯU TIÊN	85
3.2.1	Giao thức QAEE.....	86
3.2.2	Giao thức MPQ.....	87

3.3 ĐỀ XUẤT GIAO THỨC MAC ƯU TIÊN PMME	89
3.3.1 Giao thức MAC ưu tiên PMME	89
3.3.1.1 Cơ chế CSMA <i>p</i> -persistent thay đổi theo mức độ ưu tiên của gói tin.....	90
3.3.1.2 Cơ chế chấp nhận Tx-Beacon sớm nhất.....	93
3.3.2 Phân tích hiệu năng WSN đa sự kiện khi sử dụng PMME.....	93
3.3.2.1 Phân tích ảnh hưởng của mức độ ưu tiên tới trễ gói sử dụng giao thức PMME.....	94
3.3.2.2 Phân tích ảnh hưởng của mức độ ưu tiên tới độ tin cậy sử dụng giao thức PMME	96
3.3.3 Đánh giá hiệu năng WSN đa sự kiện sử dụng PMME	99
3.3.3.1 Kịch bản mô phỏng	99
3.3.3.2 Kết quả mô phỏng và đánh giá.....	101
a) Trễ gói trung bình.....	101
b) Trễ gói PMME theo mức độ ưu tiên của gói tin	103
c) Tỷ lệ truyền gói thành công.....	105
d) Hiệu quả tiêu thụ năng lượng	106
3.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3	107
KẾT LUẬN.....	108
CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ	110
TÀI LIỆU THAM KHẢO	112

BẢNG THUẬT NGỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
A		
ABMR	Agent Based Multipath Routing	Định tuyến đa đường dựa trên tác tử
ACK	Acknowledgement	Xác nhận
APLR	Average Packet Loss Ratio	Tỷ lệ mất gói trung bình
B		
BS	Base Station	Trạm gốc
C		
CCA	Clear Channel Assessment	Đánh giá kênh có rỗi không
CDMA	Code Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo mã
CODA	Congestion detection and avoidance	Phát hiện và tránh nghẽn
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	Đa truy nhập cảm nhận sóng mang
CSMA-CD	CSMA-Collision Detection	CSMA- Phát hiện xung đột
CSMA-CA	CSMA- Collision Avoidance	CSMA-Tránh xung đột
D		
DA	Destination Address	Địa chỉ đích
DMP	Dynamic Multilevel Priority	Ưu tiên đa lớp động
DRPDS	Dynamic Routing Protocol and Delivering Scheme	Giao thức định tuyến và cơ chế truyền tải linh hoạt
E		
E2E	End to End	Từ đầu tới cuối
EARPM	Energy Aware Routing Protocol for Multievent Wireless Sensor Network	Giao thức định tuyến nhận thức năng lượng cho Mạng cảm biến không dây đa sự kiện
ESRT	Event-to-Sink Reliable Transport	Vận chuyển tin cậy từ nút phát hiện sự kiện tới sink

F		
FC	Frame Control	Điều khiển khung (trường kiểm tra đầu khung)
FCFS	First Come First Serve	Vào trước phục vụ trước
FCS	Frame Check Sequence	Trình tự kiểm tra khung (trường thứ tự để kiểm tra)
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo tần số
G		
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing	Giao thức định tuyến phi trạng thái chọn nút chuyển tiếp gần sink nhất trong chu vi phủ sóng
L		
LAN	Local Area Network	Mạng nội bộ
LEDMPR	Location Aware Event Driven Multipath Routing	Định tuyến đa đường định hướng sự kiện có nhận thức vị trí
LIEMRO	Low-Interference Energy-efficient Multipath Routing protocol	Giao thức định tuyến đa đường hiệu quả năng lượng có mức nhiễu thấp
LOS	Line Of Sight	Tầm nhìn thẳng
M		
MAC	Media Access Control	Điều khiển truy nhập môi trường
MEMS	Micro ElectroMechanical System	Hệ thống vi cơ điện tử
MEMPR	MultiEvent Multipath Routing Protocol	Giao thức định tuyến đa đường đa sự kiện
MPMPS	Multi-priority Multi-path Selection	Lựa chọn đa đường đa mức ưu tiên
MPQ	Multi-priority based QoS MAC protocol	Giao thức MAC đa mức ưu tiên dựa trên QoS
P		
PER	Packet Error Rate	Tỷ lệ mất gói

PMME	Priority MAC protocol for MultiEvent Wireless Sensor Network	Giao thức MAC ưu tiên cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện
PSR	Packet Success Rate	Tỷ lệ gói truyền thành công
Q		
QAEE	QoS aware energy-efficient MAC protocol	Giao thức MAC hiệu quả năng lượng và nhận thức QoS
QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
R		
ReInForM	Reliable Information Forwarding using Multiple paths	Chuyển tiếp thông tin đáng tin cậy sử dụng nhiều đường dẫn
REQ	Routing Request message	Bản tin yêu cầu định tuyến
RX	Receive	Nhận/ Thu
S		
SA	Source Address	Địa chỉ nguồn
SIFS	Short Interframe Space	Khoảng cách liên khung ngắn
SMAC	Sensor MAC	Giao thức điều khiển truy nhập môi trường cho mạng cảm biến
SMP	Sensor Management Protocol	Giao thức quản lý mạng cảm biến
SQDDP	Sender Query and Data Dissemination Protocol	Giao thức phân phối dữ liệu và truy vấn bên gửi
T		
TADAP	Task Assignment and Data Advertisement Protocol	Giao thức quảng bá dữ liệu và chỉ định nhiệm vụ
TCP	Transmission Control Protocol	Giao thức điều khiển truyền dẫn
TDMA	Time Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo thời gian
TX	Transmission	Phát
U		
UDP	User Datagram Protocol	Giao thức dữ liệu đồ người sử dụng

W		
WMSN	Wireless Mulimedia Sensor Network	Mạng cảm biến đa phương tiện không dây
WSN	Wireless Sensor Network	Mạng cảm biến không dây

BẢNG DANH MỤC KÝ HIỆU

Ký hiệu	Từ đầy đủ	Nghĩa tiếng Việt
a	The differentiated base a	Cơ số ưu tiên
bL	Burst Length	Số gói sinh ra từ một sự kiện
d	Distance	Khoảng cách
d_{ACK}	The ACK transmission time	Thời gian truyền phản hồi
d_{CCA}	CCA check delay	Thời gian đủ để cảm nhận được chính xác trạng thái của môi trường truyền dẫn
d_j	The delay at the relay node j	Trễ ở nút chuyển tiếp j
d_{max}	The sensor node's radio transmission radius	Bán kính truyền vô tuyến của nút cảm biến
d_{MAC}	The medium access delay of a packet	Trễ truy nhập môi trường của một gói
d_{que}	The queuing delay of a packet	Trễ xếp hàng của một gói ở hàng đợi
$d_{service}$	The service delay of a packet	Trễ xử lý của một gói ở hàng đợi
d_{SIFS}	the duration of the short interframe space	Thời gian của SIFS (khoảng cách giữa các khung)
d_{total}	Total delay	Tổng trễ
d_{trans}	The transmission delay of a packet	Trễ truyền dẫn của một gói
d_{ts}	Time slot in CSMA p-persistent	Khe thời gian sử dụng trong CSMA p-persistent
$d_{TxB,m}$	Time for m^{th} trying to send a Tx-Beacon	Thời gian để được gửi Tx-Beacon trong lần gieo thứ m
D_{avr}	Average Packet Delay	Trễ gói trung bình
D_i	The i^{th} Packet Delay	Trễ gói thứ i
ε_{amp}	The energy required per bit of data for transmitter amplifier	Năng lượng để khuếch đại và phát đi một bit

ϵ_{elec}	The energy required for transceiver circuitry to process one bit of data	Năng lượng để thu hoặc phát một bit dữ liệu
e	The perhop channel packet error rate	Tỷ lệ lỗi gói kênh của một chặng
$e_{S,j}$	The perhop channel packet error rate at j^{th} hop with a packet size of S bits	Tỷ lệ lỗi gói kênh của chặng thứ j với kích thước gói tin là S bit
$e_{S,i,j}$	The probability that a packet is dropped at the j^{th} hop of the i^{th} path with a packet size of S bits	Xác suất gói bị rơi ở chặng j trên đường i với kích thước gói tin là S bit
E	E represents the set of edges in WSN	E biểu thị tập các cạnh trong đồ thị
E_{avg}	The average energy consumption for successfully receive a data bit	Năng lượng tiêu thụ trung bình để nhận được một bit dữ liệu
$E_{hop}(S,d)$	The energy consumption to transmit and receive a S -bit message at a distance d	Năng lượng thu và phát một bản tin có độ dài S bit qua khoảng cách d
E_T	Total energy consumption	Tổng năng lượng tiêu thụ
G	The undirected graph of WSN	Đồ thị vô hướng
h	Hopcount /Number of hops	Số chặng trên một đường truyền
k	Sensor node radio state (4 states: transmit, receive, listen and sleep)	Trạng thái vô tuyến của nút cảm biến (4 trạng thái: phát, thu, nghe, ngủ)
L	Dimension of Sensing Area	Chiều dài cạnh của vùng cảm biến (kích thước đo, mét)
m	The maximum trying numbers to send a Tx-Beacon	Số lần thử truyền tối đa một Tx-Beacon
m_s	Number of sensor node radio states	Tổng số lượng trạng thái vô tuyến của một nút

M	Number of paths in multipath routing	Số lượng đường trong định tuyến đa đường
n	The number of priority levels	Số mức ưu tiên
n_s	The number of senders	Số lượng nút gửi khung dữ liệu
N	The total number of packets received by the receiver	Tổng số gói bên nhận nhận được
N_r	The number of distinctive packets received by the sink	Số gói đích nhận được (không tính gói trùng do sao chép).
N_s	The number of original packets sent by the source	Số gói gốc gửi từ nguồn
p	The probability of CSMA p-persistent for one frame	Xác suất chọn gửi theo CSMA p-persistent của một khung
p_i	The probability of CSMA p-persistent for one frame with the priority level of i	Xác suất chọn gửi theo CSMA p-persistent của một khung có mức ưu tiên là i
$P_{i,a,n}$	The probability of none linear value of CSMA p-persistent for one frame with the priority level of i in n priority levels, differentiated base a	Xác suất chọn gửi theo giá trị phi tuyến CSMA p-persistent của một khung có mức ưu tiên là i trong n mức ưu tiên với cơ số phân biệt a
$P_{i,n}$	The probability of linear value of CSMA p-persistent for one frame with the priority level of i in n priority levels	Xác suất chọn gửi theo giá trị tuyến tính CSMA p-persistent của một khung có mức ưu tiên là i trong n mức ưu tiên
P_{rand}	The random number for a node to decide sending Tx-Beacon or not	Giá trị gieo ngẫu nhiên của một nút trước khi quyết định có gửi Tx-Beacon hay không
$p(L)$	The probability that at least one copy of a packet is successfully received by the sink	Xác suất ít nhất có một bản sao của gói tới được đích (sink) qua i đường thông qua định tuyến L đường
$psr_{S,j}$	Reliability at j^{th} hop with a packet size of S bits	Độ tin cậy ở chặng thứ j với kích thước gói là S bit

P_k	Energy consumption power at k^{th} state	Công suất tiêu thụ năng lượng ở trạng thái k
PER	Packet Error Rate	Tỷ lệ lỗi gói
$PER(1, h)$	Single path Packet Error Rate over h hops	Tỷ lệ lỗi gói truyền đơn đường qua h chặng
$PER(M, h_M)$	Packet Error Rate over M paths of h_M hops	Tỷ lệ lỗi gói truyền trên M đường có h_M chặng
P_{size}	The packet size	Kích thước gói tin
PSR	Packet Success Rate	Tỷ lệ truyền gói thành công
$PSR(1, h)$	Packet Success Rate over a path of h hops	Tỷ lệ nhận gói qua một đường gồm h chặng
$PSR(M, h_M)$	Packet Success Rate over M paths of h_M hops	Tỷ lệ nhận gói qua M đường gồm h_M chặng
$PSR_{TxB, m}$	Packet Success Rate for the m^{th} trying to send a Tx-Beacon	Tỷ lệ truyền Tx-Beacon thành công sau m lần thử
R	Reliability $R = N_r / N_s$	Độ tin cậy $R = N_r / N_s$
T_g	Time duration for a wakeup node to sense the medium before sending its frame.	Khoảng thời gian lắng nghe môi trường sau khi nút thức dậy đảm bảo để tránh gây xung đột
S	Message Size	Kích thước một bản tin
t_k	The duration of state k	Khoảng thời gian tồn tại trạng thái k
T_w	The Tx-Beacon contention duration	Khoảng thời gian cạnh tranh gửi Tx-Beacon
V	The set of vertices (sensor nodes and sink) in WSN	Tập các đỉnh trong đồ thị vô hướng

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Mạng cảm biến không dây đa sự kiện với những ứng dụng yêu cầu đa dạng về chất lượng	7
Hình 1.2: Thành phần của một nút cảm biến [15]	8
Hình 1.3: Mô tả hình năng lượng thu phát của nút cảm biến [15], [58]	10
Hình 1.4: Phân loại giao thức định tuyến trong WSN	11
Hình 1.5: Phân loại giao thức định tuyến đa đường [109]	18
Hình 1.6: Phân loại các giao thức MAC trong mạng cảm biến không dây (tổng hợp từ [36], [95], [109], [117]).	20
Hình 1.7: Mô tả hoạt động trong CSMA/CA	23
Hình 1.8: Sơ đồ hoạt động của ba kiểu truyền CSMA [48]	24
Hình 1.9: Các khái niệm liên quan tới thời gian sống trong WSN	31
Hình 1.10: Phân loại khái niệm độ tin cậy truyền tin trong WSN [95]	32
Hình 2.1: Mô tả cách chọn đường Greedy theo GPSR	49
Hình 2.2: Mô tả cơ chế định tuyến kết hợp đơn đường, đa đường [J2]	54
Hình 2.3: Mô tả hoạt động định tuyến DRPDS [J2]	57
Hình 2.4: Chọn nút chuyển tiếp trong DRPDS	58
Hình 2.5: Độ tin cậy gói tin truyền trên một đường	59
Hình 2.6: Độ tin cậy truyền tin khi truyền gói sao chép trên nhiều đường [J3]	60
Hình 2.7: Đánh giá tỷ lệ lỗi gói khi truyền đơn và đa đường với các tham số về số đường, số chặng khác nhau theo tỷ lệ lỗi gói đơn chặng là 1% và 2% [J3]	61
Hình 2.8: Sự chiếm giữ hàng đợi của ba loại gói	63
Hình 2.9: So sánh về trễ của định tuyến đa đường sử dụng cơ chế phân tải so với định tuyến đơn đường với số lượng đường và độ dài hàng đợi thay đổi	65
Hình 2.10: Hình trạng mạng mô phỏng chạy giao thức DRPDS [J2]	68
Hình 2.11: Đánh giá tỷ lệ lỗi gói của ba loại gói dữ liệu của ba loại gói sự kiện (A, B và C) trong các điều kiện WSN đa sự kiện khác nhau sử dụng DRPDS	69
Hình 2.12: Đánh giá độ trễ của ba loại gói dữ liệu của ba loại gói sự kiện (A, B và C) trong WSN với các điều kiện khác nhau sử dụng DRPDS	70

Hình 2.13: Mô tả cơ chế định tuyến kết hợp đơn đường, đa đường và nhận thức năng lượng [J3]	73
Hình 2.14: Mô tả hoạt động và giải thuật định tuyến EARPM [J3]	75
Hình 2.15: So sánh thời gian sống của mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM so với DRPDS	79
Hình 2.16: Số lượng nút chết và thời gian sống của mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM so với DRPDS.....	80
Hình 2.17: Phân tích tỷ lệ lỗi gói của ba loại gói dữ liệu trong mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM và DRPDS.....	80
Hình 2.18: Phân tích độ trễ của ba loại gói dữ liệu trong mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM	81
Hình 3.1: Mô tả hoạt động truyền thông của giao thức QAEE-MAC [76].....	86
Hình 3.2: Khuôn dạng các Beacon trong giao thức MPQ [115]	88
Hình 3.3: Mô tả hoạt động truyền thông của giao thức PMME [C4]	90
Hình 3.4: Cơ chế CSMA p-persistent cho việc gửi Tx-Beacon theo mức độ ưu tiên dữ liệu trong PMME [C3].....	91
Hình 3.5: Đánh giá trễ truyền và tỷ lệ truyền thành công Tx-Beacon của một nút gửi với các tham số khác nhau	97
Hình 3.6: Thời gian trễ trung bình của gói tin sử dụng giao thức PMME so với sử dụng giao thức QAEE và MPQ.....	102
Hình 3.7: Thời gian trễ trung bình của gói tin PMME với 4 mức ưu tiên khác nhau và với hai kiểu p khác nhau.....	104
Hình 3.8: Tỷ lệ truyền gói thành công của mạng sử dụng các giao thức QAEE, MPQ và PMME với $\max\text{TxRetries} = 10$	105
Hình 3.9: Năng lượng tiêu thụ trung bình (mj/bit) [C3]	106

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1: Những lợi ích của định tuyến đa đường trong WSN	15
Bảng 1.2: Các hoạt động trong giao thức định tuyến đa đường trong WSN [109]..	16
Bảng 1.3: Các cấp độ cảnh báo cháy rừng [156]	25
Bảng 1.4: Một số ứng dụng cảm biến đa sự kiện và yêu cầu ứng dụng	28
Bảng 1.5: Các giải pháp cải thiện hiệu năng WSN theo cách tiếp cận lớp chức năng	34
Bảng 1.6: Đánh giá một số giải pháp kỹ thuật đảm bảo hiệu năng cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện	37
Bảng 2.1: Các thông số mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giao thức DRPDS [J2], [36], [58]	67
Bảng 2.2: Các thông số mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giải thuật định tuyến EARPM [J2], [36], [58]	77
Bảng 3.1: Các mức ưu tiên gói [115]	88
Bảng 3.2: Các thông số mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giao thức MAC [76], [114], [115], [J4]	99

MỞ ĐẦU

1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA LUẬN ÁN

Mạng cảm biến không dây (WSN) đã, đang và tiếp tục là lĩnh vực được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm và phát triển mở rộng [15], [55], [74]. Dự báo từ những năm đầu thế kỷ 21 cho thấy trong tương lai cảm biến sẽ là phần không thể thiếu trong cuộc sống hơn nhiều so với các máy vi tính hiện dùng và trong thế giới IoT thì thiết bị cảm biến là một trong những thành phần thiết yếu [152], [154]. Những công nghệ không dây và vi cơ điện tử (MEMS) đã cho phép triển khai nhiều ứng dụng WSN trong những điều kiện mạng đặc biệt và khắc nghiệt, nó cho phép thay thế con người hay các thiết bị truyền thông thông dụng trong các lĩnh vực quân sự, giao thông, y tế, môi trường, công nông nghiệp ...[12], [15], [51], [55], [80], [112], [113].

Trong giai đoạn phát triển ban đầu, với các ứng dụng cảm biến chuyên biệt, các cảm biến trong một mạng chỉ có nhiệm vụ cảm nhận những trạng thái hay quá trình vật lý/hóa học ở môi trường cần khảo sát, biến đổi chúng thành thông tin về trạng thái hay quá trình đó rồi gửi tín hiệu mang thông tin qua hạ tầng truyền thông về trung tâm để xử lý. Sau đó, trung tâm sẽ đưa ra cảnh báo/điều khiển cho mạng. Ngày nay, những yêu cầu ứng dụng đa dạng cần kết hợp nhiều kiểu loại cảm biến như ứng dụng trong cảnh báo cháy rừng, công nghiệp hầm mỏ, nông nghiệp thông minh, nhà thông minh hay y tế thông minh [59], [66], [126], [151], [152], [156], các cảm biến cần có khả năng phân tích thông tin về nhiều loại sự kiện khác nhau rồi gửi cảnh báo về trung tâm và với mỗi sự kiện sẽ có thể có những yêu cầu truyền thông khác nhau như độ trễ, tốc độ, độ tin cậy, độ ưu tiên ...[15], [46], [51], [65], [116], [130], [146].

Như vậy ngoài rất nhiều thách thức trong việc thiết kế các mạng cảm biến không dây do đặc điểm khác biệt của mạng này so với mạng truyền thông truyền thống: số lượng thông tin cảm biến lớn, kích thước của nút cảm biến nhỏ, năng lượng hạn chế trong môi trường có độ tổn thất cao và phải có khả năng tự vận hành,

quản lý của mạng cảm biến còn có thêm thách thức về việc thiết kế mạng sao cho có thể đáp ứng nhiều yêu cầu khác nhau về chất lượng dịch vụ (QoS) của nhiều sự kiện trong mạng.

Trong những năm gần đây, đã có nhiều nghiên cứu về mạng cảm biến không dây đa sự kiện với nhiệm vụ truyền thông của thiết bị cảm biến được thực hiện khi xuất hiện sự kiện đặc biệt trong mạng và có nhiều sự kiện cùng xuất hiện trong mạng với những yêu cầu chất lượng khác nhau. Những nghiên cứu này đang thu hút khá nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học [51], [65], [76], [115], [116], [130]. Tuy nhiên, những nghiên cứu đi trước mới chỉ đáp ứng được một vài yêu cầu về chất lượng về trễ, độ tin cậy và/hoặc sử dụng hiệu quả năng lượng của mạng, hiếm khi giải quyết được nhiều yêu cầu khác biệt cùng xuất hiện trong mạng. Chính vì vậy, cần có thêm những nghiên cứu chuyên sâu để theo kịp và phù hợp với nhu cầu phát triển nhanh của những ứng dụng WSN đa sự kiện. Xuất phát từ các phân tích trên, nghiên cứu sinh đã quyết định chọn đề tài “***Nghiên cứu giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện***” cho luận án nghiên cứu của mình.

2. MỤC TIÊU, ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

Mục tiêu nghiên cứu: Luận án nghiên cứu, tìm kiếm và xây dựng các giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây, cụ thể là giảm được thời gian trễ truyền gói, tăng độ tin cậy và đảm bảo sử dụng năng lượng hiệu quả. Để đạt được mục tiêu này, luận án tiếp cận theo hai hướng: (1) đề xuất giải thuật định tuyến và lựa chọn ưu tiên phù hợp với yêu cầu ứng dụng, (2) đề xuất giao thức MAC có xét tới mức độ ưu tiên của dữ liệu. Trên cơ sở phân tích, so sánh với các tác giả trước, luận án sẽ chứng minh cách tiếp cận của mình qua tính toán toán học và mô phỏng rời rạc.

Đối tượng nghiên cứu: Luận án nghiên cứu các vấn đề liên quan tới giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây, bao gồm:

- Kỹ thuật định tuyến đa đường linh hoạt theo sự kiện và có nhận thức năng lượng trong WSN.

- Giao thức MAC ưu tiên trong WSN.

Phạm vi nghiên cứu được đề cập trong Luận án

- Mạng cảm biến bao gồm số lượng nút hữu hạn có vị trí cố định với phân bố ngẫu nhiên trong trường cảm biến có phạm vi giới hạn.
- Nút cảm biến là đồng nhất (về cấu trúc, năng lượng, phạm vi thu phát) tại thời điểm mạng bắt đầu hoạt động. Suy hao năng lượng của cảm biến phụ thuộc vào hoạt động thu, phát ngẫu nhiên của cảm biến.
- Các sự kiện xuất hiện trong mạng cảm biến là ngẫu nhiên theo thời gian. Có những thời điểm nhiều sự kiện cùng xuất hiện.
- Các sự kiện có thể có yêu cầu chất lượng khác nhau và đã được phân loại trước khi được truyền đi.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trên cơ sở các nhiệm vụ nghiên cứu vừa nêu, phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án là nghiên cứu lý thuyết dựa trên việc phân tích giao thức, phân tích toán học kết hợp với mô phỏng số và đối sánh với các phương pháp trước đây. Cụ thể, phương pháp nghiên cứu lý thuyết được sử dụng cho các nghiên cứu về nguyên lý hoạt động của mạng cảm biến không dây và các giao thức định tuyến cũng như giao thức MAC. Phương pháp tính toán số kết hợp với công cụ phần mềm mô phỏng được sử dụng để kiểm chứng nghiên cứu lý thuyết và đối sánh với các phương pháp trước.

4. CÁC ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành hai nhóm chính hướng tới đối tượng nghiên cứu mới là mạng cảm biến không dây đa sự kiện xuất hiện đồng thời:

Đóng góp thứ nhất của luận án là đề xuất 02 giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng kỹ thuật định tuyến linh hoạt: (1) giải pháp thứ nhất là đề xuất giao thức định tuyến DRPDS kết hợp định tuyến linh hoạt theo mức độ ưu tiên của sự kiện với cơ chế truyền gói tin theo kiểu sự kiện khác

nhau để đáp ứng những yêu cầu QoS khác biệt của các sự kiện có mức ưu tiên khác nhau và (2) giải pháp thứ hai là đề xuất giải thuật định tuyến EARPM là phiên bản cải tiến từ giải thuật DRPDS ở đề xuất thứ nhất với giải thuật định tuyến phát triển dựa trên việc nhận thức năng lượng còn lại kết hợp với tính toán khoảng cách để nâng cao hiệu quả tiêu thụ năng lượng nhằm kéo dài thời gian sống của mạng. Kết quả phân tích toán học và mô phỏng cho thấy hiệu quả của hai giải pháp là đáp ứng được yêu cầu khác nhau về trễ và độ tin cậy của ba loại sự kiện khác nhau và vẫn đảm bảo sử dụng hiệu quả năng lượng, kéo dài thời gian sống của mạng.

Đóng góp thứ hai của luận án là đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức MAC ưu tiên PMME. Giao thức này kết hợp cơ chế CSMA p-persistent thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu với cơ chế nhận sớm Beacon. Kết quả phân tích toán học và mô phỏng cho thấy giải pháp đã mang lại hiệu quả về mặt chất lượng mạng như giảm trễ truyền dữ liệu, đảm bảo tỷ lệ truyền gói thành công cao mà vẫn sử dụng năng lượng hiệu quả.

5. BỐ CỤC CỦA LUẬN ÁN

Luận án được bố cục thành ba chương với các nội dung chính như sau: **Chương 1 “Tổng quan về vấn đề nghiên cứu”**. Chương này trình bày tổng quan về mạng cảm biến không dây. Các tham số hiệu năng cũng được giới thiệu trong chương. Nội dung chính của chương sẽ tập trung khảo sát các nghiên cứu liên quan đến hiệu năng mạng cảm biến không dây, khảo sát hai phương thức tiếp cận sử dụng giao thức định tuyến và giao thức MAC để cải thiện hiệu năng mạng cảm biến định hướng sự kiện đa mức ưu tiên, từ đó thấy được những hạn chế của các nghiên cứu trước đây và đề xuất hướng nghiên cứu, phạm vi nghiên cứu cũng như phương thức tiếp cận của luận án. Một phần nội dung trình bày trong Chương 1 liên quan đến tìm kiếm giải pháp đáp ứng đa sự kiện sự kiện trong WSN đã được trình bày trong tạp chí [J1].

Chương 2 “Cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức định tuyến linh hoạt”. Chương này tìm hiểu và nghiên cứu một số giải pháp định tuyến linh hoạt theo sự kiện trong mạng cảm biến. Từ đó đưa ra hai

đề xuất: (1) đề xuất giao thức định tuyến DRPDS kết hợp định tuyến linh hoạt theo mức độ ưu tiên của sự kiện với cơ chế truyền gói tin theo kiểu sự kiện khác nhau để đáp ứng những yêu cầu QoS khác biệt của các sự kiện có mức ưu tiên khác nhau và (2) đề xuất giải thuật định tuyến EARPM là phiên bản cải tiến từ giải thuật DRPDS với giải thuật định tuyến phát triển dựa trên việc nhận thức năng lượng còn lại kết hợp với tính toán khoảng cách để nâng cao hiệu quả tiêu thụ năng lượng nhằm kéo dài thời gian sống của mạng. Đóng góp mới của luận án trong chương này là đề xuất 02 giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện có tên là DRPDS và EARPM, phân tích toán về hiệu quả của việc truyền nhân tải lên đa đường làm tăng độ tin cậy của việc truyền gói tin và truyền san tải lên đa đường làm giảm thời gian trễ của gói tin trong điều kiện mạng có nghẽn. Cuối cùng là sử dụng công cụ mô phỏng số OMNeT++ để đối sánh với phương pháp định tuyến trước đây là GPSR [73]. Nội dung của Chương 2 liên quan đến giải pháp đề xuất đã được công bố trong 02 bài báo đăng trên *tạp chí JSTIC* [J1, J2], 01 bài báo đăng trên *tạp chí Khoa học và Công nghệ Quân sự* [J3] và báo cáo tại 02 hội nghị quốc tế [C1, C2].

Chương 3 “Cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức MAC ưu tiên”. Chương này tìm hiểu và phân tích các giao thức MAC trong mạng cảm biến không dây và nghiên cứu giải pháp ưu tiên của hai giao thức MAC có xét nhiều mức ưu tiên dữ liệu khác nhau là QAEE [76] và MPQ [114]. Hai giao thức này đã phân biệt và ưu tiên từ 2 tới 4 mức độ khác nhau cho gói tin trong mạng, tuy nhiên việc ưu tiên vẫn còn cứng nhắc và không thực tế với mạng cảm biến đa sự kiện có nhiều sự kiện có thể xuất hiện với số sự kiện ngẫu nhiên. Chính vì thế, nghiên cứu sinh đã nghiên cứu và đề xuất thay đổi tham số p trong CSMA p -persistent theo mức độ ưu tiên của gói tin dữ liệu, đồng thời với việc thay đổi cơ chế nhận sớm Tx-Beacon ở lớp MAC. Đóng góp mới của luận án trong chương này là đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức MAC có tên là PMME. Cuối cùng là sử dụng công cụ mô phỏng số Castalia để đối sánh với hai giao thức QAEE và MPQ. Kết quả cho thấy PMME giúp mạng hoạt động hiệu quả hơn với việc giảm trễ truyền dữ liệu, tăng

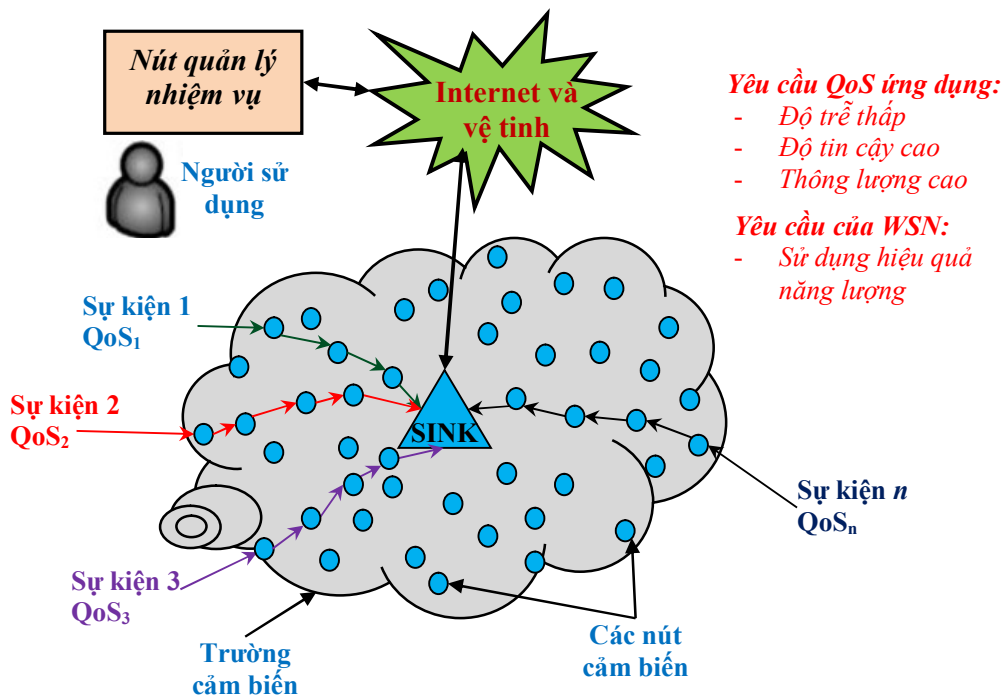
hiệu quả sử dụng năng lượng mà vẫn đảm bảo tỷ lệ truyền gói thành công cao. Các đóng góp của luận án được trình bày trong chương này được công bố trong 01 bài báo đăng trên *tạp chí Khoa học và Công nghệ Quân sự* [J4], 01 hội nghị trong nước [C3] và 01 hội nghị quốc tế [C4].

Trong phần **Kết luận**, luận án tóm tắt các kết quả nghiên cứu chính của luận án và đưa ra những gợi mở cho những nghiên cứu tiếp theo.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Tóm tắt ⁽¹⁾: Nội dung của chương trình bày tổng quan về mạng cảm biến không dây và các giao thức lớp định tuyến và MAC sử dụng trong mạng này. Các tham số hiệu năng trong mạng cảm biến không dây cũng được giới thiệu trong chương. Mục tiêu chính của chương sẽ tập trung khảo sát các nghiên cứu liên quan đến cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện để từ đó tìm ra các hạn chế của các nghiên cứu trước đây và từ đó đề xuất hướng nghiên cứu, phạm vi nghiên cứu và phương thức tiếp cận của luận án.

1.1 MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY ĐA SỰ KIỆN



Hình 1.1: Mạng cảm biến không dây đa sự kiện với những ứng dụng yêu cầu đa dạng về chất lượng

Mạng cảm biến không dây đa sự kiện (như mạng cảnh báo cháy rừng, mạng cảm biến trong nhà thông minh ...) là mạng cảm biến không dây trong đó các nút

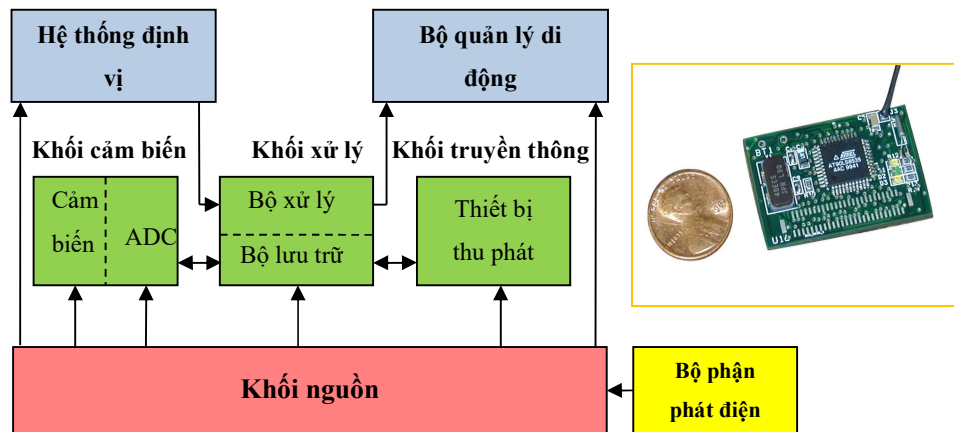
¹ Một phần nội dung của Chương 1 đã được công bố trong Tạp chí Khoa học công nghệ thông tin và truyền thông (JSTIC) 2016 [J1].

cảm biến cần chuyển tiếp thông tin cảm biến về các sự kiện tới điểm tập hợp dữ liệu (sink). Mỗi sự kiện sẽ có yêu cầu khác nhau về chất lượng dịch vụ như độ trễ, tốc độ, độ tin cậy, độ ưu tiên ...[12], [90]. Hình 1.1 mô tả một mạng cảm biến không dây đa sự kiện.

Các nút cảm biến nằm rải rác trong trường cảm biến và thường gồm một hoặc vài thiết bị cảm biến đơn giản, nhỏ gọn, giá thành rẻ... tạo nên sự kết hợp các khả năng cảm biến, xử lý và chuyển tiếp thông tin qua hạ tầng không dây về điểm tập hợp dữ liệu (sink) và từ đó chuyển tiếp tới người sử dụng cuối. Dữ liệu được định tuyến về sink thông qua con đường trực tiếp hoặc qua đa chặng. Sink có thể truyền thông với nút quản lý nhiệm vụ qua vệ tinh hoặc Internet.

1.1.1 Nút mạng

Công nghệ điện tử siêu nhỏ (MEMS – Micro ElectroMechanical System) hỗ trợ sản xuất cảm biến dưới dạng vi cơ điện tử có kích thước từ vài micromet tới vài milimet [157].



Hình 1.2: Thành phần của một nút cảm biến [15]

Một nút mạng cảm biến thường có bốn khối [15]: (1) khối cảm biến dùng để cảm nhận sự thay đổi từ môi trường bên ngoài và chuyển thành tín hiệu điện về khối xử lý, (2) khối xử lý có dung lượng nhỏ để quản lý dữ liệu thu được, (3) khối truyền thông là một bộ thu phát vô tuyến được sử dụng để trao đổi thông tin giữa các nút và (4) khối nguồn để cung cấp năng lượng cho các khối còn lại; ngoài ra còn tùy

vào ứng dụng cụ thể mà nút cảm biến còn có thể có các thành phần bổ sung như hệ thống định vị, bộ phận phát điện và bộ quản lý di động (Hình 1.2). Khối truyền thông (thu phát) trên nút cảm biến là khối tiêu thụ nhiều năng lượng nhất, vì thế rất nhiều nghiên cứu tập trung vào khối này để tiết kiệm năng lượng được nhiều hơn.

1.1.2 Mạng lưới liên kết

Với mạng cảm biến nói chung thì liên kết giữa các nút trong mạng có thể là hữu tuyến hoặc vô tuyến. Điều kiện kết nối không dây ở khắp nơi cho phép việc truyền thông tin trong WSN đến các trạm thu và xử lý và vào Internet dễ dàng hơn rất nhiều và những ứng dụng hiện đại càng hướng tới việc sử dụng kết nối không dây do tính linh hoạt và dễ dàng triển khai.

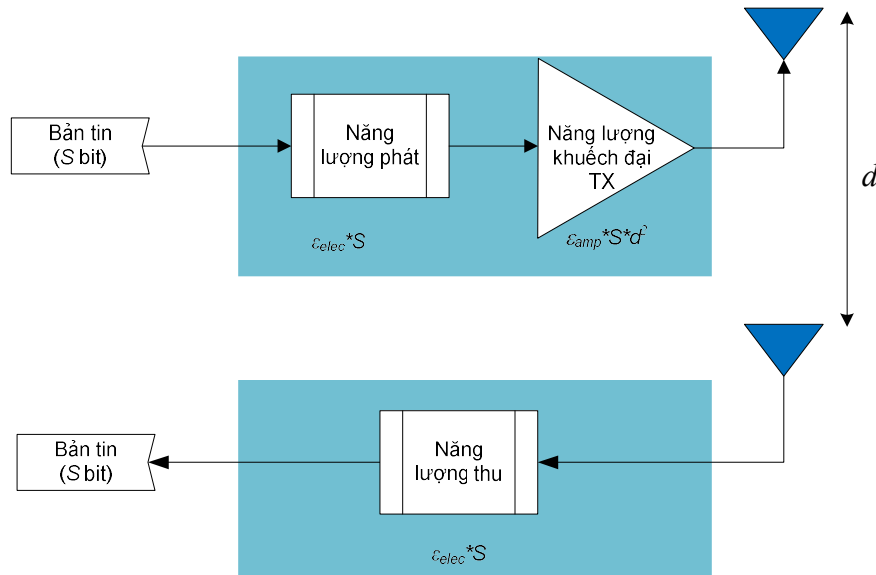
Mạng cảm biến không dây có thể biểu diễn như một đồ thị vô hướng $G = \langle V, E \rangle$ trong đó V biểu diễn tập các đỉnh (các nút cảm biến và nút sink) và E biểu diễn các cạnh [139]. Giả sử có N nút cảm biến phân bố ngẫu nhiên trong một vùng có phạm vi $L \times L$ (m^2), tồn tại một liên kết $E(i, j)$ giữa nút i và nút j nếu khoảng cách Euclidean $Euclidean(i, j)$ không vượt quá bán kính truyền dẫn của nút cảm biến (d_{\max}). Nút tập hợp /giám sát dữ liệu còn gọi là sink được đặt ở vị trí cố định và không bị giới hạn về năng lượng, nó biết vị trí của mình và vị trí của toàn bộ nút cảm biến. Với mạng cảm biến hướng theo sự kiện thì khi phát hiện sự kiện, nút cảm biến sẽ gửi thông tin trực tiếp hoặc tự tìm đường gián tiếp về sink thông qua lân cận của nó.

- Kết nối trong mạng cảm biến thường là kết nối một chiều hướng từ trường cảm biến về sink, song cũng tồn tại các kết nối theo chiều ngược lại khi các nút cảm biến yêu cầu tìm đường hoặc phát quảng bá thông tin.
- Việc truyền thông từ nút cảm biến về trạm gốc có thể là đơn bước (trực tiếp) hoặc đa bước (gián tiếp). Các nút cảm biến được triển khai dày đặc nên các nút thường ở gần nhau, vì thế truyền thông đa bước trong mạng cảm biến sẽ giúp việc tiêu thụ năng lượng của nút ít hơn so với truyền thông đơn bước [15].

1.1.3 Mô hình năng lượng

Năng lượng tiêu thụ trong mạng cảm biến không dây có ba thành phần chính: cảm biến, truyền thông (thu, phát) và xử lý dữ liệu. Trong ba thành phần này, năng lượng cho truyền thông là chủ yếu [15].

Trong luận án, năng lượng của nút cho việc thu phát thông tin được xây dựng dựa trên mô hình vô tuyến bậc nhất [58]. Trong hình 1.3, ϵ_{elec} là năng lượng cần để phát hoặc thu một bit dữ liệu còn ϵ_{amp} là năng lượng để khuếch đại một bit dữ liệu bên phát, d là khoảng cách giữa bên phát và thu.



Hình 1.3: Mô tả hình năng lượng thu phát của nút cảm biến [15], [58]

Khi đó, năng lượng tiêu thụ để gửi một bản tin có độ dài là S bit tới nút ở khoảng cách d được tính theo công thức sau [58]:

$$E_{hop}(S, d) = 2 \times \epsilon_{elec} \times S + \epsilon_{amp} \times S \times d^2 \quad (1.1)$$

1.1.4 Định tuyến trong mạng cảm biến không dây

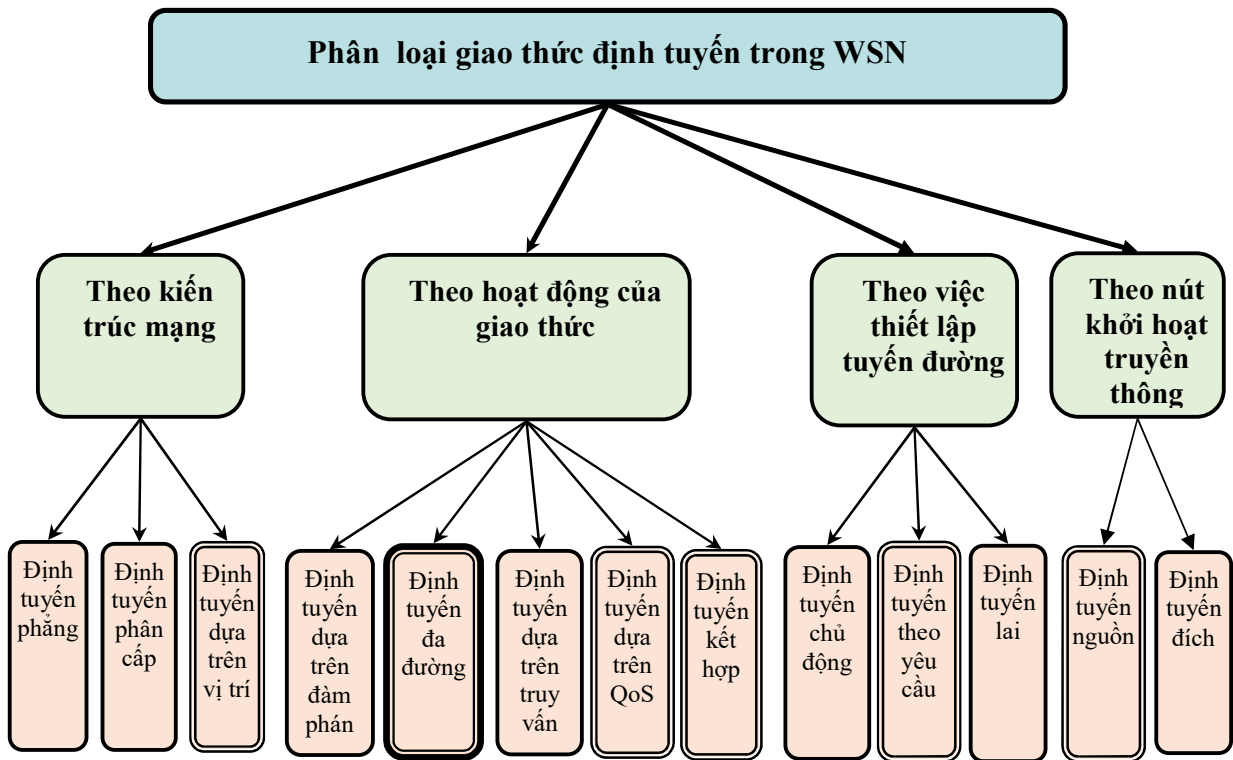
Định tuyến là tiến trình lựa chọn đường đi cho các gói tin từ nguồn qua mạng tới đích. Mục tiêu cơ bản của các giao thức định tuyến là đáp ứng được những yêu cầu chất lượng của ứng dụng và sử dụng hiệu quả tài nguyên mạng.

