

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



LÊ THỊ THÙY DƯƠNG

**GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN TẮC NGHẼN TRONG MẠNG
IoT VỚI GIAO THỨC CoAP**

**Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông
Mã số: 9.52.02.08**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2023

Công trình được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TSKH. HOÀNG ĐĂNG HẢI

2. TS. PHẠM THIẾU ANGA

Phản biện 1:.....

.....

Phản biện 2:.....

.....

Phản biện 3:.....

.....

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp Học viện họp tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Vào hồi giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

.....

LỜI MỞ ĐẦU

Trong vài năm gần đây, Internet vạn vật (IoT) đã trở thành phổ biến trong nhiều lĩnh vực ứng dụng do những tiến bộ công nghệ. Ứng dụng rộng rãi của IoT dẫn tới sự gia tăng thiết bị kết nối, nhu cầu phát triển tiêu chuẩn và giao thức cho IoT đặc biệt là các giao thức tầng ứng dụng để trao đổi dữ liệu giữa các đầu cuối. Các tổ chức tiêu chuẩn quốc tế như ITU, IETF đã nỗ lực phát triển và chuẩn hóa các giao thức tầng ứng dụng mới cho IoT. Điển hình là các giao thức MQTT, AMQP, XMPP và CoAP. Trong số đó, CoAP là giao thức dựa trên UDP đã được các tổ chức chuẩn hóa đánh giá là thích hợp hơn cho nhiều ứng dụng IoT và trở thành nền tảng cho các thiết bị IoT có hạn chế tài nguyên. Tuy nhiên, do thiết kế đơn giản nên CoAP còn nhiều hạn chế và cần được phát triển tiếp. Ngoài ra nhiều ứng dụng IoT ngày nay không chỉ trao đổi thưa thớt các gói tin, mà thường phải truyền các luồng dữ liệu lớn theo thời gian thực vì vậy tắc nghẽn là vấn đề thường xuyên xảy ra trong mạng IoT. Các vấn đề tồn tại cụ thể của CoAP trong cơ chế điều khiển tắc nghẽn gồm: sử dụng các tham số cố định, chỉ điều khiển tốc độ phát lại khi đã xảy ra mất gói, không hỗ trợ chuỗi gói, không phát hiện sớm tắc nghẽn. Có rất nhiều cải tiến cho CoAP đến nay Tuy nhiên, CoAP và các bản cải tiến CoAP vẫn còn một số hạn chế sau: (1) Hạn chế trong tính toán tham số; (2) Chưa hỗ trợ chuỗi gói; (3) Hạn chế về điều khiển tốc độ để giảm tắc nghẽn; (4) Chưa phân biệt nguyên nhân mất gói; (5) Chưa phát hiện sớm tắc nghẽn; (6) Hạn chế trong tính toán băng thông cố

chai. Ngoài ra, do hạn chế tài nguyên của các thiết bị IoT, cơ chế điều khiển cần gọn nhẹ, hiệu quả.

Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu giải pháp khắc phục các hạn chế nêu trên của CoAP và đề xuất cơ chế điều khiển tắc nghẽn hiệu quả cho giao thức CoAP để trao đổi tin cậy giữa các thiết bị đầu cuối trong mạng IoT.

Phạm vi nghiên cứu của luận án tập trung vào điều khiển tắc nghẽn với CoAP ở tầng ứng dụng tại thiết bị IoT bên gửi và bên nhận tin dựa trên thông tin trao đổi giữa các đầu cuối trong mạng IoT sử dụng kiến trúc mạng tập trung ICN.

Các kết quả đóng góp của luận án

Luận án có các kết quả đóng góp chính như sau:

- 1) Đề xuất một mô hình phân tích truyền tin theo chuỗi gói cho CoAP và giao thức mới RCoAP dựa trên tốc độ để điều khiển tắc nghẽn trong mạng IoT với cơ chế điều khiển tăng giảm tốc độ phát phù hợp với tình trạng tắc nghẽn nhằm đạt được hiệu năng cao so với các cơ chế CoAP hiện có.
- 2) Đề xuất giao thức mới FCoAP điều khiển tắc nghẽn sử dụng hệ điều khiển mờ theo biến thiên động của tình trạng tắc nghẽn và các tham số mạng nhằm đạt được hiệu năng cao so với các cơ chế CoAP hiện có.

Bố cục của luận án

Luận án được trình bày thành 3 chương. Chương 1 trình bày tổng quan về cơ sở lý thuyết mạng IoT, tắc nghẽn và điều khiển tắc nghẽn với CoAP. Chương 2 đề xuất một giao thức điều khiển tắc nghẽn dựa vào tốc độ RCoAP (Rate-based

CoAP). Chương 3 đề xuất một giao thức điều khiển tắc nghẽn FCoAP (Fuzzy CoAP) dựa vào hệ điều khiển mờ.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ MẠNG IoT VÀ VẤN ĐỀ ĐIỀU KHIỂN TẮC NGHẼN

1.1. Tổng quan về mạng IoT

IoT ra đời với ý tưởng kết nối mọi vật với nhau và với Internet để tận dụng các thành quả của Internet. Với tính thông minh, hiệu quả thiết thực, IoT đã và đang được tích hợp trên khắp mọi thứ, mọi nơi con người sống. Ứng dụng rộng rãi của IoT dẫn đến số thiết bị kết nối và lượng dữ liệu cần chuyển tiếp ngày càng lớn. Điều này thúc đẩy phát triển các giao thức tầng ứng dụng để bảo đảm truyền tải dữ liệu hiệu quả, tránh mất mát, giảm độ trễ truyền tin.

Kiến trúc cơ bản của mạng IoT gồm 3 lớp: 1) lớp cảm biến, 2) lớp liên kết mạng và truyền dữ liệu, 3) lớp ứng dụng. Kiến trúc ba lớp được mô tả trong RFC 7927 theo một mô hình mạng tập trung thông tin ICN. Các giao thức chính tầng ứng dụng đã được chuẩn hóa của mạng IoT gồm: MQTT, AMQP, XMPP, và CoAP. CoAP sử dụng kiến trúc ICN như đã chỉ ra trong tiêu chuẩn RFC 8763 (tháng 4/2020).

1.2. Tắc nghẽn và nguyên nhân tắc nghẽn

Tắc nghẽn là một hiện tượng phổ biến trên mạng với các dấu hiệu: độ trễ và tỷ lệ rơi gói tin tăng nhanh, thông lượng sụt giảm nhanh, có thể dẫn tới nguy cơ mạng tê liệt hoàn toàn.

