

PERFORMANCE EVALUATION OF RPL ROUTING PROTOCOL WITH DIFFERENT OBJECTIVE FUNCTIONS

Vu Chien Thang^{1*}, Nguyen Thi Thanh Binh²

¹TNU - University of Information and Communication Technology

²Thai Nguyen University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 09/02/2022</p> <p>Revised: 25/4/2022</p> <p>Published: 26/4/2022</p>	<p>Nowadays, we stand before the digital revolution of the 21st century: smart objects are interconnected and connected to the Internet. It is predicted that the number of smart objects will reach billions of devices in the next 10 years. Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) proposed by the RoLL working group is a multi-hop routing protocol used for smart objects networks. In the RPL protocol, an objective function specifies parent selection and route construction based on routing metrics. In this paper, we evaluate the performance of the RPL routing protocol using two objective functions that are MRHOF and OF0. We use the Cooja tool to simulate and evaluate network performance. The evaluation results show that MRHOF performs better than OF0 in terms of average power consumption, successful data delivery ratio, and adaptive change in the network. In the poor quality of the transmission medium condition, MRHOF achieves significantly better performance than OF0.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>RPL routing protocol</p> <p>Performance Evaluation</p> <p>Smart Objects Networks</p> <p>MRHOF</p> <p>OF0</p>	

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HOẠT ĐỘNG CỦA GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN RPL VỚI CÁC HÀM MỤC TIÊU KHÁC NHAU

Vũ Chiến Thắng^{1*}, Nguyễn Thị Thanh Bình²

¹Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông - ĐH Thái Nguyên

²Đại học Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 09/02/2022</p> <p>Ngày hoàn thiện: 25/4/2022</p> <p>Ngày đăng: 26/4/2022</p>	<p>Ngày nay, chúng ta đang đứng trước cuộc cách mạng kỹ thuật số của thế kỷ 21 mà ở đó các đối tượng thông minh được kết nối với nhau và kết nối với mạng Internet. Theo dự đoán, số lượng các đối tượng thông minh sẽ lên tới hàng tỉ thiết bị trong 10 năm tới. Giao thức định tuyến RPL được đề xuất bởi nhóm công tác RoLL là một giao thức định tuyến đa chặng được sử dụng cho mạng các đối tượng thông minh. Trong giao thức RPL, hàm mục tiêu xác định việc lựa chọn nút cha và xây dựng tuyến đường dựa trên các thước đo định tuyến. Trong bài báo này, chúng tôi đánh giá hiệu năng hoạt động của giao thức định tuyến RPL khi sử dụng hàm mục tiêu MRHOF và OF0. Chúng tôi sử dụng công cụ Cooja để mô phỏng và đánh giá hiệu năng mạng. Các kết quả đánh giá đã cho thấy hàm mục tiêu MRHOF đạt được kết quả tốt hơn so với hàm mục tiêu OF0 khi xét về mức năng lượng tiêu thụ trung bình, tỷ lệ chuyển phát thành công bản tin dữ liệu và sự thay đổi thích ứng của mạng. Trong điều kiện chất lượng môi trường truyền sóng không tốt, hàm mục tiêu MRHOF cho hiệu quả tốt hơn rõ rệt so với hàm mục tiêu OF0.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Giao thức định tuyến RPL</p> <p>Đánh giá hiệu năng</p> <p>Mạng các đối tượng thông minh</p> <p>Hàm mục tiêu MRHOF</p> <p>Hàm mục tiêu OF0</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5518>

* Corresponding author. Email: vcthang@ictu.edu.vn

1. Giới thiệu

Hiện nay, chúng ta đang đứng trước một cuộc cách mạng kỹ thuật số của thế kỷ 21, đó là các đối tượng thông minh kết nối thế giới số với thế giới vật lý; từ đó hình thành nên một kiến trúc mạng Internet mới trong tương lai: Kiến trúc Internet of Things (IoT) [1]. Người ta đã dự đoán rằng số lượng các đối tượng thông minh sẽ tăng lên tới hàng tỉ thiết bị trong 10 năm tới và sẽ có những thay đổi cơ bản trong cách thức để con người tương tác với cả thế giới số và thế giới vật lý. Mạng các đối tượng thông minh có rất nhiều ứng dụng tiềm năng như tự động hóa tòa nhà [2], ngôi nhà thông minh [3], tự động hóa trong sản xuất công nghiệp [4], lưới điện thông minh [5], thành phố thông minh, hệ thống theo dõi sức khỏe [6].