1.1.4.1 Phân loại định tuyến trong mạng cảm biến không dây

Nhìn chung, định tuyến trong mạng cảm biến không dây được chia thành bốn loại chính dựa trên kiểu kiến trúc mạng, hoạt động của giao thức, việc thiết lập tuyến đường và nút khởi hoạt truyền thông. Hình 1.4 cho ta thấy sự phân loại các giao thức định tuyến cơ bản này [17], [41].

(1) Dựa trên kiến trúc mạng, các giao thức định tuyến được chia thành ba loại là định tuyến ngang hàng (định tuyến phẳng), định tuyến phân cấp, định tuyến dựa theo vị trí [17], [105].

- Trong định tuyến phẳng (flat-based), các nút cảm biến giữ vai trò và chức năng tương đương nhau trong việc thực hiện nhiệm vụ cảm biến và chuyển tiếp dữ liệu.



Hình 1.4: Phân loại giao thức định tuyến trong WSN

- Trong định tuyến phân cấp (hierarchical-based) có sự phân biệt vai trò giữa các nút trong mạng. Các nút trong mạng cảm biến sẽ được phân chia vào các nhóm/cụm (cluster), mỗi nhóm sẽ có một chủ cụm (cluster head)

có vai trò thu nhận dữ liệu của các nút thành viên trong nhóm gửi về và tổng hợp, gửi dữ liệu hướng về trạm gốc (sink) [58].

- Trong phương thức định tuyến dựa trên vị trí (location-based), vị trí của các nút được sử dụng để định tuyến dữ liệu trong mạng [130].

(2) Dựa trên cách thức hoạt động, các giao thức định tuyến được chia thành các loại: định tuyến dựa trên đàm phán (negotiation-based), định tuyến dựa trên đa đường (multipath-based), định tuyến theo truy vấn (query-based), định tuyến theo chất lượng dịch vụ (QoS-based) và định tuyến xử lý dữ liệu coherent.

- Định tuyến dựa trên đàm phán: Các giao thức này sử dụng phương pháp mô tả dữ liệu ở mức độ cao nhằm loại bỏ các thông tin dư thừa khi truyền lưu lượng. Quyết định chuyển tiếp lưu lượng cũng được xác định dựa vào nguồn tài nguyên sẵn có của nút. Mục tiêu chính của các giao thức loại này là tránh các thông tin dư thừa, thông tin trùng lặp bằng cách đàm phán, trao đổi các bản tin mô tả dữ liệu trước khi thực hiện truyền dữ liệu thực.
- Định tuyến đa đường: Các giao thức thuộc loại này sử dụng nhiều tuyến đường tới nút nguồn để truyền dữ liệu chứ không phải chỉ một tuyến duy nhất. Mục tiêu của các giao thức dựa trên đa đường là nâng cao hiệu suất mạng, khả năng chịu lỗi, tăng độ tin cậy... Giao thức đa đường cũng cần cơ chế để duy trì nhiều tuyến vì vậy cũng cần thêm năng lượng tiêu thụ.
- Định tuyến dựa trên truy vấn: Các giao thức loại này thực hiện truyền lưu lượng dựa trên các truy vấn về dữ liệu cảm biến. Các truy vấn thường ở dưới dạng các mô tả về dữ liệu (nhiệm vụ cảm biến) và được các nút quảng bá trong mạng. Với nhóm giao thức loại này, cơ chế truy vấn thường là làm tràn lụt bản tin truy vấn trong mạng.
- Định tuyến dựa trên chất lượng dịch vụ: Các giao thức này cần phải cân bằng giữa năng lượng tiêu thụ và các thông số liên quan tới đảm bảo chất lượng dịch vụ. Đặc biệt trong hoạt động giao thức, mạng phải đáp ứng được các yêu cầu tham số QoS nhất định như trễ, năng lượng, băng thông song cũng cần sử dụng tối ưu các nguồn tài nguyên của mạng.

- Định tuyến xử lý dữ liệu coherent: Trong hoạt động của giao thức định tuyến này, nút thực hiện xử lý tối thiểu dữ liệu (lấy mẫu, nén ...) trước khi truyền tới nút cảm biến khác hoặc tới các nút tổng hợp. Các nút tổng hợp thực hiện việc tổng hợp dữ liệu từ nhiều nút và truyền tới sink. Định tuyến kiểu này giúp tối ưu hiệu quả về năng lượng cho mạng.

(3) Dựa trên việc thiết lập tuyến đường được chia thành định tuyến chủ động (theo bảng-table driven), theo yêu cầu (on-demand) hoặc lai ghép.

- Trong các giao thức định tuyến chủ động (proactive routing/table-driven), tất cả các đường được tính toán trước khi có yêu cầu, giao thức loại này hoạt động dựa trên sự trao đổi định kỳ của các bản tin điều khiển. Do đó một nút nguồn có thể gửi bản tin tới đích ngay lập tức khi nó cần mà không cần tốn thời gian cho việc tìm kiếm đường trong lúc truyền dữ liệu. Sử dụng giao thức định tuyến Proactive, mỗi nút luôn cập nhật trạng thái của mạng và duy trì các tuyến đường cho dù tuyến đó có lưu lượng dữ liệu chuyển qua hay không. Các giao thức Proactive có hai ưu điểm nổi trội là (1) Mạng hội tụ nhanh: Khi topo mạng có sự thay đổi thì gần như ngay lập tức các nút trong mạng sẽ cập nhật thay đổi topo mạng của mình. (2) Độ trễ tuyến thấp: Mỗi nút có đầy đủ thông tin về topo mạng nên khi cần trao đổi thông tin thì nút nguồn có thể ngay lập tức tìm thấy tuyến đường đi tới đích. Đặc tính này rất phù hợp với việc truyền thông tin yêu cầu thời gian thực. Tuy nhiên nó lại có nhược điểm là tiêu tốn nhiều băng thông mạng do các bản tin điều khiển gửi đi một cách đều đặn theo phương thức bản tin quảng bá (broadcast).
- Với các giao thức định tuyến theo yêu cầu (reactive routing/on-demand) các đường được tính toán theo nhu cầu từ phía nguồn. Giao thức định tuyến Reactive chỉ tạo ra các tuyến đường khi có yêu cầu từ các nút cần trao đổi thông tin. Dạng giao thức này hoạt động theo hai chức năng chính là (1) Khám phá tuyến: chức năng này đáp ứng cho việc dò tìm tuyến mới. Khi một nút cần trao đổi thông tin với nút khác, nó sẽ phát bản tin yêu cầu

tìm tuyến đường tới đích. Quá trình này được hoàn thành khi tìm thấy được một tuyến đường hoặc tất cả các tuyến khả thi đều đã được kiểm tra.

(2) Duy trì tuyến: chức năng này đáp ứng cho việc cảm nhận đường liên kết và duy trì những tuyến đang tồn tại. Khi một tuyến được thiết lập, nó được đảm bảo bởi một phương thức duy trì tuyến cho đến khi đích đó không thể truy nhập trên tất cả các đường từ nguồn đó hoặc cho đến khi tuyến đường không được yêu cầu nữa. Giao thức Reactive có hai ưu điểm: (1) Ít chiếm dụng băng thông và (2) Không gây lãng phí tài nguyên do chỉ tìm đường khi có yêu cầu chứ không gửi bản tin cập nhật liên tục. Tuy nhiên nó lại có nhược điểm là việc dò tìm tuyến khi có nhu cầu lại gây ra tình trạng trễ trên mạng do phải chờ đợi tìm tuyến và khó có thể sử dụng trong việc truyền thời gian thực.

- Các giao thức lai ghép (hybrid routing) kết hợp cả hai dạng giao thức Proactive và Reactive để tạo ra giao thức định tuyến tối ưu. Giao thức định tuyến loại này thực hiện phân chia mạng thành từng vùng, mỗi vùng sẽ được quan tâm bởi nút trung tâm và nút biên (nút ngoại vi). Mỗi vùng được đánh số theo bán kính vùng, việc định tuyến được chia ra làm hai phương pháp. Định tuyến trong vùng sẽ sử dụng phương pháp định tuyến Proactive, định tuyến ngoài vùng sẽ sử dụng phương pháp định tuyến Reactive. Nhờ vậy có thể giảm tối đa thời gian khám phá tuyến và thuận lợi khi topo mạng thay đổi. Tuy nhiên giao thức Hybrid cũng có hai nhược điểm: (1) Khó khăn trong việc tổ chức mạng theo các thông số của nó. (2) Nút có thông tin về topo mạng ở mức cao phải duy trì nhiều thông tin định tuyến, dẫn đến tiêu tốn nhiều bộ nhớ và tài nguyên mạng.

(4) Ngoài ra, dựa trên nút khởi hoạt việc truyền thông có thể phân loại định tuyến theo loại định tuyến nguồn và định tuyến đích.

1.1.4.2 Đặc điểm của định tuyến đa đường trong mạng cảm biến không dây

Hầu hết các giao thức định tuyến trong WSN được thiết kế theo giải pháp đơn đường, khi đó nút nguồn sẽ lựa chọn một đường thỏa mãn yêu cầu hiệu năng của

ứng dụng để chuyển lưu lượng về nút gốc. Mặc dù việc tìm đơn đường có thể thực hiện đơn giản với độ phức tạp tính toán thấp và sử dụng ít tài nguyên mạng song nó lại có nhược điểm là khi mạng có sự thay đổi (nút hay liên kết bị sự cố) thì lại không đáp ứng nhanh và xét về tổng thể thì lại làm giảm thông lượng mạng tối đa có thể đạt được. Vì vậy, nhiều giao thức định tuyến đa đường đã được nghiên cứu và phát triển để khắc phục những nhược điểm trên [34], [47],[52], [57],[66],[98].

Tuy nhiên, những đặc điểm cố hữu của mạng cảm biến (như giới hạn về năng lượng, năng lực lưu trữ và xử lý thông tin; đường truyền vô tuyến cự ly ngắn dễ bị phading và xuyên nhiễu...) lại đặt ra nhiều thách thức với việc thiết kế giao thức định tuyến đa đường [98],[109].

a) Lợi ích của định tuyến đa đường trong WSN

Bảng 1.1: Những lợi ích của định tuyến đa đường trong WSN

Tin cậy và khả năng chịu lỗi tốt	Ý tưởng cơ bản của việc sử dụng giải pháp định tuyến đa đường trong WSN là để thay thế đường đi của thông tin trong mạng trong trường hợp đường truyền bị lỗi (nút hoặc liên kết bị lỗi) và để việc truyền dữ liệu được tin cậy [52],[57],[66]. Các tuyến đường có thể được sử dụng song hành để tăng tính tin cậy cho mạng thông qua việc truyền các bản sao của gói tin qua nhiều đường khác nhau [34],[47].
Giảm nghẽn, tăng thời gian sống	Việc dàn trải lưu lượng trên nhiều tuyến đường để cân bằng tải sẽ làm giảm nghẽn trên một vài liên kết, đặc biệt với một vài ứng dụng cảm biến có lưu lượng lớn và tránh sự xuất hiện các nút nghẽn cổ chai, đồng thời có thể làm gia tăng thời gian sống của mạng do năng lượng cho việc chuyển tiếp thông tin được dàn trải trên nhiều tuyến đường [108].
Cải thiện QoS	Hỗ trợ chất lượng dịch vụ (QoS) thông qua các thông số như thông lượng, trễ đầu cuối, tỷ lệ truyền dữ liệu thành công là những mục tiêu quan trọng trong việc thiết kế các giao thức định tuyến đa đường cho nhiều loại mạng khác nhau [108]. - Tổng hợp thông lượng: Tách dữ liệu đi tới cùng đích trên nhiều dòng dữ liệu khác nhau trong khi mỗi dòng được định tuyến trên một

	<p>tuyến đường riêng sau đó hợp lại thành thông lượng hiệu dụng. Chiến lược này rất có lợi khi mà nút có nhiều liên kết có băng thông thấp song lại yêu cầu gửi dữ liệu với tốc độ lớn hơn so với khả năng của mỗi liên kết riêng biệt.</p> <p>-Trễ được giảm thiểu trong định tuyến đa đường vì các tuyến dự phòng được xác định ngay trong quá trình khám phá tuyến.</p>
--	--

Kỹ thuật định tuyến đa đường cho thấy tính hiệu quả trong việc cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây, kỹ thuật này giúp tìm ra những con đường thay thế giữa nguồn tin và điểm thu thập thông tin để vượt qua những hạn chế của mạng cảm biến không dây WSN như giới hạn về năng lượng, năng lực lưu trữ và xử lý thông tin [98], [109].

b) Các hoạt động của giao thức định tuyến đa đường trong WSN

Có ba hoạt động cơ bản trong định tuyến đa đường là khám phá tuyến, phân bổ lưu lượng và duy trì tuyến [109] (Bảng 1.2).

Bảng 1.2: Các hoạt động trong giao thức định tuyến đa đường trong WSN [109]

<p><i>Khám phá tuyến</i></p>	<p>Vì truyền dữ liệu trong WSN thường được thực hiện qua kỹ thuật chuyển tiếp dữ liệu đa chặng nên chức năng chính của tiến trình khám phá tuyến là xác định tập các nút trung gian cần chọn để tạo ra một vài tuyến đường từ nút nguồn tới nút thu thập thông tin.</p> <p>Có ba loại tuyến đường hay được xét dựa trên sự giao nhau: (a) Đường không có nút giao nhau [33]; (b) Đường không có chặng giao nhau và (c) Đường có chặng giao nhau [52].</p> <div style="text-align: center;"> <p>(a) (b) (c)</p> </div>
-------------------------------------	---

<p><i>Phân bố lưu lượng</i></p>	<p>Việc phân bố lưu lượng trong định tuyến đa đường cần được tối ưu thông qua điều khiển luồng.</p> <p>-Số lượng đường: Có thể sử dụng một đường và các đường khác dùng để dự phòng hoặc có thể sử dụng đa đường theo kiểu quay vòng, mỗi thời điểm chỉ có một đường truyền tin [52], [57], [66] hoặc đa đường truyền tin cùng thời điểm.</p> <p>- Phân bố lưu lượng: Chiến lược phân bố lưu lượng được dùng để giải quyết cách phân bố dữ liệu cho nhiều đường, có thể chia đều hoặc chia theo tỉ lệ nhất định [108].</p>
<p><i>Duy trì tuyến</i></p>	<p>Trong định tuyến đa đường, việc tái khám phá tuyến đường để duy trì việc truyền dữ liệu có thể được thực hiện khi một trong các tuyến bị lỗi [96], khi tất cả các tuyến đều lỗi [64] hoặc khi một số lượng nhất định tuyến bị lỗi [66].</p>

c) Phân loại giao thức định tuyến đa đường

Với mạng cảm biến thu thập thông tin định kỳ thì mạng thường được phân cụm và đường đi thường được thiết lập qua các nút chủ cụm tới trạm gốc, với mạng cảm biến theo sự kiện thì đường đi bắt nguồn từ nút cảm biến qua các nút trung gian về trạm gốc. Dựa trên việc sử dụng đa đường và phân bố lưu lượng trong mạng, có thể chia các giao thức định tuyến đa đường trong WSN thành hai loại chính là định tuyến thay thế và định tuyến song song. Các giao thức định tuyến song song lại được chia thành định tuyến sử dụng tài nguyên mạng hiệu quả và định tuyến truyền dữ liệu tin cậy [98], [109]. Ngoài ra, các nhà nghiên cứu còn đề xuất một số giao thức định tuyến đa đường có tính chất kết hợp của các loại định tuyến này (Hình 1.5).

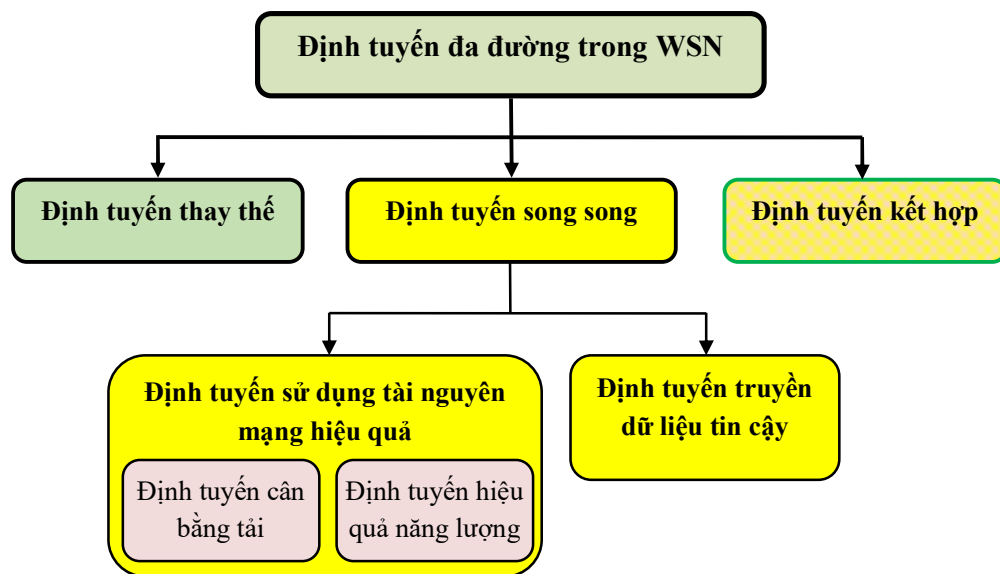
Định tuyến thay thế

Tuyến thay thế được sử dụng thay cho tuyến đường chính khi gặp sự cố. Định tuyến kiểu này chỉ cho một tuyến đường hoạt động ở một thời điểm. Định tuyến

thay thế giúp mạng có thể chấp nhận tuyến lỗi và giảm tần suất định tuyến trong tiến trình phục hồi sau lỗi [52], [57], [66].

Định tuyến song song

Mục đích chính của định tuyến song song nỗ lực khắc phục những hạn chế về tài nguyên của các nút cảm biến giá thành thấp thông qua việc chuyển tiếp dữ liệu đồng thời trên nhiều đường. Loại định tuyến song song được chia thành định tuyến sử dụng tài nguyên mạng hiệu quả, định tuyến truyền dữ liệu tin cậy.



Hình 1.5: Phân loại giao thức định tuyến đa đường [109]

Định tuyến sử dụng tài nguyên mạng hiệu quả

Với những hạn chế của nút cảm biến, ý tưởng ẩn sau sự phát triển của loại định tuyến này là để cân bằng tải lưu lượng và sự sử dụng tài nguyên trên toàn mạng.

Mục đích chính của cân bằng tải là sử dụng tài nguyên mạng sẵn có để tối thiểu nguy cơ nghẽn lưu lượng. Khi một liên kết bị quá tải và gây nghẽn, giao thức định tuyến đa đường có thể được chọn để chuyển lưu lượng qua những tuyến đường thay thế để làm giảm gánh nặng của tuyến đường bị nghẽn. Có thể thực hiện cân

bằng tải qua việc dàn lưu lượng lên nhiều tuyến để làm giảm nghẽn và hiện tượng nghẽn cổ chai [98].

Với tài nguyên năng lượng hạn chế trong mạng cảm biến, một trong những mục tiêu của giao thức định tuyến dạng này là lựa chọn đường tốt nhất để tổng năng lượng tiêu thụ của mạng được giảm thiểu và để tối đa thời gian sống. Định tuyến năng lượng tối thiểu có nhược điểm là các nút sẽ tiêu thụ năng lượng rất khác nhau, những nút trên tuyến đường năng lượng tối thiểu sẽ nhanh chóng cạn kiệt năng lượng và chết sớm trong khi các nút khác thì không tiêu hao nhiều năng lượng. Định tuyến sử dụng tài nguyên mạng hiệu quả rất coi trọng việc nhận thức năng lượng để tránh những nút có năng lượng còn lại thấp và tìm ra những nút có năng lượng cao hơn để chuyển tiếp thông tin hiệu quả [64], [93], [94], [95], [108], [109], [140].

Định tuyến truyền dữ liệu tin cậy

Định tuyến đa đường song song có thể sử dụng để hỗ trợ truyền thông tin cậy qua nhiều liên kết không dây không tin cậy bằng việc đưa thêm dữ liệu dư thừa trong tiến trình truyền dữ liệu. Các giao thức định tuyến đa đường truyền dữ liệu tin cậy sử dụng kỹ thuật sao chép gói, mã khóa hoặc sửa gói kết hợp với kỹ thuật định tuyến đa đường song song để đáp ứng yêu cầu tin cậy cho nhiều ứng dụng khác nhau [34], [47], [62], [64], [84], [91], [92], [109], [142].

Các giao thức định tuyến kết hợp

Một số giao thức định tuyến được đề xuất dựa trên sự kết hợp của định tuyến thay thế với một và/hoặc hai loại định tuyến song song để có thể đạt được nhiều tiêu chí hiệu năng cả về việc sử dụng hiệu quả năng lượng và nâng cao độ tin cậy [33], [60], [85], [119], [147].

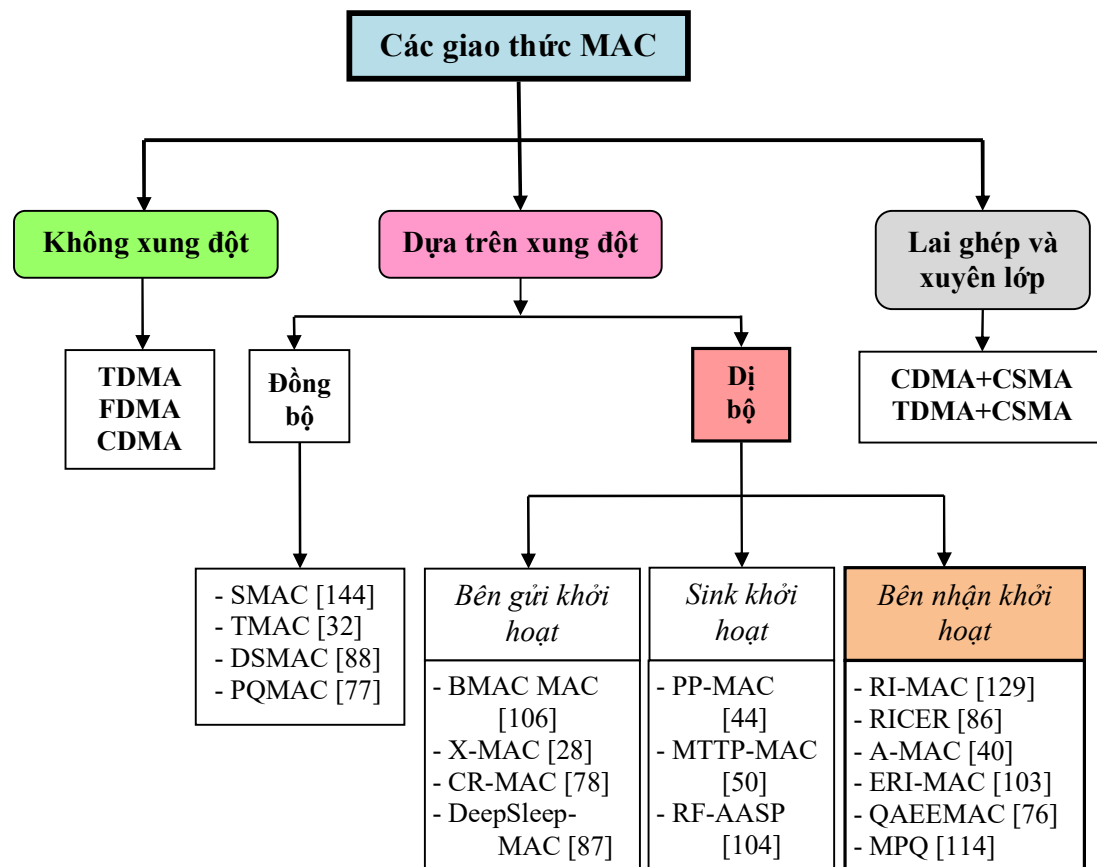
1.1.5 Giao thức MAC trong mạng cảm biến không dây

Trong mạng cảm biến không dây, giao thức điều khiển truy nhập môi trường (Medium Access Control - MAC) chịu trách nhiệm đưa ra những chính sách cho việc truy nhập kênh truyền dữ liệu sử dụng môi trường dùng chung giữa các nút cảm biến [128]. Nhiều nhà nghiên cứu đã phát triển khá nhiều giao thức MAC dựa

trên những mục tiêu cơ bản như tránh xung đột, hiệu quả năng lượng, độ trễ, thông lượng, tin cậy ...

1.1.5.1 Phân loại theo đặc điểm xung đột

Các giao thức MAC cho WSN đa phần đã được khảo sát [37], [100], [115], [121]. Nhìn chung, chúng được phân loại theo những đặc điểm xung đột thành ba loại chính: (1) Giao thức không xung đột, (2) Giao thức dựa trên xung đột, (3) Giao thức lai ghép và xuyên lớp như trong Hình 1.6. Hạn chế cơ bản của MAC vẫn là vấn đề năng lượng bị giới hạn trong WSN.



Hình 1.6: Phân loại các giao thức MAC trong mạng cảm biến không dây (tổng hợp từ [36], [95], [109], [117]).

- i. Các giao thức MAC kiểu không xung đột gán khe thời gian cố định hoặc động cho mỗi nút truyền thông. Do vậy, nút chỉ có thể truy nhập môi trường truyền trong khe thời gian cho phép, điều này giúp tránh được xung đột trong

mạng. Tuy nhiên các nút cảm biến cần thường xuyên trao đổi lịch đồng bộ và điều này làm gia tăng tiêu đề phụ (overhead) [43].

- ii. Các giao thức MAC kiểu dựa trên xung đột tránh yêu cầu đồng bộ trên toàn mạng và tiêu đề phụ bằng cách cho phép các nút truy nhập môi trường một cách ngẫu nhiên [47]. Tuy vậy, cách thức này lại có nguy cơ gây xung đột, nguy cơ này được giảm thiểu bằng việc sử dụng những cơ chế giảm xác suất xuất hiện đồng thời (sử dụng giao thức CSMA tránh xung đột - CSMA/CA). Những giao thức kiểu này lại có thể phân loại thành kiểu đồng bộ và dị bộ [134].
 - Các giao thức MAC kiểu đồng bộ là SMAC [144], TMAC [32] và DSMAC [88]. Với các giao thức loại này, các nút cảm biến sẽ theo một lịch trình ngủ chung trong cụm ảo [61]. PQMAC là giao thức MAC đồng bộ đảm bảo QoS bằng cách xét tới độ ưu tiên của gói tin trong mạng [77]. Tuy nhiên các giao thức loại này yêu cầu đồng bộ cao giữa các nút cảm biến và không hỗ trợ chu kỳ thức ngủ của riêng từng nút, điều này cản trở khả năng thích nghi với những điều kiện động trong các mạng cảm biến.
 - Trong các giao thức MAC kiểu dị bộ, các nút cảm biến có thể ngủ và thức một cách riêng biệt và vì thế không cần phải đồng bộ [38]. Những giao thức này có thể chia tiếp thành 3 loại là bên gửi khởi hoạt (preamble), sink khởi hoạt và bên nhận khởi hoạt (beacon) [121].
 - Các giao thức có bên gửi khởi hoạt là B-MAC [106], X-MAC [29], CR-MAC [78] và DeepSleep-MAC [87]. Nút gửi khởi hoạt truyền thông và truyền preamble (thông tin khởi hoạt) để thông báo nhu cầu truyền thông. Sau đó, nút nhận sẽ thức dậy và nhận lấy thông tin preamble này. Tiếp theo, nó sẽ trả lời bằng bản tin xác nhận (ACK) và chờ khung dữ liệu đến.
 - Các giao thức có sink khởi hoạt là PP-MAC [44], MTTP-MAC [50] và RF-AASP [104]. Ở những giao thức này, sink phát quảng bá một khung tin tới các nút gửi để nút gửi bắt đầu truyền dữ liệu. RF-AASP hỗ trợ QoS và đạt được hiệu quả năng lượng cao hơn cho mạng. Tuy nhiên nó không xem xét mức độ ưu tiên của gói tin dữ liệu. Thêm nữa, các giao

thức do sink khởi hoạt yêu cầu có sự điều phối tập trung để thiết lập thứ tự truyền.

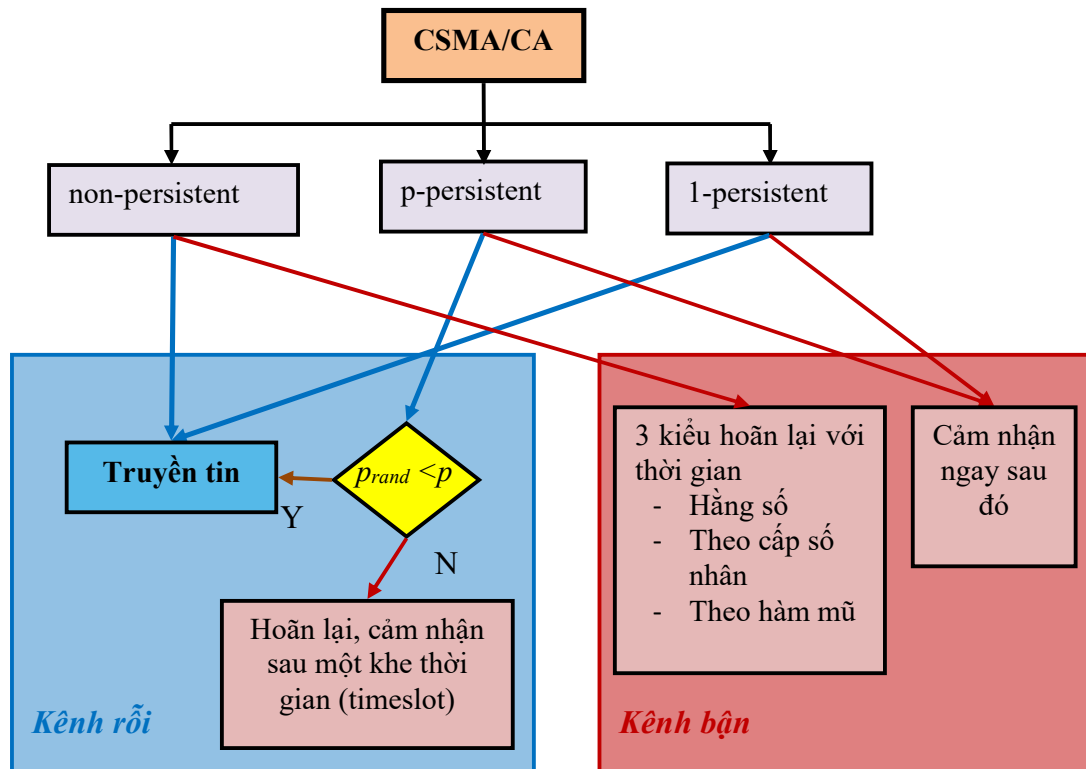
- Các giao thức có bên nhận khởi hoạt là RI-MAC [129], RICER [86], A-MAC [40], ERI-MAC [103], QAEEMAC [76] và MPQ [114]. Trong những giao thức này, bên nhận sẽ gửi beacon cho biết nó sẵn sàng nhận dữ liệu và cũng để báo cho những nút gửi trù định được gửi dữ liệu.

Trong các giao thức MAC dị bộ, các giao thức do bên nhận khởi hoạt có hiệu năng tốt hơn so với các giao thức do bên gửi khởi hoạt [45]. Trong các giao thức do bên gửi khởi hoạt thì nút gửi cần duy trì preamble bằng khoảng thời gian ngủ của bên thu. Vì thế, nó có thể chiếm giữ môi trường truyền với thời gian lâu hơn cả thời gian cần truyền dữ liệu thực sự. Ngoài ra, preamble quá dài sẽ ngăn chặn các nút gửi khác truyền gói dữ liệu của nó. Vì thế, các gói dữ liệu có thể phải chờ khá lâu và điều này có thể làm cho thông lượng mạng giảm đi [129].

1.1.5.2 Cơ chế đa truy nhập cảm nhận sóng mang CSMA

CSMA là một thành phần của giao thức điều khiển truy nhập phương tiện MAC được triển khai nhiều nhất cho phép nhiều thiết bị truyền thông chia sẻ một kênh truyền chung, ở giao thức này nút có dữ liệu để gửi sẽ cảm nhận/lắng nghe môi trường truyền trước khi quyết định gửi khung dữ liệu. Nếu môi trường rỗi thì bắt đầu truyền khung, nếu môi trường bận thì trì hoãn việc truyền. CSMA có thể làm giảm xác suất xung đột song nó không thể loại bỏ được hoàn toàn xung đột do có trễ truyền lan từ nút gửi đến nút nhận và do có thể có nhiều nút gửi dữ liệu nằm rải rác trong vùng phủ của nhau.

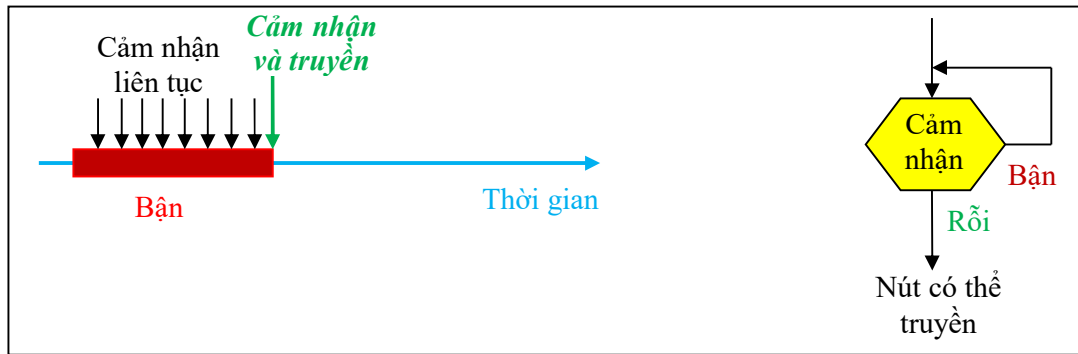
Có ba kiểu CSMA là (1) theo dõi không kiên trì (non-persistent CSMA), (2) theo dõi kiên trì với xác suất p (p -persistent CSMA) và (3) theo dõi kiên trì (1-persistent CSMA) [48], [79]. Hình 1.7 và 1.8 cho thấy sự khác nhau cơ bản của các kiểu hoạt động này, đó là chính sách gửi gói khi cảm nhận là kênh truyền rỗi hay bận.



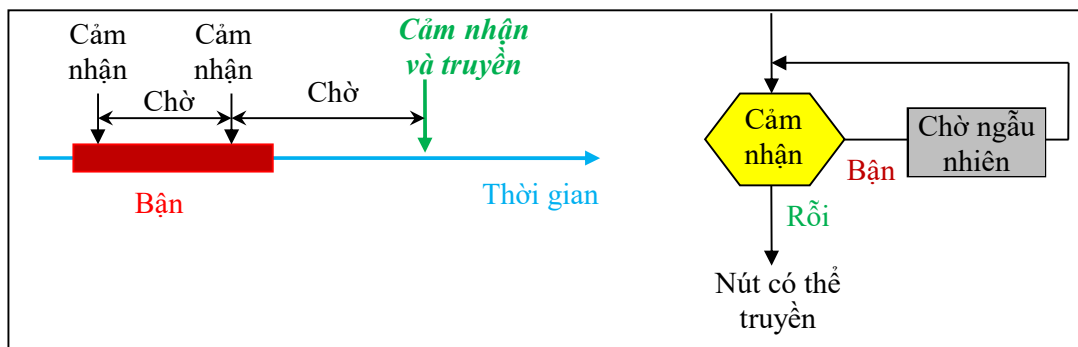
Hình 1.7: Mô tả hoạt động trong CSMA/CA

Với non-persistent CSMA thì nút sẽ gửi khung dữ liệu ngay khi cảm nhận là kênh truyền rỗi, còn nếu cảm nhận là kênh truyền bận thì nút sẽ trì hoãn việc gửi gói theo thời gian ngẫu nhiên và tùy theo phân bố trễ nhất định. Kiểu hoạt động này có ưu điểm là trễ nhỏ nếu ít có xung đột, song khi có nhiều nút cùng truyền thì dễ xung đột. Khi đã xảy ra xung đột thì việc truyền lại của hai hay nhiều nút sẽ khác nhau do thời gian chờ để truyền lại thường là khác nhau. Song việc gửi gói sẽ có thể bị trì hoãn gây trễ lớn làm giảm hiệu năng mạng.

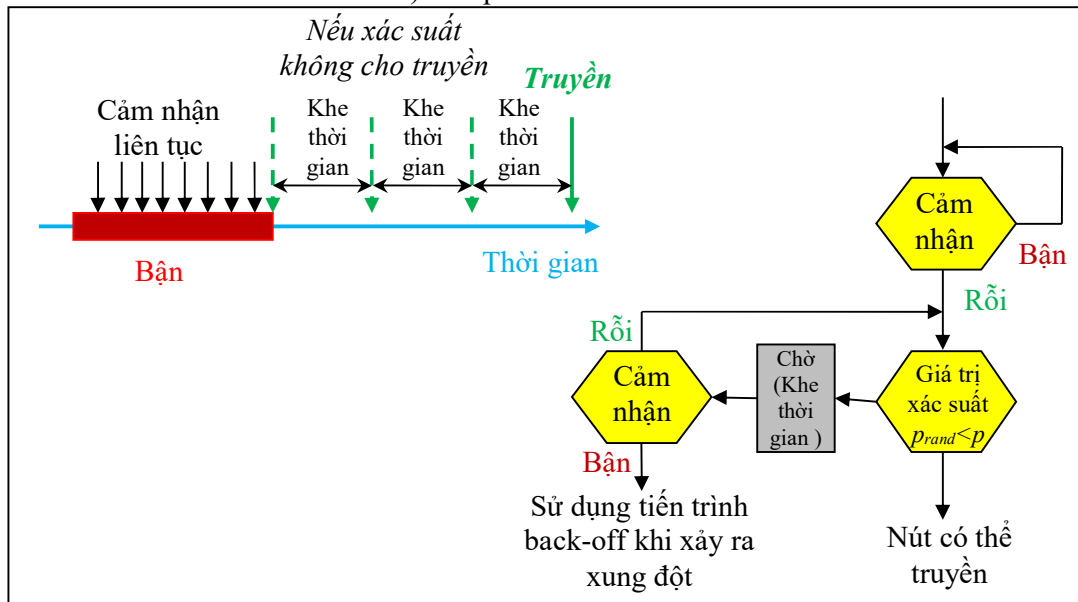
Với 1-persistent CSMA thì nút sẽ gửi khung ngay khi cảm nhận là kênh truyền rỗi, còn cảm nhận kênh là bận thì nó sẽ tiếp tục cảm nhận kênh cho tới khi môi trường rỗi là truyền tin luôn (xác suất truyền bằng 1). Kiểu hoạt động này có ưu điểm là trễ nhỏ nếu xác suất xung đột nhỏ, tuy nhiên khi có xung đột thì sẽ gây xung đột liên tiếp sau này do nút cứ cảm nhận thấy môi trường bận thì lại cảm nhận tiếp, thấy rỗi là gửi khung và lại dễ gây xung đột.



a) 1-persistent CSMA



b) non-persistent CSMA



c) p-persistent CSMA

Hình 1.8: Sơ đồ hoạt động của ba kiểu truyền CSMA [48]

Với p-persistent CSMA khi cảm nhận kênh là rỗi thì khung sẽ được gửi với xác suất là p, còn cảm nhận kênh là bận thì nó sẽ tiếp tục cảm nhận kênh cho tới khi


cảm nhận được môi trường truyền rồi rồi gửi khung với xác suất p . Kiểu hoạt động này có ưu điểm là khi cảm nhận kênh rồi thì chỉ có một số lượng nút được truyền (xác suất là p), như vậy sẽ tránh được xung đột khi có nhiều nút đồng thời muốn gửi gói, các gói cảm nhận môi trường rồi nhưng không truyền (với xác suất còn lại $1-p$) thì phải chờ thêm một khoảng thời gian tương đương hoặc lớn hơn thời gian lan truyền tối đa rồi cảm nhận lại kênh, tuy nhiên ở những thời điểm ít gói để gửi thì kiểu hoạt động này sẽ gây trễ nhất định.

Như vậy, kiểu truyền p-persistent kết hợp được hai ưu điểm của hai kiểu truyền trên, nó giảm xác suất xung đột và tăng hiệu quả truyền thông kể cả khi có nhiều nút cùng muốn truyền gói dữ liệu. Do đó kiểu truyền này rất phù hợp với mạng cảm biến không dây đa sự kiện.

1.1.6 Những yêu cầu chất lượng đặc biệt của mạng cảm biến không dây đa sự kiện

Ngày nay có khá nhiều ứng dụng cảm biến đa sự kiện, mỗi thiết bị cảm biến cho các ứng dụng này có thể chứa đơn hoặc đa cảm biến và có thể có những yêu cầu chất lượng khác nhau tùy vào ứng dụng. Phần này giới thiệu một số mạng cảm biến đa sự kiện thường gặp với những yêu cầu truyền thông khác nhau tùy thuộc ứng dụng và mức độ cấp thiết của sự kiện.

Bảng 1.3: Các cấp độ cảnh báo cháy rừng [156]

<i>Cấp độ</i>	<i>Tên cấp độ</i>	<i>Mô tả</i>	
1	Thấp	Ít có khả năng cháy rừng	
2	Trung bình	Có khả năng cháy rừng	
3	Cao	Có khả năng dễ dàng cháy rừng	
4	Nguy hiểm	Rất dễ xảy ra cháy rừng lớn	
5	Cấp cực kỳ nguy hiểm	Nguy cơ cháy lớn, tốc độ lan rất nhanh	

- Mạng cảm biến cảnh báo cháy rừng sẽ có yêu cầu truyền thông khác nhau của 5 cấp độ cảnh báo [156]. Dựa trên những thông tin cảm biến đo được như độ ẩm, tốc độ gió, nồng độ CO, CO₂ ... mà có thể có được những thông tin dự báo tổng hợp về cấp độ cháy rừng. Bảng 1.1 mô tả các cấp độ cảnh báo để có thể thấy rõ yêu cầu từ ứng dụng đối với mạng cảm biến.
 - Cấp 1: Ít có khả năng cháy rừng nên tần suất gửi thông tin nhỏ nhưng đều, mang tính chất theo dõi định kỳ. Thông tin này không quá cấp thiết nên không yêu cầu cao về tính đáp ứng và độ chính xác.
 - Cấp 2: Có khả năng cháy rừng nhưng nguy cơ cháy rừng còn thấp nên tần suất gửi thông tin về sự kiện này cũng sẽ ít hơn. Thông tin truyền về không quá cấp thiết, ngưỡng cảnh báo nhỏ nên không yêu cầu cao về tính đáp ứng và độ chính xác.
 - Cấp 3: Có khả năng dễ dàng cháy rừng nên tần suất gửi thông tin cần cao hơn hai cấp trên.
 - Cấp 4: Rất dễ xảy ra cháy rừng lớn, tần suất gửi thông tin về sự kiện này cao hơn ba cấp trên và cần có yêu cầu cao hơn về tính đáp ứng cũng như độ chính xác.
 - Cấp 5: Cấp cảnh báo cao nhất, có nguy cơ xảy ra cháy lớn và lan nhanh, vì thế tần suất gửi thông tin về nhiều, cần đáp ứng nhanh và chính xác nhất.
- Công nghiệp hầm mỏ: Trong công nghiệp hầm mỏ thì mạng cảm biến sẽ hỗ trợ rất đắc lực cho con người và máy móc lao động, hoạt động hiệu quả và an toàn. Sự kiện cảm biến cần giám sát và theo dõi là sự cố hỏa hoạn, rò rỉ khí độc, sập hầm thông qua những thông tin cảm nhận như nhiệt độ, nồng độ khí O₂, CH₄, H₂S, tăng áp suất đột ngột... Nhiều sự kiện có thể cần được báo cáo với tốc độ khác nhau khi giám sát đồng thời. Khi thiết kế mạng cần truyền thông tin cậy, sự kiện nghiêm trọng như rò rỉ khí độc, sập hầm ... cần truyền nhanh hơn so với các thông tin giám sát thông thường [65], [152].

- Nông nghiệp: Rất nhiều ứng dụng của mạng cảm biến được triển khai trong các lĩnh vực nông nghiệp chính xác (cần đo nhiệt độ, độ ẩm trong khí quyển và trong đất, khí CO ... để có những điều khiển hoạt động kịp thời [151], nhà thủy canh cần có hệ thống đo cường độ ánh sáng, độ ẩm, nhiệt độ, độ pH , H_2 ... để kịp có những hành động ứng phó với sự thay đổi của môi trường làm ảnh hưởng tới vụ mùa và để đạt điều kiện phát triển tối ưu cho cây trồng, ở Việt nam còn có tình trạng ngập lụt và xâm nhập mặn ở nhiều vùng nông nghiệp nên cũng cần phát triển các hệ thống cảnh báo sớm sử dụng cảm biến ở nhiều cấp độ ... Với các ứng dụng trong nông nghiệp như trên sẽ có nhiều mức độ cảnh báo của một hoặc vài thông tin cảm biến kết hợp có yêu cầu đáp ứng khác nhau tùy thuộc vào mức độ nghiêm trọng của thông tin.
- Giáo dục: Nhà trẻ thông minh là một ứng dụng ngày càng phổ biến. Mạng cảm biến cho lĩnh vực này kết nối các thiết bị cảm biến gắn trong nhà trẻ, sân chơi, gắn ở các đồ chơi thông minh và các trang thiết bị học tập như bàn, bảng ... cần phải truyền tin với lưu lượng dữ liệu đa dạng (quay phim, ghi âm, cảm biến phát hiện đột nhập, đo cường độ ánh sáng, nhiệt độ ...), nhận dạng trẻ và nhận thức vị trí trẻ [126]. Với nhiều yêu cầu giám sát, theo dõi và định vị, mạng cảm biến truyền thông trong nhà trẻ cũng cần có những mức độ cảnh báo khác nhau với độ ưu tiên khác nhau.
- Y tế: Ứng dụng giám sát sức khỏe con người ngày càng thông minh và tự động hơn [59]. Ứng dụng này có yêu cầu cao về chất lượng giám sát, tính an toàn và có nhiều mức cảnh báo ứng với mức độ nghiêm trọng của người bệnh, đồng thời cũng kéo theo lượng dữ liệu thay đổi theo các mức độ.