Tắc nghẽn xảy ra do nhiều nguyên nhân, song chủ yếu là: 1) tốc độ phát của bên gửi vượt quá băng thông của liên kết mạng trong tuyến từ đầu cuối tới đầu cuối; 2) bộ đệm lưu trữ

tạm thời gói tin để chuyển tiếp ở các nút trung gian bị quá tải dẫn đến tràn bộ đệm; 3) các nút mạng (kể cả nút trung gian và nút đích) không kịp xử lý các gói tin đến.

Ngoài ra, mạng IoT có thêm các nguy cơ gây tắc nghẽn khác: 1) mất gói do lỗi kênh vô tuyến; 2) hạn chế tài nguyên của thiết bị IoT; 3) kết nối mạng đa dạng và biến động; 4) yêu cầu băng thông của đa dạng ứng dụng; 5) khả năng xuất hiện chuỗi gói cao.

1.3. Điều khiển tắc nghẽn

Các cơ chế điều khiển chia thành hai nhóm: 1) Điều khiển vòng hở (có hỗ trợ của mạng) và 2) Điều khiển vòng kín (chỉ dựa vào trao đổi đầu cuối). CoAP thuộc nhóm điều khiển vòng kín. Các cơ chế điều khiển vòng kín trong mạng IoT được chia làm ba loại: 1) dựa vào mất gói, 2) dựa vào độ trễ, 3) dựa vào tốc độ.

1.4. Điều khiển mờ và khả năng áp dụng cho điều khiển tắc nghẽn

Zadeh đưa ra lý thuyết mờ từ năm 1965 và được Mamdani áp dụng vào hệ thống điều khiển thực tiễn. Một hệ điều khiển mờ gồm 4 thành phần chính: Khối mờ hóa; Khối mô tơ suy diễn; Khối luật mờ và khối giải mờ.

Do các tham số xác định tắc nghẽn đa dạng và có độ biến thiên cao, rất khó xác định rõ ràng trong điều kiện mạng luôn biến động. Bởi vậy, điều khiển mờ đã được nhiều nghiên cứu lựa chọn để điều khiển tắc nghẽn. Kết quả khảo sát đến nay cho thấy, điều khiển mờ đã được áp dụng cho điều khiển tắc nghẽn trong mạng Internet, song vẫn chưa có nghiên cứu nào đề cập

đến điều khiển mờ cho điều chỉnh tốc độ phát CoAP để tránh tắc nghẽn.

1.5. Giao thức CoAP

CoAP là giao thức hạng nhẹ có tiêu đề gói tin đơn giản. Do thiết kế hạng nhẹ, cơ chế điều khiển tắc nghẽn của CoAP khá đơn giản theo kiểu dừng và đi tiếp. Nếu thời gian chờ quá RTO mà vẫn chưa nhận được ACK, bên gửi sẽ phát lại gói CON với RTO mới gấp đôi RTO cũ. Quá trình lặp lại nếu bên gửi vẫn chưa nhận được ACK. Cơ chế này được gọi là lùi theo hàm mũ nhị phân.

1.6. Các nghiên cứu cải tiến CoAP và những tồn tại

Các nghiên cứu cải tiến CoAP chia theo ba tính năng chính: 1) cách tính RTO, 2) cơ chế lùi, và 3) thuật toán điều khiển.

Những tồn tại của CoAP và của các nghiên cứu liên quan

(1) Hạn chế trong tính toán tham số điều khiển

Do chỉ sử dụng RTO đặt cố định, CoAP bỏ qua biến động RTT và trạng thái biến thiên của tắc nghẽn và mạng. Các cơ chế cải tiến CoAP cần thay đổi cách tính RTO động.

(2) Hạn chế về hỗ trợ chuỗi gói tin

CoAP không hỗ trợ truyền chuỗi gói tin. Chuỗi gói tin có khả năng xuất hiện cao trong mạng IoT và cần được xử lý phù hợp. Mới có rất ít nghiên cứu đề cập đến xử lý chuỗi gói tin.

(3) Hạn chế về điều khiển tốc độ phát

Điều chỉnh tốc độ phát là rất cần thiết để tránh hoặc giảm tắc nghẽn. Tuy nhiên, CoAP chỉ giảm tốc độ phát một nửa mỗi khi phải phát lại với RTO cố định. Đa số các nghiên cứu liên

quan chỉ thay đổi RTO cho phát lại khi tắc nghẽn đã xảy ra. Mới có một số ít nghiên cứu có điều chỉnh tốc độ phát.

(4) Hạn chế về phân biệt nguyên nhân mất gói

Trong mạng IoT, mất gói có thể do lỗi kênh vô tuyến ngoài lý do tắc nghẽn. Cần phân biệt nguyên nhân mất gói để có điều khiển phù hợp.

(5) Hạn chế về phát hiện sớm tắc nghẽn

CoAP và đa số các nghiên cứu liên quan đều chỉ dựa vào mất gói để phát hiện tắc nghẽn, nghĩa là cơ chế điều khiển chỉ hoạt động khi đã có tắc nghẽn xảy ra. Còn rất ít nghiên cứu đưa ra tính năng phát hiện sớm tắc nghẽn cho CoAP. Mặt khác, các tham số RTT, độ trễ, tải lưu lượng, băng thông cổ chai liên tục biến thiên nên các tính toán RTT, RTO tới nay đều chỉ dựa vào thực nghiệm, khó đưa ra một công thức tính chính xác.

(6) Hạn chế về tính toán băng thông cổ chai

Băng thông cổ chai có tác động lớn đến tắc nghẽn nên đã được quan tâm trong TCP. Tuy nhiên, còn rất ít nghiên cứu về CoAP đề cập đến băng thông cổ chai.

1.7. Các tham số đánh giá hiệu năng giao thức CoAP

Hiệu năng giao thức CoAP được đánh giá bằng: (1) Số gói phát thành công và tỷ lệ phát thành công; (2) Số gói phát lại và tỷ lệ phát lại gói; (3) Số gói phát lại đúp và tỷ lệ phát lại đúp; (4) Số gói đến đích thành công và tỷ lệ đến đích thành công; (5) Số gói bị mất và tỷ lệ mất gói; (6) Độ trễ gói tin; (7) Thông lượng.

1.8. Kết luận chương 1

Chương 1 của luận án đã trình bày tổng quan về mạng IoT,

vấn đề tắc nghẽn mạng và điều khiển tắc nghẽn với giao thức CoAP, các tồn tại của CoAP và các nghiên cứu liên quan, đưa ra các vấn đề cần giải quyết trong luận án.

CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH TRUYỀN CHUỖI GÓI VÀ GIAO THỨC RCoAP ĐIỀU KHIỂN TẮC NGHẼN DỰA VÀO TỐC ĐỘ

2.1. Mô hình phân tích cho truyền chuỗi gói tin cậy

Tốc độ phát chuỗi gói tin của CoAP được tính toán như sau:

Khi không mất gói tăng tốc độ phát:

$$R(k) = R(k - 1) + \frac{1}{T(k)} \quad (2.1)$$

Khi mất gói giảm tốc độ phát theo công thức:

$$R(k) = 0,5 \times R(k - 1) \quad (2.2)$$

$R(k)$ là tốc độ tại chu kỳ k và $T(k)$ là thời gian của 1 chu kỳ k .

2.2. Đề xuất giao thức RCoAP

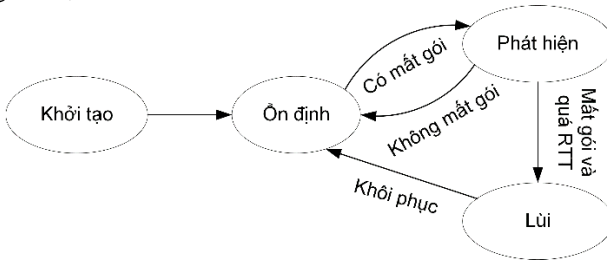
Luận án đề xuất giao thức mới RCoAP theo cơ chế điều khiển dựa vào tốc độ trên cơ sở mô hình phân tích truyền chuỗi gói tin cậy nêu trên. Cơ chế điều khiển dựa theo công thức (2.1) và (2.2). RCoAP phát các gói tin theo tốc độ tăng dần theo công thức (2.1) khi không có tắc nghẽn, giảm tốc độ phát đi một nửa theo công thức (2.2) khi có mất gói, tức là khi có tắc nghẽn xảy ra để tránh tắc nghẽn tiếp. RCoAP có tính năng xác định tốc độ phát ban đầu và phân biệt nguyên nhân mất gói.

Giao thức RCoAP được thiết kế với 4 trạng thái: 1) Khởi tạo, 2) Ổn định, 3) Phát hiện và 4) Lùi như mô tả trên hình 2.1.

- ***Trạng thái khởi tạo***

Khi bắt đầu kết nối, RCoAP ở trạng thái khởi tạo trong khoảng $2 \times RTT$. Sau đó, RCoAP sẽ chuyển sang trạng thái hoạt

động ổn định.



Hình 2.1 Bốn trạng thái của giao thức RCoAP

- **Trạng thái ổn định**

Đây là trạng thái hoạt động chính để truyền tin của RCoAP, được duy trì nếu không có tắc nghẽn xảy ra. Bên gửi tăng dần tốc độ nếu không thấy mất gói và cập nhật RTT. Tốc độ phát R được tăng theo công thức (2.3) nếu không thấy mất gói:

$$R = \min\left(R_{max}, R + \frac{1}{RTT}\right) \quad (2.3)$$

Nếu không nhận được ACK cho gói tin đã phát đi, bên gửi sẽ dừng trạng thái ổn định để chuyển sang trạng thái phát hiện.

- **Trạng thái phát hiện**

Khi phát hiện mất ACK, RCoAP lập tức giảm tốc độ một nửa. Tiếp đó, RCoAP xác định mất gói do lỗi kênh vô tuyến hay do tắc nghẽn bằng việc phát một số gói tin thử. Nếu có ACK trong khoảng một RTT, RCoAP xác định mất gói do lỗi vô tuyến. Khi đó, RCoAP khôi phục lại tốc độ phát và trở về trạng thái ổn định. Nếu sau RTT vẫn chưa nhận được ACK, RCoAP xác định mất gói do tắc nghẽn và chuyển sang trạng thái lùi.

- **Trạng thái lùi**

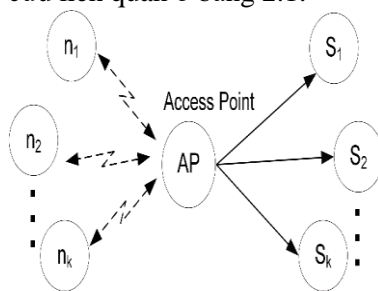
Trong trạng thái này, RCoAP giảm tốc độ phát một nửa để

tránh tắc nghẽn thêm và thực hiện phát lại các gói tin đã mất. Nếu quá 4 lần phát lại, gói tin tương ứng được coi là mất. Trong thời gian lùi, nếu bên gửi nhận được một ACK, tắc nghẽn được coi là hết. Khi đó, RCoAP dùng trạng thái lùi và chuyển về trạng thái ổn định với tốc độ phát hiện có. Trường hợp có tắc nghẽn kéo dài, RCoAP sẽ tự động lặp lại quá trình chuyển từ trạng thái ổn định sang phát hiện và lùi như mô tả ở trên.

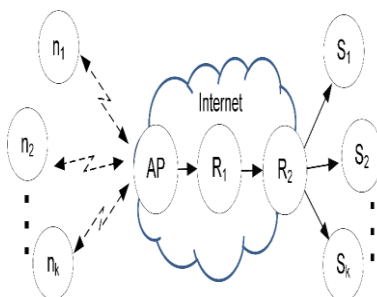
Luận án đã trình bày 4 thuật toán cơ bản của RCoAP tương ứng theo 4 trạng thái đã nêu.

2.3. Kết quả mô phỏng cho RCoAP

Bộ công cụ sử dụng cho mô phỏng là NS3.36. Luận án sử dụng sơ đồ mạng hình sao và hình xương cá (hình 2.2 và 2.3) tương tự ở các nghiên cứu liên quan để mô phỏng ứng dụng một chặng và nhiều chặng kết nối. Các kịch bản mô phỏng và các tham số chính thiết lập, mô phỏng tương tự trong các nghiên cứu liên quan ở bảng 2.1.



Hình 2.2 Mạng hình sao



Hình 2.3 Mạng hình xương cá

Kịch bản 2.1: Thử nghiệm chức năng xác định tốc độ phát ban đầu, điều khiển tăng/giảm tốc độ phát và nhận biết nguyên nhân mất gói của RCoAP.