Định tuyến là một phần quan trọng trong kết nối mạng. Suốt hai thập kỷ qua, nhiều giao thức định tuyến IP đã được đề xuất. Một số giao thức này ban đầu được thiết kế dành cho các bộ định tuyến với nguồn tài nguyên hạn chế, hỗ trợ các giao diện tốc độ thấp nhưng đặc điểm của các mạng này khác nhiều so với mạng các đối tượng thông minh.

Với các đặc trưng của mạng các đối tượng thông minh, rất nhiều thách thức mới được đặt ra cần phải giải quyết, một số vấn đề tiêu biểu hiện đang được các nhà nghiên cứu tập trung giải quyết bao gồm: Các thiết bị trong mạng có nguồn tài nguyên về năng lượng, bộ nhớ và CPU hạn chế; mạng các đối tượng thông minh thường là các mạng Ad hoc bởi vì vị trí của các nút mạng thường không được xác định trước; các nút mạng được kết nối với nhau bởi các liên kết không đáng tin cậy, đặc biệt là khi so sánh với các liên kết có dây như Ethernet hoặc liên kết cáp quang; các nút thường ở chế độ ngủ trong thời gian dài. Tùy thuộc vào thiết bị, nút mạng có thể ở các trạng thái chế độ ngủ khác nhau. Điều này ảnh hưởng đến mức tiêu thụ năng lượng trong mạng.

Để xây dựng kiến trúc IP cho mạng các đối tượng thông minh hoạt động theo chuẩn IEEE 802.15.4, tổ chức chuẩn hóa quốc tế IETF đã thành lập nhóm công tác RoLL. IETF giao cho nhóm RoLL giải quyết bài toán định tuyến qua kênh truyền tổn hao và công suất thấp nhằm chuẩn hóa giao thức định tuyến IPv6 cho các thiết bị hạn chế về tài nguyên. Nhóm này đã xác định giao thức định tuyến RPL (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy network) nhằm xây dựng một cấu trúc liên kết mạng bền vững qua các liên kết tổn hao [7].

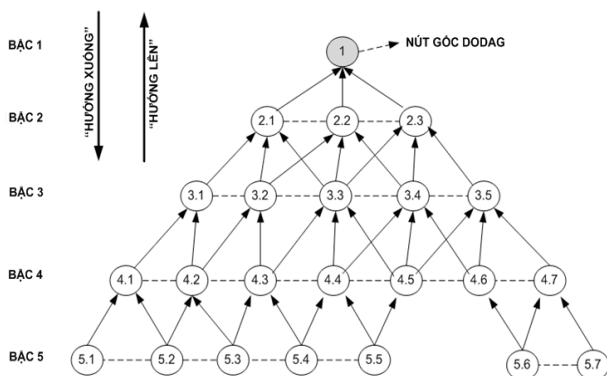
Trong bài báo này, chúng tôi tập trung nghiên cứu, phân tích hiệu quả hoạt động của giao thức RPL khi sử dụng các thước đo định tuyến và hàm mục tiêu khác nhau để xây dựng cấu trúc liên kết mạng [8]-[10]. Chúng tôi sử dụng công cụ mô phỏng Cooja [11] để mô phỏng và đánh giá. Cooja là một công cụ mô phỏng giả lập phần cứng và được sử dụng khá hiệu quả trong nghiên cứu về mạng các đối tượng thông minh.