Bảng 1.4 là tổng hợp những yêu cầu hiệu năng của một số ứng dụng mạng cảm biến đa sự kiện điển hình.

Bảng 1.4: Một số ứng dụng cảm biến đa sự kiện và yêu cầu ứng dụng

Tên ứng dụng	Sự kiện	Yêu cầu ứng dụng	Các tham số cải thiện hiệu năng mạng
Cảnh báo cháy rừng [156]	5 cấp độ cảnh báo theo khả năng cháy rừng và nguy cơ lan rộng...	<ul style="list-style-type: none"> Cần có độ ưu tiên với cấp độ cháy rừng cao và nguy cơ lan rộng nhanh. 	<ul style="list-style-type: none"> Năng lượng tiêu thụ Thời gian trễ Khả năng chịu lỗi
Mạng cảm biến cho hầm mỏ [65], [152]	Hỏa hoạn, rò rỉ khí độc, sập hầm...	<ul style="list-style-type: none"> Nhiều sự kiện có thể cần được báo cáo với tốc độ khác nhau khi giám sát đồng thời. 	<ul style="list-style-type: none"> Độ tin cậy Thời gian trễ (sự kiện nghiêm trọng cần truyền nhanh).
Nông nghiệp chính xác, nhà kính [151]	Khô hạn, ngập lụt, xâm nhập mặn, nóng lạnh, trực trực hệ thống ...	<ul style="list-style-type: none"> Cần phân biệt được sự kiện cấp bách và sự kiện cảnh báo. 	<ul style="list-style-type: none"> Độ tin cậy Thời gian trễ
Nhà trẻ thông minh [126]	Đột nhập, hỏa hoạn, hoạt động sai chức năng, an toàn ...	<ul style="list-style-type: none"> Sự kiện cấp bách cần được truyền thông tức thời (hỏa hoạn). Băng thông với yêu cầu video sẽ cao hơn so với giám sát vị trí thông thường. 	<ul style="list-style-type: none"> Băng thông rộng (với video streaming) Thời gian trễ Độ tin cậy
Theo dõi sức khỏe người bệnh [59]	Đột quy, mất nhịp tim, khó thở, khó vận động, sốt ...	<ul style="list-style-type: none"> Sự kiện trầm trọng cần được cảnh báo tức thời và với lưu lượng liên tục 	<ul style="list-style-type: none"> Độ tin cậy Băng thông linh hoạt Thời gian trễ

1.2 CÁC THAM SỐ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY

Hiệu năng (Performance) là khái niệm hướng đến cái cuối cùng là đánh giá mức độ thực hiện các mục tiêu, mục đích đã được định trước cho một hoạt động hoặc một chương trình đã được thực hiện [63]. Trong lĩnh vực kỹ thuật, hiệu năng thường xuyên được sử dụng để đánh giá mức độ hay hiệu quả về mặt thực hiện của một hệ thống, chương trình, hoạt động kỹ thuật nào đó [63].

Hiệu năng mạng (Network Performance) biểu thị việc đánh giá mạng hoạt động tốt như thế nào: thời gian đáp ứng nhanh (ít trễ), độ chính xác cao, tiết kiệm năng lượng tiêu thụ, tiết kiệm trang thiết bị, thời gian sống kéo dài ...

Giới hạn về hiệu năng của WSN đa sự kiện cũng giống như của WSN thông thường, chủ yếu do hạn chế về tài nguyên (năng lượng, bộ nhớ, khả năng xử lý, cự ly truyền dẫn của các nút có giới hạn) và môi trường không dây nhiều biến động trong trường cảm biến. Trong WSN, hiệu năng xoay quanh vấn đề đánh giá hiệu quả truyền thông, vì mạng cảm biến không dây bị hạn chế về mặt năng lượng nên rất nhiều tham số đánh giá hiệu năng liên quan tới việc phải tiết kiệm năng lượng và sử dụng năng lượng hiệu quả, khi đó thời gian sống của mạng sẽ được kéo dài [15]. Tham số thời gian sống là một trong những tham số được quan tâm hàng đầu với các nhà nghiên cứu về WSN thông thường, tuy nhiên với những mạng WSN đa sự kiện còn nhiều tham số được ưu tiên đánh giá như thời gian trễ, tỷ lệ mất gói ... tùy theo yêu cầu của từng sự kiện khác nhau.

1.2.1 Hiệu quả sử dụng năng lượng

Sử dụng hiệu quả năng lượng là một trong những tiêu chí hàng đầu của mạng cảm biến không dây [15]. Trong thời kỳ 2000-2010 yếu tố sử dụng tiết kiệm năng lượng được đặt lên hàng đầu trong việc thiết kế cảm biến và những giao thức trong mạng này kéo theo những kỹ thuật được áp dụng để kéo dài thời gian sống trên năng lượng hữu hạn của cảm biến. Trong một thập kỷ trở lại đây, từ khi kỹ thuật tái nạp năng lượng được hiện thực hóa với mạng cảm biến không dây [25], [31], [56], [67], vấn đề sử dụng hiệu quả năng lượng còn được đánh giá theo mức tiêu thụ năng lượng trung bình [115], [120].

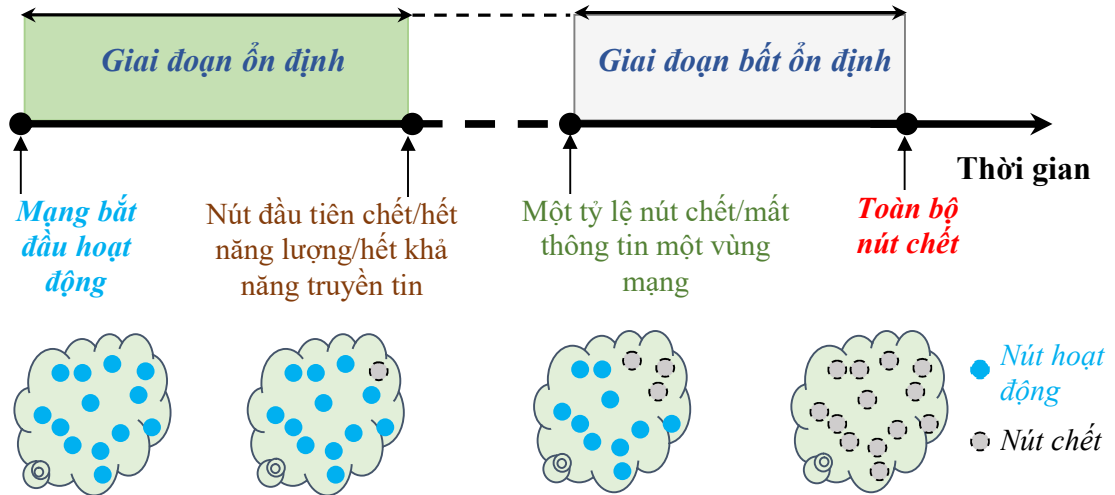
1.2.1.1 Thời gian sống

Thời gian sống của mạng cảm biến định nghĩa khoảng thời gian từ thời điểm khởi đầu mạng cho tới khi có nút hoặc vùng hoặc toàn mạng không còn hoạt động được. Khái niệm này được định nghĩa theo nhiều cách tiếp cận khác nhau, thường phụ thuộc vào ứng dụng và ngữ cảnh cảm biến [14], [27], [39], [42], [54], [89], [122], [141], [146] như sau:

- (1) Khoảng thời gian mà mạng trong trạng thái hoạt động. Nói cách khác, thời gian sống của mạng được định nghĩa là thời gian hoạt động của mạng trong đó mạng có thể thực hiện được nhiệm vụ của nó.
- (2) Khoảng thời gian tối đa trong đó những cảm biến có khả năng giám sát hiện tượng cần quan tâm.
- (3) Khoảng thời gian mạng cảm biến không dây có thể hoạt động với toàn bộ chức năng (fully operative). Một trong những định nghĩa hay được dùng là khoảng thời gian từ khi mạng hoạt động tới khi nút đầu tiên hết năng lượng để gửi được một gói tin vì mất một nút có nghĩa là mạng có thể mất một vài chức năng. Song, cũng có thể sử dụng một định nghĩa khác đó là thời gian tới khi vài nút (một nhóm nút/một tỷ lệ nút) chết hoặc hết năng lượng pin, cho tới khi những nút mạng khác có thể được dùng để thu thập thông tin yêu cầu hay định tuyến bản tin mạng thông tin đó tới đích của nó.
- (4) Tham số này được dùng để phản ánh khoảng thời gian từ khi bắt đầu triển khai mạng tới khi bị mất thông tin của một vùng mạng. Hiếm khi với các ứng dụng không cần độ chính xác cao thì thời gian này được tính tới khi tất cả các nút đều chết /mất thông tin trên toàn mạng [123].

Liên quan đến thời gian sống này, có hai giai đoạn cụ thể hay được xét [123]:

- Giai đoạn ổn định của mạng: Đây là khoảng thời gian từ khi mạng cảm biến bắt đầu hoạt động tới khi một nút/vùng phủ đầu tiên bị chết/mất liên lạc.
- Giai đoạn không ổn định: Là khoảng thời gian tính từ khi có nút/vùng phủ đầu tiên chết/mất liên lạc đến khi tất cả các nút đều chết.



Hình 1.9: Các khái niệm liên quan tới thời gian sống trong WSN

1.2.1.2 Năng lượng cho việc truyền một đơn vị dữ liệu

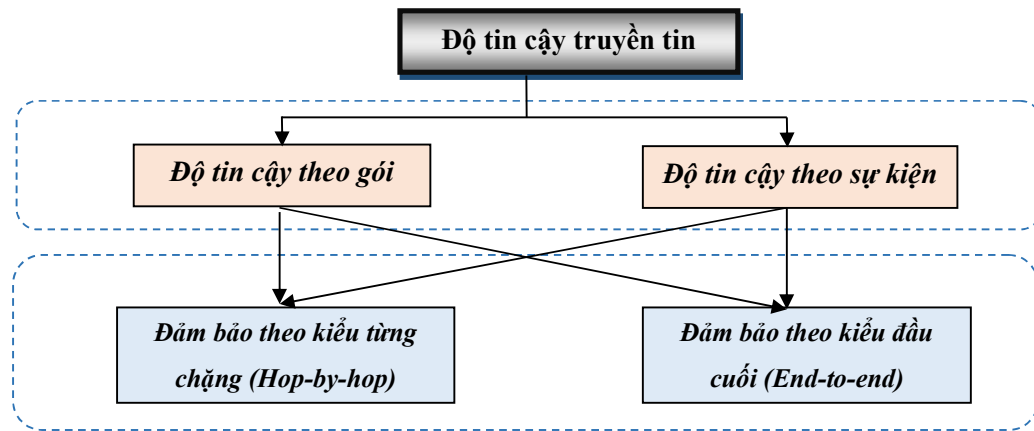
Hiệu quả tiêu thụ năng lượng có thể được xác định là tỷ lệ nghịch của năng lượng tiêu thụ trung bình cho việc truyền thành công một đơn vị dữ liệu. Như vậy năng lượng tiêu thụ trung bình cho việc truyền một đơn vị dữ liệu càng ít thì hiệu quả tiêu thụ càng cao [115], [120].

1.2.2 Trễ gói tin

Thời gian trễ (delay/latency): Trong những bối cảnh khác nhau và trong những kiểu mạng khác nhau thì thời gian trễ sẽ được tính khác nhau. Với mạng cảm biến không dây định hướng sự kiện, thời gian trễ là khoảng thời gian gửi tin từ nguồn (nút cảm biến phát hiện sự kiện) tới nút đích (nút sink) [130], [143]. Thời gian trễ còn được tính là tổng thời gian từ khi phát hiện sự kiện đến khi hệ thống nắm bắt được và xử lý, trả về đáp ứng. Khi thời gian trễ càng nhỏ thì chất lượng truyền thông càng tốt. Thời gian trễ lớn có thể do nhiều nguyên nhân như chất lượng đường truyền không tốt hoặc do tắc nghẽn. Với các ứng dụng tương tác còn có yêu cầu cao về chất lượng và trễ để đảm bảo tính thời gian thực [15], [17], [41].

1.2.3 Độ tin cậy

Có nhiều mức độ tin cậy khác nhau được sử dụng trong WSN để đánh giá hiệu năng mạng như độ tin cậy theo gói hay sự kiện, độ tin cậy trên từng chặng hoặc từ đầu đến cuối ... [36], [46], [95], [130].



Hình 1.10: Phân loại khái niệm độ tin cậy truyền tin trong WSN [95]

Độ tin cậy theo gói hay độ tin cậy theo sự kiện liên quan tới việc cần có bao nhiêu thông tin để sink xác nhận được là xuất hiện sự kiện nào đó trong trường cảm biến. Truyền gói tin cậy yêu cầu toàn bộ gói mang dữ liệu cảm biến từ các nút cảm biến phải được truyền tin cậy tới sink. Trong khi đó truyền sự kiện tin cậy chỉ yêu cầu sink có đủ thông tin để chắc chắn biết được có sự kiện xảy ra trong mạng thay vì phải nhận được toàn bộ gói mang thông tin cảm nhận. Có thể đánh giá độ tin cậy theo gói thông qua tham số Tỷ lệ gói truyền thành công PSR hoặc Tỷ lệ lỗi gói PER, tỷ lệ PER thường được coi là tỷ lệ nghịch với độ tin cậy của việc truyền tin trong mạng. Còn với độ tin cậy theo sự kiện thì việc đánh giá còn phụ thuộc vào đặc điểm của ứng dụng.

Việc khôi phục thành công một gói tin hoặc một sự kiện mang thông tin nào đó có thể thực hiện một cách tin cậy trên từng chặng hoặc từ đầu đến cuối (hop-by-hop or end-to-end). Với kiểu từng chặng, chặng kế tiếp chịu trách nhiệm đảm bảo truyền thông tin tin cậy tới đích. Trong khi đó ở mức độ tin cậy từ đầu đến cuối, chỉ có điểm đầu và cuối (nguồn và sink) là chịu trách nhiệm đảm bảo việc truyền thành

công thông tin. Để đạt được độ tin cậy theo gói hoặc sự kiện trong việc khôi phục thông tin bị mất ở mức độ từng chặng hay từ đầu đến cuối có thể sử dụng việc tái truyền hoặc cơ chế dự phòng.

Việc tái truyền có thể thực hiện đơn giản bằng việc truyền lại thông tin bị mất, có thể thực hiện từng chặng hoặc dựa trên đầu cuối. Việc truyền lại theo kiểu từng chặng cho phép nút trung gian thực hiện việc truyền lại thông tin mất bằng cách đệm gói trong bộ đệm cục bộ. Việc truyền lại theo kiểu đầu cuối chỉ yêu cầu nút nguồn tạo gói tin và gửi lại gói tin bị mất.

Trong cơ chế dự phòng thông tin, thông tin dư thừa được bổ sung thêm vào dữ liệu gốc và cho phép bên thu khôi phục được thông tin bị mất hoặc có thể thực hiện việc sao chép để gửi lặp gói tin/đoạn tin. Cũng như giải pháp tái truyền, truyền tin cậy dựa trên dự phòng có thể được thực hiện trên nền tảng từng chặng hoặc từ đầu đến cuối.

1.3 CÁC TIẾP CẬN LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU

1.3.1 Phân tích, đánh giá các tiếp cận ở Việt Nam

Ở Việt Nam, theo như tìm hiểu của nghiên cứu sinh, số lượng các kết quả nghiên cứu về các vấn đề liên quan đến cảm biến và mạng cảm biến đa sự kiện còn rất hạn chế. Dưới đây là những nghiên cứu điển hình đã có kết quả công bố:

- Thiết kế chế tạo cảm biến, triển khai mạng cảm biến có dây hoặc không dây đơn chặng: Viện Khoa học Vật Liệu – Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam [2]; Học viện Công nghệ Bru chính Viễn thông [3], Trường Đại học Bách khoa Hà Nội [5]; Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội [11]; Viện nghiên cứu điện tử, tin học, tự động hóa – Bộ công thương [1], Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An [9], Đại học Công nghiệp Hà Nội [4], Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam [7] ...
- Với cảm biến không dây đa chặng, các nghiên cứu mới dừng lại ở việc tìm hiểu nguyên lý, xây dựng mô phỏng và khả năng ứng dụng ở Việt Nam, xây dựng giao thức định tuyến phân cụm đa chặng hướng theo sự kiện và cải thiện hiệu

năng mạng như nhóm các tác giả thuộc Viện CNTT& TT và Viện Điện tử-Viễn thông Trường Đại học Bách khoa Hà Nội [10], [132], [136], Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà nội [6], thực nghiệm ở Đại học Thái Nguyên [8]...

Cho tới nay chưa có nghiên cứu nào đáp ứng và cải thiện đồng thời nhiều tham số hiệu năng cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện.

1.3.2 Phân tích, đánh giá các tiếp cận trên thế giới

Trên thế giới, mạng cảm biến không dây WSN là một lĩnh vực nghiên cứu quan trọng do khả năng sử dụng và lĩnh vực ứng dụng rộng khắp, đã có nghiên cứu nổi bật chung về mạng này [15] và nhiều nghiên cứu liên quan tới việc cải thiện hiệu năng WSN như kéo dài thời gian sống, tiết kiệm năng lượng cũng như để đạt được những tiêu chí về mật gói, độ phủ, trễ thông tin trong mạng [15], [17], [[20], [23], [58], [75], [89], [105], [110],[123],[125]... Tuy nhiên, các nghiên cứu mới chỉ dừng ở việc đáp ứng một hoặc hai yêu cầu hiệu năng đơn lẻ hoặc chỉ đáp ứng được một tiêu chí về chất lượng ở nhiều cấp độ ưu tiên khác nhau như các kỹ thuật nén và tổng hợp dữ liệu [110], [125], kỹ thuật phân cụm [75], các giao thức lớp MAC [[20], kỹ thuật định tuyến hiệu quả năng lượng [17], [105], kỹ thuật cân bằng tải [137], kỹ thuật định tuyến đa đường đảm bảo độ tin cậy [98], [109], sử dụng kỹ thuật hàng đợi đảm bảo độ ưu tiên sự kiện trong mạng [24], [68], [82], [101], [118]... Theo cách tiếp cận lớp chức năng, có thể liệt kê một số giải pháp như trong Bảng 1.5.

Bảng 1.5: Các giải pháp cải thiện hiệu năng WSN theo cách tiếp cận lớp chức năng

<p><i>Lớp ứng dụng</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sử dụng các phần mềm ứng dụng khác nhau được xây dựng phù hợp với từng loại ứng dụng. Trong lớp ứng dụng có một số giao thức quan trọng có thể sử dụng trong nút cảm biến như giao thức quản lý mạng cảm biến (SMP), giao thức quảng bá dữ liệu và chỉ định nhiệm vụ cho từng cảm biến (TADAP), giao thức phân phối dữ liệu và truy vấn cảm biến (SQDDP). Thông tin từ cảm biến về trạm gốc có thể được nén tại nút và tổng hợp/nén trong quá trình truyền thông [125] để tiết kiệm năng lượng, kéo dài thời gian sống và phần nào bảo mật được thông tin.
----------------------------	--

<i>Lớp truyền tải</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Giao thức lớp truyền tải giữa trạm gốc với người dùng (nút quản lý nhiệm vụ) có thể là giao thức UDP hay TCP thông qua internet hoặc vệ tinh. Còn giao tiếp giữa trạm gốc và các nút cảm biến yêu cầu các giao thức kiểu UDP để tiết kiệm bộ nhớ, giảm công suất tiêu thụ, nhưng cũng phải đảm bảo truyền thông tin cậy kiểu TCP như CODA [138] hay ESRT [13] ...
<i>Lớp mạng</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Các giao thức định tuyến được thiết kế hướng tới sử dụng tiết kiệm và tối ưu năng lượng: ứng dụng kỹ thuật cân bằng tải để dàn đều năng lượng tiêu thụ trong mạng và kéo dài thời gian sống [65], [117], sử dụng các phương pháp định tuyến đa đường [36], đa chặng để tăng độ tin cậy và khả năng chịu lỗi cũng như giảm nghẽn và giảm trễ cho việc truyền tin tới đích. Các cảm biến có thể được phân chia thành các cụm để giảm năng lượng truyền thông trực tiếp từ cảm biến về trạm gốc [58], [75] và các cụm có thể được tái cấu trúc sau mỗi chu kỳ nhất định.
<i>Lớp liên kết dữ liệu</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Giao thức điều khiển truy nhập môi trường (MAC) phải xét đến vấn đề năng lượng và phải có khả năng tối thiểu hoá việc va chạm với thông tin quảng bá của các nút lân cận [77], [88], [100]. Các cảm biến được phân khe thời gian trong các cụm với mạng phân cấp để tránh va chạm thông tin và tiết kiệm năng lượng. Ngoài ra, các cảm biến có thể hợp tác để chuyển tiếp dữ liệu [144].
<i>Lớp vật lý</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Các thiết bị được chế tạo nhỏ gọn với các vi mạch cảm biến tiêu thụ ít năng lượng, có dung lượng nhỏ. Các cảm biến sử dụng các mã ngắn phù hợp với thông tin cảm biến, có thể sử dụng mã khóa ngắn để bảo vệ tính an toàn cho thông tin. Có chế độ thức ngủ hợp lý để tiết kiệm năng lượng [32], [144].

Ngoài ra, còn có một số tiếp cận theo giải pháp xuyên lớp chức năng: định tuyến sử dụng thông tin chất lượng đường truyền [36]; lập lịch và phân loại gói theo độ ưu tiên hoặc theo tính khẩn cấp của sự kiện [24], [68], [82], [118].

Tuy nhiên với những nghiên cứu liên quan tới mạng cảm biến đa sự kiện đa yêu cầu về QoS thì vẫn còn khá ít và có nhiều hạn chế [51], [65], [76], [115], [116], [130]. Những nghiên cứu đi trước này mới chỉ đáp ứng được một vài yêu cầu về

chất lượng về trễ, độ tin cậy và/hoặc sử dụng hiệu quả năng lượng của mạng, song hiếm khi giải quyết được nhiều yêu cầu khác biệt cùng xuất hiện trong mạng.

Qua khảo sát, nghiên cứu sinh thấy có ba hướng tiếp cận chính để giải quyết bài toán cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện trước đây, đó là giải pháp sử dụng giao thức định tuyến đa đường linh hoạt, giải pháp sử dụng hàng đợi ưu tiên (kết hợp kỹ thuật lập lịch và phân loại gói) và giải pháp ưu tiên ở lớp MAC.

1.3.2.1 Hạn chế trong các nghiên cứu về giao thức định tuyến

Cho tới nay, đã có nhiều giao thức định tuyến trong WSN được thiết kế theo giải pháp đơn đường và đa đường và đã giúp mạng hoạt động hiệu quả: Tăng độ tin cậy và khả năng chịu lỗi, giảm nghẽn, tăng thời gian sống. Ngoài ra, mạng cảm biến không dây đa sự kiện còn nhiều yêu cầu khác về đảm bảo chất lượng cho nhiều sự kiện đồng thời. Tuy nhiên mới có một số ít nghiên cứu về định tuyến giải quyết yêu cầu về nhiều loại sự kiện trong mạng cảm biến không dây [34], [130], [148].

Hạn chế của các giải pháp đưa ra là chưa xét tới nhiều hơn hai loại sự kiện trong mạng đa sự kiện xuất hiện đồng thời. Một số giải pháp chỉ tập trung vào giải quyết một hay hai yêu cầu về QoS như giảm trễ, tăng độ tin cậy và kéo dài thời gian sống nên sẽ có hạn chế vì đáp ứng được yêu cầu này thì sẽ khó đáp ứng được yêu cầu khác. *Vì thế vẫn cần có giải pháp kết hợp để đạt được đồng thời nhiều yêu cầu QoS cho mạng đa sự kiện.*

1.3.2.2 Hạn chế trong các nghiên cứu sử dụng hàng đợi ưu tiên

Đã có một vài nghiên cứu đảm bảo hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện đề xuất giải pháp lập lịch và phân loại gói theo độ ưu tiên hoặc theo tính khẩn cấp của sự kiện [24], [101], [148]. Sự phân loại ưu tiên gói tin này làm giảm thời gian trễ từ đầu tới cuối và thời gian chờ đợi trung bình. Tuy nhiên những nghiên cứu này mới chỉ đưa giải pháp cho hai loại gói là loại yêu cầu thời gian thực và không yêu cầu thời gian thực, thêm đặc tính phân biệt sự kiện ở xa và gần chứ chưa phân biệt nhiều mức độ theo tính nghiêm trọng của sự kiện hoặc chưa có nhiều mức độ ưu tiên cho nhiều kiểu sự kiện khác nhau, chưa xét tới khả năng chịu lỗi và đảm bảo độ tin cậy theo yêu cầu ứng dụng, dù có ưu tiên gói tin thời gian thực song độ trễ đạt được trong mô phỏng vẫn còn vượt quá giới hạn cho phép. Trong điều kiện

thực tế là cảm biến bị giới hạn về dung lượng và năng lượng cũng như năng lực xử lý, cách tiếp cận này có ý nghĩa lý thuyết hơn là thực tế, chỉ những mạng cảm biến đa phương tiện không giới hạn năng lượng thì mới nghiên cứu theo tiếp cận này.

1.3.2.3 Hạn chế trong các nghiên cứu về giao thức MAC

Trong mạng cảm biến không dây, giao thức điều khiển truy nhập môi trường (MAC) chịu trách nhiệm đưa ra những chính sách cho việc truy nhập kênh truyền dữ liệu sử dụng môi trường dùng chung giữa các nút cảm biến [128]. Trong thập kỷ gần đây, nhiều nhà nghiên cứu đã phát triển khá nhiều giao thức MAC dựa trên những mục tiêu cơ bản như hiệu quả năng lượng, độ trễ, thông lượng, xung đột và tin cậy ... Đã có một vài nghiên cứu về vấn đề xử lý ưu tiên gói tin ở lớp MAC đảm bảo QoS cho mạng cảm biến không dây đa mức ưu tiên như giao thức QAEE với hai mức độ ưu tiên gói là cao vào thấp [76] và MPQ có xét tới bốn mức độ ưu tiên cho gói tin [114]. Tuy nhiên những giải pháp trên vẫn gây độ trễ lớn và cứng nhắc khi số lượng gói tin xuất hiện đồng thời tăng lên, số mức ưu tiên phân biệt còn ít và kém linh hoạt. *Vì thế vẫn cần có giải pháp linh hoạt cho giao thức MAC cho mạng đa sự kiện.*

Bảng 1.6 tổng hợp ngắn gọn ba hướng tiếp cận đảm bảo hiệu năng cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện phân tích ở trên là (1) giao thức định tuyến, (2) kỹ thuật hàng đợi ưu tiên và (3) giao thức MAC.

Bảng 1.6: Đánh giá một số giải pháp kỹ thuật đảm bảo hiệu năng cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện

Tên giải pháp	Biện pháp kỹ thuật	Ưu điểm	Tồn tại, hạn chế
Định tuyến đa đường chuyển tiếp thông tin đáng tin cậy ReInForm [34]	<ul style="list-style-type: none"> Tính toán số đường dựa trên mức độ quan trọng của thông tin, lỗi kênh cục bộ và khoảng cách tới trạm gốc. Gửi sao chép lên toàn bộ đường đã tính toán. 	<ul style="list-style-type: none"> Tăng độ tin cậy cho việc truyền tin. Đạt được độ tin cậy theo yêu cầu ưu tiên. 	<ul style="list-style-type: none"> Lãng phí năng lượng do gửi bản sao toàn bộ và càng cần độ tin cậy cao thì càng lãng phí. Chưa xem xét tới yêu cầu hiệu năng khác như độ trễ.

<p>Định tuyến đa đường kết hợp đơn đường [130]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Định tuyến đơn đường cho sự kiện không nghiêm trọng và đa đường với sự kiện nghiêm trọng. • Việc chọn đơn đường có tính đến trọng số đường đi dựa trên đánh giá về hiệu quả đường truyền, tốc độ tiêu thụ năng lượng và số chặng. • Sử dụng tác tử di động để chuyển tiếp thông tin hỗ trợ định tuyến. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tăng độ tin cậy cho nhiều loại sự kiện, sự kiện nghiêm trọng hơn sẽ có độ tin cậy cao hơn thông qua việc truyền trên nhiều đường hơn. • Sử dụng năng lượng hiệu quả, kéo dài thời gian sống. • Giảm độ trễ truyền thông. 	<ul style="list-style-type: none"> • Yêu cầu phức tạp, cảm biến phải có thêm chức năng đặc biệt là tác tử di động. • Mới chỉ phân biệt hai mức độ sự kiện khác biệt: nghiêm trọng hay không nghiêm trọng.
<p>Định tuyến đa đường đa mức ưu tiên [148]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tách luồng audio và video. • Ưu tiên luồng yêu cầu thời gian thực cao hơn. • Tối đa hóa thông lượng thông qua việc chọn tối đa số đường không giao nhau và phân tải lưu lượng lên nhiều đường. 	<ul style="list-style-type: none"> • Thông lượng luồng video cao hơn, đáp ứng yêu cầu băng thông lớn hơn khả năng của một đường đơn. • Thời gian trễ tương ứng nhỏ hơn với luồng được xử lý ưu tiên ở hàng đợi, đáp ứng được thời gian thực. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mới chỉ phân biệt hai mức độ ưu tiên: luồng quan trọng hơn được truyền trên đường có độ trễ nhỏ hơn, được ưu tiên xử lý ở hàng đợi. • Chưa xét tới khả năng chịu lỗi, độ tin cậy đảm bảo đầu cuối. • Chưa xét được yêu cầu kết hợp hiệu năng cho một hay nhiều luồng. • Trong mô phỏng mới xét một nguồn sự kiện bao gồm cả audio và video, chưa xét tới tình huống có nhiều nguồn cùng tranh chấp tài nguyên mạng.

<p>Xử lý ưu tiên sử dụng ba hàng đợi [101]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ba độ ưu tiên: (1) ưu tiên cao nhất cho gói yêu cầu thời gian thực, (2) ưu tiên thứ hai dành cho gói không yêu cầu thời gian thực nhưng ở xa hơn, (3) không ưu tiên với gói không yêu cầu thời gian thực và ở gần. 	<ul style="list-style-type: none"> • Giảm thời gian trễ từ đầu cuối tới đầu cuối và thời gian chờ đợi trung bình. • Ưu tiên yêu cầu thời gian thực song vẫn đạt được sự công bằng của các loại gói khác nhau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mới có hai loại gói khác nhau phân theo thời gian thực, thêm đặc tính phân biệt vị trí nguồn gửi gói (xa hay cục bộ). • Chưa xét tới khả năng chịu lỗi và đảm bảo độ tin cậy. • Chưa xét tới giới hạn trễ của gói tin, chưa đáp ứng được thời gian thực, độ trễ trong kết quả mô phỏng lớn (cỡ vài giây).
<p>Định tuyến đa đường kết hợp lập lịch gói tin [24]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gói tin được gán số ưu tiên. • Giao thức định tuyến tìm nhiều tuyến đường cho gói tin, gói được sao chép và gửi lên nhiều đường theo mức độ ưu tiên. • Nút sẽ điều chỉnh tốc độ gửi gói trên các đường bằng cách điều chỉnh chiều dài hàng đợi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Giảm tắc nghẽn • Tránh mất gói • Đáp ứng nhiều yêu cầu khác nhau về độ tin cậy (điều chỉnh được độ tin cậy theo yêu cầu bằng cách chọn số đường tương ứng). 	<ul style="list-style-type: none"> • Yêu cầu nút cảm biến phải có khả năng đệm nhiều hàng đợi ưu tiên khác nhau. Nút mạng phải có khả năng điều chỉnh tốc độ. • Chưa xem xét tới độ trễ của gói tin.
<p>Giao thức lớp MAC QAEE [76]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hai cấp độ ưu tiên trong tranh chấp gửi ở lớp MAC • Hết thời gian chờ T_w sẽ quyết định nút có độ ưu tiên gửi yêu cầu gói tới sớm nhất được quyền gửi dữ liệu 	<ul style="list-style-type: none"> • Đã xét đa sự kiện với 02 mức ưu tiên • Thực hiện ưu tiên hơn với gói có mức độ ưu tiên cao hơn. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mới xét tới 02 mức độ ưu tiên • Độ trễ còn lớn do phải chờ T_w

Giao thức lớp MAC MPQ [114]	<ul style="list-style-type: none"> • Bốn cấp độ ưu tiên trong tranh chấp gửi ở lớp MAC. • Sử dụng p-persistent CSMA để tránh xung đột • Hết thời gian chờ T_w sẽ quyết định nút có độ ưu tiên gửi yêu cầu gói tới sớm nhất được quyền gửi dữ liệu, riêng với gói có mức độ ưu tiên cao nhất thì không cần chờ T_w 	<ul style="list-style-type: none"> • Đã xét đa sự kiện với 04 mức ưu tiên • Thực hiện ưu tiên theo 04 mức độ ưu tiên khác nhau, riêng gói có mức ưu tiên cao nhất sẽ có trễ giảm hơn nhiều so với các gói có mức ưu tiên thấp hơn. 	<ul style="list-style-type: none"> • Độ trễ của 3 mức ưu tiên thấp hơn còn lớn do phải chờ T_w • Cứng nhắc trong việc gán giá trị p
-----------------------------	--	--	---

1.4 HƯỚNG NGHIÊN CỨU CỦA LUẬN ÁN

Trên cơ sở kết quả phân tích các hạn chế của các nghiên cứu liên quan, hướng nghiên cứu được đề xuất trong luận án này là **(1) đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng định tuyến linh hoạt** và **(2) đề xuất giao thức MAC ưu tiên mới đảm bảo QoS cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện**. Trong hai hướng nghiên cứu của mình, nghiên cứu sinh nghiên cứu các giải pháp trước đây kết hợp với yêu cầu đa mức chất lượng của nhiều sự kiện trong mạng cảm biến để đưa ra giải pháp cho luận án. Có ba mục tiêu hiệu năng hướng tới là giảm độ trễ, tăng độ tin cậy và đảm bảo sử dụng hiệu quả năng lượng cho WSN có sự phân biệt ưu tiên sự kiện.

1.4.1 Các giải pháp để làm giảm độ trễ

Trong luận án sử dụng hai giải pháp định tuyến theo yêu cầu là chọn một đường đi theo yêu cầu ngắn nhất (hoạt động dựa trên nguyên tắc là bất kỳ khi nào cần truyền dữ liệu, nút nguồn sẽ khám phá và tìm đường đi ngắn nhất đến nút đích sink) và chọn đa đường tách biệt kết hợp san tải để giảm thời gian trễ truyền tin. Ngoài ra, có thể kết hợp thêm việc phân loại gói để ưu tiên các gói của sự kiện đặc biệt.

- *Chọn một đường đi ngắn nhất: Việc chọn đường đi ngắn nhất trong kỹ thuật định tuyến cho WSN có điểm khác với cách thức chọn đường đi ngắn nhất của mạng IP truyền thống hoặc các mạng không/ít bị giới hạn về năng lượng và bộ nhớ. Thông thường thì chọn đường đi ngắn nhất nghĩa là chọn đường có ít chặng nhất và ít nghẽn nhất, song với mạng cảm biến còn phải xét đến năng lượng và cự ly truyền thông của nút; bộ nhớ và khả năng xử lý giới hạn dẫn tới việc khó thể lưu trữ quá nhiều thông tin về tuyến đường, đặc biệt là khả năng lưu giữ thông tin từ đầu đến cuối tuyến đường đi của gói [17], [105].*
- *Giải pháp định tuyến đa đường kết hợp san tải: Khi có nhiều hơn một đường truyền thông tin thì ta có thể thực hiện việc truyền đồng thời thông tin lên hai hay nhiều tuyến đường. Việc tìm đa đường ngắn nhất ngoài những tiêu chí có thể xét đến như việc chọn một đường đi ngắn nhất còn phải tính đến sự tách biệt đường đi (đường có/không giao nhau hoặc giao nhau một phần). Việc kết hợp san tải lên nhiều tuyến đường có thể rút ngắn thời gian truyền tin so với việc đẩy toàn bộ thông tin đi trên một đường [36]. Hơn nữa giải pháp này có thể giúp cải thiện vấn đề nghẽn, tránh mất gói tin trong trường hợp tắc nghẽn, đảm bảo tốt bằng thông cho những dịch vụ yêu cầu băng thông cao (như video hoặc truyền thông đa phương tiện).*
- *Giải pháp ưu tiên theo độ ưu tiên hoặc theo tính khẩn cấp của sự kiện [24], [68], [82], [101], [118]. Các gói tin sẽ được đánh dấu mức độ ưu tiên hoặc khẩn cấp, sau đó khi đi qua các nút trong mạng, gói tin sẽ được chuyển tiếp theo độ ưu tiên. Gói tin nào có độ ưu tiên cao nhất sẽ được chuyển tiếp trước hoặc có xác suất chuyển tiếp trước cao hơn và như vậy thời gian trễ khi đi qua nút sẽ được giảm hơn so với các gói có độ ưu tiên thấp hơn.*

1.4.2 Các giải pháp làm tăng độ tin cậy

Trong luận án sẽ sử dụng hai giải pháp để tăng độ tin cậy là giải pháp định tuyến đa đường cho phép gửi gói tin trên nhiều đường và giải pháp CSMA p-persistent kết hợp với beacon ở lớp MAC.

- *Giải pháp định tuyến đa đường và cho phép gửi gói tin trên nhiều đường*: Đây chính là việc gửi dự phòng thông tin cùng lúc lên nhiều đường trong trường hợp xác suất lỗi đường truyền lớn.
- *Giải pháp CSMA p-persistent kết hợp với beacon ở lớp MAC*: Giải pháp này kết hợp cơ chế CSMA p-persistent giúp giảm bớt xung đột kết hợp với sử dụng cơ chế beacon tránh xung đột ở lớp MAC. Giá trị p thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu sẽ giúp dữ liệu có độ ưu tiên càng cao sẽ có xác suất được ưu tiên chuyển trước càng cao và vì vậy sẽ có độ tin cậy cao hơn so với dữ liệu có độ ưu tiên thấp hơn.

1.4.3 Các giải pháp để tăng hiệu quả sử dụng năng lượng mạng

Có rất nhiều giải pháp được thực hiện để tăng hiệu quả sử dụng năng lượng cho mạng cảm biến không dây, như đã chỉ ra trong Bảng 1.5, có thể thấy các giải pháp thực hiện từ lớp vật lý tới lớp ứng dụng để đạt được mục tiêu hiệu năng này. Các giải pháp xoay quanh vấn đề tiêu hao năng lượng hiệu quả, sử dụng ít năng lượng mà vẫn đảm bảo chất lượng truyền thông.

Trong luận án sử dụng một vài giải pháp như sau:

- *Định tuyến theo yêu cầu (on-demand)*: Chỉ khi nào có sự kiện thì mới tìm đường để chuyển tiếp dữ liệu về sink. Như vậy tránh lãng phí năng lượng cho việc quảng bá đều đặn/gửi tràn lụt thông tin để phát hiện sự kiện. Chỉ những cảm biến nào liên quan tới sự kiện và chuyển tiếp thông tin về sink mới được kích hoạt. Tiết kiệm được năng lượng sẽ giúp các cảm biến sống lâu hơn và cũng là giúp kéo dài tuổi thọ/thời gian sống của mạng.
- *Định tuyến linh hoạt theo sự kiện*: Tùy vào yêu cầu chất lượng của sự kiện cần truyền mà lựa chọn giải pháp định tuyến đơn hay đa đường để đáp ứng yêu cầu mà không lãng phí tài nguyên mạng dùng chung.
 - Chỉ tìm giới hạn đường trong số nhiều đường đi để chuyển tiếp những thông tin của sự kiện có yêu cầu trễ thấp và độ tin cậy cao. Giải pháp này tránh việc các nút mạng chuyển tiếp thông tin phải lưu trữ quá nhiều tuyến đường, tránh tiêu hao năng lượng và bộ nhớ. Nó cũng giúp dàn đều hơn năng lượng tiêu

thụ cho việc truyền thông trên nhiều cảm biến, như vậy tránh được việc có nút cảm biến bị chết nhanh hơn.

- Chọn đường đi ngắn nhất trong trường hợp định tuyến đơn đường, phù hợp với sự kiện không yêu cầu độ tin cậy cao để tránh tổn thất năng lượng.
- *Cơ chế nhận sớm beacon*: Chấp nhận yêu cầu gửi (beacon) sớm nhất từ nhiều nút gửi dữ liệu ở lớp MAC, tránh cho nút nhận phải chờ đợi hết thời gian tranh chấp gửi yêu cầu khi có nhiều nút cùng muốn gửi khung dữ liệu. Phương pháp này giảm bớt tổn thất năng lượng do giảm xác suất xung đột và do nút nhận không phải chờ đợi cho tới khi hết thời gian chờ nhận được tất cả yêu cầu gửi từ nhiều nút.

1.4.4 Sự trả giá cho các tham số hiệu năng trong WSN

Như phân tích các giải pháp cải thiện ba tham số về hiệu năng vừa đề cập, có thể thấy là sẽ có giải pháp đáp ứng được tham số này nhưng lại không phù hợp với tham số khác. Như vậy sẽ có sự trả giá với từng tham số:

- Muốn truyền thông tin cậy thì phải trả giá bằng việc là truyền dư thừa thông tin (sao chép và gửi lên nhiều đường hoặc là chèn thêm thông tin kiểm tra lỗi) để dự phòng trường hợp lỗi mạng hoặc tái truyền từng chặng, nhưng như vậy xét về tính hiệu quả năng lượng thì không cao và có thể gây thêm trễ. Do vậy giải pháp đưa ra là nếu sử dụng giải pháp truyền dư thừa thì không sao chép dữ liệu cho toàn bộ các loại sự kiện, chỉ sự kiện nào yêu cầu độ tin cậy rất cao và khi chất lượng đường truyền kém (tỷ lệ truyền thành công góí thấp) thì mới thực hiện giải pháp này; nếu sử dụng giải pháp tái truyền từng chặng thì cần giới hạn số lần truyền lại phù hợp để giảm trễ mà vẫn đảm bảo độ tin cậy yêu cầu.
- Muốn truyền thông tin nhanh thì ngoài việc chọn đường đi ngắn nhất còn cần để ý đến năng lượng còn lại của nút vì nếu năng lượng còn lại của nút trên tuyến đường ngắn nhất mà thấp thì có thể dẫn đến việc mất gói tin (giảm độ tin cậy). Giải pháp đưa ra là san tải và chuyển trên nhiều đường, tuy nhiên cái giá phải trả là việc định tuyến đa đường sẽ phức tạp hơn định tuyến đơn đường, đòi hỏi nhiều dung lượng nhớ hơn và tiêu hao năng lượng cho xử lý nhiều thông tin hơn

nhưng đổi lại nó lại giúp dàn đều năng lượng tiêu thụ cho việc chuyển tiếp thông tin cho nhiều đường.

- Muốn truyền ưu tiên dữ liệu thì ưu tiên dữ liệu này sẽ làm giảm chất lượng đáp ứng dữ liệu khác, ngoài ra phải có cơ chế phân biệt dữ liệu nên độ phức tạp trong tính toán, cân nhắc lựa chọn tuyến đường hoặc xử lý sẽ cao hơn.

Bài toán khó đối với WSN đa sự kiện là bài toán đa ràng buộc: vừa phải đảm bảo những yêu cầu khác biệt cho ứng dụng (như độ tin cậy cao, độ trễ nhỏ) vừa phải đảm bảo việc sử dụng năng lượng hiệu quả (tiêu hao ít năng lượng) để kéo dài thời gian sống cho mạng.

1.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Nội dung Chương 1 đã trình bày khái quát về mạng cảm biến không dây và các tham số hiệu năng cảm biến không dây đa sự kiện. Ngoài ra, nghiên cứu sinh cũng phân tích, đánh giá tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến các mạng cảm biến nói chung và hiệu năng mạng cảm biến nói riêng trong chương này. Qua phân tích, đánh giá, nghiên cứu sinh chỉ ra các hạn chế của những nghiên cứu trước đây về mạng cảm biến đa không dây sự kiện, khảo sát và phân tích các giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện. Trên cơ sở những hạn chế này, hướng nghiên cứu của luận án đã được chỉ ra là đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện. Hướng nghiên cứu thứ nhất là cải tiến giao thức định tuyến kết hợp giải thuật định tuyến và truyền gói linh hoạt để có thể đáp ứng yêu cầu của nhiều loại sự kiện và kết hợp nhận thức năng lượng để kéo dài thời gian sống cho mạng, hai giải pháp cụ thể theo hướng này được trình bày chi tiết trong Chương 2 của luận án. Hướng nghiên cứu thứ hai là cải tiến giao thức MAC có xét tới mức độ tiên của gói tin và cơ chế nhận Beacon sớm để giảm trễ gói tin, đồng thời đảm bảo tỷ lệ truyền gói thành công cao và tiết kiệm năng lượng, giải pháp cụ thể được trình bày chi tiết trong Chương 3 của luận án.