Bảng 2.1: Các tham số chính để thiết lập mô phỏng RCoAP

Tham số		Giá trị
Thời gian mô phỏng		50s – 300s
Số lần chạy mỗi kịch bản		30 lần
Số mô đun IoT bên gửi		3 – 30
Tầng vật lý và MAC		WifiPhy, 2.4 GHz; IEEE 802.11b/n
Liên kết AP		250 Kbps, 64 ms
Kết nối Internet		10/100 Mbps (Ethernet)
Kịch bản mô phỏng		Mô phỏng băng thông cố chai với BW và trễ liên kết D
Kịch bản 2.1	Thử nghiệm chức năng	BW = 500 Kbps, D = 500 ms
Kịch bản 2.2	So sánh giao thức	BW = 1 Mbps, 500 Kbps; D = 64 ms, 500 ms
Kịch bản 2.3	Lưu lượng biến động	2.3a: BW = 1 Mbps; D = 70 ms
		2.3b: BW = 1 Mbps; D = 120 ms
Mô hình mạng		Kịch bản 2.1: Mạng hình 2.2 Kịch bản 2.2, 2.3: Mạng hình 2.3
Thời điểm bắt đầu phát		Ngẫu nhiên trong khoảng 0-200 ms
Tính khoảng tin cậy		Mức tin cậy 99%

Kịch bản 2.2: So sánh hiệu năng của RCoAP với các giao thức CoAP, CoCoA và CoCoA+. Tốc độ phát của các luồng tin thay đổi từ 2 Kbps tới 2,5 Kbps. Băng thông cố chai chưa đủ tạo ra tắc nghẽn nên chưa có mất gói xảy ra trong cả 4 giao thức.

Bảng 2.2: So sánh hiệu năng của RCoAP và các giao thức CoAP khác

Giao thức	Độ trễ trung bình (ms)	Thông lượng trung bình (Kbps)	Tỷ lệ mất gói (%)	Số gói phát thành công	Số gói phát lại
CoAP	102,4	16,96	0	50	43
CoCoA	585,7	16,96	0	50	43
CoCoA+	316,7	16,96	0	50	43
RCoAP	78,8	23,24	0	137	0

Lưu lượng động được tạo với một luồng TCP có biến thiên cao, cạnh tranh với các luồng CoAP, CoCoA, CoCoA+ và RCoAP. Kết quả mô phỏng cho thấy giao thức RCoAP độ trễ thấp hơn và thông lượng cao hơn giao thức CoAP, CoCoA, CoCoA+.

Kịch bản 2.3: So sánh RCoAP với CoAP trong các điều kiện độ trễ liên kết khác nhau thể hiện tình trạng tắc nghẽn.

Bảng 2.3: So sánh RCoAP và CoAP khi độ trễ liên kết là 70ms

Giá trị trung bình của 10 luồng tin	RCoAP	CoAP
<i>Tổng số gói gửi</i>	216	162
<i>Số gói phát thành công</i>	216 (100%)	159 (98,21%)
<i>Số gói phát lại</i>	0 (0,00%)	33 (20,53%)
<i>Số gói phát lại đúp</i>	0 (0,00%)	29 (17,93%)
<i>Số gói đến đích thành công</i>	216 (100%)	130 (80,27%)
<i>Số gói bị mất</i>	0 (0,00%)	32 (19,73%)
<i>Trễ trung bình (ms)</i>	922,41	4175,40
<i>Thông lượng trung bình (Kbps)</i>	0,7111	0,5353

Bảng 2.4: So sánh RCoAP và CoAP khi độ trễ liên kết là 120ms

Giá trị trung bình của 10 luồng tin	RCoAP	CoAP
<i>Tổng số gói gửi</i>	74	49
<i>Số gói phát thành công</i>	63 (85,33%)	44 (89,57%)
<i>Số gói phát lại</i>	35 (47,24%)	48 (97,55%)
<i>Số gói phát lại đúp</i>	27 (36,88%)	40 (82,62%)
<i>Số gói đến đích thành công</i>	36 (48,45%)	4 (6,95%)
<i>Số gói bị mất</i>	38 (51,55%)	45 (93,05%)
<i>Trễ trung bình (ms)</i>	10902,82	30665,06
<i>Thông lượng trung bình (Kbps)</i>	0,2459	0,1519

Trong cả 2 kịch bản các tham số hiệu năng của RCoAP đều tốt hơn CoAP.

2.4. Tổng hợp các thay đổi cải tiến của RCoAP so với CoAP

RCoAP có một số thay đổi cải tiến chính so với CoAP như sau: RCoAP cần thời gian khởi tạo kéo dài $2 \times \text{RTT}$ cho một

phiên kết nối mới để tính tốc độ phát ban đầu; Tiêu đề gói tin RCoAP có nhiều hơn 4 bytes ở phần tùy chọn để gửi số thứ tự gói tin phục vụ cho kiểm tra nguyên nhân mất gói. Bảng 2.5 thống kê các cải tiến chính của RCoAP so với các giao thức khác.

Bảng 2.5: Các cải tiến của RCoAP so với CoAP, CoCoA và CoCoA+

Giao thức	Thuật toán lưu	Xác định tốc độ khởi tạo	Hỗ trợ chuỗi gói	Phân biệt mát gói	Điều khiển tốc độ
CoAP	BEB	Không	Không	Không	Không
CoCoA	BEB	Không	Không	Không	Không
CoCoA+	VBF	Không	Không	Không	Không
RCoAP	VBF	Có	Có	Có	Có

2.5. Kết luận chương 2

Chương 2 trình bày mô hình phân tích truyền chuỗi gói tin cây và giao thức RCoAP. Kết quả thử nghiệm cho thấy RCoAP đạt hiệu năng tốt hơn các giao thức đã chuẩn hóa hiện có. Các kết quả đạt được trong chương 2 đã được công bố trong các công trình [J1-J4].

CHƯƠNG 3. GIAO THỨC FCoAP ĐIỀU KHIỂN TẮC NGHE DỰA VÀO HỆ ĐIỀU KHIỂN MỜ

3.1. Giải pháp điều khiển tắc nghe sử dụng hệ FCS

Hệ điều khiển mờ (FCS) sử dụng trong luận án có hai đầu vào và một đầu ra. **Đầu vào thứ nhất** là độ dốc $RT_gradient$:

$$RT(k) = \frac{RTT_s(k) - RTT_{min}}{RTT_{max}(k) - RTT_{min}} \quad (3.1)$$

$RTT_{min}(k)$, $RTT_{max}(k)$: Giá trị nhỏ nhất và giá trị lớn nhất của RTT tính đến thời điểm hiện tại.