Phần còn lại của bài báo được trình bày theo bố cục sau đây: Những phân tích về hoạt động của giao thức RPL sẽ được giới thiệu ở phần 2 của bài báo. Trong phần 3, chúng tôi sẽ thảo luận về các hàm mục tiêu được sử dụng cho giao thức RPL. Các kết quả mô phỏng, đánh giá được trình bày trong phần 4 của bài báo và cuối cùng là một số kết luận.

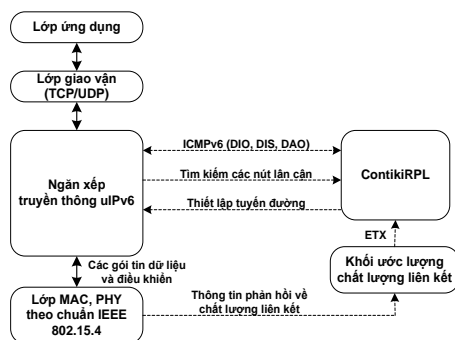
2. Giao thức định tuyến RPL

RPL là một giao thức định tuyến được thiết kế cho các thiết bị có tài nguyên hạn chế về khả năng xử lý, năng lượng và bộ nhớ. Liên kết giữa các nút mạng trong giao thức RPL là các liên kết tổn hao và tốc độ dữ liệu thấp. Tính tổn hao của các liên kết ảnh hưởng đến các quyết định trong việc thiết kế giao thức RPL. Trong những mạng này, lưu lượng bản tin dữ liệu thường bị giới hạn và lưu lượng bản tin điều khiển nên được giảm xuống ở mức thấp nhất có thể để tiết kiệm băng thông và năng lượng.

Giao thức RPL xây dựng cấu trúc mạng gồm một hoặc nhiều DODAG (Destination Oriented Direct Acyclic Graph). Các tuyến đường trong DODAG được tối ưu theo một hàm mục tiêu OF (Objective Function). Với những triển khai mạng khác nhau thì các mục tiêu cũng khác nhau và ngay cả trong một mạng cũng có thể hỗ trợ lưu lượng với các yêu cầu rất khác nhau về chất lượng tuyến đường.



Hình 1. Ví dụ về một DODAG



Hình 2. Kiến trúc giao thức mạng [12]

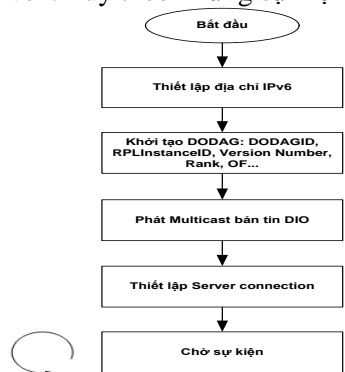
Ví dụ về một DODAG được minh họa ở Hình 1. Khác với các cấu trúc liên kết hình cây, các DODAG cung cấp những đường dẫn dư thừa và đây là một yêu cầu bắt buộc trong các mạng tồn hao. Do vậy, giao thức RPL có thể cung cấp nhiều hơn một tuyến đường từ một nút đến nút gốc DODAG và thậm chí đến cả những nút khác trong mạng.

Để xây dựng cấu trúc liên kết mạng, giao thức RPL sử dụng ba loại bản tin điều khiển ICMPv6 đó là bản tin DIO (DODAG Information Object), bản tin DAO (Destination Advertisement Object) và bản tin DIS (DODAG Information Solicitation). DIO là bản tin mang thông tin về DODAG. Một nút có thể yêu cầu thông tin về DODAG bằng cách gửi bản tin DIS để yêu cầu các nút khác phản hồi bằng các bản tin DIO. Các nút sẽ phải theo dõi các bản tin DIO trước khi chúng tham gia vào một DODAG. DAO là bản tin nhằm quảng bá khả năng tham gia vào quá trình định tuyến theo chiều hướng xuống trong DODAG. Khi một nút đã tham gia vào một DODAG thì nó sẽ có một tuyến đường hướng về một nút gốc để hỗ trợ lưu lượng MP2P (Multi-Point to Point) từ các nút thành viên về nút gốc.