CHƯƠNG 2: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY ĐA SỰ KIỆN SỬ DỤNG GIAO THỨC ĐỊNH TUYỂN LINH HOẠT

Tóm tắt ⁽²⁾: Nội dung của chương trình bày về hai giải pháp nghiên cứu sinh đề xuất để cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giải pháp định tuyến linh hoạt: (1) dựa trên giao thức định tuyến đơn đường định hướng sự kiện GPSR [73], nghiên cứu sinh đề xuất giải thuật định tuyến DRPDS (Dynamic Routing Protocol and Delivering Scheme) linh hoạt kết hợp định tuyến đơn và đa đường cùng với cơ chế phân tải lưu lượng linh hoạt theo sự kiện để đáp ứng 3 loại sự kiện có yêu cầu QoS khác nhau trong mạng cảm biến không dây; (2) đề xuất giải thuật định tuyến EARPM là phiên bản cải tiến từ giải thuật DRPDS giải pháp 1, giải thuật định tuyến được tiếp tục phát triển dựa trên việc nhận thức năng lượng còn lại để nâng cao hiệu quả tiêu thụ năng lượng nhằm kéo dài thời gian sống của mạng và vẫn đáp ứng những yêu cầu QoS khác biệt của các sự kiện có mức ưu tiên khác nhau. Kết quả mô phỏng mạng cảm biến không dây đa sự kiện trên OMNeT++ qua hai bước đề xuất trên cho kết quả như sau: (1) giải thuật định tuyến DRPDS giúp mạng đáp ứng được yêu cầu đồng thời của nhiều sự kiện khác loại trong điều kiện khác nhau về tỷ lệ lỗi gói, (a) sự kiện yêu cầu trễ thấp giảm được 20% thời gian trễ so với các loại sự kiện còn lại, (b) sự kiện yêu cầu độ tin cậy cao đáp ứng được yêu cầu tỷ lệ mất gói nhỏ hơn nhiều lần so với tỷ lệ lỗi gói của một chặng và nhỏ hơn so với những sự kiện khác dù truyền thông đa chặng; (2) giải thuật định tuyến EARPM giúp mạng kéo dài thời gian sống của toàn mạng lên khoảng 70% so với giao thức DRPDS, đồng thời vẫn đảm bảo độ tin cậy cao hơn với gói tin của loại sự kiện cần độ tin cậy cao và giảm độ trễ cho sự kiện cần ưu tiên về thời gian so với các sự kiện khác trong điều kiện mạng có nghẽn. Đóng góp về việc cải

² Một phần nội dung của Chương 2 đã được công bố trên tạp chí JSTIC 2017 [J2], Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự 2018 [J3] và báo cáo tại Hội nghị quốc tế SoICT 2017 [C1] và Hội nghị quốc tế SigTelCom2018 [C2].

thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giải thuật định tuyến linh hoạt DRPDS đã được công bố trong một hội thảo một hội thảo quốc tế ACM SoICT2017 [C1] và được đăng trong tạp chí JSTIC 2017 [J2]. Đóng góp về việc cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giải thuật định tuyến linh hoạt nhận thức năng lượng EARPM đã được công bố trong một hội nghị quốc tế IEEE SigTelcom 2018 [C2] và được đăng trong tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự [J3].

2.1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong một số mạng cảm biến không dây, có nhiều loại sự kiện được phân biệt theo mức độ quan trọng. Sự kiện quan trọng thường dành cho những tình huống bất thường. Lấy ví dụ như trong công nghiệp hóa chất là tình huống phát hiện khí hoặc chất lỏng độc hại, trong cảnh báo cháy rừng là tình huống phát hiện có đám cháy, những tình huống này đều được coi là sự kiện quan trọng và nghiêm trọng [12], [90]. Nếu có sự rò rỉ khí, chất lỏng độc hại hoặc khi xảy ra cháy rừng thì hệ thống giám sát cần được cảnh báo tức thì. Đôi khi sẽ có vài điểm rò rỉ hoặc xuất hiện nhiều khu vực cháy rừng, lúc đó hệ thống giám sát sẽ nhận được nhiều sự kiện cùng lúc và hệ thống cần nhanh chóng xác định vị trí khẩn cấp đó. Những thông số đo đạc môi trường khác như độ ẩm, nhiệt độ, áp suất khí quyển, cường độ ánh sáng có thể được coi là sự kiện bình thường (không nghiêm trọng).

Với những mạng cảm biến không dây cho các tòa nhà thông minh, các hệ thống giám sát môi trường và xử lý công nghiệp thông minh [12], [15], [55], [83], [90], [98], [107], nhiều sự kiện có mức độ quan trọng khác nhau có thể xuất hiện trong mạng. Như đã giới thiệu ở mục 1.1.6, với ứng dụng là mạng cảm biến cháy rừng thì có thể có nhiều cấp độ cảnh báo khác nhau, mỗi cấp độ lại yêu cầu một mức độ ưu tiên khác nhau về độ trễ và độ tin cậy. Các điểm cháy có thể đồng thời xuất hiện ở nhiều địa điểm với nhiều cấp độ khác nhau và lúc này mạng cảm biến cho cảnh báo cháy rừng trở thành mạng cảm biến đa sự kiện đa yêu cầu về chất lượng.

Yêu cầu tiết kiệm năng lượng là yêu cầu sống còn với các mạng cảm biến vì các cảm biến thường bị giới hạn về kích thước, năng lượng, dung lượng và khả năng xử lý [15]. Thời gian sống của nút cảm biến phụ thuộc rất nhiều vào thời gian sống của pin mà nó có. Vì thế đã có rất nhiều nghiên cứu tập trung vào thiết kế các giao thức và giải thuật nhận thức năng lượng cho mạng cảm biến [15], [70], [117].

Để đáp ứng được nhiều yêu cầu chất lượng cho sự kiện và đảm bảo mạng sử dụng năng lượng hiệu quả, có ba hướng tiếp cận chính sử dụng giao thức định tuyến.

Một là để đảm bảo yêu cầu về độ tin cậy, đã có nhiều nghiên cứu dựa trên định tuyến đơn đường và đa đường [21], [34], [71], [73], [98], [109], [124], [150]. Mặc dù việc tìm đơn đường là đơn giản và có độ phức tạp thấp và sử dụng tài nguyên tối thiểu [71], [124] song khi mạng có thay đổi (lỗi nút hoặc kênh) thì nó lại phản ứng chậm và không đảm bảo được độ tin cậy theo yêu cầu do giới hạn của việc truyền trên một đường [70]. Vì thế nhiều nghiên cứu về giao thức định tuyến đa đường được thực hiện để khắc phục nhược điểm này [21], [98], [109]. Trong trường hợp có nhiều sự kiện xảy ra trong mạng và có yêu cầu khác biệt về độ tin cậy thì cơ chế định tuyến động kết hợp giữa định tuyến đơn đường cho sự kiện bình thường và đa đường cho sự kiện quan trọng yêu cầu độ tin cậy cao là hợp lý [34], [130]. Tuy nhiên độ phức tạp cho tìm đa đường sẽ cao hơn và năng lượng tiêu thụ cho việc truyền dữ liệu sao chép trên nhiều đường sẽ tăng tỷ lệ với số lần sao chép.

Thứ hai, việc tách lưu lượng và gửi trên nhiều đường có thể hỗ trợ yêu cầu về băng thông và giảm nghẽn cho nhiều loại ứng dụng khác nhau dẫn tới giảm trễ truyền thông [84], [148]. Tuy nhiên việc này sẽ kéo theo việc gia tăng độ phức tạp và độ trễ cho việc tách và hợp lưu lượng.

Thứ ba, rất nhiều giao thức định tuyến hiệu quả năng lượng đã được đề xuất, chúng được phân loại trong các nghiên cứu [15] [41], [71], [91], [105], [108], những nghiên cứu này đều hướng tới việc tiêu thụ năng lượng hiệu quả và kéo dài thời gian sống cho mạng.

Tuy nhiên, theo những kiến thức mà nghiên cứu sinh đã khảo sát và tổng hợp, những giải pháp trên mới chỉ dành cho mạng cảm biến có một hoặc hai loại sự kiện có yêu cầu khác biệt về chất lượng như độ tin cậy và/hoặc độ trễ, một vài nghiên cứu đã xem xét sử dụng năng lượng hiệu quả song vẫn chưa khảo sát trong trường hợp đa sự kiện xuất hiện đồng thời. Đã có một nghiên cứu [108] đã đưa ra vấn đề đa sự kiện, song trong tình huống xuất hiện nhiều sự kiện đồng thời thì giải pháp không hiệu quả và thời gian sống của mạng giảm đi, nguyên nhân là vì nếu chỉ có một nguồn dữ liệu (đơn sự kiện) thì khi tách lưu lượng lên đa đường làm cho năng lượng tiêu thụ được san đều, tuy nhiên khi có nhiều sự kiện đồng thời thì các lưu lượng san ra lại có thể chập lại trên một đường và gây hỏ sâu năng lượng dẫn đến nút chết sớm. Cho tới nay, chưa có nghiên cứu về định tuyến nào hỗ trợ được nhiều mức độ yêu cầu về chất lượng và vẫn đáp ứng yêu cầu sử dụng năng lượng hiệu quả.

Phần tiếp theo trong chương giới thiệu kiến thức nền tảng của các giao thức định tuyến hướng sự kiện cải thiện hiệu năng mạng và hai đề xuất của nghiên cứu sinh để giải quyết bài toán cải thiện hiệu năng cho mạng WSN đa sự kiện.

2.2 CÁC GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN ĐỊNH HƯỚNG SỰ KIỆN

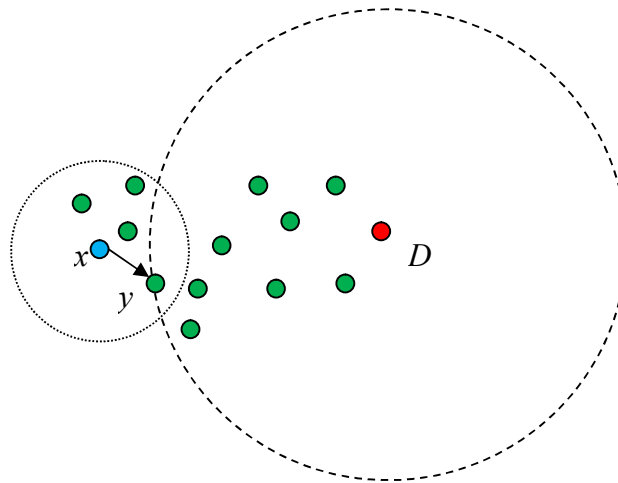
Với mạng cảm biến đa sự kiện thì sẽ có nhiều kiểu sự kiện có yêu cầu chất lượng truyền thông khác nhau như độ trễ, tốc độ, độ tin cậy, độ ưu tiên,... Với mạng cảm biến định hướng sự kiện thì việc xác định đường đi cho thông tin sẽ chỉ được quyết định khi có sự kiện trong mạng và thường là do chính cảm biến có sự kiện khởi hoạt [73]. Vì các sự kiện lại yêu cầu chất lượng khác nhau nên đã có một số giải pháp chọn định tuyến linh hoạt kết hợp đơn đường và đa đường để có chính sách khác biệt với từng loại sự kiện [30],[34],[130],[148].

2.2.1 Giao thức định tuyến GPSR

Giao thức định tuyến GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [73] là giao thức định tuyến kiểu cục bộ, quyết định chuyển tiếp chỉ phụ thuộc vào thông tin về các lân cận trong mạng.

Khi nút có dữ liệu cần truyền, nó sẽ tìm trong các nút lân cận con đường về đích. Theo nghiên cứu của nhóm tác giả này, giả định là các nút biết vị trí của chính nó thông qua thiết bị GPS hoặc cách thức nào đó và nút chỉ cần thông tin về vị trí của các nút lân cận và vị trí của nút đích (sink) là đủ để quyết định chọn đường mà không cần những thông tin về hình trạng khác của mạng.

Hình 2.1 cho thấy ý tưởng của định tuyến thông tin cục bộ, với x là nút nguồn có dữ liệu cảm biến cần gửi, D là nút đích và y là nút được lựa chọn chuyển tiếp.



Hình 2.1: Mô tả cách chọn đường Greedy theo GPSR

Vòng tròn nhỏ bao quanh x chỉ ra vùng phủ vô tuyến mà nút x có thể giao tiếp được, vòng tròn lớn bao quanh D là vòng tròn có bán kính là khoảng cách $y - D$. Thông tin x có sẽ là vị trí của x , vị trí của các nút lân cận của x (trong vùng phủ vô tuyến của x) và vị trí của nút đích D . Lựa chọn cục bộ tối ưu nhất của x để chuyển dữ liệu tới D sẽ là nút lân cận có vị trí địa lý gần D nhất và trong trường hợp này là nút y . Theo cách chọn đường này, x sẽ chọn y là nút chuyển tiếp dữ liệu tốt nhất của mình về D vì khoảng cách giữa y tới D là khoảng cách nhỏ nhất trong số các khoảng cách giữa D và bất kỳ lân cận nào khác của x . Có thể thấy trong vùng giao của hai vòng tròn sẽ không còn nút lân cận nào của x ở trong đó. Tiến trình chuyển tiếp tham lam (greedy) này sẽ lặp lại cho tới khi gói dữ liệu từ x được chuyển tới D .

Giao thức GPSR có hai ưu điểm là phù hợp với mạng định hướng sự kiện: tuyến đường được xác lập từ điểm nguồn có dữ liệu cảm biến cần truyền và việc tìm đường đơn giản vì chỉ cần thông tin cục bộ, tuy nhiên cần đảm bảo là mật độ cảm biến đủ dày đặc để luôn tìm được nút lân cận về đến đích.

2.2.2 Giao thức định tuyến đa đường linh hoạt hướng theo sự kiện

Nhóm tác giả [130] đề xuất giải pháp xây dựng giao thức định tuyến đa đường hướng theo sự kiện có nhận biết vị trí.

1. Mục tiêu nghiên cứu của nhóm này là làm sao để tìm đường khi xuất hiện các sự kiện trong mạng và chuyển tiếp thông tin cảm biến về sự kiện tới trạm gốc. Sự kiện có mức độ nghiêm trọng hơn sẽ được chuyển tiếp tin cậy hơn. Ngoài ra, giao thức định tuyến đề xuất (LEDMPR-Location Aware Event Driven Multipath Routing) còn giúp mạng hoạt động hiệu quả hơn với việc sử dụng năng lượng hiệu quả, tăng thời gian sống, tăng tỷ lệ truyền gói thành công và giảm độ trễ truyền thông.
2. Giải pháp được nhóm đưa ra để đạt được mục tiêu trên là sử dụng định tuyến đơn đường và đa đường cho sự kiện khác nhau về mức độ nghiêm trọng; sử dụng tác tử cố định và di động (static and mobile agent) trong việc hỗ trợ chuyển tiếp thông tin để trạm gốc chọn đường tốt hơn và quyết định số lượng đường phù hợp.

Các bước hoạt động theo đề xuất:

- (1) Nút phát hiện sự kiện tính toán điểm giữa tùy ý (arbitrary midpoint) giữa nút phát hiện sự kiện và nút/trạm gốc dựa trên thông tin về vị trí.
- (2) Nút phát hiện sự kiện thiết lập đường ngắn nhất từ nó tới trạm gốc thông qua trực tham khảo kết nối giữa hai nút này bằng cách sử dụng một tác tử di động với sự hỗ trợ của thông tin về vị trí; tác tử di động này thu thập thông tin về đường đi và các tham số của nút trên đường và cung cấp thông tin này tới nút gốc.

- (3) Tìm vị trí tùy ý của nút trung gian đặc biệt (giữa nút sự kiện và trạm gốc) ở trên/dưới trục tham khảo dựa trên thông tin về vị trí điểm giữa ở bước 1.
 - (4) Tác tử di động sao chép thông tin về loại sự kiện của nút phát sinh sự kiện và khám phá ra đường đi qua các nút trung gian đặc biệt; đường này nằm trên/dưới trục tham khảo giống như các đường cung. Khi di chuyển từ nút cảm biến này sang nút cảm biến khác dọc theo các tuyến đường khác nhau, mỗi tác tử di động sẽ thu thập thông tin của nút trên tuyến đường (như id của nút, thông tin vị trí, năng lượng còn lại, băng thông khả dụng và độ kết nối của các nút lân cận) và truyền những thông tin này về trạm gốc.
 - (5) Trạm gốc từ đó sẽ tính toán và tạo dựng một phần hình trạng (partial topology) mạng kết nối nút sự kiện và trạm gốc bằng cách sử dụng thông tin kết nối do các tác tử di động chuyển tới. Sử dụng thông tin về hình trạng một phần này, nút gốc sẽ tìm đa đường và tính được tham số trọng số đường (path weight factor) sử dụng tính hiệu quả liên kết (link efficiency), tỷ lệ năng lượng (energy ratio) và khoảng cách chặng (hop distance).
 - (6) Trạm gốc lựa chọn số lượng đường trong số các đường khả dụng dựa trên mức độ nghiêm trọng của sự kiện.
 - (7) Nếu sự kiện không nghiêm trọng thì trạm gốc chọn một đường có trọng số đường cao nhất, còn nếu sự kiện là nghiêm trọng thì trạm gốc chọn nhiều đường để đảm bảo việc truyền thông được tin cậy hơn.
3. Kết quả của nghiên cứu được so với giải pháp ABMR (Định tuyến đa đường dựa trên tác tử [111]) cho thấy ưu điểm vượt trội về tỷ lệ truyền gói thành công, năng lượng tiêu thụ, độ trễ và tiêu đề phụ (overhead), ngoài ra nó còn đạt được mục tiêu là các tuyến đường chỉ được thiết lập khi phát sinh sự kiện và được yêu cầu, hơn nữa còn đảm bảo truyền thông tin cậy hơn với sự kiện nghiêm trọng (mạng có nhiều loại sự kiện).

4. Tuy nhiên giải pháp này có một số nhược điểm là trong mạng phải có thêm khả năng đặc biệt là các tác tử có khả năng di động và chuyển tiếp thông tin chứ không chỉ là cảm biến đơn thuần. Như vậy đòi lại việc làm đơn giản hóa đặc tính của cảm biến và tiết kiệm năng lượng, dung lượng cho cảm biến trong quá trình tìm đường đi cho dữ liệu thì lại phải trả giá bằng việc bổ sung thêm tác tử di động.

2.2.3 Định tuyến đa đường nâng cao độ tin cậy và đảm bảo băng thông

Nghiên cứu [34] đề xuất ReInForM (Chuyển tiếp thông tin đáng tin cậy sử dụng nhiều đường dẫn), nguồn gửi nhiều bản sao của cùng một dữ liệu qua nhiều đường truyền đến trạm gốc. Mỗi gói tin được gán mức độ ưu tiên dựa trên nội dung của thông tin chứa trong nó. Nguồn tính số lượng đường (hay số lượng bản sao của gói tin được gửi) dựa trên mức độ quan trọng của thông tin, lỗi kênh cục bộ và khoảng cách từ trạm gốc. ReInForM không phân biệt giữa nguồn thực tế và nút chuyển tiếp trung gian. Các bước nhảy tiếp theo thường được chọn giữa các nút gần nhất tới trạm gốc hoặc chúng sẽ được chọn ngẫu nhiên. Điều này giúp cân bằng tải và tránh các nút trên con đường "tốt hơn" để nhanh chóng mất năng lượng. Tuy nhiên, gửi nhiều bản sao của tất cả các gói dữ liệu sẽ lãng phí năng lượng và giao thức định tuyến đã không xem xét độ trễ của sự kiện.

Nghiên cứu [30] đề xuất một giao thức định tuyến đa đường kết hợp với lập lịch gói tin nhằm đảo bảo độ tin cậy bằng cách sử dụng nhiều đường truyền, truyền sao chép gói và điều chỉnh tốc độ truyền ở mỗi nút. Giải pháp còn sử dụng thông tin về tỷ lệ lỗi kênh cục bộ và hình trạng mạng để lựa chọn đường đi. Mỗi gói tin được gán một số ưu tiên dựa trên thông tin nó có. Mỗi nút có hai hàng đợi cho dữ liệu đến và ba hàng đợi để truyền dữ liệu. Tất cả các nút trong mạng hoạt động như một đơn vị lập lịch trình và đặt các gói tin đến trong hàng đợi thích hợp. Giải pháp này giúp tránh tắc nghẽn và mất gói. Giao thức này điều khiển lưu lượng mạng bằng cách điều chỉnh chiều dài hàng đợi. Tuy nhiên, nhược điểm của giao thức này là chưa xem xét đến độ trễ của gói tin và yêu cầu quản lý hàng đợi phức tạp.

Nghiên cứu [148] đề xuất giải pháp xây dựng giao thức định tuyến đa đường đa mức ưu tiên cho mạng cảm biến đa phương tiện không dây (WMSN). Mục tiêu nghiên cứu của nhóm này là làm sao để ưu tiên lưu lượng quan trọng và chọn tối đa số đường không giao nhau để tối đa hóa thông lượng cho truyền video và đảm bảo trễ đầu cuối trong WMSN. Giải pháp đề xuất là MPMPS (Multi-priority Multi-path Selection), đây là cơ chế ở lớp vận chuyển để chọn được tối đa số đường từ các đường định tuyến không giao nhau để tối đa thông lượng dữ liệu cho video thời gian thực. Dữ liệu từ nguồn sẽ được tách thành luồng audio và video, sau đó tùy vào ứng dụng mà đặt độ ưu tiên cao hơn cho một trong hai luồng. Luồng ít quan trọng hơn có thể được truyền với yêu cầu không cao về giới hạn thời gian thực. Khi đó có thể sử dụng các tuyến đường có trễ truyền dẫn đầu cuối ít nghiêm ngặt hơn và như vậy có thể tăng tổng lượng dữ liệu thu ở trạm gốc, dữ liệu khi đó có thể được hợp lại hay được xử lý riêng.

Kết quả của nghiên cứu đạt được là giải pháp đề xuất có thể hỗ trợ hai mức ưu tiên và chọn được số lượng đường tối đa để tối đa hóa thông lượng cho truyền dòng dữ liệu (phân tách dữ liệu và truyền trên nhiều đường), giải pháp phù hợp với ứng dụng đa phương tiện trong điều kiện mạng hạn chế về tốc độ đường truyền và băng thông, có thể đảm bảo được truyền thông có thời gian trễ phù hợp và thông lượng đáp ứng với yêu cầu ứng dụng cao hơn so với khả năng của đường truyền đơn lẻ. Tuy nhiên nghiên cứu này mới chỉ có giải pháp cho hai mức ưu tiên và chưa xét tới khả năng chịu lỗi và đảm bảo độ tin cậy của việc truyền tin.

2.3 GIẢI PHÁP DRPDS KẾT HỢP ĐỊNH TUYẾN ĐỘNG VỚI CƠ CHẾ TRUYỀN GÓI LINH HOẠT

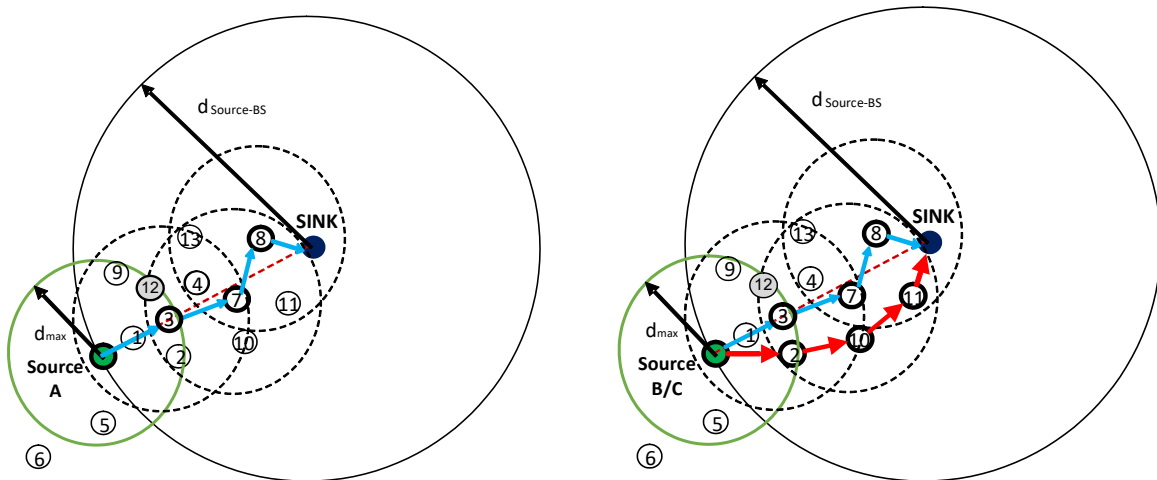
Dựa trên những yêu cầu đa dạng của WSN đa sự kiện và qua phân tích những ưu điểm là có khả năng đáp ứng độ tin cậy cao và trễ thấp của các giải pháp định tuyến đa đường đã phân tích ở mục 1.1.4.2 và 2.2, nghiên cứu sinh đề xuất xây dựng giao thức định tuyến động kết hợp giải thuật định tuyến đa đường linh hoạt với cơ chế phân tải linh hoạt có tên là DRPDS cho WSN đa sự kiện với ba loại sự kiện yêu cầu chất lượng khác nhau.

2.3.1 Phân tích giải pháp chọn tuyến và cơ chế phân tải linh hoạt

Giải pháp đề xuất được xây dựng dựa trên giao thức định tuyến đơn đường GPSR [73] cho WSN định tuyến định hướng sự kiện. Có hai sự thay đổi từ giao thức này.

Thứ nhất: Nút nguồn chọn số lượng đường để truyền gói tin sự kiện khác nhau dựa trên kiểu loại sự kiện. Chọn đơn đường để định tuyến cho loại sự kiện bình thường (đặt tên là A, sự kiện này không yêu cầu cao về độ tin cậy cũng như độ trễ), đa đường cho hai loại sự kiện có yêu cầu chất lượng cao hơn (đặt tên là B với yêu cầu độ tin cậy cao và đặt tên là C với yêu cầu trễ nhỏ với mức độ nghiêm trọng cao của sự kiện).

Thứ hai: Cơ chế truyền gói tin dữ liệu trên đa đường của sự kiện B và C khác nhau. Với sự kiện B, gói dữ liệu từ nguồn cần được sao chép và chuyển tiếp đồng thời trên hai đường trong khi với sự kiện C thì các gói dữ liệu sẽ được chuyển tiếp luân phiên trên hai đường.



a) Định tuyến GPSR đơn đường

b) Định tuyến DRPDS

Hình 2.2: Mô tả cơ chế định tuyến kết hợp đơn đường, đa đường [J2]

Hình 2.2 mô tả cơ chế định tuyến linh hoạt đề xuất cho WSN đa sự kiện. Nút nguồn cần tìm một hoặc hai nút lân cận trong số các nút lân cận có khoảng cách tới sink gần hơn để truyền gói dữ liệu mà nó cảm nhận được, các nút chuyển tiếp này

cũng cần tìm một lân cận tốt nhất trong số các lân cận của nó để chuyển tiếp gói dữ liệu tới đích là sink. Có 5 nút lân cận còn sống (1, 2, 3, 5, 9) và một nút đã chết (12) của nút nguồn, trong đó chỉ có 4 nút là gần sink hơn (1, 2, 3, 9).

- Với định tuyến GPSR đơn đường: chỉ có một nút còn sống và gần sink nhất là nút 3. Vì thế, nút nguồn sẽ chọn nút 3 là lân cận tốt nhất trên đường định tuyến về sink (Hình 2.2a). Kiểu định tuyến này được áp dụng cho gói dữ liệu của sự kiện loại A, chỉ cần truyền dữ liệu trên một đường có khoảng cách ngắn nhất tới sink để tiết kiệm năng lượng truyền tải. Sự kiện này không yêu cầu cao về độ tin cậy cũng như độ trễ nên chỉ cần chọn đường đơn giản chứ không cần truyền đa đường để tăng độ tin cậy hay giảm trễ trong trường hợp khẩn.
- Với định tuyến đa đường: 4 nút lân cận còn sống có thể được sắp xếp theo thứ tự ưu tiên theo khoảng cách gần nhất về sink là 3, 2, 1 và 9 (Hình 2.2b). Như vậy trong giải pháp lựa chọn thì nút 3 và nút 2 sẽ được nút nguồn có gói sự kiện loại B và C lựa chọn làm nút chuyển tiếp.
- Cơ chế phân tải lưu lượng được thực hiện động tại nguồn, nếu phát hiện sự kiện loại B thì các gói của sự kiện sẽ được sao chép và chuyển lên cả hai đường, còn nếu phát hiện sự kiện loại C thì các gói dữ liệu của sự kiện sẽ được gửi luân phiên trên hai đường để giảm tải cho mỗi đường.

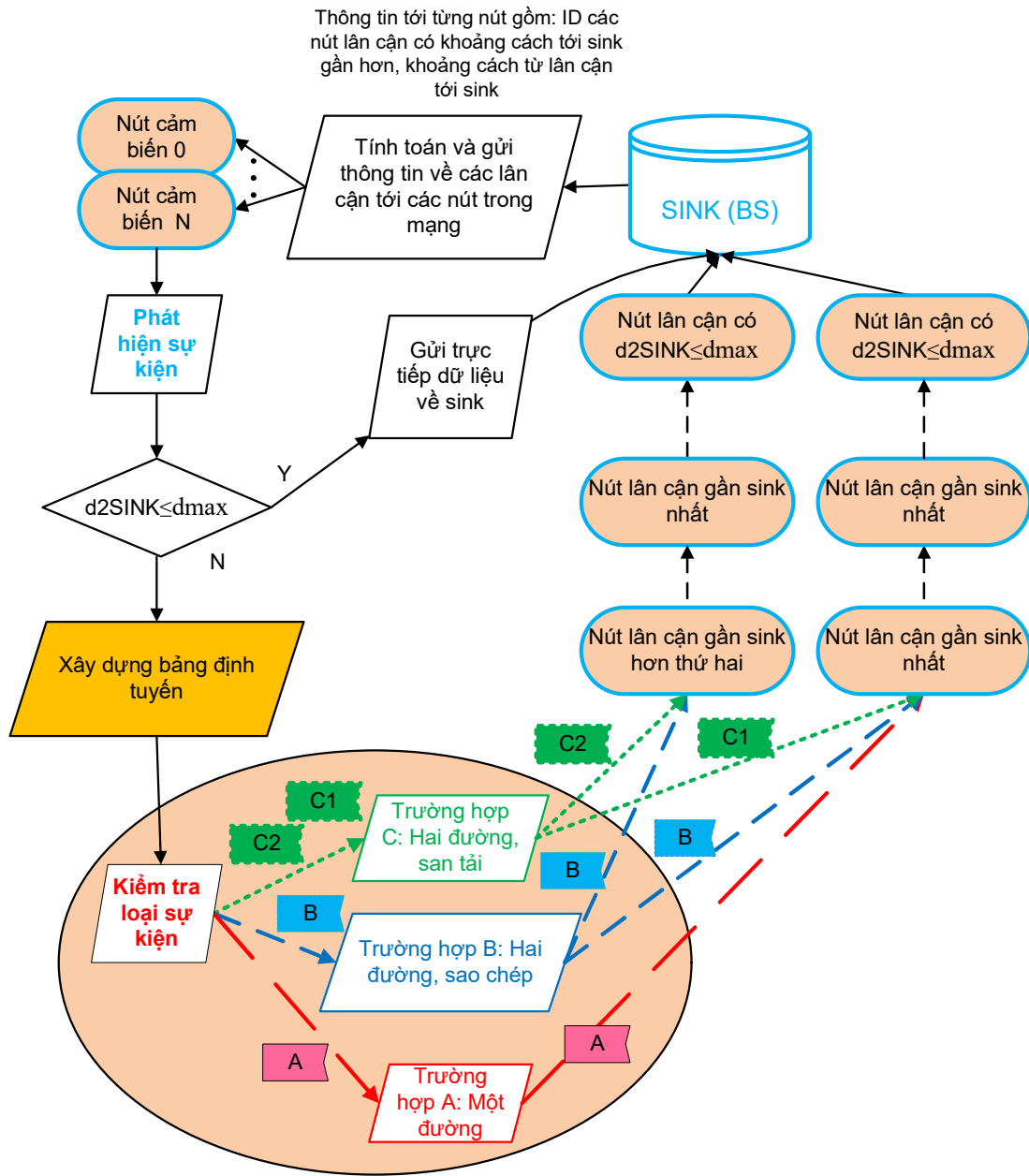
2.3.2 Giải thuật định tuyến và cơ chế truyền gói linh hoạt DRPDS

Hình 2.3 mô tả ngắn gọn hoạt động của giao thức DRPDS khi nút phát hiện sự kiện hoặc khi nó nhận được yêu cầu định tuyến từ nút lân cận, khi đó nút sẽ phải lựa chọn một hoặc hai lân cận để chuyển tiếp gói dữ liệu đi tới đích. Tùy vào loại sự kiện, nút nguồn sẽ gửi gói dữ liệu lên một hoặc hai đường, san tải hay nhân tải.

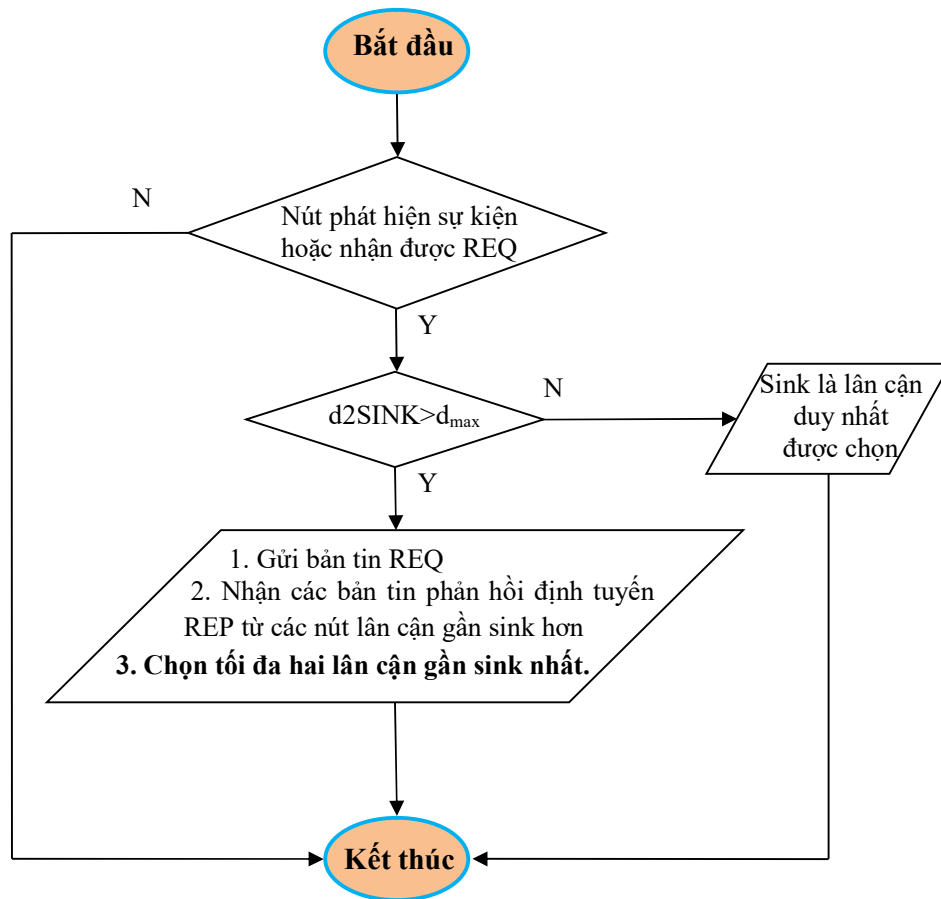
Khi nút cảm biến phát hiện ra sự kiện, nó sẽ gửi trước yêu cầu định tuyến REQ tới các lân cận, sau đó các lân cận gần còn sống sẽ gửi yêu cầu định tuyến tới các lân cận của nó và cứ thế yêu cầu tìm đường chuyển tiếp lan đi trong mạng. Cũng trong thời gian chuyển tiếp REQ này, nguồn và các nút lân cận sẽ nhận được bản tin phản hồi REP từ những lân cận còn sống của nó và biết được những lân cận

nào còn hoạt động. Trên cơ sở đó, nút sẽ xác định lân cận nào được lựa chọn làm nút chuyển tiếp trên đường chuyển gói dữ liệu tới đích (Hình 2.4).

- Nếu khoảng cách từ nút tới sink bằng hoặc nhỏ hơn d_{max} (cự ly truyền tối đa của cảm biến) thì nút sẽ gửi gói trực tiếp về sink.
- Nếu nút chỉ có một lân cận duy nhất thì nút đó chính là nút chuyển tiếp duy nhất.
- Trong cả hai trường hợp trên, dù nút phát hiện sự kiện là A, B hay là C thì gói tin mang sự kiện này sẽ được chuyển tiếp trên một đường duy nhất.



Hình 2.3: Mô tả hoạt động định tuyến DRPDS [J2]



Hình 2.4: Chọn nút chuyển tiếp trong DRPDS

- Nếu không (nút không gần sink và nút có từ 2 lân cận gần sink hơn trở lên) thì nút sẽ phải tìm tối đa hai lân cận tốt nhất có ID là minID1 và minID2 để chuyển tiếp gói dữ liệu về đích. Tiêu chí lựa chọn dựa trên khoảng cách từ lân cận về đích ngắn nhất.
- Chỉ có nút nguồn là phải xác định số lượng đường để gửi gói dữ liệu theo kiểu loại sự kiện, còn các nút chuyển tiếp chỉ cần lựa chọn một nút lân cận tốt nhất (minID1). Tùy theo loại sự kiện mà nút nguồn sẽ quyết định chuyển tiếp gói tin như sau:
 - Nếu là sự kiện loại A: Chỉ chọn nút có ID là minID1 để gửi gói tin dữ liệu.
 - Nếu là sự kiện loại B: Chọn 2 nút có ID là minID1 và minID2 để gửi gói tin dữ liệu.

- Nếu là sự kiện loại C: Nút nguồn chọn luân phiên hai nút có ID là minID1 và minID2 để gửi gói tin dữ liệu.

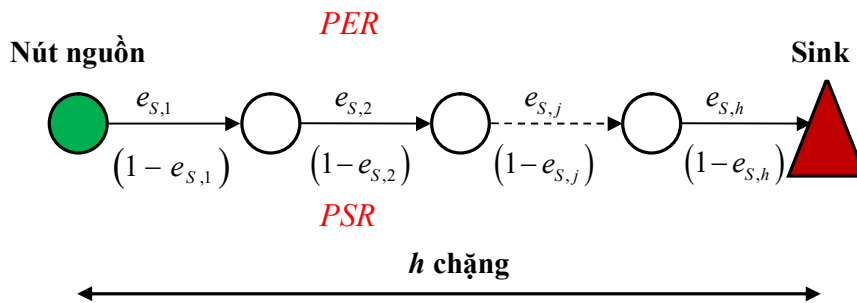
2.3.3 Phân tích hiệu năng WSN đa sự kiện khi truyền đa đường

Phần này phân tích trễ gói và tính toán mức độ tin cậy cho định tuyến đơn và đa đường. Kết quả phân tích cho thấy là chia sẻ tải trên nhiều đường sẽ làm giảm thời gian chờ ở hàng đợi trong trường hợp có nghẽn dẫn đến làm giảm trễ gói một cách đơn giản và chuyển gói sao chép trên đa đường sẽ làm gia tăng mức độ tin cậy của việc truyền tin.

2.3.3.1 Phân tích về độ tin cậy

Nếu coi số lượng gói gốc do nguồn gửi là N_s và số lượng gói nhận không trùng lặp tại sink là N_r thì độ tin cậy R được tính bằng $R = \frac{N_r}{N_s}$. Ở đây gói nhận không trùng lặp nghĩa là nếu sink nhận gói kép (gói gốc và gói sao chép) thì nó coi đó chỉ là một gói.

a) Độ tin cậy của gói tin khi truyền trên một đường



Hình 2.5: Độ tin cậy gói tin truyền trên một đường

Xét nguồn và nút sink cách xa nhau h chặng như Hình 2.5. Nếu tỉ lệ lỗi bit chấp nhận trên chặng j là e_j ($0 \leq e_j \leq 1$ và e_j tỷ lệ với khoảng cách chặng) và kích thước gói tin dữ liệu là S (bit) thì tỷ lệ nhận gói thành công PSR hay độ tin cậy R của chặng thứ j được tính theo công thức sau:

$$psr_{S,j} = (1 - e_j)^S \quad (2.1)$$

Khi đó, tỷ lệ lỗi gói tương ứng trên chặng thứ j trên đường đi trong mạng được tính theo công thức sau:

$$e_{S,j} = 1 - psr_{S,j} = \left[1 - (1 - e_j)^S \right] \quad (2.2)$$

Độ tin cậy của một đường qua nhiều chặng là đại lượng có tính nhân. Giả sử xác suất lỗi bit và gói là độc lập thì xác suất một gói nhận được ở sink khi đi qua h chặng là $PSR(1, h)$ được tính theo công thức sau:

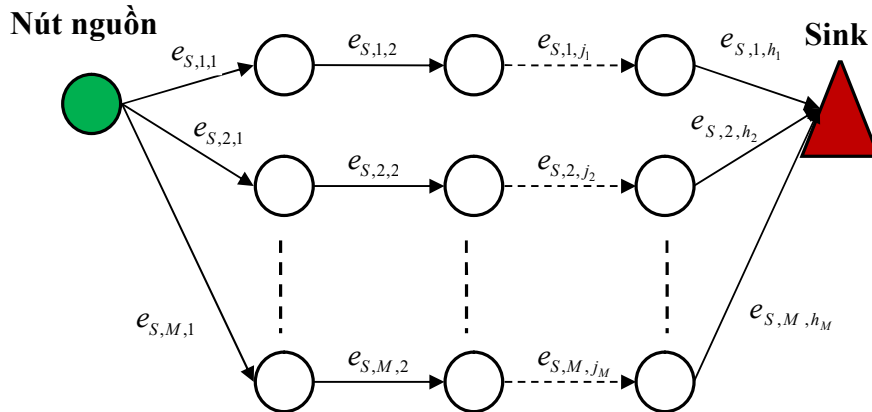
$$PSR(1, h) = \prod_{j=1}^h (1 - e_{S,j}) \quad (2.3)$$

Khi đó tỷ lệ lỗi gói của một đường được tính theo công thức sau:

$$PER(1, h) = 1 - PSR(1, h) = 1 - \prod_{j=1}^h (1 - e_{S,j}) \quad (2.4)$$

Như vậy, gói có kích thước càng lớn và số chặng càng nhiều thì tỷ lệ mất gói càng cao. Do đó, trong mạng cảm biến đa chặng, khi tỷ lệ lỗi kênh cao và nguồn ở xa sink thì cơ chế chuyển tiếp đơn thuần là chỉ sử dụng một đường đi sẽ có PER cao, vì thế một đường là không đủ để đạt được độ tin cậy mong muốn.

b) Độ tin cậy của gói tin khi truyền sao chép trên nhiều đường



Hình 2.6: Độ tin cậy truyền tin khi truyền gói sao chép trên nhiều đường [J3]

Xét trường hợp từ nguồn gửi gói tới đích có nhiều đường như Hình 2.6. Có M đường và số chặng của đường thứ i là h_i , khi đó tỷ lệ lỗi gói khi truyền sao chép trên nhiều đường là xác suất mà tất cả các gói sao chép bị lỗi trên tất cả đường đi.

Tỷ lệ lỗi gói khi sao chép gói và gửi lên nhiều đường có thể được tính theo công thức sau:

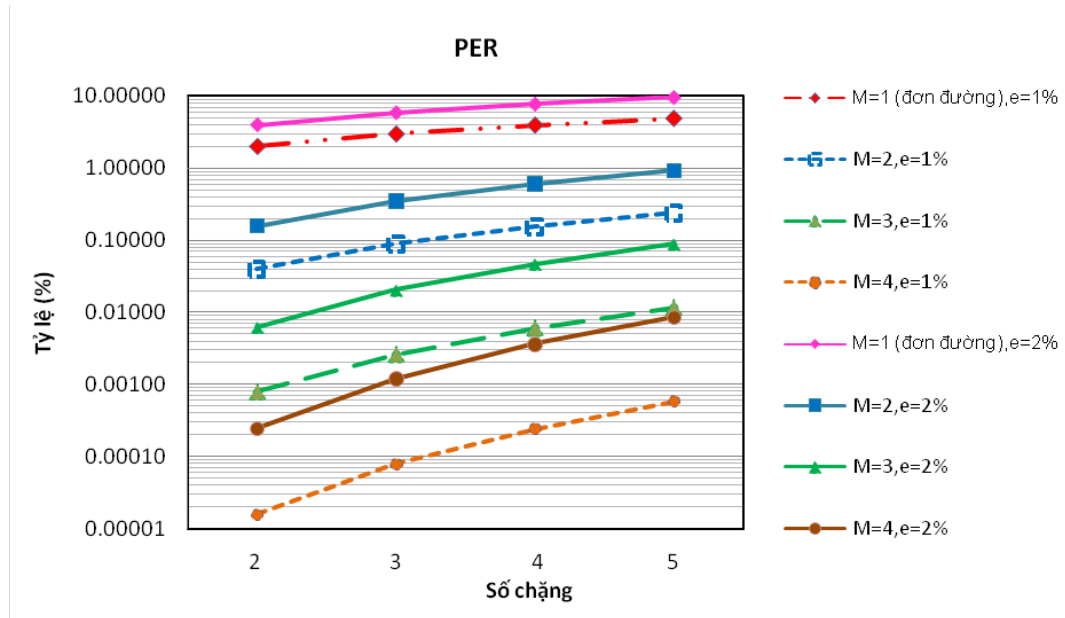
$$PER(M, h_M) = \prod_{i=1}^M PER(1, h_i) = \prod_{i=1}^M [1 - PSR(1, h_i)] = \prod_{i=1}^M \left[1 - \prod_{j=1}^{h_i} (1 - e_{S,i,j}) \right] \quad (2.5)$$

Trong đó $PSR(1, h_i)$ là xác suất truyền thành công gói trên đường thứ i định nghĩa ở công thức (2.3) và $e_{S,i,j}$ là xác suất gói bị mất trên chặng thứ j của đường thứ i .