$RTT_s(k)$: Giá trị RTT trung bình theo phương pháp EWMA.

Đầu vào thứ hai là tỷ lệ thông lượng so với băng thông cố chai

$$BG_gradient : \quad BG(k) = \frac{\min(BW_{max}(k), \theta_t(k))}{BW_{max}(k)} \quad (3.2)$$

$\theta_t(k)$: Thông lượng tại chu kỳ k; $BW_{max}(k)$: Băng thông cổ chai lớn nhất tại thời điểm k.

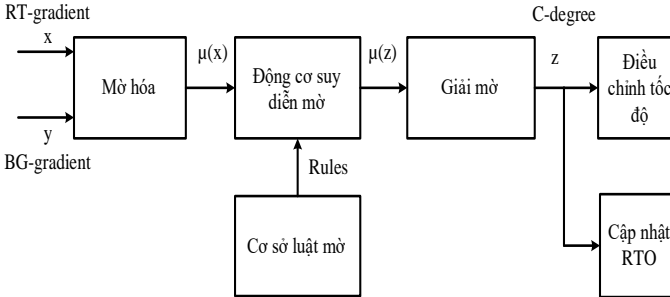
RT(k), BG(k) được chuẩn hóa trong khoảng [0;1]

Đầu ra là hệ số C_Degree (Congestion Degree) làm đầu ra cho hệ FCS và đề xuất công thức điều khiển tính tốc độ phát:

$$R(k) = R(k - 1) + C_degree(k) \times \frac{1}{RTT_s(k)} \quad (3.3)$$

$R(k)$ là tốc độ phát ở thời điểm k. C_degree biểu thị trạng thái tắc nghẽn mạng. Nếu $C_Degree \in (0; 1]$, mạng được xác định là ít tắc nghẽn. Nếu $C_Degree \in [-1; 0)$, mạng được xác định là có tắc nghẽn. Nếu $C_Degree = 0$, mạng ở trạng thái cân bằng không có sự thay đổi lưu lượng, không điều chỉnh tốc độ phát.

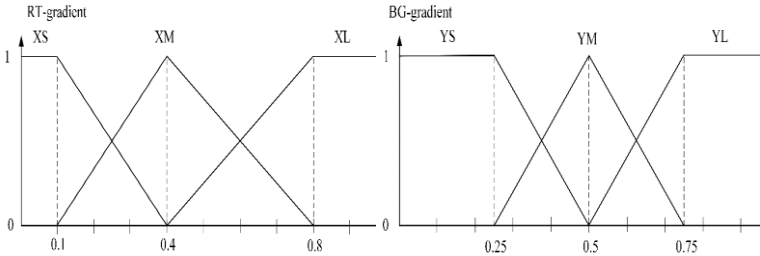
3.2. Thiết kế hệ thống điều khiển mờ



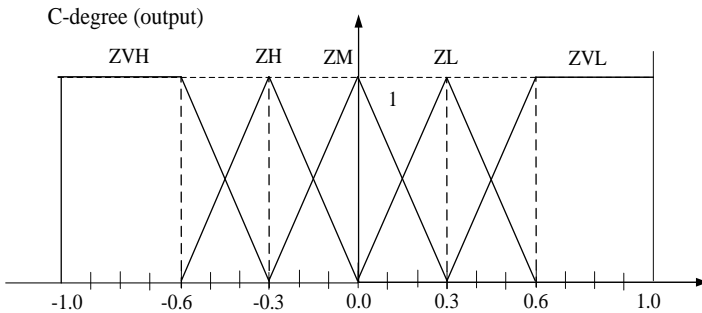
Hình 0.1 Mô hình hệ thống điều khiển mờ

Mờ hóa: Biểu diễn các đầu vào và đầu ra với các biến ngôn ngữ và diễn giải các hàm thuộc. Luận án đề xuất sử dụng 3 hạng thức cho mỗi đầu vào và 5 hạng thức cho đầu ra. Cụ thể, các hạng thức (“small”, “medium”, “large”) cho các đầu vào RT_gradient và BG_gradient, bài định nghĩa 5 hạng thức: “very low”, “low”, “medium”, “high”, “very high” cho đầu ra

C_degree.



Hình 0.2 Các hàm thuộc cho RT_gradient và BG_gradient



Hình 0.3 Các hàm thuộc cho đầu ra C_degree

Cơ sở luật mờ: chứa các luật mờ để xác định các biến ngôn ngữ đầu ra dựa vào các biến ngôn ngữ đầu vào. Tập luật mờ được đề xuất trong bảng 3.1 với các toán tử AND.

Bảng 3.1: Tập luật mờ

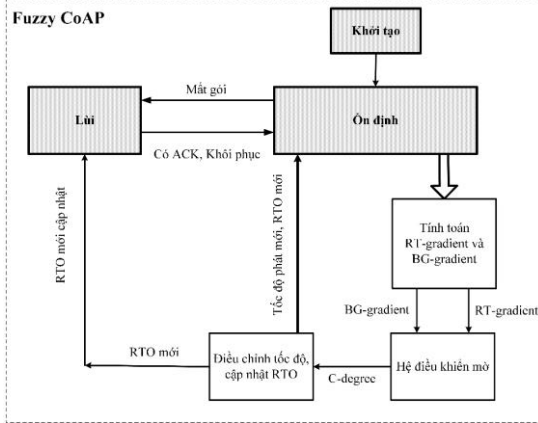
Rules	RT_Gradient	BG_Gradient	Congestion Degree
1	Small (XS)	Small (YS)	Very Low (ZVL)
2	Small (XS)	Medium (YM)	Very Low (ZVL)
3	Small (XS)	Large (YL)	Low (ZL)
4	Medium (XM)	Small (YS)	Low (ZL)
5	Medium (XM)	Medium (YM)	Medium (ZM)
6	Medium (XM)	Large (YL)	Medium (ZM)
7	Large (XL)	Small (YS)	High (ZH)
8	Large (XL)	Medium (YM)	High (ZH)
9	Large (XL)	Large (YL)	Very High (ZVH)

Mô tơ suy diễn mờ: Xác định tập mờ đầu ra dựa vào các tập mờ đầu vào và cơ sở luật mờ. Phương pháp suy diễn mờ sử dụng trong luận án là phương pháp max-min.