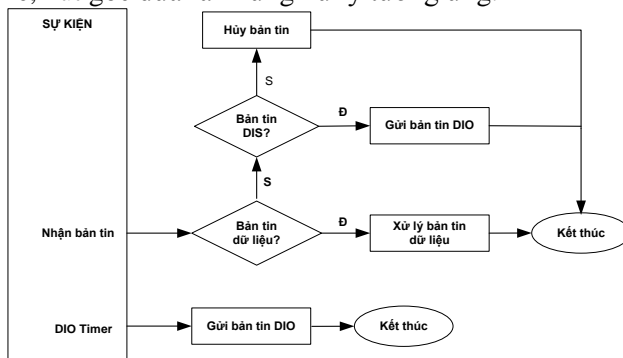
Giao thức định tuyến RPL đã được thực thi trên hệ điều hành Contiki [13]. Hình 2 minh họa kiến trúc giao thức mạng được thực thi trên hệ điều hành Contiki. Ngăn xếp truyền thông uIPv6 gọi đến module ContikiRPL khi nhận được bản tin ICMPv6 (DIO, DIS, DAO) hoặc khi cần tìm kiếm các nút lân cận. Module ContikiRPL gọi đến ngăn xếp truyền thông uIPv6 để thiết lập tuyến đường trong các bảng định tuyến.

Hình 3 và Hình 4 minh họa lưu đồ thuật toán ở pha khởi tạo và xử lý các sự kiện của nút gốc khi thực thi giao thức RPL trong hệ điều hành Contiki.

Khi khởi tạo mạng, những nút được lựa chọn làm nút gốc thực hiện quá trình thiết lập địa chỉ IPv6, công kết nối và những thông số định tuyến của DODAG như DODAGID, RPLInstanceID, Object Function,... Những thông tin của DODAG được nút gốc đưa vào bản tin DIO và gửi tới những nút khác trong mạng. Sau quá trình khởi tạo, nút gốc hoạt động theo cơ chế Event – driven. Tùy theo những sự kiện đến cụ thể, nút gốc đưa ra những xử lý tương ứng.