Khi đó, xác suất của ít nhất một gói sao chép đến được đích trên M đường là $PSR(M, h_M)$ được tính theo công thức sau:

$$PSR(M, h_M) = 1 - PER(M, h_M) = 1 - \prod_{i=1}^M \left[1 - \prod_{j=1}^{h_i} (1 - e_{S,i,j}) \right] \quad (2.6)$$

Gói tin có thể bị mất do lỗi đường truyền và tràn bộ đệm, trong những trường hợp như vậy việc gửi gói sao chép lên nhiều đường sẽ tăng được độ tin cậy hay nói cách khác là giảm được PER .



Hình 2.7: Đánh giá tỷ lệ lỗi gói khi truyền đơn và đa đường với các tham số về số đường, số chặng khác nhau theo tỷ lệ lỗi gói đơn chặng là 1% và 2% [J3]

Hình 2.7 là ví dụ cụ thể cho việc tính toán *PER* theo công thức (2.5) khi truyền gói trên một đường ($M = 1$) và nhiều đường ($M = 2 - 4$) khi giá trị tỷ lệ lỗi gói của kênh truyền đơn chặng tương ứng là 1% và 2% với giả định là các đường có khoảng cách/số chặng tương đương. Có thể thấy là số lượng đường càng lớn thì độ tin cậy càng tăng (*PER* càng giảm), số lượng chặng càng tăng thì độ tin cậy càng giảm (*PER* càng tăng).

2.3.3.2 Phân tích tính trễ gói

Các thành phần trễ bao gồm: trễ truyền lan (phụ thuộc vào khoảng cách), trễ truyền tin (phụ thuộc vào độ dài gói tin và băng thông của liên kết), trễ xử lý tại các nút chuyển tiếp (điều khiển truy nhập, phân loại, tổng hợp, xếp hàng/phân khe thời gian, ...), trễ xử lý tại nút nhận thông tin.

Tổng trễ gói, ký hiệu là d_{total} , khoảng thời gian gói tin đi qua h chặng, được tính theo công thức sau:

$$d_{total} = \sum_{j=1}^h d_j \quad j = 1, 2, \dots, h \quad (2.7)$$

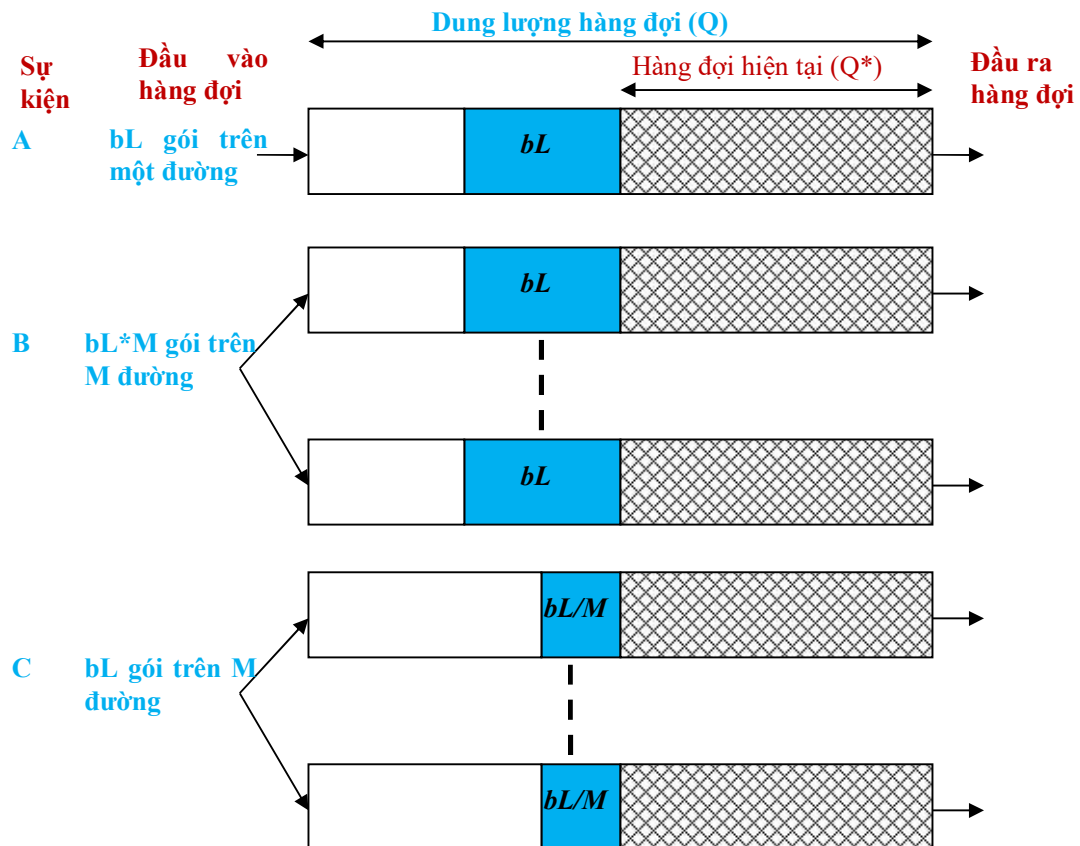
Giả sử trễ truyền lan là không đáng kể, khi đó trễ ở nút trung gian d_j có thể được tính theo công thức sau:

$$d_j = d_{trans} + d_{MAC} + d_{que} \quad (2.8)$$

Trong đó d_{trans} là trễ truyền tin, d_{MAC} là trễ truy nhập môi trường và d_{que} là trễ hàng đợi của gói tin.

Khi xem xét mạng cảm biến đa sự kiện với nhiều sự kiện có thể đồng thời xuất hiện thì sẽ có nhiều gói tin truyền từ nhiều nguồn khác và gây nghẽn tại các nút trung gian trước khi về sink. Vì thế ở chương này, nghiên cứu sinh chỉ tập trung phân tích trễ hàng đợi của các gói tin, tải lưu lượng được chia đều lên các đường. Trễ hàng đợi ở một nút bất kỳ phụ thuộc vào thời gian phục vụ trong hàng đợi, số lượng gói tin trong hàng đợi và mô hình đến của gói tin.

Hình 2.8 cho thấy sự phân tích trễ hàng đợi của gói tin. Khi so sánh trễ hàng đợi của gói tin khi gói chuyển qua đơn hoặc đa đường sử dụng cơ chế truyền gói sao chép và chia sẻ. Từ nút nguồn, có 3 loại gói sự kiện có thể đi vào hàng đợi với độ dài hàng đợi trung bình hiện tại là Q^* gói với dung lượng hàng đợi tối đa là Q gói, giả sử thời gian xử lý một gói tin trong hàng đợi là $d_{service}$ (kiểm tra lỗi bit, xác định liên kết ra) và là hằng số.



Hình 2.8: Sự chiếm giữ hàng đợi của ba loại gói

Với gói loại A và B, chỉ có bL gói của một sự kiện sẽ được gửi lên trên một đường, vì thế trễ hàng đợi trung bình của gói loại A và B là tương đương và có thể được tính xấp xỉ bằng trễ của gói ở trung tâm ($bL/2$). Với gói loại C, bL gói được gửi luân phiên trên M đường, như vậy chỉ có bL/M gói được gửi trên một đường khi có sự kiện. Như vậy giá trị trễ nhỏ hơn và tỷ lệ nghịch với M là số đường đa

đường. Thời gian trễ tại một hàng đợi khi có sự kiện A, B, C xuất hiện có thể được tính theo công thức sau:

$$d_{queA} = d_{queB} = \left(Q^* + \frac{bL}{2}\right) \times d_{service} \quad (2.9)$$

$$d_{queC} = \left(Q^* + \frac{bL}{2 \times M}\right) \times d_{service} \quad (2.10)$$

Nếu coi hệ số cải thiện trễ của gói sự kiện loại C so với gói sự kiện loại B hoặc A là $l_{improvement}$, có thể tính hệ số cải thiện ở một hàng đợi được tính theo công thức sau:

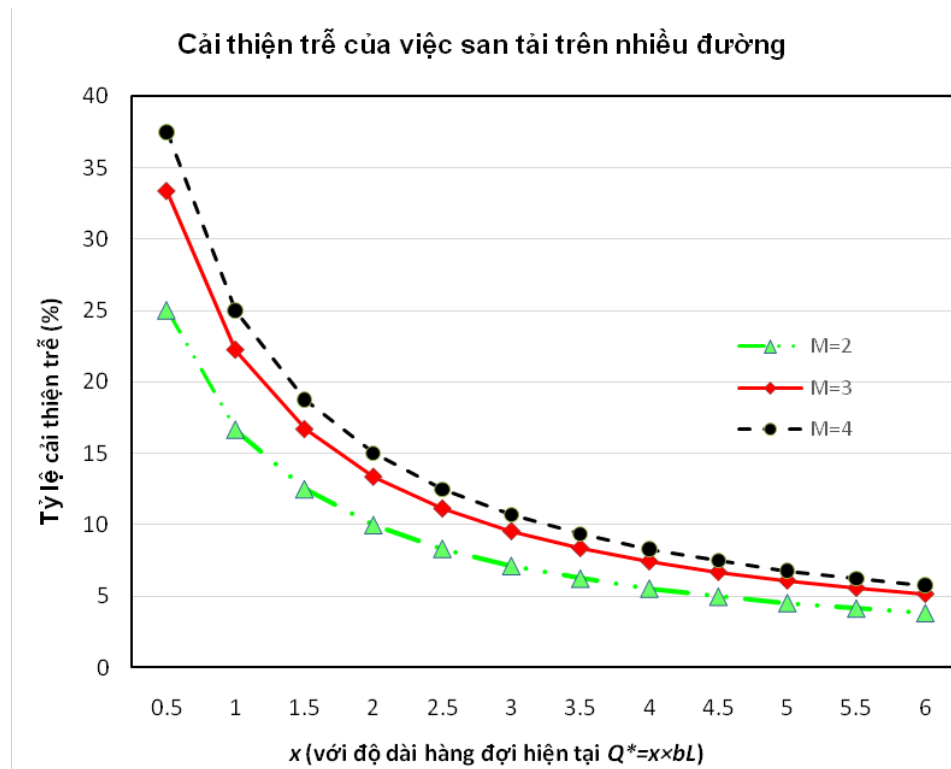
$$l_{improvement} = \left(\frac{d_{queB} - d_{queC}}{d_{queB}}\right) \times 100\% = \left(\frac{bL - \frac{bL}{M}}{2 \times Q^* + bL}\right) \times 100\% \quad (2.11)$$

Coi độ dài hàng đợi hiện tại có thể đệm được x lần số gói của một sự kiện $Q^* = x \times bL$, khi đó công thức (2.11) có thể rút gọn thành :

$$l_{improvement} = \left(\frac{1 - \frac{1}{M}}{2 \times x + 1}\right) \times 100\% \quad (2.12)$$

Từ công thức (2.12), có thể thấy là việc tách gói tin và chuyển tiếp lên đa đường sẽ làm giảm tải đặt lên mỗi đường truyền, do vậy sẽ làm giảm thời gian xử lý gói tin. Khi số lượng đường càng tăng thì hệ số cải thiện này sẽ càng cao và gói của sự kiện C sẽ có trễ càng thấp so với gói của hai sự kiện còn lại. Với thực tế là nút cảm biến bị giới hạn về dung lượng bộ nhớ [15], [70], có thể thấy là dung lượng đệm của nút cảm biến không thể lớn và giá trị $l_{improvement}$ lại càng cao.

Hình 2.9 cho thấy ví dụ cụ thể khi so sánh độ trễ của định tuyến đa đường so với định tuyến đơn đường với số lượng đường và độ dài hàng đợi thay đổi. Có thể thấy lợi thế về trễ càng lớn khi độ dài hàng đợi càng nhỏ và số lượng đường truyền song song càng lớn.



Hình 2.9: So sánh về trễ của định tuyến đa đường sử dụng cơ chế phân tải so với định tuyến đơn đường với số lượng đường và độ dài hàng đợi thay đổi

2.3.3.3 Một số trường hợp đặc biệt làm ảnh hưởng tới lợi thế trễ và độ tin cậy của định tuyến đa đường

Còn có một số trường hợp đặc biệt cho thấy truyền thông đa đường không đáp ứng được yêu cầu QoS:

- Nút chỉ có một lân cận để chuyển tiếp gói về sink hoặc nút có thể truyền trực tiếp về sink trong cự ly truyền dẫn của nó. Khi đó nguồn chỉ gửi một gói trên một đường duy nhất nó có mà không phải phân loại gói để chọn đường. Vì thế, việc gửi sao chép gói trên nhiều đường hoặc tách gói để gửi lần lượt trên nhiều đường là không khả thi. Nếu sự kiện xuất hiện ngẫu nhiên trong mạng, sẽ có nhiều sự kiện ở vị trí không khả thi cho đa đường (trong trường hợp sự kiện xuất hiện ngẫu nhiên trong trường cảm biến thì có tới 25% số sự kiện sẽ xuất hiện quanh sink và nút nguồn sẽ gửi trực tiếp gói tới sink mà không qua lân cận nào).

- Có hai điều kiện tác động tới việc các đường sẽ tụ lại trước khi về sink: (1) chỉ có giới hạn một vài nút chuyển tiếp gần sink, (2) số chặng từ nguồn tới đích lớn. Trong trường hợp lưu lượng mạng tăng cao thì các nút quanh sink sẽ bị nghẽn và làm trễ tăng lên, trường hợp xấu là tràn bộ đệm và giá trị *PER* sẽ tăng cao, do vậy độ tin cậy truyền gói sẽ giảm.
- Sự cải thiện về trễ chỉ có thể tốt trong trường hợp có nghẽn ở hàng đợi nhưng cũng không được quá cao tới mức đẩy giá trị Q^* tới ngưỡng tối đa dung lượng hàng đợi Q . Trễ gói tin end-to-end là giá trị có tính cộng và phụ thuộc vào số chặng, trạng thái hàng đợi cũng như lưu lượng mạng, vì thế khó có thể ước tính chính xác thông qua tính toán (bài toán NP-complete), vì thế giải pháp phù hợp để giải quyết điều này là thông qua kỹ thuật heuristic.

2.3.4. Đánh giá hiệu năng WSN đa sự kiện sử dụng DRPDS

2.3.4.1 Kịch bản mô phỏng

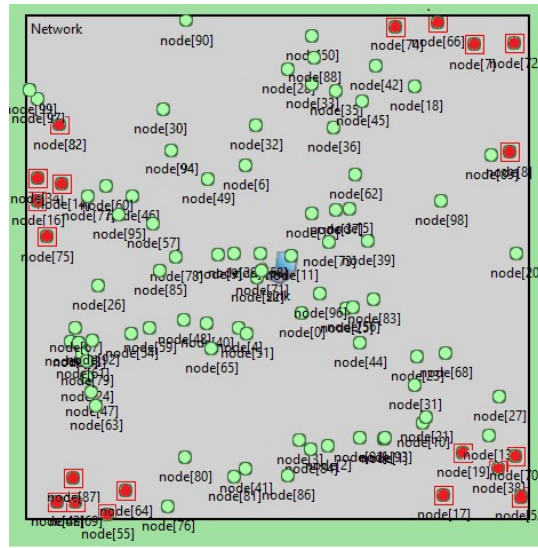
Bảng 2.1 cho thấy các thông số chính sử dụng trong mô phỏng dựa trên phần mềm mô phỏng OMNeT++ [133]. Sink đặt ở tâm vùng cảm biến với 100 nút cảm biến rải ngẫu nhiên trong trường cảm biến có diện tích 500m×500m (Hình 2.10). Có ba loại sự kiện (A, B và C) xuất hiện trong mạng cảm biến với tỷ lệ xuất hiện tương đương. Có 20 sự kiện sẽ xuất hiện theo vòng thời gian là 0,16; 0,32 và 0,64 giây một vòng tương ứng với mỗi sự kiện gửi *BL* gói có giá trị bằng 10, 20 và 40 (lưu lượng dữ liệu ở 4 kịch bản là tương đương nhau). Các sự kiện xuất hiện ở 20 nút từ 4 góc của trường cảm biến cùng gửi gói dữ liệu tại thời điểm ngẫu nhiên trong một vòng. Với vị trí từ 4 góc trong trường cảm biến thì số chặng trung gian từ nguồn về đích là khoảng 2-4 chặng, vừa đủ là số nhiều để thấy hiệu quả của việc truyền đa đường qua đa chặng và cũng đủ ít để tránh đường đi bị tụ lại trước sink. Để đơn giản và do chỉ cần phân biệt ba loại sự kiện khác nhau, chương trình mô phỏng chỉ sử dụng định tuyến đơn đường và hai đường ($M=1$ và 2).

Bảng 2.1: Các thông số mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giao thức
DRPDS [J2], [36], [58]

<i>Thông số</i>	<i>Giá trị</i>
Diện tích trường cảm biến	500m x 500m
Số lượng nút cảm biến	100
Số lượng sự kiện chạy đồng thời trên một vòng thời gian	20
Khoảng thời gian (cho một vòng)	0,16; 0,32; 0,64 giây
Số lượng gói tin/ sự kiện (burstLength)	10, 20, 40
Bán kính truyền dẫn vô tuyến của một nút cảm biến (d_{max})	120 m
Kích thước gói tin thông tin định tuyến (từ Sink ở thời điểm mạng bắt đầu hoạt động, gửi tới các nút cảm biến)	256 bit
Tốc độ đường truyền	30,720 bit/s
Thời gian xử lý (một gói tin ở hàng đợi)	1 milli giây
PER của một chặng (%) $e^c = 1 - 2\%$	$e^c \times (10 - rand(0,1)) \times 10^{-1} \times \left(\frac{d}{d_{max}}\right)^2$
Thời gian chạy	200 vòng

Các tham số hiệu năng được đánh giá trong mô phỏng là:

- *Tỷ lệ lỗi gói:* Là tỷ lệ gói bị mất trên tổng số gói gửi. Với gói tin loại B, gói bị mất là gói tin không thể tới sink dù đi trên đường nào, gói gửi là các gói ban đầu, không xét tới gói sao chép.
- *Độ trễ:* Là tổng thời gian cần truyền gói dữ liệu từ khi nút cảm nhận có gói tới khi gói truyền được tới sink.



Hình 2.10: Hình trạng mạng mô phỏng chạy giao thức DRPDS [J2]

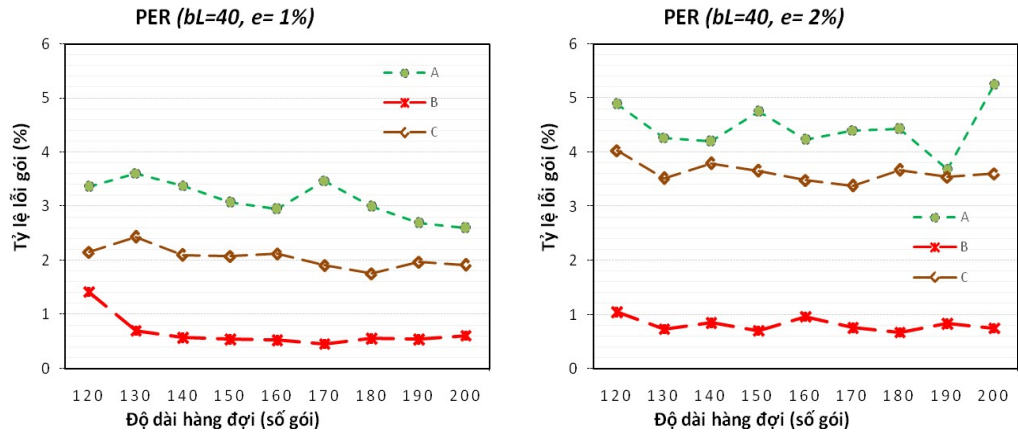
2.3.4.2 Kết quả mô phỏng và đánh giá

Kết quả mô phỏng đã cho thấy giải pháp định tuyến đề xuất có thể thích nghi với yêu cầu chất lượng về trễ và độ tin cậy của nhiều sự kiện của 3 loại yêu cầu QoS khác nhau cùng xuất hiện trong mạng.

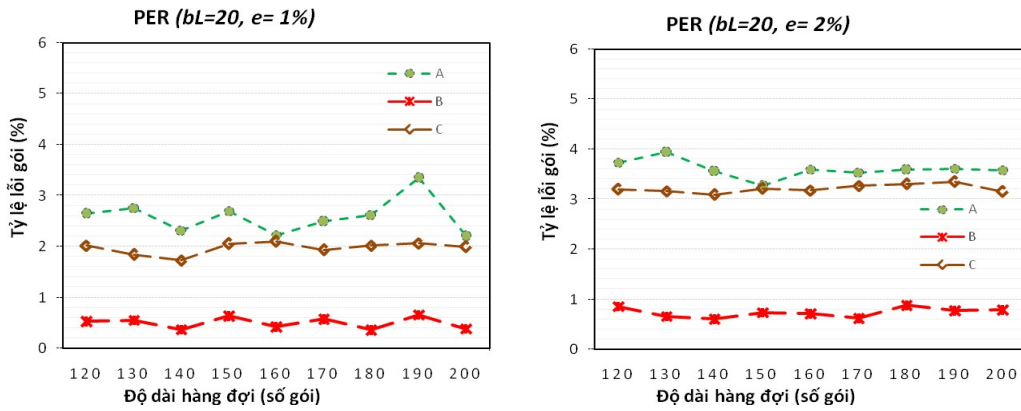
a) Tỷ lệ lỗi gói

Hình 2.11 là kết quả mô phỏng với trường hợp 20 sự kiện/vòng (các sự kiện xuất hiện ngẫu nhiên trong vòng). Khi tỷ lệ lỗi kênh cao thì PER của cả 3 loại sự kiện đều tăng. Có thể thấy PER của gói tin sự kiện B cải thiện đáng kể so với PER của gói tin sự kiện A và C. Cụ thể là PER của sự kiện B giảm nhỏ dưới 1% khi kích thước hàng đợi khá lớn (trên 120 gói) trong khi PER của sự kiện A và C ở khoảng 2 đến 5% khi tỷ lệ lỗi kênh truyền trên từng chặng tương ứng là 1 và 2%.

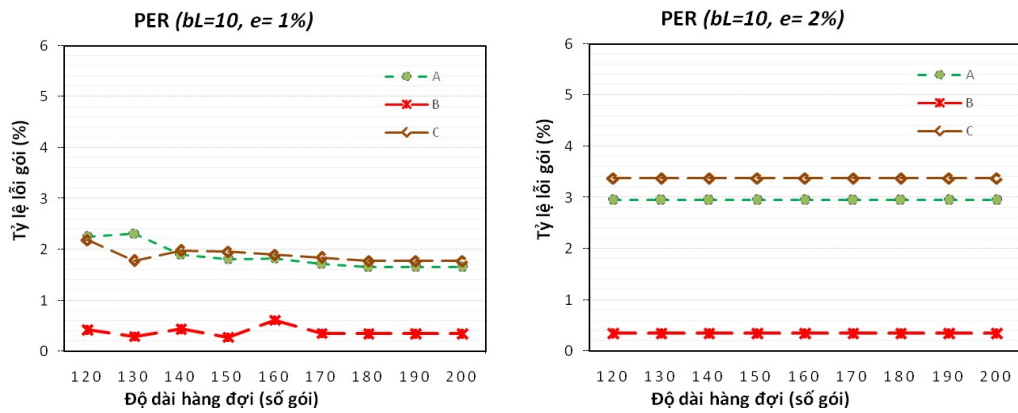
PER của sự kiện C chỉ nhỏ hơn (tốt hơn) PER của sự kiện A khi có nghẽn ($bL=20$ và 40), song theo cách thức chọn tuyến thì C sẽ gửi dữ liệu trên hai đường và một đường là tốt nhất như A, đường còn lại không tốt bằng đường thứ nhất về khoảng cách nên PER trên đường thứ hai sẽ không tốt bằng PER trên đường thứ nhất. Vì thế, trong hầu hết các trường hợp sự khác biệt về PER giữa A và C là không đáng kể.



a) *burstLength* =40 gói, *round*=0,64 giây



b) *burstLength* =20 gói, *round*=0,32 giây



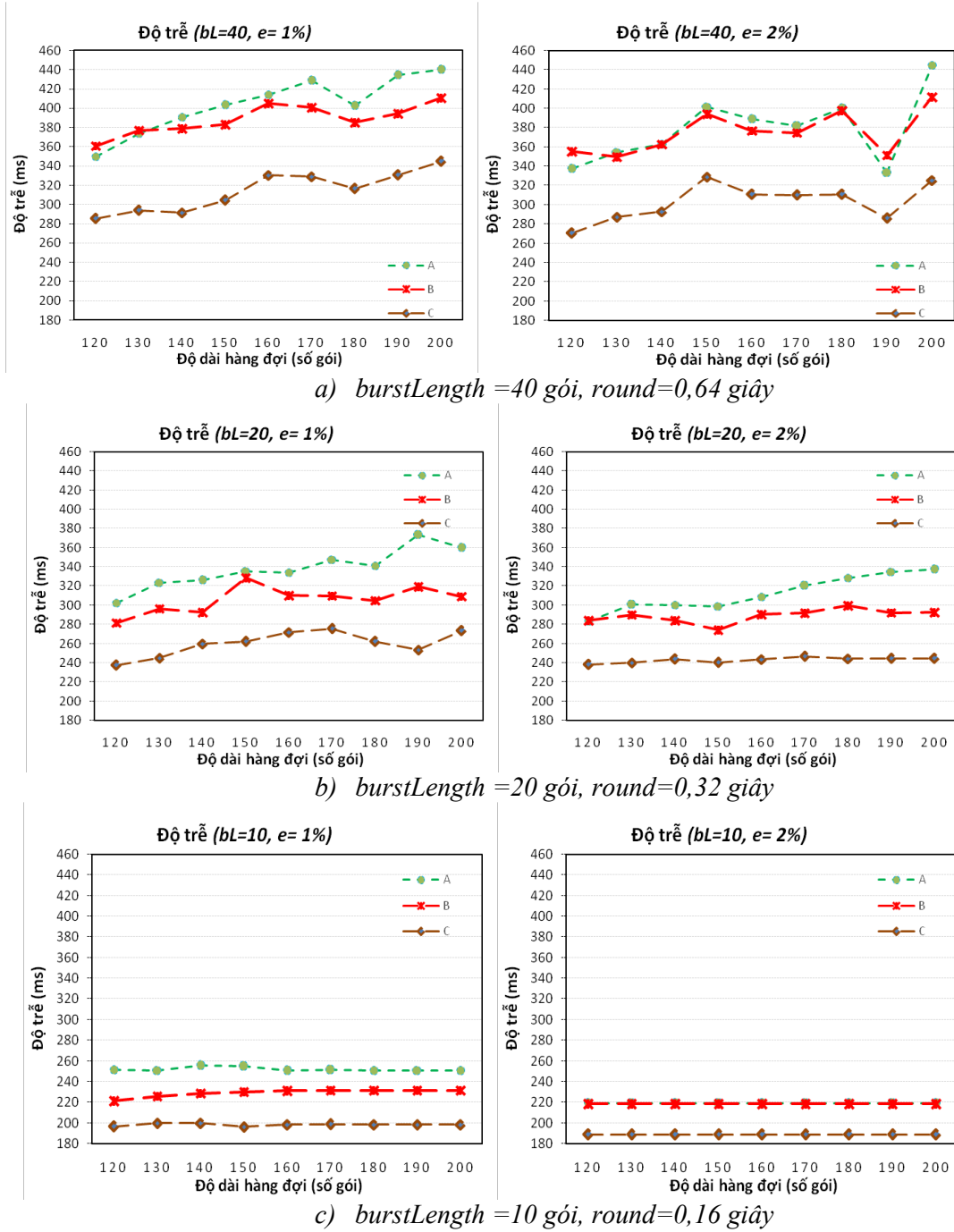
c) *burstLength* =10 gói, *round*=0,16 giây

Hình 2.11: Đánh giá tỷ lệ lỗi gói của ba loại gói dữ liệu của ba loại gói sự kiện (A, B và C) trong các điều kiện WSN đa sự kiện khác nhau sử dụng DRPDS

Kích thước hàng đợi càng lớn thì trễ càng tăng nhưng PER càng giảm, mặc dù gói B chuyển tiếp trên 2 đường và một đường không phải là tốt nhất song do nó gửi gói tin lên cả 2 đường nên chỉ cần nhận được một trong 2 gói truyền trên 2 đường là

đã thành công nên PER của B tốt hơn của A và C, kết quả này phù hợp với kết quả phân tích toán học trong phần 2.3.3.2.

b) Thời gian trễ và hiệu quả trễ của gói loại C so với A và B



Hình 2.12: Đánh giá độ trễ của ba loại gói dữ liệu của ba loại gói sự kiện (A, B và C) trong WSN với các điều kiện khác nhau sử dụng DRPDS

Hình 2.12 là kết quả đo trễ gói trong mô phỏng. Có thể thấy gói của sự kiện loại C có độ trễ trung bình là nhỏ nhất và tốt nhất. Trễ của gói sự kiện loại C được cải thiện hơn hẳn so với sự kiện loại A và B (từ 15-30% tùy theo tỷ lệ chiếm dụng hàng đợi) . Vì các gói của sự kiện loại C được san ra trên hai đường nên lưu lượng trên mỗi đường sẽ giảm đi và C ít gây nghẽn hơn so với A và B.

Khi bL càng nhỏ thì mỗi khi có sự kiện, số gói tin đẩy vào mạng sẽ giảm dần tới độ trễ gói càng giảm và ít thay đổi đột ngột hơn.

Khi tỷ lệ lỗi kênh tăng thì sẽ gây mất gói nhiều hơn và dẫn tới lưu lượng mạng giảm xuống, lưu lượng giảm sẽ làm giảm nghẽn và làm trễ trung bình giảm đi.

2.4 GIẢI THUẬT ĐỊNH TUYẾN NHẬN THỨC NĂNG LƯỢNG EARPM³

Dựa trên đề xuất ở phần 2.3 về giải thuật định tuyến cùng cơ chế phân tải linh hoạt theo sự kiện DRPDS, trong đề xuất này, nghiên cứu sinh tiếp tục cải tiến giải thuật định tuyến linh hoạt có nhận thức năng lượng có tên là EARPM để đáp ứng yêu cầu sử dụng hiệu quả năng lượng của mạng cảm biến không dây đa sự kiện.

2.4.1 Phân tích giải pháp chọn tuyến EARPM

Giải pháp đề xuất được xây dựng dựa trên giao thức định tuyến DRPDS ở mục 2.3 với cải tiến trong giải thuật chọn đường theo mức năng lượng trung bình còn lại của các nút lân cận. Cách thức chọn đường có ba điểm cơ bản:

Thứ nhất: Nút nguồn vẫn chọn số lượng đường để truyền gói tin sự kiện khác nhau dựa trên kiểu loại sự kiện như DRPDS. Chọn đơn đường để định tuyến cho loại sự kiện bình thường (đặt tên là A, sự kiện này không yêu cầu cao về độ tin cậy cũng như độ trễ), đa đường cho hai loại sự kiện có yêu cầu chất lượng cao hơn (đặt tên là B với yêu cầu độ tin cậy cao và đặt tên là C với yêu cầu trễ nhỏ với mức độ nghiêm trọng cao của sự kiện).

³ Một phần nội dung của mục này đã được công bố trên Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự 2018 [J3] và báo cáo tại Hội nghị quốc tế SigTelCom2018 [C2].

Thứ hai: Cơ chế truyền gói tin của B và C khác nhau. Với B, gói dữ liệu từ nguồn cần được sao chép và chuyển tiếp đồng thời trên hai đường trong khi với C thì các gói tin sẽ được chuyển tiếp luân phiên trên hai đường.

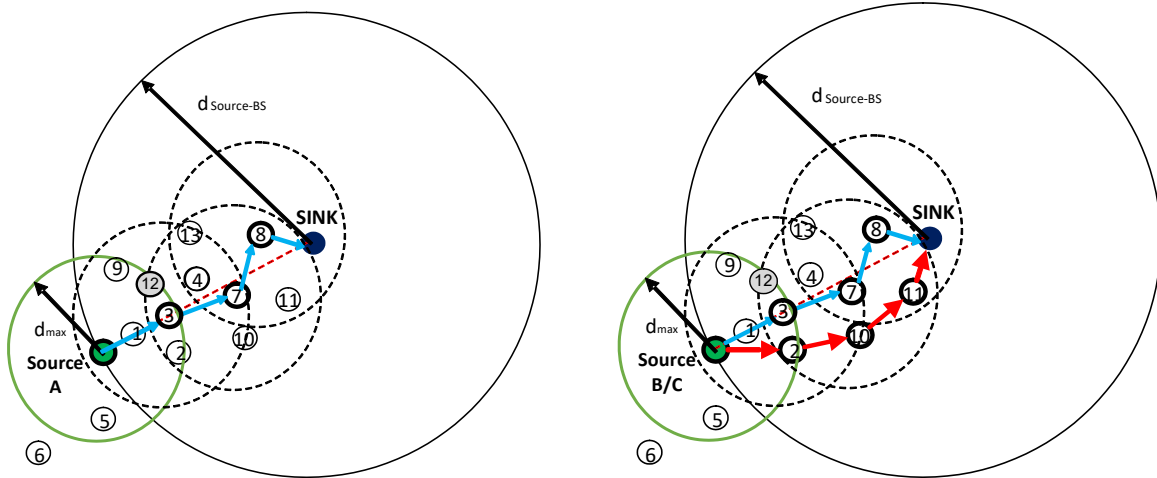
Thứ ba: Điểm khác biệt cơ bản với DRPDS là giải thuật tìm đường. Để tránh cho nút khỏi tiêu hao năng lượng nhanh chóng trên một đường ngắn nhất, các nút trong mạng sẽ thay đổi nút chuyển tiếp trung gian thông qua giá trị năng lượng còn lại của nút, giá trị này phải lớn hơn hoặc bằng giá trị năng lượng còn lại trung bình của các nút lân cận còn sống và gần sink hơn.

Việc xem xét giá trị năng lượng trung bình là cần thiết và hiệu quả vì theo thời gian thì các nút chuyển tiếp sẽ được chọn luân chuyển giữa các nút còn sống, như vậy mức năng lượng còn lại của chúng sẽ giảm chậm và đều hơn. Việc chọn giá trị trung bình sẽ tốt hơn là chọn giá trị lớn nhất bởi vì trong mạng đa sự kiện sẽ có nhiều sự kiện xuất hiện ở nhiều nơi, nếu luôn chọn nút chuyển tiếp có giá trị năng lượng còn lại cao nhất thì chưa chắc đã chọn được nút có khoảng cách tới sink là ngắn nhất, như vậy thì việc chuyển gói tin qua nút có năng lượng lớn nhất lại gây tiêu hao năng lượng lớn cho nút đó, trong khi đó, nút có năng lượng lớn nhất này lại có thể đồng thời là nút chuyển tiếp tốt hơn theo khoảng cách của sự kiện khác xuất hiện trong mạng.

Hình 2.13 mô tả cơ chế định tuyến linh hoạt đề xuất cho WSN đa sự kiện. Nút nguồn cần tìm một (cho sự kiện loại A) hoặc hai nút lân cận (cho sự kiện loại B và C) trong số các nút lân cận có khoảng cách tới sink gần hơn để truyền gói tin mà nó cảm nhận được, các nút chuyển tiếp này cũng cần tìm một lân cận tốt nhất trong số các lân cận của nó để chuyển tiếp gói tin tới đích là sink. Nút nguồn có 5 nút lân cận còn sống (1, 2, 3, 5, 9) và một nút đã chết (12), trong đó chỉ có 4 nút là gần sink hơn (1, 2, 3, 9).

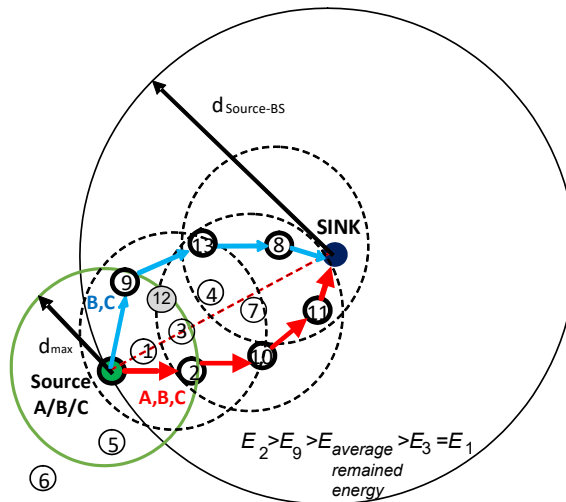
- Với định tuyến GPSR đơn đường: chỉ có một nút còn sống và gần sink nhất là nút 3. Vì thế, nút nguồn sẽ chọn nút 3 là lân cận tốt nhất trên đường định tuyến về sink (Hình 2.13. a). Như vậy nếu sự kiện liên tục

xuất hiện tại một điểm thì năng lượng trên đường được chọn duy nhất này sẽ nhanh chóng bị cạn kiệt và đường này cũng thường xuyên nghẽn.



a) Định tuyến GPSR đơn đường

b) Định tuyến đa đường DRPDS



c) Định tuyến đề xuất EARPM

Hình 2.13: Mô tả cơ chế định tuyến kết hợp đơn đường, đa đường và nhận thức năng lượng [J3]

- Với định tuyến đa đường DRPDS: 4 nút lân cận còn sống có thể được sắp xếp theo thứ tự ưu tiên là 3, 2, 1 và 9 nếu chỉ xem xét tiêu chí về khoảng cách ngắn nhất về sink (Hình 2.13.b). Như vậy trong trường hợp này nếu chọn tối đa hai đường để truyền dữ liệu và nguồn có thể xuất hiện sự kiện

A hoặc B hoặc C thì các gói tin của sự kiện sẽ đi theo đường thứ nhất là Nguồn-nút 3-nút 7- nút 8- SINK (với cả A, B, C); với sự kiện B/C gói sao chép/gói san tải sẽ đi lên đường thứ 2 là Nguồn-nút 2-nút 10- nút 11-SINK. Như vậy nếu sự kiện xuất hiện tập trung tại một điểm thì các nút trên đường đi thứ nhất sẽ bị tiêu hao năng lượng nhiều và liên tục, nghẽn cũng có khả năng xuất hiện nhiều hơn; các nút trên đường đi thứ hai sẽ ít tiêu hao năng lượng hơn và cũng đỡ nghẽn hơn đường thứ nhất.

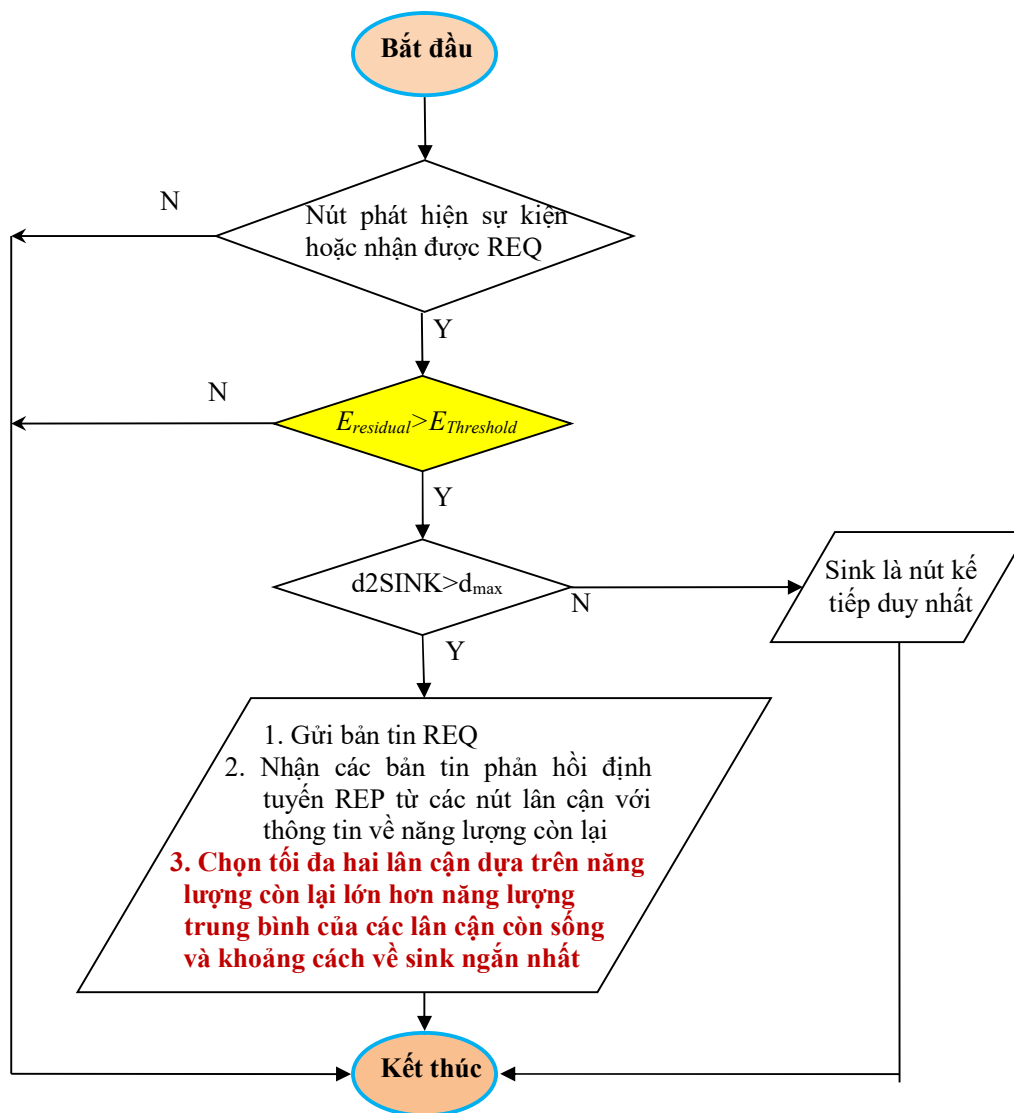
- Với giao thức đề xuất EARPM: Xem xét chọn đường dựa trên hai tiêu chí theo lựa chọn ưu tiên: (1) năng lượng còn lại của nút lân cận, (2) khoảng cách từ lân cận tới sink. Như vậy, ở thời điểm xét trong Hình 2.13c, năng lượng của nút 2 lớn nhất, của nút 9 lớn thứ hai, năng lượng của nút 3 bằng nút 1; khoảng cách từ nút lân cận tới sink ngắn nhất lần lượt là 3, 2, 9 và 1. Khi xét cả 2 tiêu chí thì nút lân cận sẽ sắp xếp theo thứ tự ưu tiên lần lượt là 2, 9, 3 và 1. Nguồn mang gói của sự kiện A sẽ chọn nút 2 là nút chuyển tiếp trong khi B và C sẽ chọn nút 2 và 9 làm hai nút chuyển tiếp trên đường định tuyến về đích. Sau khi chuyển tiếp xong dữ liệu của sự kiện này thì khi có sự kiện khác xuất hiện, nút sẽ xem xét chọn lại đường đi theo tiêu chí năng lượng còn lại và khoảng cách. Như vậy tại thời điểm sau, lựa chọn nút chuyển tiếp sẽ cho kết quả khác và năng lượng của các nút lân cận sẽ giảm đều hơn hai trường hợp GPSR và DRPDS.

2.4.2 Giải thuật định tuyến EARPM

Hình 2.14 mô tả ngắn gọn hoạt động của giao thức EARPM khi nút phát hiện sự kiện hoặc khi nó nhận được yêu cầu định tuyến từ nút lân cận, khi đó nút sẽ phải lựa chọn một hoặc hai lân cận để chuyển tiếp gói dữ liệu đi tới đích.

Khi nút cảm biến phát hiện ra sự kiện, nó sẽ gửi trước yêu cầu định tuyến tới các lân cận còn sống, sau đó các lân cận này sẽ gửi yêu cầu định tuyến tới các lân cận của nó và cứ thế yêu cầu tìm đường chuyển tiếp lan đi trong mạng. Sau đó, nguồn và các nút lân cận sẽ nhận được gói phản hồi từ những lân cận với thông báo về mức năng lượng còn lại. Trên cơ sở đó, nút sẽ xác định lân cận nào được lựa

chọn làm nút chuyển tiếp trên đường chuyển gói tin tới đích. Nếu năng lượng còn lại của nút ($E_{residual}$) nhỏ hơn ngưỡng năng lượng không hoạt động được của nút (E_{dead}) thì nó không thể gửi phản hồi bản tin REQ nó nhận được từ lân cận, nếu năng lượng còn lại nhỏ hơn ngưỡng năng lượng đủ để gửi được bản tin dữ liệu ($E_{threshold}$) thì nút phản hồi được bản tin REQ song không đủ năng lượng để gửi hoặc chuyển tiếp gói dữ liệu. Chỉ có nút nguồn là phải xác định số lượng đường để gửi gói tin theo loại gói tin, còn các nút chuyển tiếp chỉ cần lựa chọn một nút lân cận tốt nhất.



Hình 2.14: Mô tả hoạt động và giải thuật định tuyến EARPM [J3]

- Nếu khoảng cách tới sink bằng hoặc nhỏ hơn d_{max} (cự ly truyền tối đa của cảm biến) thì nút sẽ gửi gói trực tiếp về sink.
- Nếu không thì nút nguồn sẽ phải tìm tối đa hai lân cận tốt nhất để chuyển tiếp gói tin về đích. Hai lân cận tốt nhất được lựa chọn dựa trên 2 tiêu chí: (1) năng lượng còn lại và (2) khoảng cách từ lân cận về sink ngắn nhất. Trong trường hợp nút chỉ còn một lân cận thì cũng như trường hợp nút có thể truyền trực tiếp về sink, dù là gói của sự kiện A, B hay C thì cũng chỉ gửi qua một đường duy nhất. Trong trường hợp có từ 2 lân cận trở lên thì việc lựa chọn lân cận được thực hiện như sau:
 - Lân cận tốt nhất: (1) Có năng lượng còn lại phải lớn hơn hoặc bằng năng lượng trung bình của các nút lân cận còn sống gửi về ($E_{residual} \geq E_{avg}$); (2) Trong số các lân cận thỏa mãn tiêu chí thứ nhất thì chọn lân cận có khoảng cách ngắn nhất về sink (lân cận càng gần sink càng tốt).
 - Lân cận tốt thứ hai: Lựa chọn giống như lân cận tốt thứ nhất. Để tránh trường hợp có nhiều lân cận song chỉ có một lân cận có năng lượng lớn hơn năng lượng trung bình, khi tìm lân cận tốt nhất thứ hai thì sẽ phải tính lại E_{avg} với các lân cận còn lại (không xét lân cận tốt nhất đã tìm được ở bước trên).