Giải mờ: sử dụng công thức trung bình tâm như sau:

$$C_degree = Z_c = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \times \mu(Z_i)}{\sum_{i=1}^N \mu(Z_i)} \quad (3.4)$$

3.3. Giao thức FCoAP cho điều khiển tắc nghẽn mạng



Hình 0.4 Cơ chế điều khiển FCoAP (Fuzzy CoAP)

Luận án đề xuất giao thức FCoAP sử dụng hệ điều khiển mờ (FCS) để phát hiện sớm tắc nghẽn và điều chỉnh tốc độ để giảm tắc nghẽn như biểu thị trên hình 3.4. Khi khởi tạo, bên gửi FCoAP thực hiện tính các giá trị $\theta_i(k)$ và $BW_{max}(k)$ trong khoảng thời gian từ 6 đến 10 lần RTT để từ đó tính tốc độ phát ban đầu thông qua số gói ACK đếm được (nACK):

$$R = \frac{nACK}{T} \quad (3.5)$$

Trong trạng thái ổn định, bên gửi FCoAP liên tục phát các gói tin và tính toán RTT , $BW(k)$, $\theta_i(k)$ mỗi khi nhận được ACK để tính $RT_gradient$ và $BG_gradient$. Các giá trị này được đưa

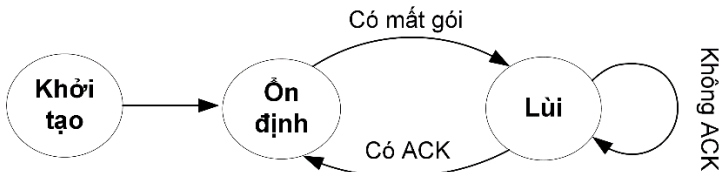
vào hệ FCS để tính ra cấp độ tắc nghẽn C_degree nhằm điều chỉnh lại tốc độ phát. FCoAP liên tục kiểm tra mất gói thông qua: Khoảng trống số thứ tự gói tin và sự kiện của hàm định thời RTO. Khi có dấu hiệu mất gói, FCoAP chuyển sang trạng thái lùì.

Trong trạng thái lùì, FCoAP kiểm tra ACK sau mỗi RTT. Nếu có ACK, FCoAP cập nhật mới C_degree và quay về trạng thái ổn định. Nếu không có ACK sau thời gian tối đa do ứng dụng cho phép, kết nối được coi là bị lỗi và cần khởi tạo lại.

Giao thức FCoAP có 3 trạng thái: 1) Khởi tạo, 2) Ổn định, và 3) Lùì như mô tả trên hình 3.5.

- **Trạng thái khởi tạo:**

FCoAP thực hiện tính băng thông cổ chai để tính ra tốc độ phát ban đầu. Tiếp theo, FCoAP chuyển sang trạng thái ổn định.



Hình 0.5 Ba trạng thái của giao thức FCoAP

- **Trạng thái ổn định**

Đây là trạng thái hoạt động chính của FCoAP. FCoAP liên tục phát các gói tin theo tốc độ được điều chỉnh cập nhật bởi hệ điều khiển mờ. Khi mất ACK, FCoAP thực hiện phát lại gói tin đã mất theo giá trị RTO được cập nhật bởi C_degree . Nếu quá 4 lần phát lại không thành công, FCoAP đánh dấu gói tin bị mất và chuyển sang trạng thái lùì.

- **Trạng thái lùì**

FCoAP liên tục kiểm tra ACK. Nếu có ACK, FCoAP sẽ

phát tiếp một gói tin, cập nhật lại C_degree và tốc độ phát hiện tại và tiếp đó về trạng thái ổn định. Nếu không có ACK sau một thời gian tối đa của ứng dụng cho phép, FCoAP sẽ hủy bỏ kết nối. Luận án trình bày 3 thuật toán cơ bản của FCoAP tương ứng theo 3 trạng thái đã nêu.

3.4. Kết quả mô phỏng đánh giá FCoAP

Bảng 3.2: Các tham số chính để thiết lập mô phỏng RCoAP

Tham số		Giá trị
Thời gian mô phỏng		100s – 300s
Số lần chạy mỗi kịch bản		30 lần
Số mô đun IoT bên gửi		3 – 30
Tầng vật lý và MAC		WifiPhy; 2,4 GHz; IEEE 802.11b/n
Liên kết AP		250 Kbps, 50 ms
Kết nối Internet		10/100 Mbps (Ethernet)
Kịch bản mô phỏng		Mô phỏng băng thông cổ chai với BW và trễ liên kết D
Kịch bản 3.1	Thử nghiệm chức năng	BW = 45 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng hình 2.2
Kịch bản 3.2	So sánh giao thức	BW = 60 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng 2.3
Kịch bản 3.3	Lưu lượng UDP thay đổi	BW = 75 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng hình 2.3
Kịch bản 3.4	Lưu lượng CoAP hỗn hợp	BW = 75 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng hình 2.3
Kịch bản 3.5	Lưu lượng UDP/TCP hỗn hợp	BW = 75 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng hình 2.3
Kịch bản 3.6	So sánh với các giao thức CoAP khác	BW = 60 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng hình 2.3
Kịch bản 3.7	So sánh FCoAP với RCoAP chặn ngắn	BW = 60 Kbps, D = 300 ms, mô hình mạng hình 2.2
Kịch bản 3.8	So sánh FCoAP với RCoAP chặn dài	BW = 75 Kbps, D = 500 ms, mô hình mạng hình 2.3

Các tham số chính thiết lập mô phỏng tương tự trong các nghiên cứu liên quan như ở bảng 3.2. Tương tự ở chương 2, luận án sử dụng sơ đồ mạng hình sao (hình 2.2) và hình xương cá (hình 2.3) để mô phỏng ứng dụng một chặng và nhiều chặng kết nối cho FCoAP.

Kịch bản 3.1: Kiểm tra hoạt động của hệ điều khiển mờ.

Kịch bản 3.2: Sử dụng 10 luồng FCoAP và 10 luồng CoAP để so sánh hiệu năng. Kết quả mô phỏng biểu thị ở bảng 3.4.