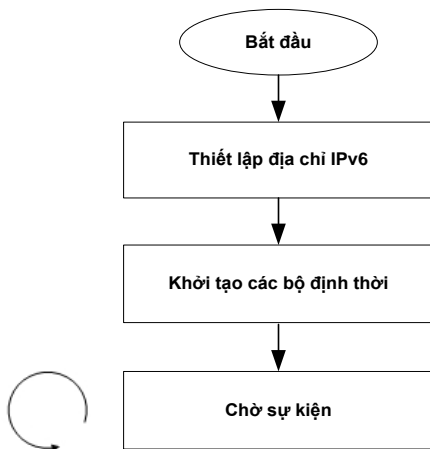


Hình 3. Pha khởi tạo của nút gốc

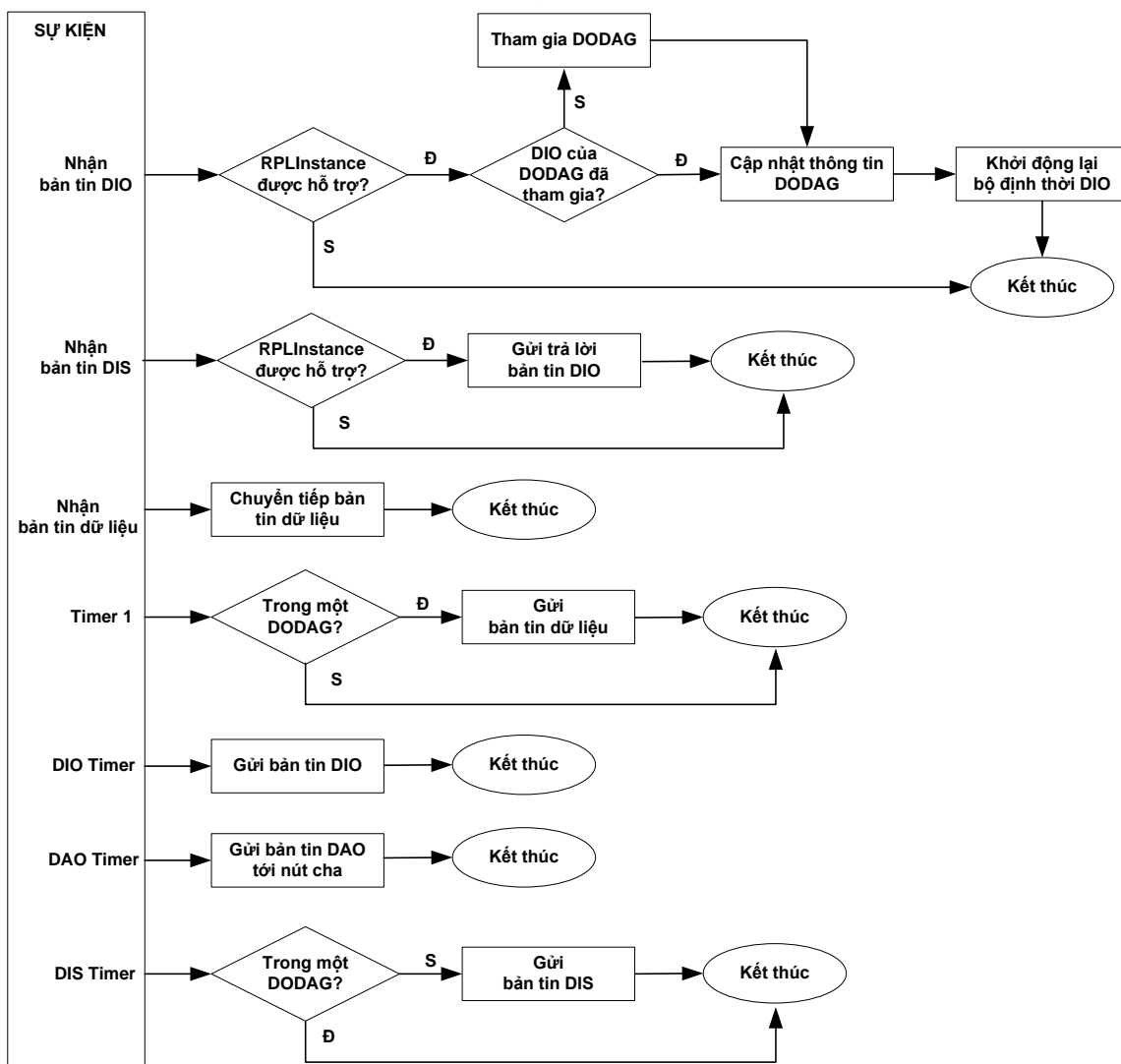


Hình 4. Cơ chế điều khiển sự kiện của nút gốc

Các Hình 5, 6 là lưu đồ thuật toán ở pha khởi tạo và xử lý các sự kiện của các nút thành viên trong ContikiRPL.



Hình 5. Pha khởi tạo của các nút thành viên



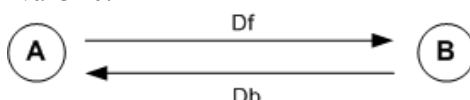
Hình 6. Cơ chế điều khiển sự kiện của nút thành viên

Trong pha khởi tạo, các nút thành viên thực hiện quá trình thiết lập địa chỉ IPv6 và khởi động các bộ định thời để gửi các bản tin DIS tới các nút lân cận trong mạng khi nút chưa tham gia vào bất kỳ DODAG nào.