2.4.3 Đánh giá hiệu năng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM

2.4.3.1 Kích bản mô phỏng

Bảng 2.2 cho thấy các thông số chính sử dụng trong mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giải thuật định tuyến EARPM dựa trên phần mềm mô phỏng OMNeT++ [133]. Có ba loại sự kiện (A, B và C) xuất hiện trong mạng cảm biến với tỷ lệ xuất hiện tương đương. Các sự kiện sẽ xuất hiện theo vòng thời gian là 0,5 giây một lần, có 2, 4, 5, 10, 20, và 25 nút ở các vị trí ngẫu nhiên cùng gửi gói dữ liệu tại thời điểm ngẫu nhiên trong một vòng, vì thế tổng lưu lượng mạng gửi tương ứng là 25,5; 51; 64; 128, 255 và 319 kbit/giây. Sink đặt ở tâm vùng cảm biến với 100 nút cảm biến rải ngẫu nhiên trong trường cảm biến có phạm vi 500m×500m. Kích thước các gói tin là kích thước ở lớp định tuyến, chưa bao gồm các tiêu đề lớp dưới. Giả sử không

có tranh chấp truy nhập ở lớp MAC (FDMA/CDMA). Do chỉ cần phân biệt ba loại sự kiện khác nhau, chương trình mô phỏng chỉ sử dụng định tuyến đơn đường cho sự kiện loại A và hai đường cho sự kiện loại B (nhân tải), sự kiện loại C (san tải).

Bảng 2.2: Các thông số mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giải thuật định tuyến EARPM [J2], [36], [58]

<i>Thông số</i>	<i>Giá trị</i>
Diện tích trường cảm biến	500m x 500m
Số lượng nút cảm biến	100
Số lượng sự kiện chạy đồng thời trên một vòng thời gian	2, 4, 5, 10, 20, 25
Khoảng thời gian (cho một vòng)	0,5 giây
Số lượng gói tin/ sự kiện (burstLength)	40
Bán kính truyền dẫn vô tuyến của một nút cảm biến (d_{max})	120 m
Kích thước gói tin thông tin định tuyến (từ Sink ở thời điểm mạng bắt đầu hoạt động, gửi tới các nút cảm biến)	32 byte
Kích thước gói tin yêu cầu định tuyến, gói tin trả lời định tuyến	3, 4 byte
Kích thước gói tin dữ liệu DATA và gói tin phản hồi đã nhận dữ liệu ACK	16, 1 byte
Tốc độ đường truyền	30,720 bit/s
Thời gian xử lý (một gói tin ở hàng đợi)	1 milli giây
Kích thước hàng đợi (Số gói tin DATA)	200
PER của một chặng (%)	$(10 - rand(0,1)) \times 10^{-1} \times \left(\frac{d}{d_{max}}\right)^2$
Năng lượng khởi đầu ở mỗi nút	$15 - rand(0,1) \times 10^{-2}$ J
\mathcal{E}_{elec}	50nJ/bit
\mathcal{E}_{amp}	100pJ/bit/m ²
Mức ngưỡng năng lượng $E_{threshold}$	0,1J

Các tham số hiệu năng được đánh giá trong mô phỏng là:

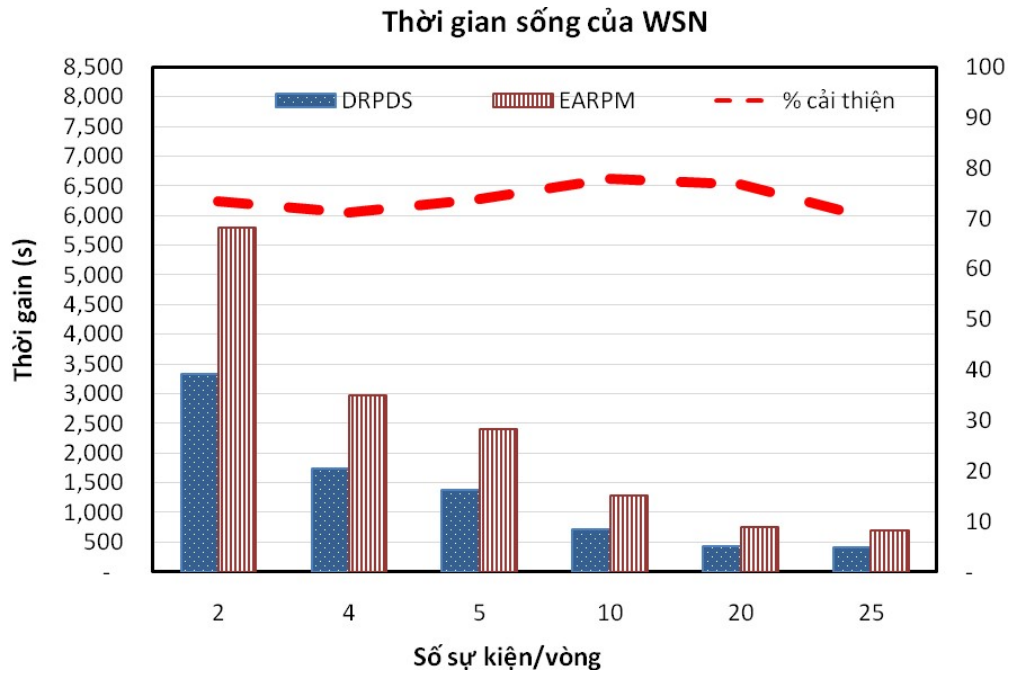
- *Thời gian sống của mạng*: Thời gian sống được định nghĩa là khoảng thời gian từ khi mạng bắt đầu hoạt động tới khi có nút mạng đầu tiên chết (hết năng lượng truyền tin).
- *Số lượng nút chết*: Là số lượng nút có năng lượng còn lại thấp hơn năng lượng ngưỡng (threshold energy).
- *Tỷ lệ lỗi gói*: Là tỷ lệ gói bị mất trên tổng số gói gửi. Với gói tin loại B, gói bị mất là gói tin không thể tới sink dù đi trên đường nào, gói gửi là các gói ban đầu, không xét tới gói sao chép.
- *Độ trễ*: Là tổng thời gian cần truyền gói dữ liệu từ khi nút cảm nhận có gói tới khi gói truyền được tới sink.

2.4.3.2 Kết quả mô phỏng và đánh giá

Kết quả mô phỏng đã cho thấy giải pháp định tuyến đề xuất có thể kéo dài thời gian sống của mạng và thích nghi với yêu cầu chất lượng của nhiều loại sự kiện khác nhau.

a) Thời gian sống và số lượng nút chết

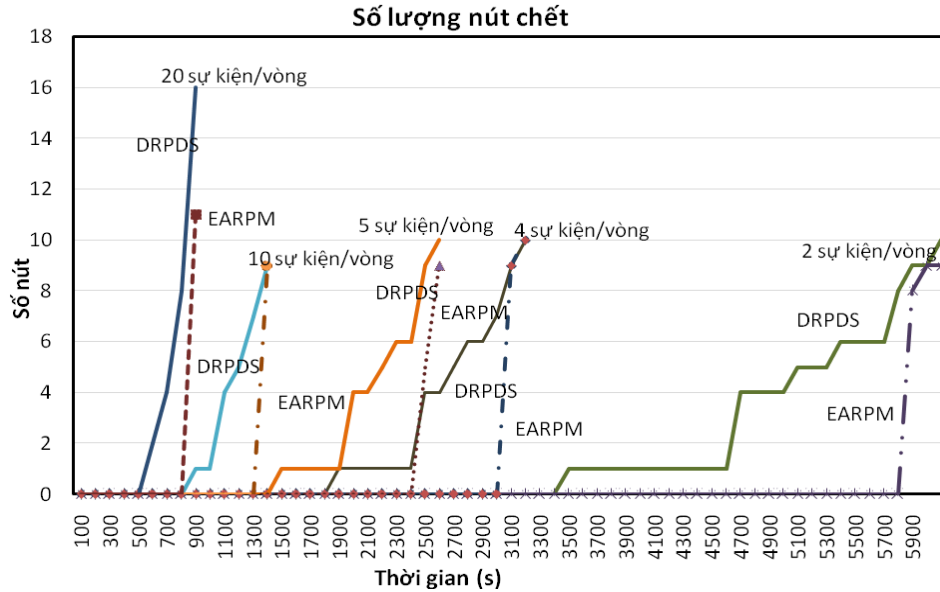
Hình 2.15 là kết quả so sánh giữa thời gian sống của mạng cảm biến không dây đa sự kiện chạy giao thức EARPM so với thời gian sống khi chạy giao thức định tuyến DRPDS dựa trên khoảng cách. Có thể thấy EARPM sử dụng thêm tiêu chí năng lượng còn lại kết hợp tiêu chí khoảng cách nên thời gian sống trong cả 6 kịch bản khác nhau về tốc độ gửi gói đều được kéo dài (khoảng 70%), mặc dù EARPM có yêu cầu phức tạp hơn trong giải thuật định tuyến so với DRPDS, đó là cơ chế phản hồi bản tin yêu cầu định tuyến có thêm thông tin về mức năng lượng còn lại dẫn đến nhược điểm là tăng thêm độ trễ tính toán và tăng năng lượng cho việc truyền thêm và xử lý thông tin này. Kết quả này cũng cho thấy hiệu quả năng lượng trong giải pháp đề xuất khá là ổn định và ít thay đổi khi tăng mật độ sự kiện xuất hiện đồng thời (với điều kiện lưu lượng chưa phải quá lớn gây nghẽn toàn bộ mạng). Tuy nhiên,



Hình 2.15: So sánh thời gian sống của mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM so với DRPDS

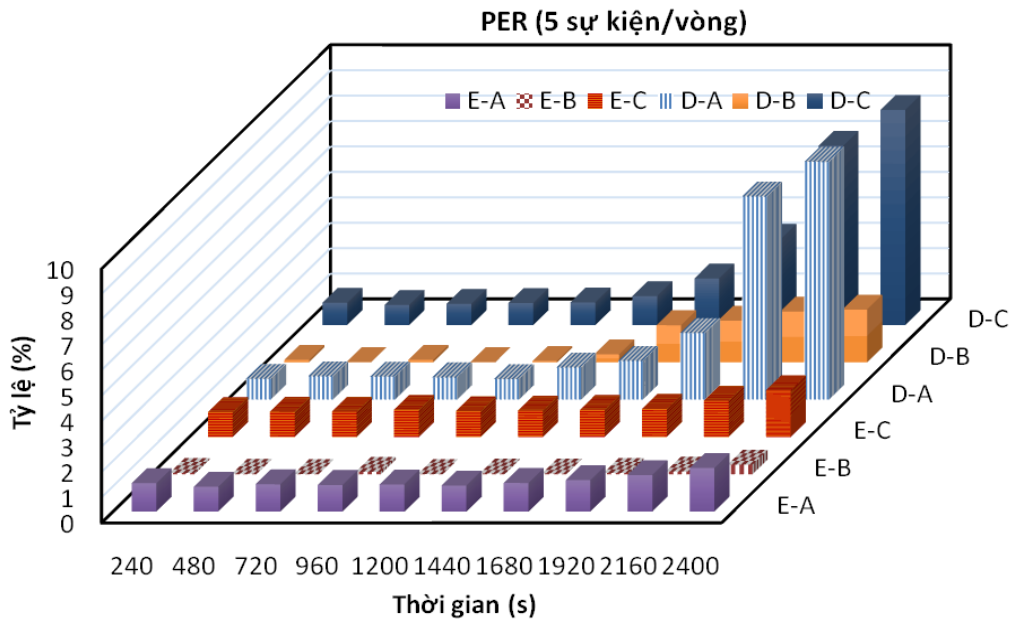
Số lượng nút gửi sự kiện trong một vòng càng lớn thì thời gian sống của mạng càng giảm. Điều này đúng vì khi càng có nhiều sự kiện xuất hiện thì càng có nhiều gói cần chuyển đi và năng lượng tiêu thụ cho việc chuyển tiếp này sẽ gia tăng, các nút tiêu hao năng lượng nhiều hơn và chết sớm hơn dẫn tới tuổi thọ của mạng giảm xuống.

Hình 2.16 cho thấy số lượng nút chết theo thời gian của WSN. Trong giải pháp đề xuất EARPM, nút chết đầu tiên xuất hiện muộn hơn so với giải pháp định tuyến DRPDS, nguyên nhân là vì EARPM xem xét năng lượng còn lại so với năng lượng còn lại trung bình và chọn luân phiên nút chuyển tiếp theo giá trị động này, vì thế việc tiêu hao năng lượng trên mạng được dàn đều hơn, nút sẽ hết năng lượng chậm hơn và chết muộn hơn. Tuy nhiên sau khi bắt đầu có nút chết ở EARPM thì số nút chết sẽ gia tăng rất nhanh.



Hình 2.16: Số lượng nút chết và thời gian sống của mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARP so với DRPDS

b) Tỷ lệ lỗi gói



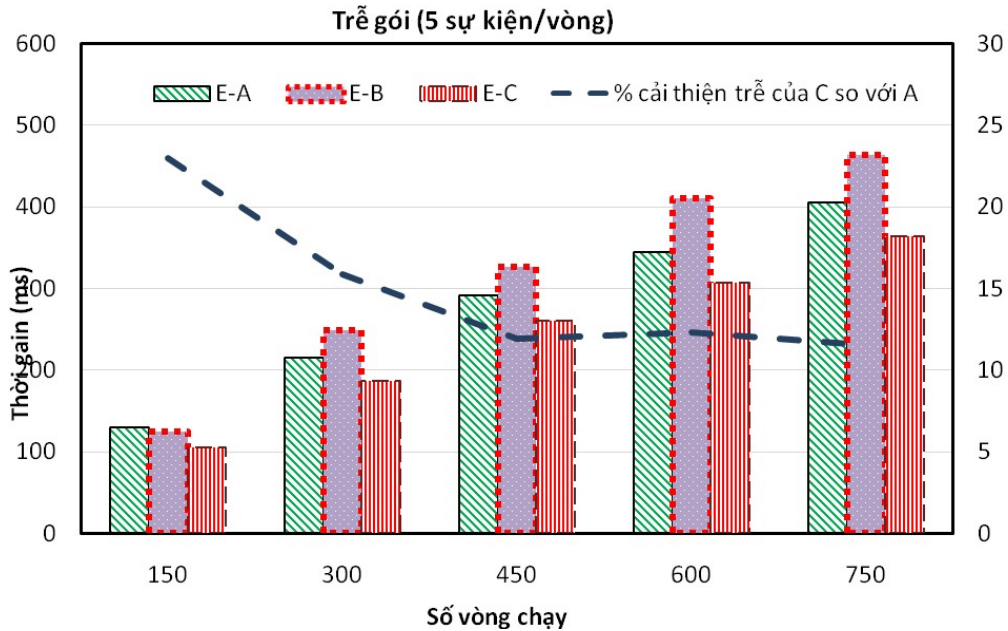
Hình 2.17: Phân tích tỷ lệ lỗi gói của ba loại gói dữ liệu trong mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARP và DRPDS

Hình 2.17 là kết quả mô phỏng với trường hợp 5 sự kiện/vòng (các trường hợp khác cũng có kết quả so sánh tương tự). Có thể thấy PER của gói tin sự kiện B cải thiện đáng kể so với PER của gói tin sự kiện A và B. Hơn nữa, trong thời gian mô

phông từ khi nút đầu tiên chết ở cơ chế định tuyến theo khoảng cách ngắn nhất về sink DRPDS (1380 giây) tới thời điểm nút đầu tiên chết ở giải pháp EARPM (2400 giây) thì PER của cả ba loại gói sự kiện của EARPM (ký hiệu là E-A, E-B và E-C) thấp hơn hẳn so với ba loại gói sự kiện của DRPDS (ký hiệu là D-A, D-B và D-C).

Tuy nhiên, PER của tất cả các loại sự kiện sẽ tăng nhanh sau khi nút đầu tiên chết ở cả hai cơ chế định tuyến. Đó là vì nút chết không thể gửi hoặc chuyển tiếp bất kỳ gói tin nào vì chúng hết năng lượng và như vậy nó sẽ trực tiếp gây mất gói của nó cũng như của nút chuyển tiếp qua nó.

c) Thời gian trễ



Hình 2.18: Phân tích độ trễ của ba loại gói dữ liệu trong mạng WSN đa sự kiện sử dụng EARPM

Hình 2.18 là kết quả đo trễ gói trong mô phỏng với điều kiện 5 sự kiện/vòng. Phần này chỉ phân tích khoảng thời gian từ khi sự kiện đầu tiên xuất hiện cho tới hết 750 vòng (khi mạng có một số nút ở trạng thái ngẽn và các nút vẫn còn sống, như vậy mới có cơ hội xuất hiện đa đường để được chọn). Có thể thấy trễ của gói tin C có giá trị thấp nhất, trễ của gói A có giá trị cao hơn còn trễ của gói B có giá trị lớn hơn cả. Trễ của gói C được cải thiện đáng kể so với gói A và B bởi vì gói của sự

kiện C sẽ được tách ra trên hai đường vì thế số gói loại C trên một đường sẽ giảm một nửa so với gói A và B, như vậy trong trường hợp lưu lượng của hai sự kiện chồng lên nhau trên một đường thì C sẽ có lợi thế hơn so với A và B. Song, sự cải thiện này chỉ tốt và phân biệt rõ khi hàng đợi bị chiếm với tỷ lệ chiếm dụng thấp (ở 750 vòng chạy ban đầu), giá trị này sẽ bị giảm đi khi hàng đợi đầy dần.

Trễ của gói sự kiện B tăng vì số gói tin của sự kiện loại B là gấp đôi sự kiện loại A và C. Gói loại B được gửi sao chép lên hai đường nên chính nó gây nghẽn nhiều hơn trên đường mà nó đi khi gặp một luồng gói khác. Và trong trường hợp xấu nhất là đường đi bị tụt lại trên đường về sink thì các gói sẽ gộp chung trên một đường và lại càng gây nghẽn.

Theo kết quả mô phỏng, giải pháp định tuyến EARPMP với việc chọn tuyến động dựa trên loại sự kiện và năng lượng còn lại mang tới ba lợi ích đồng thời: giảm PER cho sự kiện loại B, giảm trễ cho sự kiện loại C và kéo dài tuổi thọ cho toàn mạng.

2.5 KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Nội dung Chương 2 tập trung nghiên cứu giải pháp đề xuất giải thuật định tuyến đa đường trong mạng cảm biến không dây đảm bảo QoS cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện. Chương 2 giới thiệu về một số giao thức định tuyến định hướng sự kiện, định tuyến linh hoạt đáp ứng đa loại sự kiện và định tuyến đa đường đảm bảo tin cậy. Dựa trên những giao thức định tuyến này, nghiên cứu sinh đề xuất hai giải pháp định tuyến mới. Giải pháp thứ nhất là giải thuật định tuyến và cơ chế phân tải linh hoạt DRPDS có thể đáp ứng được ba loại sự kiện trong mạng cảm biến không dây đa sự kiện bằng việc kết hợp giữa đơn và đa đường cùng với việc phân tải linh hoạt lên đa đường. Kết quả là DRPDS giúp mạng đáp ứng được yêu cầu đồng thời của ba loại sự kiện khác nhau trong điều kiện khác nhau về tỷ lệ lỗi gói với sự kiện loại C yêu cầu trễ thấp giảm được 20% thời gian trễ so với các loại sự kiện còn lại, sự kiện loại B yêu cầu độ tin cậy cao đáp ứng được yêu cầu tỷ lệ mất gói nhỏ hơn nhiều lần so với tỷ lệ lỗi gói của một chặng và nhỏ hơn so với những sự kiện khác dù truyền thông đa chặng. Giải pháp thứ hai là giải thuật định tuyến

linh hoạt nhận thức năng lượng EARPM. Giải pháp này dựa trên nền tảng của giải pháp thứ nhất là DRPDS và tăng hiệu quả sử dụng năng lượng bằng việc cải tiến giải thuật định tuyến có xét tiêu chí năng lượng còn lại của nút chuyển tiếp kế tiếp. Kết quả mô phỏng EARPM cho thấy mạng sử dụng năng lượng hiệu quả hơn thể hiện ở việc thời gian sống của toàn mạng kéo dài thêm khoảng 70%, độ tin cậy của gói tin loại sự kiện B vẫn đảm bảo cao hơn so với gói của các loại sự kiện khác, độ trễ của gói tin loại sự kiện C được cải thiện trong điều kiện mạng có nghẽn song không giảm được nhiều như DRPDS do các tuyến đường được chọn luân phiên theo năng lượng hiện tại của các nút trong mạng. Kết quả này cũng phản ánh đúng thực trạng khó giải quyết của bài toán đa ràng buộc: đảm bảo được tiêu chí hiệu năng này sẽ ảnh hưởng tới tiêu chí hiệu năng khác.

Đề xuất của chương 2 đã xét việc xử lý định tuyến gói tin và coi điều kiện mặc định là không có tranh chấp truy nhập ở lớp MAC (như sử dụng FDMA hoặc CDMA). Để xét ảnh hưởng của lớp truy nhập MAC trong điều kiện có cạnh tranh, chương 3 nghiên cứu và đề xuất giao thức MAC mới có thể đáp ứng đa yêu cầu QoS của nhiều sự kiện đồng thời và vẫn đảm bảo tiêu thụ hiệu quả năng lượng cho mạng cảm biến không dây.

CHƯƠNG 3: CẢI THIỆN HIỆU NĂNG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY ĐA SỰ KIỆN SỬ DỤNG GIAO THỨC MAC ƯU TIÊN

Tóm tắt⁴: Nội dung của chương trình bày về giải pháp nghiên cứu sinh đề xuất để cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức MAC ưu tiên có tên là PMME. Giao thức này được phát triển từ hai giao thức MAC QAEF và MPQ đã phân biệt và ưu tiên từ 2 tới 4 mức độ khác nhau cho gói tin trong mạng cảm biến không dây. Bằng cách kết hợp cơ chế CSMA p -persistent với giá trị p thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu với cơ chế nhận sớm Tx-Beacon, PMME giúp mạng hoạt động hiệu quả hơn với việc giảm trễ truyền dữ liệu, tăng hiệu quả sử dụng năng lượng mà vẫn đảm bảo tỷ lệ truyền gói thành công cao. Kết quả mô phỏng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng PMME trên Castalia cho thấy mạng truyền thông hiệu quả hơn so với việc sử dụng QAEF và MPQ ở lớp MAC ở ba thông số cụ thể là (1) thời gian trễ truyền gói giảm với tất cả 4 mức ưu tiên khác nhau, khi số lượng nút gửi cạnh tranh tăng từ 1 đến 10 thì trễ gói PMME chỉ tăng rất chậm, giảm hơn so với QAEF và MPQ từ 2 đến 60 ms trên một chặng; (2) hiệu quả sử dụng năng lượng tốt hơn so với QAEF (giảm được 10% đến 50% năng lượng khi số nút gửi tăng từ 2 đến 10) cũng như so với MPQ (giảm được 6-9%) và (3) tỷ lệ truyền gói thành công cao hơn hai giao thức MAC tiền nhiệm. Đóng góp này được công bố trong hai hội thảo [C3, C4] và một bài tạp chí [J4].

3.1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các mạng cảm biến không dây đa sự kiện, nhiều sự kiện có thể đồng thời xuất hiện và yêu cầu mức độ ưu tiên trong truyền thông khác nhau như độ trễ, độ tin cậy [15], [51], [65], [76], [115], trong khi mạng vẫn phải đảm bảo sử dụng năng lượng hiệu quả [12], [90]. Như đã trình bày trong mục 1.3 và 2.1, có rất nhiều nghiên cứu liên quan tới vấn đề này và tập trung vào các giải pháp sử dụng kỹ thuật

⁴ Một phần nội dung của Chương 3 được công bố tại Hội nghị REV-ECIT2018 [C3], IEEE ICT-2019 [C4] và Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự 2019 [J4].

định tuyến hoặc kỹ thuật ưu tiên trong hàng đợi lớp 3, tuy nhiên với việc sử dụng giao thức lớp MAC để đảm bảo ưu tiên cho thông tin thì mới chỉ có một vài nghiên cứu được thực hiện [76], [77], [114], [115]. Những giải pháp sử dụng giao thức MAC này có ưu điểm là đã đảm bảo ưu tiên về chất lượng cho những sự kiện khác nhau trong mạng cảm biến, song vẫn còn hạn chế trong việc giới hạn số mức ưu tiên, xử lý ưu tiên còn một phần bị động theo số nút gửi đồng thời và vẫn còn để thời gian trễ truy nhập kéo dài với những sự kiện có mức ưu tiên không phải là cao nhất.

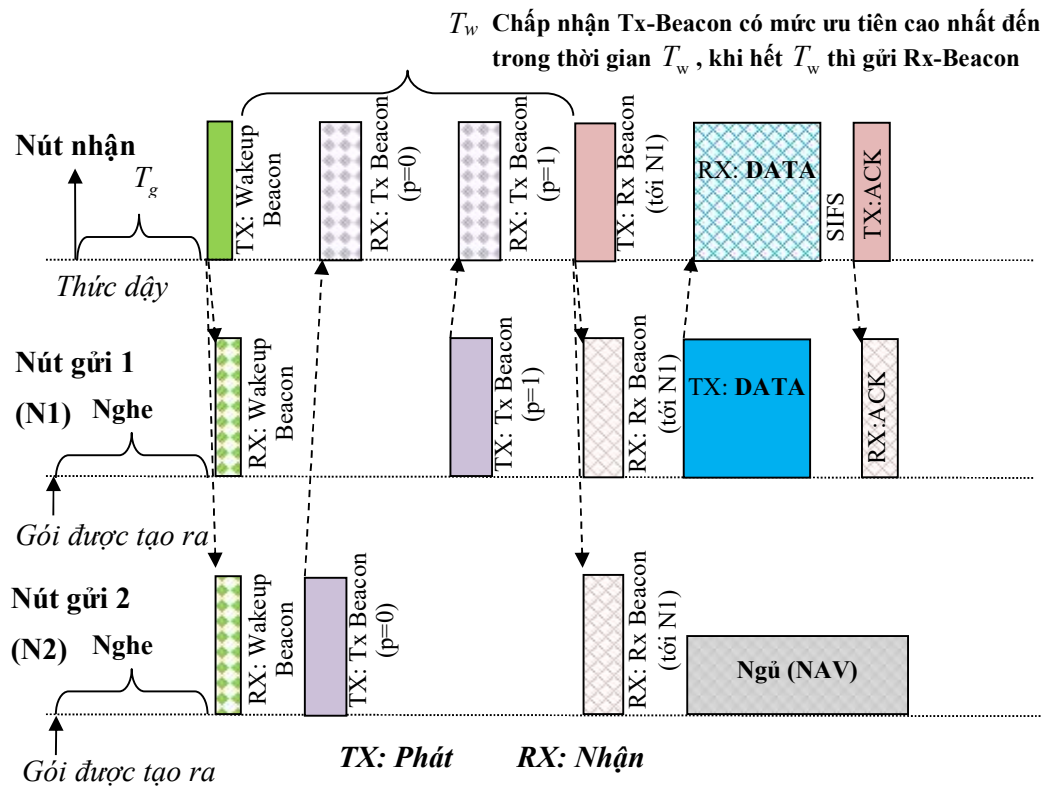
Để vừa giải quyết được vấn đề ưu tiên cho nhiều kiểu sự kiện có yêu cầu chất lượng khác nhau, vừa khắc phục được các hạn chế của các nghiên cứu trên, nghiên cứu sinh đề xuất giao thức MAC ưu tiên mới có tên là PMME dựa trên hai giao thức MAC đã có ưu tiên sự kiện là QAEE [76] và MPQ [114]. Trên cơ sở kết hợp cơ chế CSMA p -persistent với giá trị p thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu với cơ chế nhận sớm Tx-Beacon, PMME đã tự động và linh hoạt hơn trong việc xử lý ưu tiên dữ liệu theo yêu cầu, đồng thời vẫn đảm bảo những tiêu chí hiệu năng quan trọng cho mạng cảm biến.

Như vậy, nhằm đặt ra và đạt được mục tiêu nghiên cứu, trước hết cần phân tích cụ thể cơ chế hoạt động của hai giao thức MAC có xét ưu tiên. Tiếp sau đó là đề xuất kết hợp cơ chế hoạt động CSMA p -persistent linh hoạt theo mức ưu tiên của dữ liệu cảm biến với cơ chế nhận Tx-Beacon sớm nhất ở lớp MAC. Cuối cùng là phân tích tính toán các tham số hiệu năng như trễ, độ tổn thất và kiểm nghiệm đánh giá bằng mô phỏng để thấy được hiệu quả của giải pháp đề xuất.

3.2 GIAO THỨC MAC ƯU TIÊN

Phần này giới thiệu chi tiết về hai giao thức MAC làm nền tảng cho giao thức đề xuất PMME của nghiên cứu sinh là QAEE [76] và MPQ [114]. Đây là hai giao thức MAC dị bộ và do bên nhận khởi hoạt việc truyền thông, những giao thức kiểu này có hiệu năng tốt hơn so với giao thức do bên gửi khởi hoạt [45]. Hai giao thức này đảm bảo QoS cho có xét đa mức ưu tiên, đảm bảo hiệu năng phân biệt cho các mức ưu tiên đề ra: QAEE xét hai mức độ ưu tiên gói là cao và thấp và MPQ có xét tới bốn mức độ ưu tiên cho gói tin.

3.2.1 Giao thức QAEE



Hình 3.1: Mô tả hoạt động truyền thông của giao thức QAEE-MAC [76]

QAEE xem xét hai mức ưu tiên của gói tin là cao và thấp, nó cho phép gói tin có độ ưu tiên cao được truyền nhanh hơn so với gói tin có độ ưu tiên thấp. Hình 3.1 mô tả hoạt động truyền thông này trong đó SIFS (Short Interframe Space) là khoảng thời gian yêu cầu để xử lý một khung tin và chuyển trạng thái vô tuyến của nút cảm biến.

- Bước 1: Nút nhận sẽ thức dậy theo chu kỳ đều đặn để nhận gói tin gửi từ các nút gửi. Sau khi thức dậy, nút sẽ lắng nghe môi trường truyền trong khoảng thời gian đảm bảo là T_g và sau đó sẽ gửi Wakeup-Beacon để báo cho các nút gửi biết. Sau khi truyền Wakeup-Beacon nút sẽ chờ trong một khoảng thời gian T_w để nhận toàn bộ các Tx-Beacon (có thêm trường ưu tiên) của các nút gửi.

- Bước 2: Các nút gửi sẽ chèn vào Tx-Beacon bit thông tin về độ ưu tiên của gói tin và trường NAV (Network Allocation Vector) rồi gửi đi. Sau đó, nút sẽ đợi Rx-Beacon có bổ sung trường NAV từ nút nhận.
- Bước 3: Nút nhận nhận được nhiều Tx-Beacon với nhiều mức ưu tiên khác nhau sẽ chọn nút được gửi dựa trên mức ưu tiên cao nhất đến trong khoảng thời gian T_w . Sau đó, nó quảng bá Rx-Beacon mang địa chỉ của bên gửi có mức độ ưu tiên cao nhất được chọn.
- Bước 4: Nút nhận nhận Rx-Beacon này, nếu nó được chọn gửi thì gửi dữ liệu; nếu không được chọn gửi thì sẽ không hoạt động trong thời gian NAV.
- Bước 5: Khi nút nhận nhận xong khung dữ liệu, nó sẽ gửi phản hồi khung dữ liệu xác nhận ACK và sẽ bắt đầu một chu kỳ nhận gói mới.
- Bước 6: Ở chu kỳ nhận gói mới này, các nút có dữ liệu chưa được gửi sẽ thức dậy và lại tiếp tục gửi Tx-Beacon.

QAEE có hai nhược điểm. Thứ nhất, nó chỉ xét hai mức ưu tiên gói là cao (1) và thấp (0). Thứ hai, nút nhận phải chờ tới khi nó nhận toàn bộ Tx-Beacon từ các nút gửi trong thời gian T_w thì mới tiến hành gửi Rx-Beacon cho phép gửi dữ liệu. Điều này có nghĩa là ngay cả khi bên nhận đã nhận được Tx-Beacon có mức ưu tiên cao nhất rồi thì nó vẫn phải chờ cho tới khi hết thời gian T_w . Vì vậy nút gửi dù có mức ưu tiên cao hơn vẫn phải chờ đợi và những nút khác cũng phải tiêu tốn thời gian và năng lượng thức trong khi chờ nhận được Rx-Beacon.

3.2.2 Giao thức MPQ

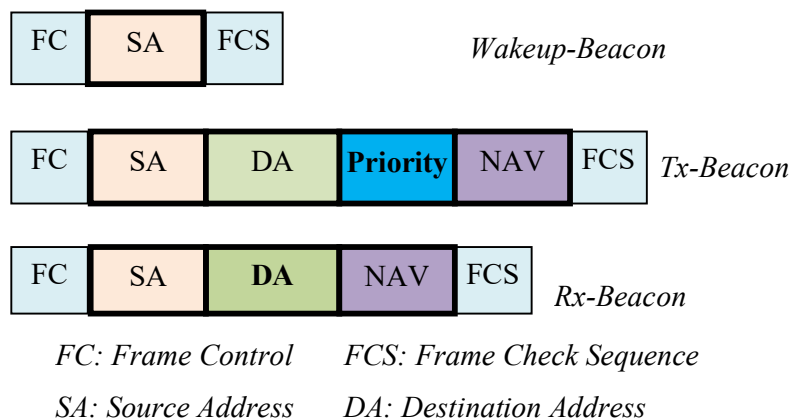
MPQ đã cải tiến QAEE ở hai điểm: thứ nhất, nó xét bốn mức ưu tiên khác nhau (Bảng 3.1) và thứ hai, nó giảm trễ đáng kể cho gói tin có độ ưu tiên cao nhất bằng cách bên nhận khi đã nhận được yêu cầu truyền gói Tx-Beacon có mức ưu tiên cao nhất rồi thì gửi luôn xác nhận Rx-Beacon để cho bên gửi truyền khung dữ liệu luôn mà không phải chờ cho tới khi hết thời gian T_w . Các khung mang dữ liệu có mức ưu tiên thấp hơn thì vẫn phải chờ cho tới hết T_w . Giao thức MPQ sử dụng cơ

chế CSMA p-persistent với giá trị p được gán bằng tỷ lệ nghịch của số nút gửi n_s để có thể dàn đều việc gửi gói giúp giảm bớt xung đột.

Bảng 3.1: Các mức ưu tiên gói [115]

Phân loại dữ liệu	Mức ưu tiên
Khẩn cấp	4
Ưu tiên cao nhất	3
Ưu tiên	2
Không ưu tiên	1

Giao thức MPQ sử dụng khuôn dạng chung của các khung theo chuẩn IEEE 802.15.4 cho Wakeup-Beacon, Tx-Beacon và Rx-Beacon với một số trường đặc biệt được tô đậm như trong Hình 3.2.



Hình 3.2: Khuôn dạng các Beacon trong giao thức MPQ [115]

SA là địa chỉ nguồn có gói dữ liệu cần gửi tới đích có địa chỉ DA. Trong Wakeup-Beacon, SA là địa chỉ nút thu, nó được sử dụng để phát quảng bá ra môi trường xung quanh nên không có địa chỉ đích DA cụ thể. Trong bản tin Tx-Beacon, SA là địa chỉ của nút có dữ liệu cảm biến muốn gửi đi, DA là địa chỉ nút thu, Priority mang thông tin về mức ưu tiên của dữ liệu cảm biến cần gửi. Trong Rx-Beacon, SA là địa chỉ của nút muốn nhận dữ liệu, DA là địa chỉ nút có dữ liệu cảm biến được chọn cho phép gửi.

Tuy nhiên MPQ vẫn còn có hai hạn chế. Thứ nhất, chỉ khung dữ liệu có độ ưu tiên cao nhất mới được xử lý sớm, còn lại các khung mang dữ liệu có độ ưu tiên

thấp hơn vẫn phải chờ tới khi hết thời gian chờ T_w thì mới được xem xét để gửi. Như vậy những nút mang gói tin không phải có mức ưu tiên cao nhất phải tiêu tốn thời gian để chờ nhận được Rx-Beacon, việc này cũng kéo theo hiệu quả sử dụng năng lượng giảm do trong thời gian chờ đợi này nút vẫn phải thức và có thể nhiều nút gửi Tx-Beacon đồng thời sẽ gây xung đột và lại càng tiêu tốn năng lượng. Thứ hai, việc gán giá trị p khá cứng nhắc và không thực tế khi phải biết chính xác số nút gửi cạnh tranh tại một thời điểm, điều này không phù hợp với mạng cảm biến đa sự kiện có nhiều sự kiện có thể xuất hiện với số sự kiện ngẫu nhiên.

Với những nhược điểm còn tồn tại của hai giao thức QAEE và MPQ, nghiên cứu sinh thấy cần tiếp tục cải tiến giao thức MAC để cải thiện hơn nữa hiệu năng của mạng, khắc phục được hai nhược điểm nêu trên, cụ thể là giảm được trễ chờ nhận được Rx-Beacon để được phép gửi dữ liệu và sử dụng giá trị p linh hoạt theo mức độ ưu tiên của dữ liệu chứ không cứng nhắc theo số nút gửi dữ liệu đồng thời như trong hai giao thức kể trên.

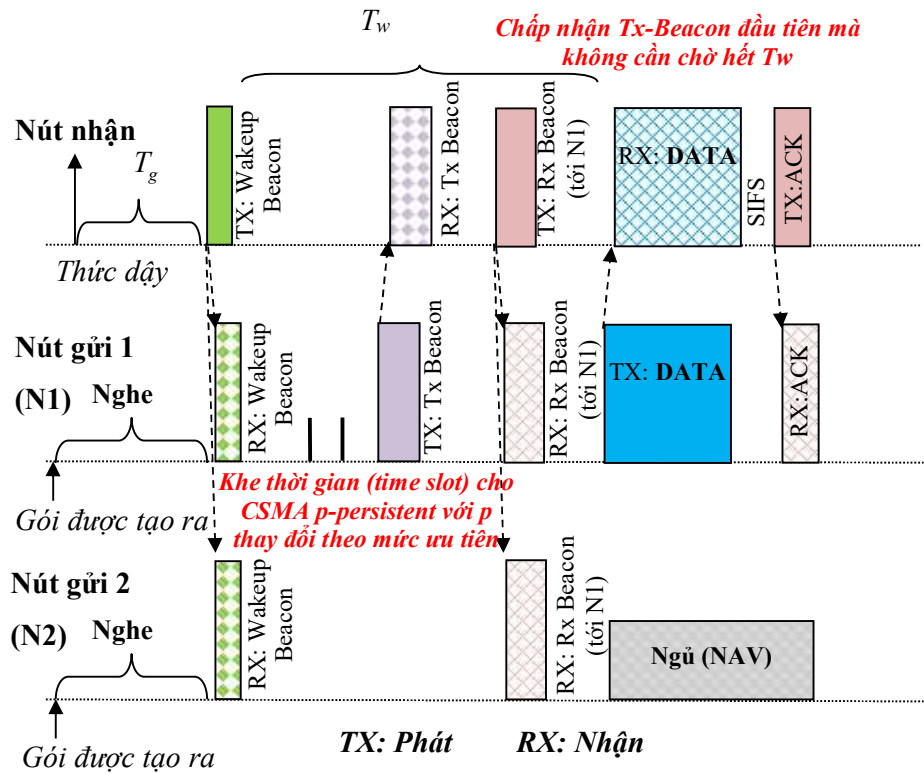
3.3 ĐỀ XUẤT GIAO THỨC MAC ƯU TIÊN PMME

Để có thể đạt được chất lượng truyền thông theo mức ưu tiên của dữ liệu cảm biến cần gửi, giao thức MAC do nghiên cứu sinh đề xuất trong luận án có hai thay đổi so với giao thức QAEE và MPQ. Một là để có thể ưu tiên nhận khung dữ liệu có mức ưu tiên cao, giao thức PMME cho phép các nút gửi có cơ chế gửi yêu cầu gửi Tx-Beacon với tần suất gửi tỷ lệ với mức độ ưu tiên của gói tin. Hai là, rút ngắn thời gian chờ Rx-Beacon để được quyền gửi dữ liệu. Khi nút nhận nhận được Tx-Beacon từ bất kỳ nút gửi nào thì nút nhận sẽ gửi Rx-Beacon chấp nhận cho nút gửi đầu tiên. Rx-Beacon cũng có ý nghĩa là thông báo cho các nút gửi khác tạm ngừng trong thời gian nút nhận nhận dữ liệu, như vậy sẽ giảm năng lượng tiêu thụ cho mạng cũng như tránh những xung đột không cần thiết.

3.3.1 Giao thức MAC ưu tiên PMME

Cũng giống như giao thức QAEE, giao thức đề xuất PMME giữ nguyên hoạt động và trình tự thu nhận các Beacon và khung dữ liệu như đã phân tích ở Mục 3.1.

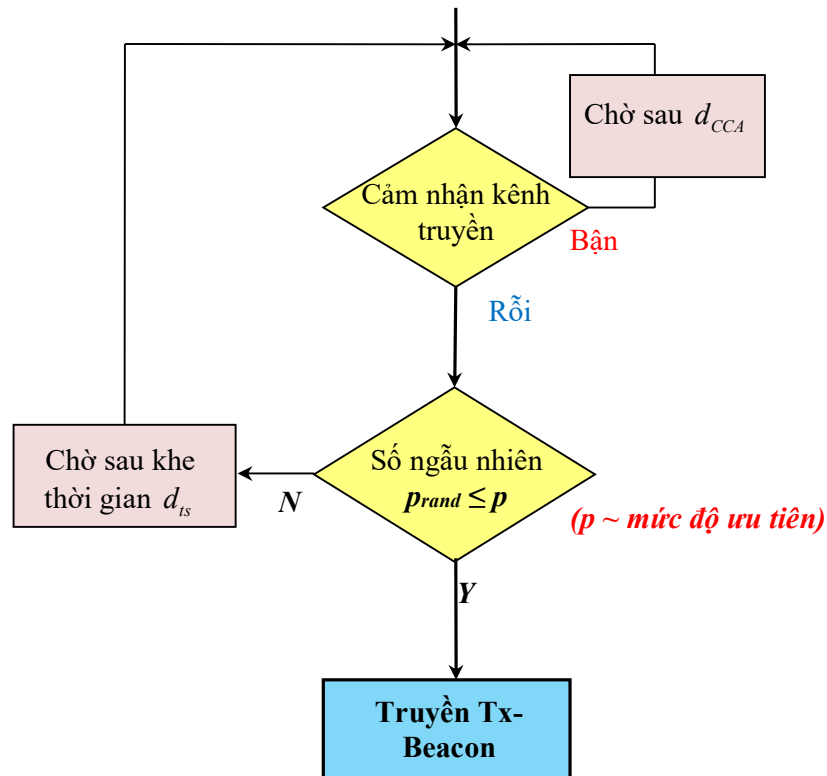
Mỗi bản tin từ lớp ứng dụng sẽ được chuyển xuống lớp mạng để đóng gói và chuyển xuống lớp MAC. Giao thức đề xuất PMME cũng xét bốn mức ưu tiên cho bản tin lớp ứng dụng và thiết kế các trường trong các Beacon như MPQ. Hai thay đổi chính tập trung vào thời gian nút gửi Tx-Beacon sau khi nhận được Wakeup-Beacon và thời gian nút nhận gửi phản hồi Rx-Beacon. Hình 3.3 mô tả hoạt động truyền thông của giao thức PMME đề xuất với hai cơ chế cải tiến là cơ chế CSMA p -persistent với p thay đổi theo mức độ ưu tiên của khung dữ liệu và cơ chế chấp nhận Tx-Beacon sớm nhất.



Hình 3.3: Mô tả hoạt động truyền thông của giao thức PMME [C4]

3.3.1.1 Cơ chế CSMA p -persistent thay đổi theo mức độ ưu tiên của gói tin

Để ưu tiên gói tin có mức ưu tiên cao hơn gói tin có mức ưu tiên thấp, trong giao thức PMME, nghiên cứu sinh thay đổi cơ chế CSMA p -persistent cho việc gửi Tx-Beacon với p thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu cần truyền (Hình 3.4).



Hình 3.4: Cơ chế CSMA p-persistent cho việc gửi Tx-Beacon theo mức độ ưu tiên dữ liệu trong PMME [C3]

Với cơ chế này, nếu nút gửi nhận được Wakeup-Beacon từ nút nhận, nó sẽ cảm nhận kênh truyền để quyết định có gửi Tx-Beacon hay không. Tiếp đó, nếu cảm nhận kênh truyền là bận thì nút gửi sẽ quay lại cảm nhận kênh truyền ngay sau thời gian trễ của lớp vật lý để cảm nhận chính xác môi trường truyền dẫn có bận hay không (CCA check delay). Nếu nút gửi cảm nhận được kênh truyền là rỗi thì nó sẽ thực hiện các bước sau [C4]:

- i. Gieo ngẫu nhiên p_{rand} và so nó với giá trị xác suất p_i (với p_i thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu, mức độ ưu tiên càng cao thì p_i càng lớn với $0 \leq p_i \leq 1$, i là mức ưu tiên). Trong đề xuất của nghiên cứu sinh, để phù hợp với sự khác biệt về mức độ ưu tiên của dữ liệu của các sự kiện khác nhau, có thể gán hai kiểu giá trị p_i khác nhau: tuyến tính và phi tuyến.