Bảng 3.4: So sánh hiệu năng của FCoAP và CoAP

Tham số hiệu năng	FCoAP	CoAP
<i>Tổng số gói gửi</i>	2558	389
<i>Số gói phát thành công</i>	2558 (100%)	389 (100%)
<i>Số gói phát lại</i>	1 (0,04%)	0 (0%)
<i>Số gói phát lại đúng</i>	1 (0,04%)	0 (0%)
<i>Số gói bị mất</i>	0 (0%)	0 (0%)
<i>Trễ trung bình</i>	392,43 ms	390,31 ms
<i>Thông lượng trung bình</i>	8,35 Kbps	1,27 Kbps

Kịch bản 3.3: So sánh hiệu năng FCoAP và CoAP khi có lưu lượng UDP thay đổi. So với kịch bản 3.2 có thêm một luồng UDP có tốc độ thay đổi: tốc độ 2 Kbps trong khoảng 0-160s, tăng dần theo từng bước 1 Kbps trong khoảng 160s-200s; từ thời điểm 200s, luồng UDP giảm nhanh với bước giảm 2 Kbps để nhanh chóng giải phóng các gói tin *inflight* ùn tắc trên mạng.

Bảng 3.5: Hiệu năng của FCoAP và COAP khi có lưu lượng UDP

Tham số hiệu năng	FCoAP	CoAP
<i>Tổng số gói gửi</i>	2106	3172
<i>Số gói phát thành công</i>	2020 (95,92%)	1840 (58,01%)
<i>Số gói phát lại</i>	669 (31,77%)	2954 (93,13%)
<i>Số gói phát lại đúng</i>	571 (27,11%)	922 (29,07%)
<i>Số gói bị mất</i>	86 (4,10%)	1332 (41,99%)
<i>Trễ trung bình (ms)</i>	4304,14	8639,60
<i>Thông lượng trung bình (Kbps)</i>	6,97	6,32

Kết quả biểu thị ở bảng 3.5 cho thấy hiệu năng của FCoAP tốt hơn so với CoAP.

Kịch bản 3.4: So sánh hiệu năng FCoAP và CoAP khi có lưu lượng CoAP hỗn hợp. Sử dụng một luồng CoAP không tin cậy, gọi tắt là BUNCON (Basic Unconfirmable) tương tranh bằng thông cổ chai với 10 luồng FCoAP và 10 luồng CoAP. Luồng BUNCON bắt đầu với tốc độ phát là 0,5 Kbps, sau đó tăng dần từng bước tới giá trị 25 Kbps. Tiếp đó, giảm dần từng bước xuống 0,5 Kbps. Luồng BUNCON tăng và giảm tốc độ được lặp lại 3 lần, và dừng phát ở 280s. Kịch bản tạo ra lưu lượng CoAP hỗn hợp có biến đổi động. Các kết quả cho thấy độ trễ và thông lượng trung bình của FCoAP tốt hơn CoAP khi có lưu lượng hỗn hợp.

Kịch bản 3.5: So sánh FCoAP và CoAP khi có lưu lượng TCP/UDP hỗn hợp. Sử dụng thêm lưu lượng TCP/UDP hỗn hợp để so sánh hiệu năng FCoAP và CoAP. Luồng TCP biến thiên tùy theo băng thông cổ chai và trạng thái mạng. Luồng UDP bắt đầu với tốc độ dữ liệu 20 Kbps, tăng thành 50 Kbps ở 80s, 150 Kbps ở 150s và giảm thành 5 Kbps ở thời điểm 200s. Kịch bản tạo tình trạng tắc nghẽn và biến động mạng. Kết quả thí nghiệm cho thấy, FCoAP tận dụng được băng thông khả dụng khi chia sẻ băng thông cổ chai với CoAP, TCP và UDP để tăng thông lượng, trong khi CoAP không thể thực hiện điều này. Lý do là FCoAP sử dụng hệ FCS giúp điều chỉnh cập nhật tốc độ phát kịp thời và sát với tình trạng biến động của mạng.

Kịch bản 3.6: So sánh FCoAP với CoAP, CoCoA, CoCoA+. Sử dụng thêm một luồng UDP có tốc độ phát thay đổi từ 2 Kbps đến 25 Kbps nhằm tạo biến động mạng.

Bảng 3.6: So sánh hiệu năng của FCoAP và các giao thức CoAP khác

Chỉ số hiệu năng	FCoAP	CoAP	CoCoA	CoCoA+
Tổng số gói gửi	381	299	300	300
Số gói phát thành công	381 (100%)	299 (100%)	300 (100%)	300 (100%)
Số gói phát lại	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)
Số gói phát lại đúp	0 (0,0%)	0 (0,0%)	12 (4,0%)	7 (2,33%)
Số gói bị mất	0 (0,0%)	0 (0,0%)	12 (4,0%)	7 (2,33%)
Trễ trung bình (ms)	380,33	385,18	387,94	388,33
Thông lượng trung bình (Kbps)	1,245	0,978	0,979	0,979

Kết quả mô phỏng ở bảng 3.6 cho thấy: FCoAP có độ trễ trung bình nhỏ hơn CoAP, CoCoA và CoCoA+. Thông lượng trung bình của FCoAP cao hơn so với CoAP, CoCoA và CoCoA+. FCoAP truyền thành công nhiều gói tin so với CoAP, CoCoA và CoCoA+ trong cùng một điều kiện truyền.

3.6. So sánh FCoAP với RCoAP

So với RCoAP, FCoAP có một số thay đổi cải tiến chính sau:

Thời gian khởi tạo của RCoAP là $2 \times RTT$, còn của FCoAP là $6 \times RTT$; Tiêu đề gói tin FCoAP có thêm 8 Bytes ở phần tùy chọn so với CoAP (ở RCoAP là 4 Bytes); Do có hệ điều khiển mờ FCS, FCoAP phát sinh thêm thời gian xử lý so với RCoAP. Cả FCoAP và RCoAP đều truyền chuỗi gói tin cậy. FCoAP và RCoAP đều phù hợp cho các ứng dụng truyền luồng dữ liệu lớn, yêu cầu thời gian thực. FCoAP có khả năng xác định băng thông cổ chai và phát hiện sớm tắc nghẽn, sớm điều chỉnh tốc độ phát để hạn chế tắc nghẽn. Chi phí thời gian xử lý của

FCoAP cao hơn CoAP. Mặt khác, do chu kỳ điều chỉnh tốc độ là một RTT và cần thời gian để tính toán hệ mờ nên FCoAP thích hợp hơn với các ứng dụng có RTT dài gồm nhiều chặng. RCoAP có thể phù hợp hơn cho các ứng dụng truyền chuỗi gói theo chặng ngắn có RTT nhỏ. Điều này được thể hiện qua hai kịch bản mô phỏng 3.7 và 3.8.