Sau pha khởi tạo, mỗi nút sẽ thiết lập được những thông tin ban đầu và bắt đầu nhận, xử lý những bản tin ICMPv6 trong mạng. Sau khi tham gia vào những DODAG được hỗ trợ, nút thành viên hoạt động theo cơ chế Event – driven được minh họa ở Hình 6.

3. Hàm mục tiêu

Trong bài báo này, chúng tôi phân tích hiệu quả hoạt động của giao thức RPL dựa trên hai hàm mục tiêu, đó là MRHOF và OF0.



Hình 7. ETX của một liên kết

Hàm mục tiêu MRHOF sử dụng thước đo định tuyến ETX [14] để tính toán Rank khi xây dựng DODAG. Thước đo định tuyến ETX đặc trưng cho số lần truyền dẫn gói tin trung bình cần thiết để truyền thành công một gói tin. Thước đo định tuyến ETX của một liên kết ở Hình 7 có thể được tính toán theo công thức sau:

$$ETX = \frac{1}{D_f \cdot D_b} \quad (1)$$

Trong đó: D_f là tỷ lệ chuyển phát thành công bản tin theo chiều từ nút A đến nút B; D_b là tỷ lệ chuyển phát thành công bản tin theo chiều ngược lại từ nút B đến nút A.

Tuyến đường có ETX nhỏ nhất là tuyến đường có độ tin cậy cao nhất và hiệu quả về năng lượng nhất. Mỗi nút sẽ tính toán giá trị ETX đến các nút cha ứng viên và lựa chọn nút cha sao cho tuyến đường đi qua nút cha đó đến nút gốc có giá trị ETX là nhỏ nhất.

Một nút N bất kỳ ở trong mạng có thể tính toán Rank của nó thông qua Rank của các nút cha ứng viên theo công thức sau:

$$R(N) = R(P) + ETX \quad (2)$$

Trong đó, $R(P)$ là Rank của các nút cha ứng viên và ETX là chất lượng liên kết giữa nút N và nút cha ứng viên. Sau khi nút N tính toán được giá trị $R(N)$, nút N sẽ lựa chọn một nút cha trong danh sách các nút cha ứng viên sao cho $R(N)$ là nhỏ nhất.

Hàm mục tiêu OF0 sử dụng thước đo định tuyến số bước nhảy (HC) để tính toán Rank. Thước đo định tuyến HC xác định số các nút trung gian mà gói tin cần phải đi qua trên tuyến đường từ nút nguồn đến nút đích. Tuyến đường tối ưu được lựa chọn là tuyến đường có số bước nhảy đến nút gốc là nhỏ nhất. Khi sử dụng hàm mục tiêu OF0, mỗi nút sẽ tính toán Rank của nó dựa trên Rank của các nút cha ứng viên theo công thức sau:

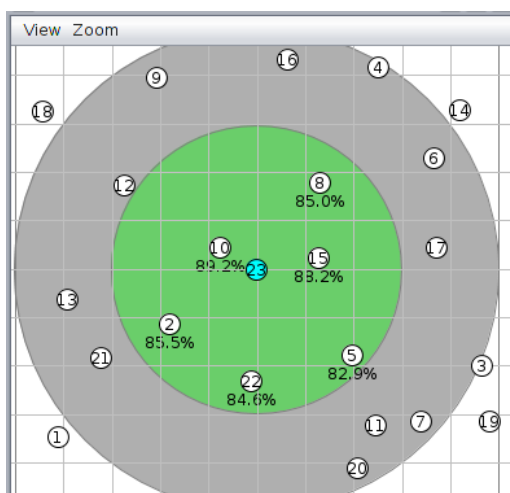
$$R(N) = R(P) + \text{DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE} \quad (3)$$

Trong đó, $\text{DEFAULT_MIN_HOP_RANK_INCREASE}$ là một hằng số được quy định bằng 256 trong tài liệu RFC 6550 [15]. Nút N sẽ lựa chọn nút cha sao cho giá trị $R(N)$ là nhỏ nhất.