- Với kiểu tuyến tính, nút gửi có mức ưu tiên i sẽ có giá trị $p_{i,n}$ là

$$p_{i,n} = \frac{i}{\sum_{j=1}^n j} \quad (3.1)$$

trong đó n là số mức ưu tiên.

- Với kiểu phi tuyến, nút gửi có mức ưu tiên i sẽ có giá trị $p_{i,a,n}$ là

$$p_{i,a,n} = \frac{a^{i-1}}{\sum_{j=1}^n a^{j-1}} \quad (3.2)$$

trong đó a là cơ số phân biệt, n là số mức ưu tiên.

Nếu tỷ lệ gói tin có mức ưu tiên khác nhau gửi từ lớp mạng xuống là như nhau thì ta có thêm điều kiện ràng buộc là tổng các giá trị p_i phải bằng 1 để tránh xung đột các bản tin yêu cầu gửi Tx-Beacon như sau:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (\text{tuyến tính } \sum_{i=1}^n p_{i,n} = 1, \text{ phi tuyến } \sum_{i=1}^n p_{i,a,n} = 1) \quad (3.3)$$

- ii. Nếu p_{rand} nhỏ hơn hoặc bằng giá trị $p_{i,n}$ thì nút sẽ truyền khung dữ liệu.
- iii. Nếu p_{rand} lớn hơn giá trị $p_{i,n}$ thì chờ sau một khe thời gian rồi lại cảm nhận lại kênh truyền.

Như vậy, các Tx-Beacon của nút mang dữ liệu có độ ưu tiên cao sẽ có xác suất xuất hiện sớm hơn so với các Tx-Beacon của nút mang dữ liệu có độ ưu tiên thấp hơn, như vậy tỷ lệ chấp nhận cho nút gửi dữ liệu có mức độ ưu tiên cao sẽ cao hơn và thời gian trung bình để bắt đầu gửi Tx-Beacon của nút mang dữ liệu có độ ưu tiên cao hơn sẽ sớm hơn.

3.3.1.2 Cơ chế chấp nhận Tx-Beacon sớm nhất

Để giảm thời gian chờ đợi trong cửa sổ cạnh tranh sau khi nút nhận gửi Wakeup-Beacon, giao thức PMME sử dụng cơ chế gửi phản hồi chấp nhận nút gửi Tx-Beacon sớm nhất bằng việc gửi bản tin Rx-Beacon ngay sau khi nhận bản tin Tx-Beacon đầu tiên. Bản tin này đồng thời cũng thông báo luôn cho các nút gửi khác biết để không gửi dữ liệu trong khoảng thời gian NAV sắp tới. Như vậy giao thức này sẽ rút ngắn thời gian chờ của bên nhận để gửi Rx-Beacon so với thời gian T_w của giao thức QAEE và với giao thức MPQ cho các khung truyền có mức ưu tiên không phải cao nhất. Cơ chế này là công bằng với tất cả các yêu cầu gửi Tx-Beacon, điều này có vẻ mâu thuẫn với việc đảm bảo ưu tiên cho khung dữ liệu ưu tiên. Tuy nhiên, việc xử lý ưu tiên đã được tự động trong cơ chế CSMA p-persistent và cơ chế này giúp giảm thời gian trễ cho tất cả các khung dữ liệu ở các mức ưu tiên khác nhau.

Như vậy, việc nhận Tx-Beacon sớm nhất đồng nghĩa với việc gửi sớm Rx-Beacon không những giúp giảm trễ truy nhập môi trường của các khung dữ liệu mà còn giúp tiết kiệm năng lượng cho toàn mạng do rút ngắn được thời gian chờ gửi hơn so với T_w như hai giao thức QAEE và MPQ.

3.3.2 Phân tích hiệu năng WSN đa sự kiện khi sử dụng PMME

Phần này phân tích trễ gói và tính toán mức độ tin cậy cho việc truyền thông ở lớp MAC khi sử dụng PMME. Kết quả phân tích cho thấy là việc nhận Tx-Beacon đầu tiên rồi gửi luôn Rx-Beacon sẽ giúp giảm thời gian trễ truyền khung kéo theo giảm thời gian trễ truyền gói tin, thêm vào đó, việc sử dụng giá trị p_i khác nhau với các khung dữ liệu có mức ưu tiên khác nhau cũng giúp làm phân biệt trễ khác nhau. Việc sử dụng giá trị truyền lại tối đa \maxTxRetries cũng giúp nâng cao độ tin cậy cho mạng khi có nhiều sự kiện xảy ra đồng thời dẫn tới việc có xung đột.

3.3.2.1 Phân tích ảnh hưởng của mức độ ưu tiên tới trễ gói sử dụng giao thức PMME

Như đã phân tích ở phần 2.3.3.2, tổng trễ gói được tính theo công thức (2.7) và (2.8). Ở chương này, tác giả tập trung nghiên cứu về d_{MAC} là trễ truy nhập môi trường của một khung tin, giá trị trễ này ảnh hưởng trực tiếp tới trễ gói truyền tin.

Trong cơ chế hoạt động của giao thức đề xuất PMME ở mục 3.3.1, trễ ở lớp MAC có các thành phần trễ là trễ lắng nghe môi trường cho tới khi nhận được Wakeup-Beacon, thời gian chờ để gửi và thời gian gửi gói yêu cầu Tx-Beacon (nếu gieo p_{rand} có giá trị vượt quá p_i cần thêm thời gian của một khe thời gian để quay lại cảm nhận và gửi lại yêu cầu), thời gian chờ và nhận được Rx-Beacon tương ứng (thời gian này có thể kéo dài thêm NAV nếu có gói khác được truyền), thời gian gửi được gói dữ liệu và các thời gian chuyển đổi trạng thái cũng như cảm nhận môi trường truyền mỗi khi cần gửi khung tin khác. Như vậy sự khác biệt về trễ gói dữ liệu khác nhau khi truyền qua lớp MAC sẽ chủ yếu khác nhau ở thời gian chờ để gửi gói Tx-Beacon và thời gian chờ để nhận được Rx-Beacon tương ứng, các giá trị thời gian này sẽ bị giá trị p_i (thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu) tác động và còn tùy thuộc vào số nút cạnh tranh ở thời điểm gửi khung dữ liệu.

Từ công thức (3.1), (3.2) và áp dụng vào cơ chế CSMA p-persistent ở Hình 3.4, có thể thấy thời gian chờ để gửi được gói yêu cầu Tx-Beacon sẽ là một giá trị phụ thuộc vào giá trị xác suất p_i . Trước khi quyết định gửi một yêu cầu Tx-Beacon, mỗi nút gửi sẽ cần một khoảng thời gian để cảm nhận môi trường truyền là d_{CCA} , sau đó mỗi nút sẽ gieo một giá trị xác suất là p_{rand} , nếu giá trị này nhỏ hơn giá trị p_i thì Tx-Beacon sẽ được truyền, còn nếu không, với xác suất $(1-p_i)$ còn lại thì nút gửi sẽ trì hoãn một khe thời gian là d_{fs} và quay lại cảm nhận môi trường truyền. Tiến trình tiếp tục lặp lại sau đó cho tới khi Tx-Beacon được gửi đi hoặc số lần gửi tiến tới bằng maxTxRetries thì khung dữ liệu sẽ bị hủy.

Vậy, giả sử chỉ có một nút yêu cầu truyền một khung dữ liệu với giá trị p_i thay đổi theo mức ưu tiên và Tx-Beacon được gửi một lần thì chỉ có tỷ lệ p_i Tx-

Beacon được gửi. Khi này thời gian để truyền được Tx-Beacon ở lần gieo xác suất thứ nhất ký hiệu là $d_{TxB,1}$:

$$d_{TxB,1} = \frac{p_i \times d_{CCA}}{p_i} = d_{CCA} \quad (3.4)$$

Khi cho phép gửi lại Tx-Beacon thì sau mỗi lần gieo giá trị xác suất p_{rand} thì chỉ có tỷ lệ p_i Tx-Beacon được gửi. Như vậy ở lần gieo thứ 2 thì có tỷ lệ $p_i \times (1 - p_i)$ Tx-Beacon được gửi và ta sẽ có thời gian gửi gói trung bình sau hai lần gieo bằng:

$$\begin{aligned} d_{TxB,2} &= \frac{d_{TxB,1} \times p_i + (d_{ts} + 2d_{CCA}) \times p_i \times (1 - p_i)}{p_i + (1 - p_i) \times p_i} \\ &= \frac{d_{CCA} \times p_i + (d_{ts} + 2d_{CCA}) \times p_i \times (1 - p_i)}{p_i + p_i \times (1 - p_i)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Nếu số lần gửi lại lên tới giá trị m thì ta có :

$$\begin{aligned} d_{TxB,m} &= \frac{\left(d_{TxB,m-1} \times \left(p_i + p_i \times (1 - p_i) + \dots + p_i \times (1 - p_i)^{m-2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left((m-1)d_{ts} + m \times d_{CCA} \right) \times p_i \times (1 - p_i)^{m-1} \right)}{p_i + p_i \times (1 - p_i) + \dots + p_i \times (1 - p_i)^{m-1}} \\ &= \frac{\left(d_{CCA} \times p_i + (d_{ts} + 2d_{CCA}) \times p_i \times (1 - p_i) \right. \\ &\quad \left. + \dots + \left((m-1)d_{ts} + m \times d_{CCA} \right) \times p_i \times (1 - p_i)^{m-1} \right)}{p_i + p_i \times (1 - p_i) + \dots + p_i \times (1 - p_i)^{m-1}} \\ &= \frac{\left(d_{CCA} \times p_i + (d_{ts} + 2d_{CCA}) \times p_i \times (1 - p_i) \right. \\ &\quad \left. + \dots + \left((m-1)d_{ts} + m \times d_{CCA} \right) \times p_i \times (1 - p_i)^{m-1} \right)}{1 - (1 - p_i)^m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Như vậy độ trễ gói tin trung bình phụ thuộc vào số giá trị p được gán theo mức độ ưu tiên của dữ liệu, số lần truyền lại m và thời gian để cảm nhận chính xác môi trường d_{CCA} cũng như giá trị khe thời gian d_{ts} .

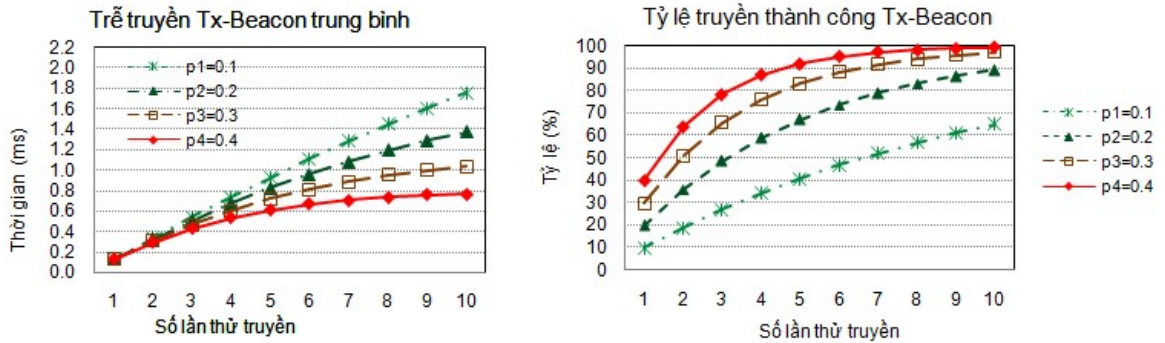
3.3.2.2 Phân tích ảnh hưởng của mức độ ưu tiên tới độ tin cậy sử dụng giao thức PMME

Như đã phân tích ở phần 2.3.3.1, độ tin cậy R được tính bằng $R = \frac{N_r}{N_s}$ trong đó gói do nguồn gửi là N_s và số lượng gói nhận sink là N_r . Như đã phân tích về hoạt động của PMME trong mục 3.2.1, Tx-Beacon là khung yêu cầu gửi tin sẽ được gửi khi nút gửi có dữ liệu và nhận được Wakeup-Beacon. Tuy nhiên việc gửi ngay Tx-Beacon chỉ được thực hiện khi nút cảm nhận là môi trường rỗi và khi gieo số ngẫu nhiên p_{rand} phải nhỏ hơn giá trị p_i là giá trị thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu. Ở giao thức PMME, khi nút gửi được Tx-Beacon nó sẽ chờ để nhận được Rx-Beacon cho phép nó được gửi dữ liệu (có địa chỉ bên nhận hay địa chỉ đích là địa chỉ của nó) và bản tin này cũng đồng thời báo cho các nút gửi khác ngủ trong thời gian truyền khung dữ liệu và tránh được xung đột.

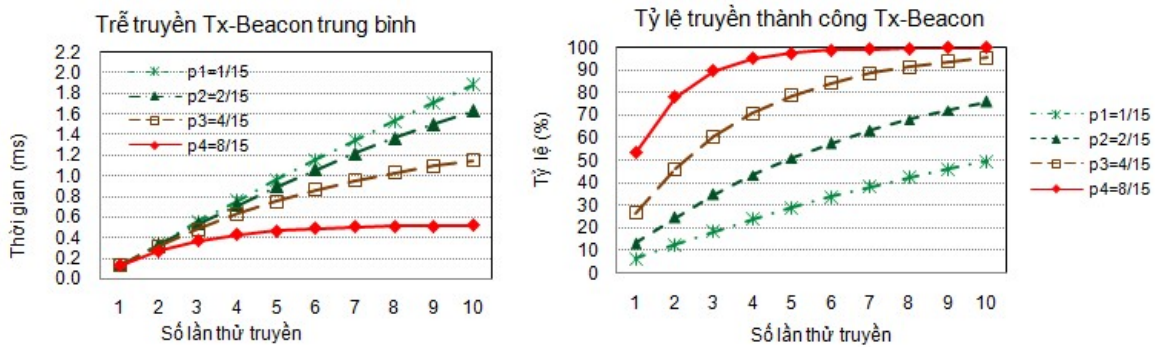
Áp dụng vào cơ chế CSMA p-persistent ở Hình 3.4, có thể thấy tỷ lệ gửi thành công gói yêu cầu Tx-Beacon sẽ là một giá trị phụ thuộc vào giá trị xác suất p_i và giá trị truyền lại cho phép $maxTxRetries$. Trước khi quyết định gửi một yêu cầu Tx-Beacon, mỗi nút sẽ gieo một giá trị xác suất là p_{rand} , nếu giá trị này nhỏ hơn giá trị p_i thì Tx-Beacon sẽ được truyền, còn nếu không, với xác suất $(1 - p_i)$ còn lại thì nút gửi sẽ trì hoãn một khe thời gian và quay lại cảm nhận môi trường truyền. Tiến trình tiếp tục lặp lại sau đó cho tới khi Tx-Beacon được gửi đi hoặc số lần gửi Tx-Beacon tiến tới bằng $maxTxRetries$ thì khung dữ liệu sẽ bị hủy.

Giả sử chỉ có một nút yêu cầu truyền một khung dữ liệu với giá trị p_i thay đổi theo mức ưu tiên thì tỷ lệ gửi thành công Tx-Beacon sau lần gieo p_{rand} thứ nhất (có thể coi đây cũng là tỷ lệ gói tin sẽ được gửi thành công PSR vì trong PMME, khi nhận được Tx-Beacon đầu tiên thì bên thu sẽ gửi ngay Rx-Beacon cho phép gửi và nút gửi sẽ gửi dữ liệu ngay sau đó) có thể được tính như sau:

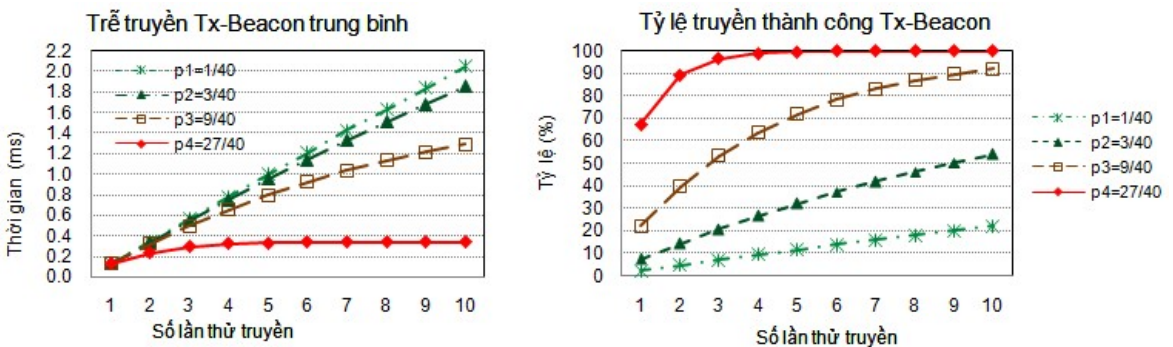
$$PSR_{TxB,1} = p_i \quad (3.7)$$



a) p tuyến tính



b) p phi tuyến, $a = 2$



c) p phi tuyến, $a = 3$

Hình 3.5: Đánh giá trễ truyền và tỷ lệ truyền thành công Tx-Beacon của một nút gửi với các tham số khác nhau

Khi cho phép gửi lại Tx-Beacon thì sau mỗi lần gieo giá trị xác suất p_{rand} thì chỉ có tỷ lệ p_i Tx-Beacon được gửi tiếp. Như vậy nếu tính trung bình trễ cho cả lần

gieo thứ 2 thì có tỷ lệ $(1-p_i)$ Tx-Beacon được gửi, khi đó tỷ lệ gói tin sẽ được gửi PSR sau hai lần gieo được tính theo công thức 3.8.

$$PSR_{TxB,2} = p_i + p_i \times (1-p_i) \quad (3.8)$$

Nếu số lần gieo để gửi Tx-Beacon lên tới giá trị m thì ta có

$$\begin{aligned} PSR_{TxB,m} &= p_i + p_i \times (1-p_i) + \dots + p_i \times (1-p_i)^{m-1} \\ &= 1 - (1-p_i)^m \end{aligned} \quad (3.9)$$

Hình 3.5 đánh giá thời gian trễ trung bình theo công thức (3.6) và tỷ lệ gửi Tx-Beacon thành công ở lớp MAC tính theo mi li giây theo công thức (3.9) trong trường hợp cụ thể $d_{CCA} = 0,128\text{ms}$ và $d_{is} = 0,32\text{ms}$ cùng với các loại giá trị p_i là tuyến tính và phi tuyến; số lần gieo để gửi m lấy giá trị từ 1 đến 10.

Có thể thấy được là số lần thử truyền càng tăng thì tỷ lệ truyền Tx-Beacon thành công sẽ tăng lên, giá trị p_i càng lớn thì độ trễ càng nhỏ và tỷ lệ truyền thành công càng cao. Như vậy theo phân tích toán học, khi thay đổi giá trị cơ số phân biệt a có thể điều chỉnh ưu tiên đồng thời cả độ trễ và độ tin cậy.

Trong trường hợp hãn hữu xảy ra là có xung đột giữa các Tx-Beacon hoặc xung đột giữa Rx-Beacon và Tx-Beacon thì Tx-Beacon vẫn được truyền lại với giá trị truyền lại cho phép lớn nhất là $maxTxRetries$, điều này giúp đảm bảo việc truyền tin cậy Tx-Beacon, cũng nghĩa là truyền dữ liệu tin cậy sau đó.

Điểm hạn chế rất ít gặp của giao thức PMME cũng giống như các giao thức MAC sử dụng cơ chế p-persistent là sẽ có trường hợp với tỷ lệ rất ít là nút khi có dữ liệu và cảm nhận là môi trường rỗi nhưng chậm gieo được giá trị $p_{rand} < p$, khi đó cho dù không có nguồn gửi dữ liệu khác cạnh tranh gửi thì nút vẫn chưa gửi dữ liệu. Tuy nhiên do xác suất trường hợp này nhỏ cộng với thời gian gieo lại giá trị p_{rand} cũng rất nhỏ nên ít ảnh hưởng tới giá trị trễ trung bình.

3.3.3 Đánh giá hiệu năng WSN đa sự kiện sử dụng PMME

Phần này phân tích kết quả mô phỏng dùng để đánh giá, so sánh hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức MAC PMME do nghiên cứu sinh đề xuất với hai giao thức MAC QAEE và MPQ dựa trên phần mềm mô phỏng Castalia 3.3 [28] và OMNeT++4.6 [133] sử dụng chuẩn thiết bị thu phát CC2420 [155].

3.3.3.1 Kịch bản mô phỏng

Bảng 3.2 là những thông số chính thiết lập trong chương trình mô phỏng. Để có thể so sánh trực tiếp với hai nghiên cứu về giao thức MAC ưu tiên nhiệm vụ, trong các kịch bản mô phỏng, nghiên cứu sinh có thừa kế các thông số trong kịch bản mô phỏng và thêm thông số liên quan tới việc gán giá trị p khác nhau.

Bảng 3.2: Các thông số mô phỏng mạng cảm biến sử dụng giao thức MAC [76], [114], [115], [J4]

Thông số	Giá trị
Diện tích trường cảm biến	10m x 10m
Số lượng nút gửi dữ liệu đồng thời	1-10
Vị trí nút gửi dữ liệu trong trường cảm biến	Ngẫu nhiên
Băng thông	250kb/s
Kích thước Wakeup-Beacon	6 byte
Kích thước Tx-Beacon	14 byte
Kích thước Rx-Beacon	13 byte
Tiêu đề lớp MAC	11 byte
Giới hạn tối đa bộ đệm MAC	32 gói
Số lần gửi yêu cầu truyền gói dữ liệu tối đa ở lớp MAC <i>maxTxRetries</i>	5-10
Tiêu đề lớp ứng dụng	5 byte
Kích thước gói DATA	28 byte
Kích thước gói ACK	11 byte
CCA Check Delay	0,128ms
Time slot	0,32ms
Tiêu đề khung vật lý	6 byte
Khoảng thời gian cạnh tranh gửi TxBeacon T_w	5ms

Khoảng thời gian nút nhận cảm nhận trước khi phát WakeupBeacon (T_g)	6,7ms
Thời gian lắng nghe trước khi phát dữ liệu	17ms
a	2,3
n	4
Tốc độ gửi dữ liệu của các nút	1 gói/giây
Tỷ lệ trung bình từng loại gói	Tương đương nhau
Số mẫu chạy	5 mẫu/kịch bản

Các nút cảm biến có dữ liệu để gửi (từ 1 đến 10 nút) được rải ngẫu nhiên trong môi trường cảm biến, nút thu đặt ở trung tâm. Mỗi nút sẽ gửi dữ liệu với tốc độ là 1 gói/giây với tỷ lệ gói có mức độ ưu tiên khác nhau ở các nút là tương đương nhau.

Những tham số hiệu năng được đánh giá trong mô phỏng đề xuất:

- *Trễ gói trung bình*: Trễ gói được tính bằng tổng thời gian để truyền gói từ nút nguồn tới nút đích. Ở cả ba giao thức thời gian trễ được tính bằng tổng thời gian thành phần: thời gian trễ truyền lan, thời gian xử lý tại nút và thời gian trễ ở lớp MAC (như phân tích trong phần 3.2.2.1). Trễ gói trung bình là trung bình trễ của các gói nhận được ở đích ở công thức (3.1).
 - Công thức tính trễ gói trung bình D_{avr} được tính như sau:

$$D_{avr} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \quad (3.10)$$

Trong đó N , D_i lần lượt là tổng số gói đích nhận được và trễ của gói thứ i mà đích đã nhận.

- *Tỷ lệ truyền gói thành công (PSR)*: Được tính bằng tỷ số của tổng số gói nhận được ở nút đích N_r (không tính số gói trùng lặp) trên tổng số gói gửi từ nguồn N_s .

$$PSR = \frac{N_r}{N_s} \times 100\% \quad (3.11)$$

- *Hiệu quả tiêu thụ năng lượng*: Hiệu quả tiêu thụ năng lượng được đánh giá là tỷ lệ nghịch của năng lượng tiêu thụ trung bình cho việc truyền thành

công một bit dữ liệu ($\mu\text{j/bit}$). Như vậy năng lượng tiêu thụ càng ít thì hiệu quả tiêu thụ càng cao.

- Công thức tính năng lượng tiêu thụ trung bình E_{avg} được tính như sau:

$$E_{avg} = \frac{E_T}{N_r \times S} \quad (3.12)$$

Trong đó E_T , N_r và S lần lượt là tổng năng lượng tiêu thụ, tổng số gói nhận được và kích thước bản tin tính theo bit.

Tổng năng lượng tiêu thụ được tính bằng:

$$E_T = \sum_{k=1}^{m_s} P_k \times t_k \quad (3.13)$$

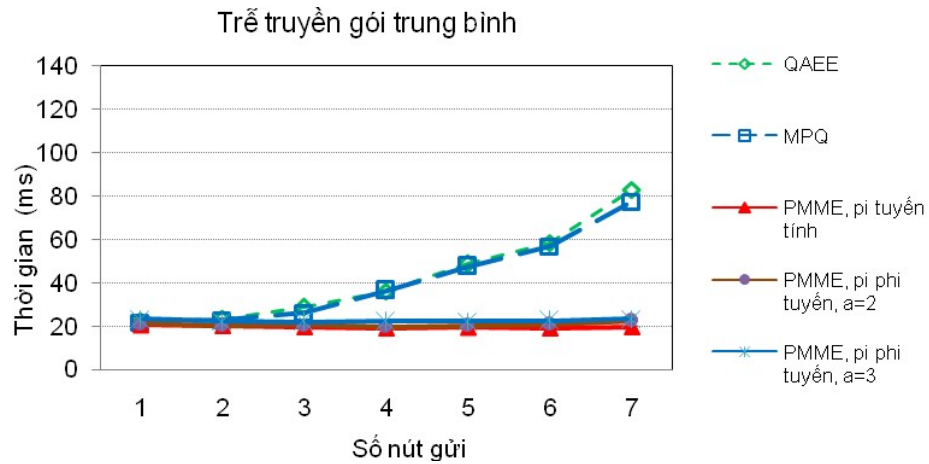
Trong đó m_s biểu diễn số lượng các trạng thái, k là trạng thái vô tuyến (có bốn trạng thái: trạng thái phát, trạng thái nhận, trạng thái nghe và trạng thái ngủ). P_k là công suất tiêu thụ năng lượng ở trạng thái k và t_k là thời gian tồn tại của trạng thái k .

3.3.3.2 Kết quả mô phỏng và đánh giá

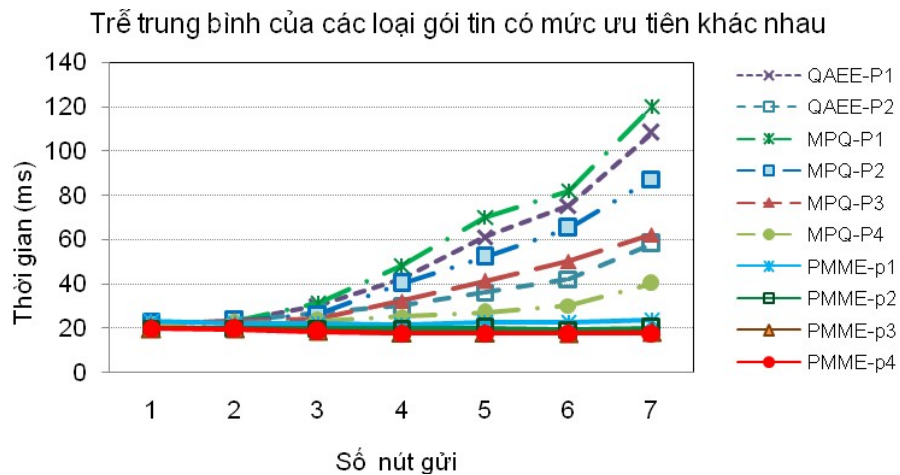
a) Trễ gói trung bình

Trễ gói trung bình ở nút thu được thể hiện trong Hình 3.6a với tốc độ gửi gói là 1 gói/giây và $\text{maxTxRetries}=10$, với PMME có $n=4$ và p tuyến tính. Có thể thấy khi số lượng nút cùng gửi càng tăng thì thời gian để gói tới được đích sẽ càng kéo dài do có nhiều gói cùng gửi và sẽ xảy ra xung đột trên đường truyền. QAEE sử dụng T_w để có thể nhận đồng thời nhiều yêu cầu gửi rồi mới phân loại yêu cầu theo thứ tự ưu tiên là p_2 và p_1 , nó chấp nhận gói gửi có mức ưu tiên cao nhất sau thời gian chờ T_w , như vậy nó sẽ phải mất thời gian để nhận hết yêu cầu từ các nút gửi. Ngoài ra, vì các khung sẽ cạnh tranh trong môi trường truyền nên sẽ xảy ra xung đột dẫn đến việc phải truyền lại khung. Do không phân biệt độ ưu tiên cho thời gian gửi yêu cầu Tx-Beacon nên xác suất xung đột sẽ cao ngay cả ở chu kỳ gửi kế tiếp. MPQ thì ưu tiên khung có mức ưu tiên p_4 được nhận sớm trong khoảng thời gian T_w ,

song không có cơ chế nhận sớm yêu cầu gửi Tx-Beacon với các khung mang dữ liệu ưu tiên khác (p_3, p_2 và p_1) nên các nút gửi dữ liệu phải chờ tới hết T_w mới biết mình có được gửi khung dữ liệu hay không khi nhận Rx-Beacon.



a) So sánh trễ gói trung bình chung các loại gói



b) So sánh trễ gói trung bình của các loại gói ưu tiên khác nhau

Hình 3.6: Thời gian trễ trung bình của gói tin sử dụng giao thức PMME so với sử dụng giao thức QAEE và MPQ

Với giải pháp đề xuất PMME, việc nhận yêu cầu gửi Tx-Beacon đầu tiên sẽ giảm đáng kể độ trễ so với T_w của QAEE và $\frac{3}{4} T_w$ của MPQ.

Hình 3.6b cho thấy trễ trung bình của các gói tin có mức độ ưu tiên khác nhau. Có thể thấy các gói tin có mức ưu tiên cao sẽ có độ trễ nhỏ hơn so với các gói có mức ưu tiên thấp. Độ trễ của các loại gói tin ưu tiên chạy giao thức PMME là tốt nhất so với các gói tin chạy giao thức QAEE và MPQ khi số nút cạnh tranh tăng, Trễ truyền gói của cả ba giao thức đều tăng theo mức độ ưu tiên của gói tin. QAEE và MPQ giả định chặt là p bằng tỷ lệ nghịch của số nút gửi, khi số nút gửi là 1 thì xác suất gửi luôn bằng 1 và gói gửi không trì hoãn, trong khi đó PMME không phân biệt giá trị p với số nút gửi khác nhau và bị trì hoãn với thời gian theo xác suất. Thực tế không thể biết chính xác số nút gửi dữ liệu đồng thời ở những thời điểm khác nhau nên giả định của PMME hợp lý hơn.

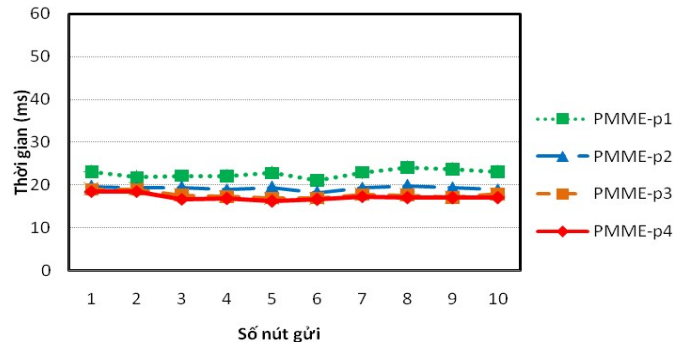
Tuy nhiên do ảnh hưởng của giá trị truyền lại yêu cầu gửi cho phép (maxTxRetries), nhiều gói sau khi thử truyền hết số lần cho phép sẽ bị hủy, trong khi đó thời gian trễ gói chỉ tính với các gói tới được đích nên cũng làm giảm mức độ phân biệt trễ của các loại gói tin khi số nút gửi tăng cao.

b) Trễ gói PMME theo mức độ ưu tiên của gói tin

Trễ gói theo mức độ ưu tiên của gói tin PMME thể hiện trong Hình 3.7 với maxTxRetries=10 với số lượng nút gửi từ 1 đến 10, số mức ưu tiên $n = 4$. Để có thể thực hiện cơ chế ưu tiên ở cấp độ khác nhau, trong kịch bản lựa chọn giá trị p theo kiểu tuyến tính và phi tuyến. Với p thiết lập theo kiểu tuyến tính thì ta có $p_{1,4} = 0,1$, $p_{2,4} = 0,2$, $p_{3,4} = 0,3$ và $p_{4,4} = 0,4$. Với p thiết lập theo kiểu phi tuyến, có hai giá trị được sử dụng trong mô phỏng là $a = 2$ ($p_{1,2,4} = \frac{1}{15}$, $p_{2,2,4} = \frac{2}{15}$, $p_{3,2,4} = \frac{4}{15}$ và $p_{4,2,4} = \frac{8}{15}$) và $a = 3$ ($p_{1,3,4} = \frac{1}{40}$, $p_{2,3,4} = \frac{3}{40}$, $p_{3,3,4} = \frac{9}{40}$ và $p_{4,3,4} = \frac{27}{40}$).

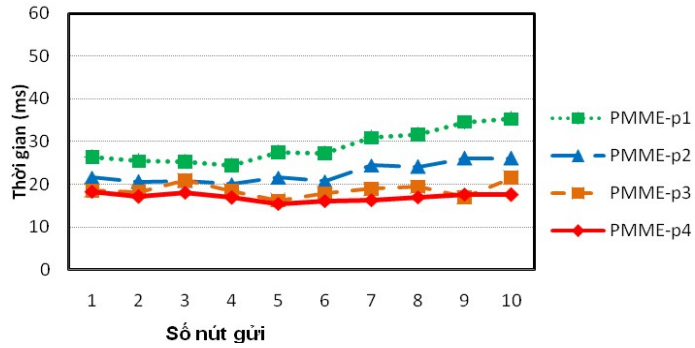
Có thể thấy ở PMME gói có mức độ ưu tiên càng cao thì trễ gói càng nhỏ và ngược lại. Hiệu quả này có được là do nghiên cứu sinh đã áp dụng cơ chế p-persistent với p thay đổi theo mức độ ưu tiên của dữ liệu cần truyền. Dữ liệu có độ ưu tiên cao sẽ bị trì hoãn ít hơn so với dữ liệu mang dữ liệu có độ ưu tiên thấp, kết hợp với cơ chế nhận Tx-Beacon đến sớm nhất, thời gian trễ trung bình của các gói dữ liệu được giảm đi đáng kể so với các gói dữ liệu gửi theo cơ chế QAEE và MPQ. Khi số nút gửi cạnh tranh càng cao thì độ phân biệt sẽ càng rõ nét.

Trễ gói PMME trung bình theo mức độ ưu tiên



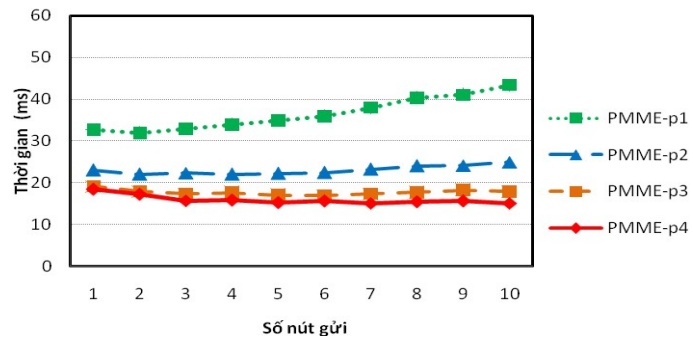
a) p tuyến tính

Trễ gói PMME trung bình theo mức độ ưu tiên



b) p phi tuyến, $a = 2$

Trễ gói PMME trung bình theo mức độ ưu tiên

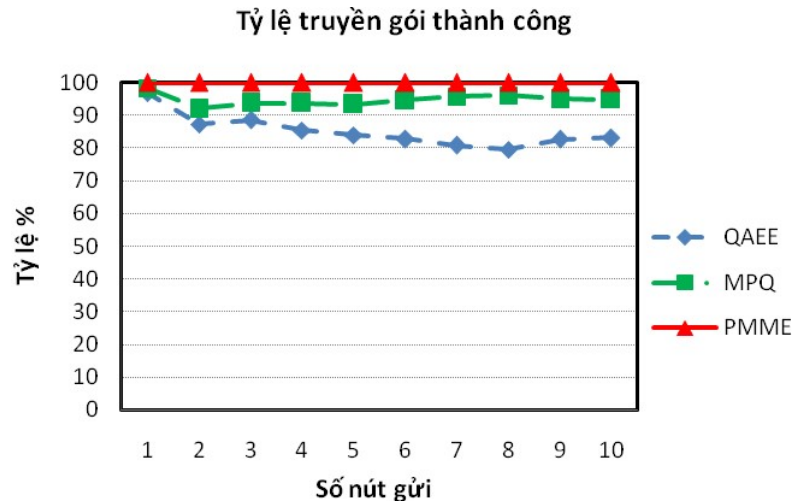


c) p phi tuyến, $a = 3$

Hình 3.7: Thời gian trễ trung bình của gói tin PMME với 4 mức ưu tiên khác nhau và với hai kiểu p khác nhau

Với hai kiểu gán giá trị p khác nhau, có thể thấy sử dụng p phi tuyến sẽ cho ta sự phân biệt trở rõ nét hơn giữa các mức độ ưu tiên gói tin, cơ số phân biệt a có giá trị càng cao thì độ phân biệt càng rõ nét hơn nữa. Điều này sẽ giúp cho việc lựa chọn cơ chế phân biệt phù hợp với sự khác biệt về ưu tiên giữa nhiều loại ứng dụng cảm biến có yêu cầu khác nhau về trễ.

c) Tỷ lệ truyền gói thành công

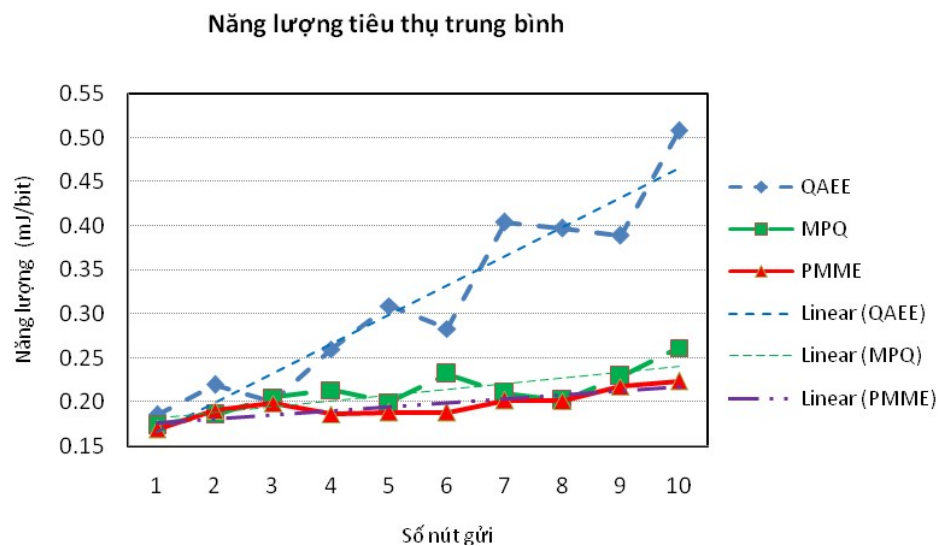


Hình 3.8: Tỷ lệ truyền gói thành công của mạng sử dụng các giao thức QAEE, MPQ và PMME với $\text{maxTxRetries} = 10$

Hình 3.8 cho thấy tỷ lệ truyền gói thành công của mạng sử dụng cả ba giao thức QAEE, MPQ và PMME với điều kiện mô phỏng khác nhau về số nút cảm biến gửi dữ liệu đồng thời. Có thể thấy giao thức MAC ưu tiên đề xuất PMME giúp mạng hoạt động hiệu quả hơn với tỷ lệ truyền gói thành công cao hơn so với giao thức QAEE và MPQ. Việc sử dụng cơ chế p -persistent với p thay đổi theo mức ưu tiên của dữ liệu giúp mạng tránh được những xung đột không đáng có do sử dụng cơ chế trì hoãn gói gửi theo xác suất. Khi số lượng nút gửi tăng lên xác suất xung đột sẽ tăng lên khiến tỷ lệ truyền gói thành công giảm xuống. Kết hợp với việc thử gửi yêu cầu truyền gói nhiều lần sẽ giúp tỷ lệ truyền thành công gói cao hơn.

PMME giảm được xung đột yêu cầu gửi do việc gửi sớm Rx-Beacon, do vậy nó cũng giúp gói tin được chuyển tiếp tới đích với xác suất cao, như vậy giúp tỷ lệ truyền gói thành công cao. Với việc giãn các yêu cầu gửi theo xác suất kết hợp với việc nhận Tx-Beacon và gửi Rx-Beacon báo xác nhận nút được gửi sớm, PMME đã nâng cao hiệu quả truyền gói, đảm bảo tỷ lệ truyền gói thành công cao hơn so với QAEE và MPQ. Hơn nữa, PMME không để thời gian chết T_w như MPQ, vì thế tránh được sự cạnh tranh và gửi lại nhiều lần yêu cầu tranh chấp đường truyền trong thời gian còn lại của T_w , trong khi đó số lần thử truyền bị giới hạn nên gói tin càng tranh chấp nhiều thì tỷ lệ mất gói sẽ càng cao.

d) Hiệu quả tiêu thụ năng lượng



Hình 3.9: Năng lượng tiêu thụ trung bình (mj/bit) [C3]

Hình 3.9 cho thấy năng lượng tiêu thụ trung bình để truyền thành công một bit dữ liệu với ba giao thức MAC tương ứng là QAEE, MPQ và PMME và với các tốc độ gửi gói khác nhau và sử dụng giá trị p tuyến tính. Có thể thấy khi số lượng nút gửi tăng lên thì xu hướng tiêu thụ năng lượng trung bình khi sử dụng giao thức của cả ba trường hợp đều tăng. Tuy nhiên với QAEE năng lượng này tăng lên nhanh hơn trong khi với giao thức MPQ và PMME thì năng lượng tiêu thụ trung bình chỉ tăng rất chậm. Năng lượng tiêu thụ trung bình của mạng sử dụng PMME nhỏ hơn

không đáng kể so với QAEE và MPQ khi chỉ có một nút gửi tại một thời điểm, tuy nhiên khi số nút gửi cạnh tranh tăng thì hiệu quả về năng lượng của mạng sử dụng giao thức PMME tốt hơn nhiều so với QAEE (giảm được 10% đến 50% năng lượng khi số nút gửi tăng từ 2 đến 10) và tốt hơn MPQ (giảm được 6-9%). Điều này có được là do PMME sử dụng kết hợp cơ chế tránh xung đột p-persistent theo mức ưu tiên và việc xác nhận Rx-Beacon sớm ngay khi nhận được Tx-Beacon đầu tiên, như vậy nó làm giảm thời gian thức vô ích từ thời điểm nút nhận được Tx-Beacon đầu tiên tới hết thời gian T_w , nó cũng giảm bớt được xung đột xảy ra trong thời gian này và như vậy sẽ giúp tiết kiệm năng lượng cho mạng.

3.4 KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Chương 3 đã trình bày nguyên lý hoạt động của hai giao thức MAC có xét tới mức độ ưu tiên của dữ liệu là QAEE và MPQ và đề xuất của nghiên cứu sinh là thiết kế giao thức MAC mới có xét 4 mức ưu tiên dữ liệu có tên là PMME. Giao thức đề xuất kết hợp hai cơ chế: (1) cơ chế CSMA p-persistent linh hoạt theo mức độ ưu tiên của dữ liệu với hai kiểu gán giá trị p khác nhau là tuyến tính và phi tuyến và (2) cơ chế nhận sớm Tx-Beacon. Dựa trên nghiên cứu lý thuyết, ảnh hưởng của các tham số như số lần thử truyền tối đa ở lớp MAC, thời gian cảm nhận chính xác môi trường truyền d_{CCA} và khe thời gian d_{ts} sau mỗi lần gieo xác suất để gửi yêu cầu Tx-Beacon tới trễ và độ tin cậy của việc truyền tin có thể được định lượng một cách cụ thể. Các kết quả mô phỏng thực hiện với những kịch bản khác nhau về số lượng nút gửi đồng thời đã chứng minh tính hiệu quả của giải pháp do nghiên cứu sinh đề xuất là giảm được trễ truyền tin từ 2 đến 60 ms trên một chặng, hiệu quả sử dụng năng lượng tăng (giảm được từ 6% đến 50% năng lượng tiêu thụ trung bình khi số nút gửi tăng từ 2 đến 10) trong khi vẫn đạt được tỷ lệ truyền tin thành công cao.

KẾT LUẬN

Với mục tiêu cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện qua giao thức định tuyến linh hoạt và giao thức MAC ưu tiên, luận án đã đạt được mục tiêu đề ra là đề xuất các giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện có thể đáp ứng đồng thời nhiều yêu cầu hiệu năng khác nhau cho các sự kiện xuất hiện trong mạng mà vẫn đảm bảo sử dụng hiệu quả năng lượng. Những kiến thức nền tảng và các kết quả nghiên cứu đã được trình bày trong luận án với bố cục ba chương như sau: (1) *Tổng quan về vấn đề nghiên cứu*, (2) *Cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức định tuyến linh hoạt* và (3) *Cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng giao thức MAC ưu tiên*. Các kết quả đóng góp mới về khoa học của luận án có thể phân thành hai nhóm lớn:

1. Đề xuất giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng định tuyến linh hoạt

Đề xuất 02 giải pháp cải thiện hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện sử dụng kỹ thuật định tuyến linh hoạt là DRPDS và EARPM.