Kịch bản 3.7 sử dụng mạng hình sao để biểu diễn truyền chuỗi gói tin theo chặng ngắn (đơn chặng). Kịch bản 3.8 sử dụng mạng hình xương cá để biểu diễn truyền chuỗi gói tin có kết nối dài gồm nhiều chặng. Cả hai kịch bản đều sử dụng thêm một luồng UDP có tốc độ phát thay đổi từ 2 Kbps đến 25 Kbps nhằm tạo biến động mạng.

Bảng 3.7: So sánh FCoAP và RCoAP trong đơn chặng

Tham số hiệu năng	FCoAP	RCoAP
<i>Tổng số gói gửi</i>	351	354
<i>Số gói phát thành công</i>	351 (100%)	354 (100%)
<i>Số gói phát lại</i>	0 (0,0%)	0 (0,0%)
<i>Số gói phát lại đúng</i>	0 (0,0%)	0 (0,0%)
<i>Số gói bị mất</i>	0 (0,0%)	0 (0,0%)
<i>Trễ trung bình (ms)</i>	413,03	412,99
<i>Thông lượng trung bình (Kbps)</i>	1,148	1,157

Kết quả bảng 3.7: không có mất gói xảy ra, RCoAP có độ trễ nhỏ hơn FCoAP, thông lượng trung bình của RCoAP cao hơn FCoAP. RCoAP truyền thành công nhiều gói tin FCoAP. Kết quả cho thấy RCoAP phù hợp hơn so với FCoAP cho các ứng dụng truyền chuỗi gói tin theo chặng ngắn.

Kết quả bảng 3.8: FCoAP truyền thành công nhiều gói tin hơn RCoAP. Thông lượng trung bình của FCoAP cao hơn RCoAP. Kết quả chứng tỏ FCoAP phù hợp hơn RCoAP cho các ứng

dụng truyền chặng dài (đa chặng) như đã nhận xét ở phần trên.

Bảng 3.8: So sánh FCoAP và RCoAP trong chặng dài

Tham số hiệu năng	FCoAP	RCoAP
<i>Tổng số gói gửi</i>	2916	2754
<i>Số gói phát thành công</i>	2916 (100%)	2754 (100%)
<i>Số gói phát lại</i>	484 (16,60%)	442 (16,05%)
<i>Số gói phát lại đúp</i>	484 (16,60%)	442 (16,05%)
<i>Số gói bị mất</i>	0 (0,0%)	0 (0,0%)
<i>Trễ trung bình (ms)</i>	899,82	805,08
<i>Thông lượng trung bình (Kbps)</i>	9,521	8,987

3.7. Kết luận chương 3

Chương 3 trình bày về đề xuất giao thức FCoAP dựa vào hệ điều khiển mờ. FCoAP có khả năng phát hiện sớm tắc nghẽn, điều khiển tốc độ dựa vào tính toán băng thông cổ chai và biến thiên động của các tham số mạng. Các kết quả mô phỏng cho thấy, FCoAP đạt hiệu quả tốt hơn so với CoAP, CoCoA và CoCoA+ về các tham số hiệu năng. Nội dung đóng góp trong chương 3 đã được công bố trong [J5] và [J6].

KẾT LUẬN

Luận án đã nghiên cứu vấn đề điều khiển tắc nghẽn trong mạng IoT với giao thức CoAP, chỉ ra các điểm còn tồn tại của CoAP và các nghiên cứu liên quan, đưa ra những đóng góp mới sau:

- 1) Xây dựng một mô hình phân tích truyền tin theo chuỗi gói cho CoAP và xây dựng giao thức mới RCoAP dựa trên tốc độ để điều khiển tắc nghẽn trong mạng IoT với cơ chế điều khiển tăng giảm tốc độ phát phù hợp với tình trạng tắc nghẽn nhằm đạt được hiệu năng cao so với các cơ chế CoAP chuẩn hóa hiện có. Kết quả được công bố trong [J1-J4].

2) Xây dựng giao thức mới FCoAP điều khiển tắc nghẽn sử dụng hệ điều khiển mờ theo biến thiên động của tình trạng tắc nghẽn và các tham số mạng nhằm đạt được hiệu năng cao so với các cơ chế CoAP chuẩn hóa hiện có trong điều kiện mạng biến thiên động, kể cả khi có tắc nghẽn nghiêm trọng. Kết quả được công bố trong [J5, J6].

B. Hướng phát triển tiếp

Các hướng phát triển tiếp của luận án gồm:

- Nghiên cứu khả năng tối ưu các tham số điều khiển cho RCoAP và FCoAP.
- Nghiên cứu đánh giá độ phức tạp của RCoAP và FCoAP so với CoAP.
- Nghiên cứu đánh giá RCoAP và FCoAP trong môi trường mạng ứng dụng cụ thể.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC

- [J1] **Le Thi Thuy Duong**, Hoang Dang Hai, Pham Thieu Nga (2022), “A control mechanism for reliable burst data transfer in IoT networks”, *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, ISSN 2525-2224, CS.01, No. 2, 2022. pp. 38-49.
- [J2] Hoàng Đăng Hải, **Lê Thị Thùy Dương**, Phạm Thiều Nga (2019), “Giải pháp điều khiển chống tắc nghẽn trong mạng IoT”, *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, ISSN 2525-2224, No. 1, CS.01, 2019. pp. 7-18.
- [J3] **Le Thi Thuy Duong**, Hoang Dang Hai, Pham Thieu Nga (2023), “Avoiding congestion for CoAP burst traffic”, **EAI endorsed Transactions on Internet of Things**, Vol. 9, No. 1, p. e2, Mar. 2023.
- [J4] Hoang Dang Hai, **Le Thi Thuy Duong** (2021), “RCOAP: A Rate Control Scheme for Reliable Bursty Data Transfer in IoT Networks”, **IEEE Access, SCI/Q1**, Vol. 9 (2021), doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135435. pp. 169281-169298.
- [J5] **Lê Thị Thùy Dương**, Hoàng Đăng Hải, Phạm Thiều Nga (2023), “Điều khiển mờ hỗ trợ giao thức CoAP nhằm chống tắc nghẽn mạng Internet vạn vật”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học Công nghệ Quân sự, số 88, tháng 6/2023, trang 22-33.
- [J6] T. N. Pham, D. H. Hoang, **T. T. Duong Le** (2022), "Fuzzy Congestion Control and Avoidance for CoAP in IoT Networks," **IEEE Access, SCI/Q1**, Vol. 10 (2022), doi: 10.1109/ACCESS.2022.3211296. pp. 105589-105611.