4. Mô phỏng và đánh giá

4.1. Kịch bản mô phỏng

Chúng tôi thực hiện mô phỏng với công cụ mô phỏng Cooja. Mạng được chia thành nhiều cụm nhỏ khác nhau. Do các cụm là giống nhau nên chúng tôi chỉ mô phỏng một cụm bao gồm 23 nút mạng. Các nút mạng được phân bố ngẫu nhiên trong khu vực 100m x 100m. Mỗi cụm bao gồm một nút gốc nằm ở trung tâm cụm (nút số 23) và 22 nút khác là những nút thành viên có nhiệm vụ thu thập và gửi dữ liệu về cho nút gốc như Hình 8.



Hình 8. Mô hình một cụm gồm 23 nút mạng

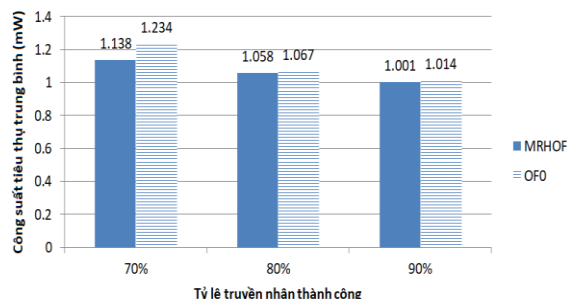
Các tham số được sử dụng trong suốt thời gian đánh giá mô phỏng được tóm tắt ở Bảng 1. Mô hình truyền thông vô tuyến được sử dụng trong mô phỏng là mô hình truyền thông UDI [16], trong đó phạm vi truyền thông hiệu quả là 30m và phạm vi ảnh hưởng của nhiễu là 50m. Giao thức tiết kiệm năng lượng ở lớp MAC được sử dụng trong kịch bản mô phỏng là giao thức ContikiMAC [17].

Bảng 1. Kịch bản mô phỏng

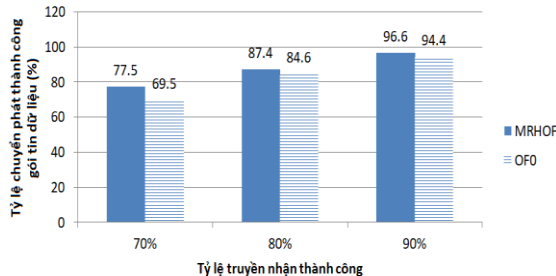
Các tham số	Giá trị
Mô hình truyền thông vô tuyến	UDI (Unit Disk Graph with Distance Interference)
Số nút mạng	23
Kích thước mạng (m x m)	100 x 100
Phạm vi phủ sóng của nút (m)	Phạm vi truyền hiệu quả: 30 Phạm vi ảnh hưởng của nhiễu: 50
Tỷ lệ truyền nhận thành công (%)	70, 80, 90
Chu kỳ gửi gói tin dữ liệu	60s
Nguồn gửi gói tin dữ liệu	Tất cả các nút trong mạng
Giao thức lớp MAC	CSMA/ContikiMAC

4.2. Kết quả mô phỏng

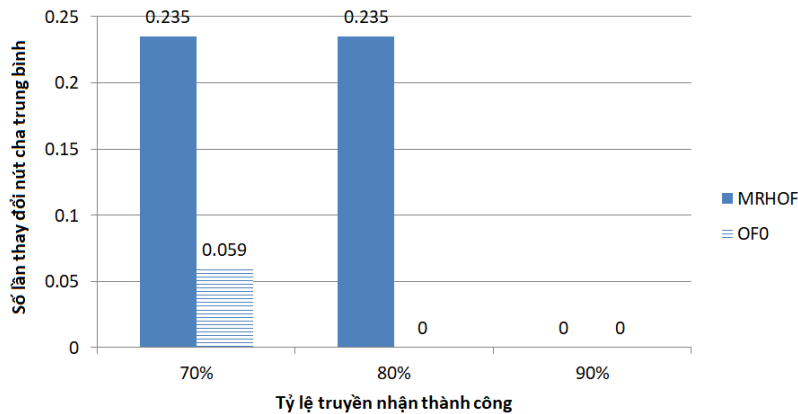
Hình 9, 10, 11 lần lượt là kết quả mô phỏng đánh giá so sánh công suất tiêu thụ trung bình trong mạng, tỷ lệ chuyển phát thành công gói tin dữ liệu và số lần thay đổi nút cha trung bình trong mạng đối với giao thức RPL khi sử dụng hai hàm mục tiêu MRHOF và OF0.