Giao thức định tuyến DRPDS linh hoạt kết hợp định tuyến đơn và đa đường cùng với cơ chế phân tải lưu lượng linh hoạt theo sự kiện để đáp ứng 3 loại sự kiện có yêu cầu QoS khác nhau trong mạng cảm biến không dây. Kết quả mô phỏng trên OMNeT++ cho thấy giao thức định tuyến DRPDS giúp mạng đáp ứng được yêu cầu đồng thời của nhiều sự kiện khác loại trong điều kiện khác nhau về tỷ lệ lỗi gói, (a) sự kiện yêu cầu trễ thấp giảm được 20% thời gian trễ so với các loại sự kiện còn lại, (b) sự kiện yêu cầu độ tin cậy cao đáp ứng được yêu cầu tỷ lệ mất gói nhỏ hơn nhiều lần so với tỷ lệ lỗi gói của một chặng và nhỏ hơn so với những sự kiện khác dù truyền thông đa chặng;

Giải thuật EARPM tiếp tục phát triển dựa trên DRPDS kết hợp với việc nhận thức năng lượng còn lại để nâng cao hiệu quả tiêu thụ năng lượng nhằm kéo dài thời gian sống của mạng và vẫn đáp ứng những yêu cầu QoS khác biệt của các sự kiện có mức ưu tiên khác nhau. Kết quả mô phỏng trên OMNeT++ đã kiểm chứng khả

năng đáp ứng yêu cầu hiệu năng khác biệt cho mạng mạng cảm biến không dây đa sự kiện, cụ thể là giảm độ trễ cho sự kiện cần ưu tiên về thời gian, tăng độ tin cậy với gói tin cần độ tin cậy cao và sử dụng hiệu quả năng lượng, kéo dài thời gian sống của toàn mạng lên khoảng 70% so với việc sử dụng DRPDS.

2. Đề xuất giao thức MAC ưu tiên đảm bảo QoS cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện

Giao thức PMME do nghiên cứu sinh đề xuất trên cơ sở hai giao thức MAC có xét mức ưu tiên gói khác nhau là QAEE và MPQ. Cụ thể là giao thức đề xuất kết hợp cơ chế CSMA p-persistent linh hoạt theo mức độ ưu tiên của dữ liệu cảm biến với hai kiểu gán giá trị p khác nhau là tuyến tính và phi tuyến với cơ chế nhận Tx-Beacon sớm nhất. Giá trị p đề xuất được gán linh hoạt theo mức ưu tiên của sự kiện làm thay đổi tần suất gửi khung mang dữ liệu sự kiện ở mức ưu tiên khác nhau, khi đó không cần giới hạn thời gian T_w ở bên thu như hai giao thức tiền nhiệm. Việc phân tích tính toán các tham số hiệu năng như trễ, độ tổn thất của cơ chế đề xuất đem lại cũng như kiểm nghiệm đánh giá bằng mô phỏng đã cho thấy được hiệu quả của giải pháp đề xuất. Cụ thể là, kết quả mô phỏng trên Castalia cho thấy giao thức PMME đã cải thiện đáng kể hiệu năng cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện so với hai giao thức tiền nhiệm: (1) thời gian trễ truyền gói giảm với tất cả 4 mức ưu tiên khác nhau, khi số lượng nút gửi cạnh tranh tăng từ 1 đến 10 thì trễ gói PMME chỉ tăng rất chậm, giảm hơn so với QAEE và MPQ từ 2 đến 60 ms trên một chặng; (2) hiệu quả sử dụng năng lượng tốt hơn so với QAEE (giảm được 10% đến 50% năng lượng khi số nút gửi tăng từ 2 đến 10) cũng như so với MPQ (giảm được 6-9%) và (3) tỷ lệ truyền gói thành công cao hơn.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án sẽ tập trung vào các giải pháp xuyên lớp để cải thiện hơn nữa hiệu năng mạng cảm biến không dây đa sự kiện có xét tới khả năng nạp lại năng lượng. Cụ thể đề xuất giải pháp kết hợp ưu tiên gói tin ở lớp MAC với định tuyến nhận thức năng lượng có xét tới khả năng nạp lại năng lượng.

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

BÀI BÁO KHOA HỌC

- [J1] Nguyễn Thị Thu Hằng, Nguyễn Chiến Trinh, Nguyễn Tiên Ban (2016), “**Khảo sát một số giao thức định tuyến đa đường trong mạng cảm biến không dây và đề xuất xây dựng giao thức định tuyến đa đường định hướng đa sự kiện trong mạng**”, *Tạp chí Khoa học công nghệ thông tin và truyền thông (JSTIC)*, ISSN 2525-2224, số 2 (CS.01) 2016, tr. 41-49.
- [J2] Nguyen Thi Thu Hang, Nguyen Chien Trinh, Nguyen Tien Ban (2017), “**Dynamic Routing Protocol and Delivering Scheme for MultiEvent Wireless Sensor Network**”, *Tạp chí Khoa học công nghệ thông tin và truyền thông (JSTIC)*, ISSN 2525-2224, số 02&03 (CS.01) 2017, tr. 30-39.
- [J3] Nguyen Thi Thu Hang, Nguyen Chien Trinh, Nguyen Tien Ban (2018), “**Novel Energy Aware Routing Protocol for MultiEvent Wireless Sensor Network**”, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, ISSN 1859 - 1043, số 55, 06-2018, tr. 52-68.
- [J4] Nguyen Thi Thu Hang, Nguyen Chien Trinh, Nguyen Tien Ban (2019), “**PPME – Priority MAC protocol for MultiEvent Wireless Sensor Network**”, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, ISSN 1859 - 1043, số 59, 02-2019, tr. 12-25.

HỘI NGHỊ KHOA HỌC

- [C1] Nguyen Thi Thu-Hang, Nguyen Tien Ban (2017), “**Hybrid Routing Protocol and Dynamic Delivering Scheme for MultiEvent Wireless Sensor Network**”, *The Eighth International Symposium on Information and Communication Technology (SoICT 2017)*, 7-8 December 2017, Nha Trang, Viet Nam, pp. 286-292.
DOI:10.1145/3155133.3155192
- [C2] Nguyen Thi Thu-Hang, Nguyen Chien Trinh, Nguyen Tien Ban (2018), “**Energy Aware Event Driven Routing Protocol and Dynamic Delivering Scheme for MultiEvent Wireless Sensor Network**”, *IEEE 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom2018)*, January 29th-31st, 2018, Ho Chi Minh, Vietnam, pp. 224-229.
DOI:10.1109/SIGTELCOM.2018.8325795

- [C3] Nguyễn Thi Thu Hằng, Nguyễn Chiến Trinh, Nguyễn Tiến Ban (2018), “**Đề xuất giao thức MAC ưu tiên mới đảm bảo QoS cho mạng cảm biến không dây đa sự kiện**”, *Kỷ yếu Hội nghị Quốc gia lần thứ XXI về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ thông tin, (REV-ECIT 2018)*, 14-15/12/2018, Hà Nội, tr.123-128.
- [C4] Nguyen Thi Thu-Hang, Nguyen Chien Trinh, Nguyen Tien Ban (2019), “**Delay and Reliability Analysis of p-persistent Carrier Sense Multiple Access for MultiEvent Wireless Sensor Network**”, in *Proc. IEEE 26th International Conference on Telecommunications (ICT-2019)*, April 8-10, Hanoi, Vietnam, pp. 426-430.
- DOI:10.1109/ICT.2019.8798849

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Nguyễn Văn Cường (2016), “Hoàn thiện thiết kế, công nghệ và chế tạo hệ thống tự động hoá cho các nhà trồng thông minh”, Đề tài khoa học và công nghệ cấp nhà nước, Viện nghiên cứu điện tử, tin học, tự động hóa – Bộ công thương, KC03.DA04/11-15.
- [2] Hồ Trường Giang (2012), “Nghiên cứu chế tạo cảm biến khí Monoxit Cacbon và Hydrocacbon trên cơ sở vật liệu Pervovskite ABO_3 ”, Luận án tiến sĩ khoa học vật liệu, Viện khoa học và công nghệ Việt Nam, Viện khoa học vật liệu.
- [3] Nguyễn Đắc Hải (2016), “Nghiên cứu cảm biến chất lỏng kiểu tụ điện cho ứng dụng cảm nhận thay đổi môi trường trong kênh dẫn”, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Học viện Công nghệ Bru chính viễn thông. [Online] <http://dlib.ptit.edu.vn/HVCNBCVT/1513>
- [4] Phan Thanh Hòa (Chủ nhiệm) (2016), “Nghiên cứu chế tạo vi cảm biến vận tốc góc lưu chất”, Đề tài cấp nhà nước, Đại học Công nghiệp Hà Nội.
- [5] Bành Thị Quỳnh Mai (2016), “Mạng cảm biến thông minh giám sát môi trường (ISNEM)”. Đề tài Bộ giáo dục 2012-2014 (nghiệm thu 30/5/2016), Viện Công nghệ thông tin và truyền thông, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [6] Nguyễn Duy Tân (2018), “Nghiên cứu giao thức định tuyến tiết kiệm năng lượng cho mạng sensor”, Luận án Tiến sĩ Truyền dữ liệu và mạng máy tính, Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà nội.
- [7] Cao Thị Thanh (2018), “Nghiên cứu chế tạo vật liệu ống nano cacbon định hướng và vật liệu graphene nhằm ứng dụng trong cảm biến sinh học”, Luận án Tiến sĩ Khoa học vật liệu, Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. [Online] <http://gust.edu.vn/media/26/uftai-ve-tai-day26222.pdf>

- [8] Vũ Chiến Thắng, Nguyễn Chấn Hùng, Lê Nhật Thăng (2013), “Về một hệ thống nghiên cứu thực nghiệm cho mạng cảm biến không dây”, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, số 3(64), tr.103-109.
- [9] Lê Đình Tuấn, Thái Doãn Ngọc (2013), “Xây dựng mạng cảm biến không dây trong nông nghiệp chính xác”, Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, số chuyên đề Công nghệ thông tin, tr. 115-122.
- [10] Nguyễn Khanh Văn (Chủ nhiệm) (2016), “Xây dựng công cụ mô phỏng các thuật toán định tuyến mạng không dây ứng dụng nghiên cứu khắc phục hồ mạng trong môi trường địa hình phức tạp”, Đề tài Bộ giáo dục 2013-2015 (nghiệm thu 2/2016), Viện Công nghệ thông tin và truyền thông, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [11] Vương Đạo Vy (Chủ trì) (2008), “Thiết kế, xây dựng mạng cảm nhận không dây, theo dõi và cảnh báo tự động theo thời gian thực, liên tục, dài ngày mực nước, độ sâu và tốc độ dâng cao của mực nước”, Đề tài cấp ĐHQGHN, QG.06.01, 2006-2007.

Tiếng Anh

A

- [12] S. Abdullah, S. Bertalan, S. Masar, A. Coskun, I. Castle (2017), “ A wireless sensor network for early forest fire detection and monitoring as a decision factor in the context of a complex integrated emergency response system”, in IEEE Workshop EESMS, Milan, Italy, Jul. 24-25. DOI: 10.1109/EESMS.2017.8052688
- [13] O.B. Akan, I.F. Akyildiz (2005), “Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(5), Oct., pp. 1003 – 1016. DOI: 10.1109/TNET.2005.857076.
- [14] A. Akbas, H. U. Yildiz, B. Tavli, S. Uludag (2016), “Joint Optimization of Transmission Power Level and Packet Size for WSN Lifetime Maximization”, *IEEE Sensors Journal*, 16 (12), June 15, pp. 5084 - 5094. DOI 10.1109/JSEN.2016.2548661

- [15] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci (2002), “A survey on sensor networks”, *IEEE Communications Magazine*, 40(8), pp. 102-114.
- [16] I. Al-Anbagi, M. Erol-Kantarci, H. T. Mouftah (2016), “A Survey on Cross-Layer Quality-of-Service Approaches in WSNs for Delay and Reliability-Aware Applications”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18 (1), Firstquarter, pp. 525 - 552. DOI: 10.1109/COMST.2014.2363950
- [17] J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal (2004), “Routing techniques in wireless sensor networks: a survey”, *IEEE Wireless Communications*, 11 (6), Dec., pp. 6 - 28.
- [18] Y. Al-Nidawi, H. Yahya, A. H. Kemp (2016), “Tackling Mobility in Low Latency Deterministic Multihop IEEE 802.15.4e Sensor Network”, *IEEE Sensors Journal*, 16 (5), March 1, pp. 1412 - 1427. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2500502
- [19] M. M. Alam, M. A. Razzaque, M. Mamun-Or-Rashid, C. S. Hong (2009), “Energy-aware QoS provisioning for wireless sensor networks: Analysis and protocol”, *IEEE Journal of Communications and Networks*, 11 (4), pp. 390-405.
- [20] F. Alfayez, M. Hammoudeh, A. Abuarqoub (2015), “A Survey on MAC Protocols for Duty-cycled Wireless Sensor Networks”, International Conference on Advanced Wireless Information and Communication Technologies (AWICT 2015), ScienceDirect, Procedia Computer Science, Vol. 73, pp. 482-489. DOI:10.1016/j.procs.2015.12.034
- [21] A. A. Anasane, R. A. Satao (2016), “A survey on various multipath routing protocols in wireless sensor networks”, in Proc. *ICCCV 2016*, Mumbai, India, pp. 610–615. DOI: 10.1016/j.procs.2016.03.077
- [22] R. Anubhama, T. Rajendran (2017), “A Survey on Mac Protocols for Wireless Sensor Networks”, Proceedings of the Second International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering, pp. 121-126, ACSIS, Vol. 10. DOI: 10.15439/2017R26.

- [23] M. Asif, S. Khan, R. Ahmad, M. Sohail, D. Singh (2017), "Quality of Service of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Review", *IEEE Access*, Vol. 5, 17 Jan., pp. 1846-1871. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2654356

B

- [24] M. M B, A. Ajith (2015), "Packet Scheduling in Wireless Sensor Networks using Dynamic method", *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 4(9), September 2015, pp. 486-488. DOI: 10.17148/IJARCCE.2015.49107.
- [25] M. Baga, Y. Challal, A. Ksentini, A. Derhab, N. Badache (2014), "Data Aggregation Scheduling Algorithms in Wireless Sensor Networks: Solutions and Challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16 (3), Mar. 31th, pp. 1339-1368. DOI: 10.1109/SURV.2014.031914.00029
- [26] Y.W. Bai, M.Y. Yang (2008), "An improved design of a wireless keyboard powered by solar cells and a large capacitor", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(3), pp. 1355-1359. DOI: 10.1109/TCE.2008.4637627
- [27] F. Bouabdallah, N. Bouabdallah, R. Boutaba (2008), "Load-Balanced Routing Scheme for Energy-Efficient Wireless Sensor Network", *IEEE "GLOBECOM" 2008 proceedings*.
- [28] A. Boulis (2011), "Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks", NICTA: National ICT Australia.
- [29] M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson, R. Han (2006), "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks", in *Proc. 4th Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., USA*, pp. 307-320. DOI: 10.1145/1182807.1182838

C

- [30] M. Cherian, T. R. G. Nair (2011), "Multipath Routing with Novel Packet Scheduling Approach in Wireless Sensor Networks", *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 3(5), pp. 666-670.

D

- [31] D. Dai, J. Liu (2012), “Human powered wireless charger for low-power mobile electronic devices”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58 (3), pp. 767-774. DOI: 10.1109/TCE.2012.6311316
- [32] T. Van Dam, K. Langendoen (2003), "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", in Proc. 1st Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., ACM: New York, NY, USA. pp. 171-180.
- [33] S. De, C. Qiao, H. Wu (2003), “Meshed multipath routing with selective forwarding: an efficient strategy in wireless sensor networks”, *Computer Networks*, Vol. 43, pp. 481- 497. DOI: 10.1016/S1389-1286(03)00355-4
- [34] B. Deb, S. Bhatnagar, B. Nath (2003), “ReInForM: reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks”, *IEEE Int. Conf. Local Comp. Netw.*, pp. 406 – 415.
- [35] I. Demirkol, C. Ersoy, F. Alagöz (2006), “MAC protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey”, *IEEE Communications Magazine*, 44(4), April, pp. 115-121. DOI: 10.1109/MCOM.2006.1632658
- [36] C. Diallo, M. Marot, M. Becker (2010), “Link Quality and Local Load Balancing Routing Mechanisms in Wireless Sensor Networks”, *Telecommunications (AICT)*, Sixth Advanced Int. Conf., 9-15 May, pp. 306-315.
- [37] F.Z. Djiroun, D. Djenouri (2017), “MAC protocols with wake-up radio for wireless sensor networks: A review”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), pp. 587-618.
- [38] M. Doudou, D. Djenouri, N. Badache (2013), “Survey on latency issues of asynchronous MAC protocols in delay-sensitive wireless sensor networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2), pp. 528-550.
- [39] R. Du, L. Gkatzikis, C. Fischione, M. Xiao (2018), “On Maximizing Sensor Network Lifetime by Energy Balancing”, *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 5 (3), Sept., pp. 1206 -1218. DOI: 10.1109/TCNS.2017.2696363

- [40] P. Dutta, S. Dawson-Haggerty, Y. Chen, C.J.M. Liang, A. Terzis (2012), “A-MAC: A versatile and efficient receiver-initiated link layer for low-power wireless”, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 8(4), pp. 1-30.

E

- [41] S. Ehsan, B. Hamdaoui (2012), “A Survey on Energy-Efficient Routing Techniques with QoS Assurances for Wireless Multimedia Sensor Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14 (2), Second Quarter, pp. 265–278. DOI:10.1109/SURV.2011.020211.00058
- [42] M. El-Sherif, Y. Fahmy, H. Kamal (2018), “Lifetime maximisation of disjoint wireless sensor networks using multiobjective genetic algorithm”, *IET Wireless Sensor Systems*, 8 (5), Oct., pp. 200 – 207. DOI: 10.1049/iet-wss.2017.0069
- [43] Z.A. Eu, H.P. Tan (2012), “Probabilistic polling for multi-hop energy harvesting wireless sensor networks”, in: Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), Canada, pp. 271-275.
- [44] Z.A. Eu, H.P. Tan, W.K. Seah (2011), “Design and performance analysis of MAC schemes for wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting”, *Ad Hoc Networks*, 9 (3), pp. 300-323.

F

- [45] X. Fafoutis, A. Di Mauro, N. Dragoni (2013), “Sustainable medium access control: Implementation and evaluation of ODMAC”, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC), Hungary, pp. 407-412.
- [46] Z. Fei, B. Li, S. Yang, C. Xing, H. Chen, L. Hanzo (2017), “A Survey of Multi-Objective Optimization in Wireless Sensor Networks: Metrics, Algorithms, and Open Problems”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19 (1), Firstquarter, pp. 550 - 586. DOI: 10.1109/COMST.2016.2610578
- [47] E. Felemban, Chang-Gun Lee, E. Ekici (2006), “MMSPEED: multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and Timeliness in wireless sensor networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5 (6), pp. 738 – 754. DOI: 10.1109/TMC.2006.79

- [48] B. A. Forouzah, S. C. Fegan (2007), “Data Communications and Networking”, 4th Edition, ISBN 978-0-07-337622-6, McGraw-Hill Education. Chapter 12 Multiple Access, Carrier Sense Multiple Access, pp. 370-379.
- [49] B. A. Forouzah (2012), “Data Communications and Networking”, 5th Edition, ISBN 978-0-07-337622-6, McGraw-Hill Education, 1264 pages, Feb.
- [50] C. Fujii, W.K. Seah (2011), “Multi-tier probabilistic polling in wireless sensor networks powered by energy harvesting”, in Proc. 7th IEEE Int. Conf. Intelligent Sensors, Sensor Netw. and Inform. Process. (ISSNIP), Australia, pp. 383-388.

G

- [51] J. R. Gallardo, A. Gonzalez, L. Villasenor-Gonzalez, J. Sanchez (2007), “Multipath Routing Using Generalized Load Sharing for Wireless Sensor Networks”, in Proc. 7th IASTED Int. Conf. WOC2007, Montreal, QC, Canada, May 30–Jun. 1, pp. 374-379.
- [52] D. Ganesan, Ramesh Govindan, Scott Shenker, Deborah Estrin (2001), “Highly Resilient, Energy Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks”, Mobi HOC2001, Long Beach, CA, USA, pp. 251-254.
- [53] C. F. García-Hernández, P. H. Ibarguengoytia-González, J. García-Hernández, J. A. Pérez-Díaz (2007), “Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey”. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 7(3), March, pp. 264-273.
- [54] A. Ghosal, S. Halder (2017), “Lifetime Optimizing Clustering Structure Using Archimedes’ Spiral-Based Deployment in WSNs”, *IEEE Systems Journal*, 11 (2), June, pp. 1039 - 1048. DOI: 10.1109/JSYST.2015.2434498

H

- [55] M. Z. Hasan, H. Al-Rizzo, F. Al-Turjman (2017), “A Survey on Multipath Routing Protocols for QoS Assurances in Real - Time Wireless Multimedia Sensor Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19 (3), pp. 1424 -1456. DOI:10.1109/COMST.2017.2661201

- [56] M. Hassanalieragh, T. Soyata, A. Nadeau, G. Sharma (2016), “UR-SolarCap: An open source intelligent auto-wakeup solar energy harvesting system for supercapacitor-based energy buffering”, *IEEE Access*, Vol. 4, pp. 542-557. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2519845
- [57] H. Hassanein, J. Luo (2006), “Reliable Energy Aware Routing In Wireless Sensor Networks”, Second IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor Networks and Systems, 24-28 April, Columbia, MD, USA, pp. 54 – 64. DOI: 10.1109/DSSNS.2006.10
- [58] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan (2000), “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, in Proceedings of the 33rd Annual Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS), Maui, HI, USA, Jan. 7. DOI:10.1109/HICSS.2000.926982
- [59] W. B. Heinzelman, A. L. Murphy, H. S. Carvalho, M. A. Perillo (2004), “Middleware to Support Sensor Network Applications”, *IEEE Network*, 18(1), pp. 6–14.
- [60] X. Hong, M. Gerla, H. Wang, L. Clare (2002), “Load Balanced, Energy-Aware Communications for Mars Sensor Networks”, IEEE Aerospace Conf. Proceedings, Big Sky, MT, USA, Mar. 9-16, Vol. 3, pp. 1109 – 1115. DOI: 10.1109/AERO.2002.1035240
- [61] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M.W. Mutka, N. Xi (2013), “The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), pp. 101-120.
- [62] X. Huang, Y. Fang (2007), “Multi-constrained QoS multipath routing in wireless sensor networks”, *Wirel. Netw.*, 14 (4), pp. 465-478.
- [63] C. J. Hughes, J. D. Parsons, G. L. White (1997), “Principles of Performance Engineering for Telecommunication and Information Systems”, IEE Telecommunications Series 35, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 327pgs.

[64] P. Hurni, T. Braun (2008), “Energy-Efficient Multi-Path Routing in Wireless Sensor Networks”. In Proceedings of the 7th Int. Conf., ADHOC-NOW 2008 Sophia-Antipolis, France, September 10-12, pp.72-85.

[65] F. B. Hussain, Y. Cebi, G. A. Shah (2008), “A Multievent Congestion Control Protocol for Wireless Sensor Networks”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2008, Article ID 803271, pp.1-12.

I

[66] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva (2003), “Directed diffusion for wireless sensor networking”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11 (1), pp. 2-16, Feb. DOI:10.1145/345910.345920

J

[67] H. Jabbar, Y.S. Song, T.T. Jeong (2010), “RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56 (1), pp. 247-253. DOI: 10.1109/TCE.2010.5439152

[68] V. Jain, S. Agarwal, K. Goswami (2014), “Dynamic Multilevel Priority Packet Scheduling Design for WSN”, 2014 Int. Conf. Signal Propagation and Computer Technology (ICSPCT), pp. 86-90.

K

[69] J. Kabara, M. Calle (2012), “MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and a General Method of Performance Evaluation”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, January 3, DOI: 10.1155/2012/834784

[70] M. E. E. D. A. E. Kader, A. A. A. Youssif, A. Z. Ghalwash (2016), “Energy Aware and Adaptive Cross-Layer Scheme for Video Transmission Over Wireless Sensor Networks”, *IEEE Sensors Journal*, 16 (1), pp. 7792 – 7802. DOI:10.1109/JSEN.2016.2601258

[71] S. V. Kalore, P. Rewagad (2015), “A review on efficient routing techniques in wireless sensor networks”, in Proc. ICACEA, Ghaziabad, India, Mar. 19-20, pp. 803– 807, DOI:10.1109/ ICACEA.2015.7164813

- [72] J. Kang, Y. Zhang, B. Nath (2004), "End-to-End Channel Capacity Measurement for Congestion Control in Sensor Networks", in Proc. SANPA '04, Boston, MA, USA, Aug. 22.
- [73] B. Karp, H. Kung (2000), "Greedy Perimeter Stateless Routing", in Proc. 6th Annual ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2000), Boston, Massachusetts, USA, Aug. 6-11, pp. 243-254. DOI: 10.1145/345910.345953
- [74] V. Katiyar, N. Chand, N. Chauhan (2010), "Recent advanced and future trends in Wireless Sensor Networks", *International Journal of Applied Engineering Research*, Dindigul (ISSN-0976-4259), 1 (3), pp. 330-342.
- [75] Katiyar, N. Chand, N. Chauhan, S. Soni (2010), "Clustering Algorithms for Heterogeneous Wireless Sensor Network: A Survey", *International Journal of Applied Engineering Research*, Dindigul, 1 (2), pp. 273-287.
- [76] S. C. Kim, J. H. Jeon, H. J. Park (2012), "QoS aware energy-efficient (QAEE) MAC protocol for energy harvesting wireless sensor networks", in Proc. Int. Conf. Hybrid Information Technology, South Korea, pp. 41-48. DOI: 10.1007/978-3-642-32645-5_6
- [77] H. Kim, S.-G. Min (2009), "Priority-based QoS MAC protocol for wireless sensor networks", in Proc. IEEE Int. Symp. Parallel & Distributed Processing, Italy, May 23-29, pp. 1-8. DOI: 10.1109/IPDPS.2009.5161184
- [78] Y. Kim, C.W. Park, T.J. Lee (2014), "MAC protocol for energy- harvesting users in cognitive radio networks", in: Proc. 8th Int. Conf. Ubiquitous Inform. Manage. and Commun., Cambodia, pp. 1-5. DOI: 10.1145/2557977.2558054
- [79] L. Kleinrock, F. A. Tobagi (1975), "Packet switching in radio channels: Part I: Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics", *IEEE Transactions on Communications*, 23 (12), pp. 1400-1416.
- [80] P. S. Kumar, L. Xie, B. Soong, M. Y. Lee (2018), "Feasibility for Utilizing IEEE 802.15.4 Compliant Radios Inside Rotating Electrical Machines for Wireless

Condition Monitoring Applications”, *IEEE Sensors Journal*, 18 (10), May 15th, pp. 4293 – 4302. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2821266

- [81] M. Kuorilehto, M. Hännikäinen, T. D. Hämäläinen (2005), “A survey of application distribution in wireless sensor networks”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005 (5), October, pp. 774-788.

L

- [82] E. M. Lee, A. Kashif, D. H. Lee, I. T. Kim, M. S. Park (2010), “Location based multi-queue scheduler in wireless sensor network”, in Proc. 2010 International Conf. Advanced Commun. Technol., Vol.1, pp. 551-555.
- [83] M. Li, C. Hua, C. Chen, X. Guan (2017), “Application-driven virtual network embedding for industrial wireless sensor networks”, IEEE ICC, Paris, France, May 21-25, pp. 1-6.
- [84] S. Li, R. Neelisetti, C. Liu, A. Lim (2010), “Efficient Multi-Path Protocol for Wireless Sensor Networks”, *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, 2 (1), Feb., pp. 110-130.
- [85] S. Li, S. Zhao, X. Wang, K. Zhang, L. Li (2014), “Adaptive and Secure Load-Balancing Routing Protocol for Service-Oriented Wireless Sensor Networks”, *IEEE Systems Journal*, 8 (3), pp. 858 – 867. DOI: 10.1109/JSYST.2013.2260626
- [86] E. Lin, J.M. Rabaey, A. Wolisz (2004), “Power-efficient rendez-vous schemes for dense wireless sensor networks”, in: Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Paris, France, 2004, pp. 3769-3776.
- [87] H.H. Lin, M.J. Shih, H.Y. Wei, R. Vannithamby (2015), “DeepSleep: IEEE 802.11 enhancement for energy-harvesting machine-to-machine communications”, *Wireless Netw.*, Vol. 21, No. 2, pp. 357-370.
- [88] P. Lin, C. Qiao, X. Wang (2004), “Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks”, in: Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC), pp. 1534-1539.

- [89] S. Lindsey, C. S. Raghavendra (2002), “PEGASIS: Power-efficient Gathering in sensor information systems”, *IEEE Aerospace Conf. Proc.*, Vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.
- [90] Y. Liu, X. Zhu, C. Ma, L. Zhang (2011), “Multiple event detection in wireless sensor networks using compressed sensing”, in *Proc. ICT, Ayia Napa, Cyprus*, May 8-11, pp. 27-32. DOI: 10.1109/CTS.2011.5898935
- [91] W. Lou (2005), “An efficient N-to-1 multipath routing protocol in wireless sensor networks”, in *Proc. IEEE Int. Conf. MASS, DC, USA*, Nov. 7-10, pp. 665-672.
- [92] W. Lou, Y. Kwon (2006), “H-SPREAD: a hybrid multipath scheme for secure and reliable data collection in wireless sensor networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2006, 55 (4), pp. 1320 – 1330. DOI: 10.1109/TVT.2006.877707
- [93] Y. M. Lu, V. W. S. Wong (2006), “An Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks”, in *Proc. IEEE VTC-2006, Montreal, QC, Canada*, 25-28 Sep., pp. 2454–2459. DOI: 10.1109/VTCF.2006.505
- [94] Y. M. Lu, V. W. S. Wong (2007), “An Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks”. *International Journal of Communication Systems*, 20(7), Jul., pp. 747-766. DOI: 10.1002/dac.v20:7

M

- [95] M. A. Mahmood, W. Seah, I. Welch (2015), “Reliability in Wireless Sensor Networks: Survey and Challenges Ahead”, Elsevier, March 14, pp. 166-187. DOI: 10.1016/j.comnet.2014.12.016
- [96] M. Maimour (2008), “Maximally Radio-Disjoint Multipath Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks”, *WMuNeP’08*, October 27, Vancouver, BC, Canada, pp. 26-31. DOI: 10.1145/1454573.1454579.
- [97] F. Marcelloni, M. Vecchio (2009), “An efficient lossless compression algorithm for tiny nodes of monitoring wireless sensor networks”, *The Computer Journal*, 52 (8), pp. 969-987.

- [98] M. Masdari, M. Tanabi (2013), “Multipath routing protocols in wireless sensor networks: a survey and analysis”, *International Journal of Future Generation Communication and Networking (IJFGCN)*, 6 (6), pp. 181-192.
- [99] L. Miller, K. Abas, K. Obraczka (2015), “SCmesh: Solar-Powered Wireless Smart Camera Mesh Network”, in Proc. ICCCN, Las Vegas, NV, USA, pp. 1-8. DOI:10.1109/ICCCN.2015.7288462

N

- [100] Patel R. N, N. V. Bhatt (2016), “Wireless Sensor Network: MAC Survey”, *International Journal of Advanced Research in Computer Science and -Software Engineering*, 6 (5), May, pp. 872-878.
- [101] N. Nasser, L. Karim, T. Taleb (2013), “Dynamic Multilevel Priority Packet Scheduling Scheme for Wireless Sensor Network”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12 (4), April, pp. 1448-1459.
- [102] T. Ngo-Quynh, H. T. Trung, V. Tran-Quang (2012), “Improving Energy Efficiency for ARPEES Routing Protocol in Wireless Sensor Networks”, 2012 Int. Conf. Advanced Technologies for Communications (ATC), 10-12 Oct., pp. 73 – 77.
- [103] K. Nguyen, V.H. Nguyen, D.D. Le, Y. Ji, D.A. Duong, S. Yamada, ERI-MAC (2014), “An energy-harvested receiver-initiated MAC protocol for wireless sensor networks”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10 (5), pp.1-8. DOI: 10.1155/2014/514169
- [104] T.D. Nguyen, J.Y. Khan, D.T. Ngo (2016), “An adaptive MAC protocol for RF energy harvesting wireless sensor networks”, in: Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), USA, pp. 1-6.

P

- [105] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados (2013), “Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15 (2), pp. 551 – 591.

- [106] J. Polastre, J. Hill, D. Culler (2004), “Versatile low power media access for wireless sensor networks”, in: Proc. 2nd Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., USA, pp. 95- 107. DOI: 10.1145/1031495.1031508
- [107] Y. R. V. Prasad, R. Pachamuthu (2015), “Neural Network Based Short Term Forecasting Engine to Optimize Energy and Big Data Storage Resources of Wireless Sensor Networks”, in Proc. IEEE COMPSAC, Taichung, Taiwan, Jul. 1-5, pp. 511-516. DOI:10.1109/COMPSAC.2015.264

R

- [108] M. Radi, B. Dezfouli, S. A. Razak, K. A. Bakar (2010), “LIEMRO: A Low-Interference Energy-Efficient Multipath Routing Protocol for Improving QoS in Event-Based Wireless Sensor Networks”, in Proc. SENSORCOMM, Venice, Italy, Jul. 18-25, pp. 551-557. DOI:10.1109/SENSORCOMM.2010.89
- [109] M. Radi, B. Dezfouli, K. A. Bakar, M. Lee (2012), “Multipath routing in wireless sensor networks: a survey and research challenges”, *Sensors* ISSN 1424-8220, 12 (1), pp. 650-685.
- [110] R. Rajagopalan, P. K. Varshney (2006), “Data-aggregation techniques in sensor networks: A survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8 (4), 4th Quarter, pp. 48-63. DOI: 10.1109/COMST.2006.283821.
- [111] R. A. Ramadan (2009), “Agent based multipath routing in wireless sensor networks”. In: Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Agents, IA 09, pp. 63-69. DOI: 10.1109/IA.2009.4927501
- [112] M. Raza, N. Aslam, H. Le-Minh, S. Hussain, Y. Cao, N. M. Khan (2018), “A Critical Analysis of Research Potential, Challenges, and Future Directives in Industrial Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 1st Quarter, pp. 39-95. DOI: 10.1109/COMST.2017.2759725

S

- [113] N. Saleh, A. Kassem, A. M. Haidar (2018), “Energy-Efficient Architecture for Wireless Sensor Networks in Healthcare Applications”, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 6478 – 6486, Jan 8th. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2789918

- [114] S. Sarang, M. Drieberg, A. Awang (2017), "Multi-priority based QoS MAC protocol for wireless sensor networks", in: Proc. 7th IEEE Int. Conf. Syst. Eng. and Technol. (ICSET), Shah Alam, Malaysia, Oct. 2-3, pp. 54-58. DOI: 10.1109/ICSEngT.2017.8123420
- [115] S. Sarang, M. Drieberg, A. Awang, R. Ahmad (2018), "A QoS MAC Protocol for Prioritized Data in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks", *Computer Networks, International Council for Computer Communication*, Elsevier, Vol. 144, Oct. 24th, pp. 141-153. DOI: 10.1016/j.comnet.2018.07.022
- [116] G. A. Shah, M. Bozyigit, Ö. B. Akan (2006), "Multi-Event Adaptive Clustering (MEAC) Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks", Proc. The IFIP Fifth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net 2006), pp. 30-37.
- [117] R. C. Shah, H. M. Rabaey (2002), "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks", in Proc. IEEE WCNC, Orlando, FL, USA, Mar. 17-21, pp. 350–355. DOI: 10.1109/WCNC.2002.993520
- [118] Shantveer, J. S. Kallimani (2016), "A Study on Dynamic Multilevel Priority Packet Scheduling Scheme for WSNs", *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*, Vol.V, No. VIII, August, ISSN 2278-2540, pp.58-63.
- [119] S. Sharma, S. K. Jena (2015), "Cluster based Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 45 (2), April, pp.15-20.
- [120] B. A. Shehhi, M. Sanduleanu (2016), "An 800 μ W Peak Power Consumption, 24GHz (K-Band), Super-Regenerative Receiver with 200p J/bit Energy Efficiency, for IoT", 2016 29th Int. Conf. VLSI Design and 2016 15th Int. Conf. Embedded Systems (VLSID), 4-8 Jan. DOI: 10.1109/VLSID.2016.145
- [121] H. H. R. Sherazi, L.A. Grieco, G. Boggia (2018), "A comprehensive review on energy harvesting MAC protocols in WSNs: Challenges and tradeoffs", *Ad Hoc Netw.*, 71, pp. 117-134. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.01.004

- [122] T. Shu, M. Krunz (2010), “Coverage-Time Optimization for Clustered Wireless Sensor Networks: A Power-Balancing Approach”, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 18 (1), Feb., pp. 202-215.
- [123] G. Smaragdakis, I. Matta, A. Bestavros (2004), “SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks”, Proc. of the International Workshop on SANPA, pp. 251-261.
- [124] D. Son, B. Krishnamachari, J. Heidemann (2006), “Experimental Study of Concurrent Transmission in Wireless Sensor Networks”, in Proc. SenSys '06, Boulder, CO, USA, 31 Oct. 31–Nov. 3, pp. 237–250.
- [125] T. Srisooksai, K. Keamarungsi, P. Lamsrichan, K. Araki (2012), “Practical data compression in wireless sensor networks: A survey”, *Journal of Network and Computer Applications* 35, pp. 37–59. DOI: 10.1016/j.jnca.2011.03.001
- [126] M. B. Srivastava, R. R. Muntz, and M. Potkonjak (2001), “Smart kindergarten: sensor-based wireless sensor networks for smart developmental problem-solving environments”, in Proc. 7th ACM Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), July, Rome, Italy, pp. 132-138.
- [127] Y. Su, X. Fu, G. Han, N. Xu, Z. Jin (2017), “Implementation of a cross-layer sensing medium access control scheme”, *Sensors*, 17 (4), pp. 1-10. DOI: 10.3390/s17040816
- [128] Y. Sun, S. Du, O. Gurewitz, D.B. Johnson (2008), “DW-MAC: A low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks”, in: Proc. 9th ACM Int. Symp. Mobile Ad Hoc Netw. Comput., China, pp. 53-62.
- [129] Y. Sun, O. Gurewitz, D.B. Johnson (2008), “RI-MAC: A receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks”, in: Proc. 6th ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., USA, pp. 1-14. DOI: 10.1145/1460412.1460414
- [130] A. V. Sutagundar, S. S. Manvi (2013), “Location aware event driven multipath routing in Wireless Sensor Networks: Agent based approach”. *Egyptian Informatics Journal*, 14 (1), March, pp. 55–65.

T

- [131] Z. Teng, K. I. Kim (2010), “A Survey on Real-Time MAC Protocols in Wireless Sensor Networks”, *Communications and Networks*, Vol. 2, pp. 104-112. DOI: 10.4236/cn.2010.22017
- [132] N. Q. Thu, T. V. Thuy, B. T. Q. Mai (2012), “Multipath Routing for Cluster-based and Event-based Protocols in Wireless Sensor Networks”, Proceeding of 2012 3rd International Symposium on Information and Communication Technology (SoICT 2012), Halong, Vietnam. August., pp. 172-179.

V

- [133] A. Varga (2014), OMNeT++ user manual version 4.6, OpenSim Ltd. <http://www.omnetpp.org/> (truy cập gần nhất ngày 23/9/2018).
- [134] J. Varghese, S.V. Rao (2014), “Performance analysis of synchronous and receiver initiated MAC protocols under varying traffic density over wireless sensor networks”, in Proc. Int. Conf. Control, Instrumentation, Commun. Computational Technologies (ICCICCT), India, pp. 1228-1232.
- [135] A. Verma, M. P. Singh, J. P.h Singh, P. Kumar (2015), “Survey of MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”, 2015 2nd Int. Conf. on Advances in Computing and Communication Engineering, 1-2 May, India, DOI: 10.1109/ICACCE.2015.29
- [136] T. T. Vinh, T. N. Quynh, M. B. T. Quynh (2012), “EMRP: Energy-Aware Mesh Routing Protocol for Wireless Sensor Networks”, Int. Conf. Advanced Technologies for Communications (ATC), pp. 78-82.

W

- [137] D. Wajgi, N. V. Thakur (2012), “Load Balancing Algorithms in Wireless Sensor Network: A Survey”, *IRACST – International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC)*, ISSN: 2250-3501, 2 (4), pp. 456-460.

- [138] C.Y. Wan, S. B. Eisenman, A.T. Campbell (2003), “CODA: Congestion detection and avoidance in sensor networks”, Proceedings of the 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (ACM SenSys), USA, pp. 266-279.
- [139] J. Wang, T. Ma, J. Cho, S. Lee (2011), “An Energy Efficient and Load Balancing Routing. Algorithm for Wireless Sensor”, *ComSIS* 8 (4), Special Issue, October, pp. 991-1007. DOI: 10.2298/CSIS110228052W
- [140] Z. Wang, E. Bulut, B. K. Szymanski (2009), “Energy Efficient Collision Aware Multipath Routing for Wireless Sensor Networks”, in Proc. IEEE Int. Conf. Communication, ICC09, Dresden Germany, June 14-18, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICC.2009.5198989
- [141] C. Wu, Tsinghua, R. Yuan, H. Zhou (2008), “A Novel Load Balanced and Lifetime Maximization Routing Protocol in Wireless Sensor Networks”, IEEE Vehicular Technology Conf. VTC Spring 2008, pp.113-117.

Y

- [142] B. Yahya, J. Ben-Othman (2009), “An energy efficient and QoS aware multipath routing protocol for wireless sensor networks”, 2009 IEEE 34th Conf. on Local Computer Networks, Zurich, Switzerland, pp. 93 – 100. DOI: 10.1109/LCN.2009.5355184
- [143] M. Yarvis, N. Kushalnagar, H. Singh et al (2005), “Exploiting heterogeneity in sensor networks”, 24 Annual Joint Conf. of the IEEE Comput. Commun. Societies, IEEE INFOCOM 2005, Vol. 2, pp. 878-890.
- [144] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin (2002), “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, in: Proc. 21st Annu. Joint Conf. IEEE Comput. Commun. Societies, New York, USA, Jun. 23-27, pp. 1567-1576. DOI: 10.1109/INFCOM.2002.1019408
- [145] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin (2004), “Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 12 (3), pp. 493-506. DOI: 10.1109/TNET.2004.828953

- [146] H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar, L. H. Hanzo (2017), “A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19 (2), Secondquarter, pp. 828 - 854. DOI: 10.1109/COMST.2017.2650979
- [147] M. Yuvaraju, K.S.S. Rani (2014), “Secure energy efficient load balancing multipath routing protocol with power management for wireless sensor networks”, 2014 Int. Conf. Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), 10-11 July, pp. 331 - 335. DOI: 10.1109/ICCICCT.2014.6992980

Z

- [148] L. Zhang, M. Hauswirth, L. Shu, Z. Zhou, V. Reynolds, G. Han (2008), “Multi-priority Multi-path Selection for Video Streaming in Wireless Multimedia Sensor Networks”, in Proc. 5th Int. Conf. Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC2008), pp. 439-452.
- [149] R. Zhou, L. Li, J. Zhang (2012), “Analysis on Event Delay in Event-Driven Wireless Sensor Networks”, National Conf. Information Technology and Computer Science (CITCS 2012), pp. 656-660.
- [150] A. E. Zonouz, L. Xing, V. M. Vokkarane, Y. L. Sun (2014), “Reliability – Oriented Single-Path Routing Protocols in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Sensors Journal*, 14 (11), pp. 4059-4068.

Các trang web

- [151] Fraunhofer Food Chain Management Alliance, “Wireless Sensor Networks for Agricultural Applications”. [Online]:
http://www.fcm.fraunhofer.de/en/beispiele11/drahtlose_sensornetzeinderland-undforstwirtschaft.html (Truy cập mới nhất vào ngày 16/9/2019).
- [152] Gartner, Inc. (2017), “Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016”, U.K., February 7, 2017. [Online]
<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-07-gartner-says->

8-billion-connected-things-will-be-in-use-in-2017-up-31-percent-from-2016
(Truy nhập mới nhất vào ngày 16/9/2019).

- [153] The PBE Group, “Integrated Solutions for Mine Communications, Data and Critical Priority Systems”. [Online]: <http://minesitesystems.com/> (Truy nhập mới nhất vào ngày 16/9/2019).
- [154] M. Hung (2017), “Leading the IoT. Gartner Insights on How to Lead in a Connected World”, 29 pgs.
[Online] https://www.gartner.com/imagesrv/books/iot/iotEbook_digital.pdf
(Truy nhập mới nhất vào ngày 16/9/2019).
- [155] Texas Instruments. “CC2420 single-chip 2.4 GHz RF transceiver”. [Online]:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf> (Truy nhập mới nhất vào ngày 16/9/2019).
- [156] Natural Hazards Portal, “Danger levels forest fire”, Switzerland. [Online].
<http://www.natural-hazards.ch/home/dealing-with-natural-hazards/forest-fire/danger-levels-forest-fire.html> (Truy nhập mới nhất vào ngày 16/9/2019).
- [157] MNX MEMS&Nanotechnology Exchange. [Online]. <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html> (Truy nhập mới nhất vào ngày 16/9/2019).