Hình 9. So sánh công suất tiêu thụ trung bình trong mạng



Hình 10. So sánh tỷ lệ chuyển phát thành công gói tin dữ liệu



Hình 11. So sánh số lần thay đổi nút cha trung bình trong mạng

Kết quả mô phỏng ở Hình 9 cho thấy, công suất tiêu thụ trung bình trong mạng khi giao thức RPL sử dụng hàm mục tiêu MRHOF thấp hơn so với trường hợp sử dụng hàm mục tiêu OF0. Với hàm mục tiêu MRHOF, thước đo định tuyến được sử dụng là ETX. Tuyến đường tối ưu được lựa chọn khi sử dụng hàm mục tiêu MRHOF là tuyến đường có ETX nhỏ nhất và cũng là tuyến đường có chất lượng liên kết tốt nhất, có số lần truyền ít nhất. Trong mạng các đối tượng thông minh, quá trình truyền nhận các gói tin dữ liệu là tiêu tốn năng lượng. Do đó, tuyến đường có số lần truyền ít nhất cũng chính là tuyến đường tiết kiệm năng lượng nhất. Như vậy, hàm mục tiêu MRHOF rất phù hợp với mạng các đối tượng thông minh hoạt động bằng pin. Trong các mạng hoạt động bằng pin thì vấn đề tiết kiệm năng lượng là một yêu cầu quan trọng.

Kết quả mô phỏng ở Hình 10 cho thấy tỷ lệ chuyển phát thành công gói tin dữ liệu trong mạng khi giao thức RPL sử dụng hàm mục tiêu MRHOF cho kết quả tốt hơn so với trường hợp sử dụng hàm mục tiêu OF0. Hàm mục tiêu MRHOF sử dụng thước đo định tuyến ETX cho phép lựa chọn tuyến đường có chất lượng liên kết tốt nhất nên tỷ lệ chuyển phát thành công gói tin dữ liệu cao hơn so với trường hợp hàm mục tiêu OF0 sử dụng thước đo định tuyến số bước nhảy. Điều này càng thể hiện rõ khi chất lượng môi trường truyền sóng trong mạng không tốt.

Để đánh giá về độ ổn định của mạng, chúng tôi dựa vào số lần thay đổi nút cha trung bình trong mạng. Hình 11 cho thấy khi sử dụng hàm mục tiêu MRHOF thì cấu trúc liên kết mạng có sự điều chỉnh thích ứng với chất lượng môi trường truyền sóng tốt hơn so với trường hợp sử dụng hàm mục tiêu OF0. Trong điều kiện môi trường truyền sóng có chất lượng không tốt (tỷ lệ truyền nhận thành công chỉ bằng 70% hoặc 80%) thì cấu trúc liên kết mạng khi sử dụng hàm mục tiêu MRHOF đã có sự điều chỉnh nhiều hơn. Tuy nhiên, khi môi trường truyền sóng có chất lượng tốt (tỷ lệ truyền nhận thành công bằng 90%) thì cấu trúc liên kết mạng rất ổn định khi sử dụng cả hai hàm mục tiêu MRHOF và OF0.

5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã trình bày một số kết quả đánh giá hiệu năng của giao thức RPL khi sử dụng hai hàm mục tiêu MRHOF và OF0. Các kết quả mô phỏng cho thấy giao thức RPL khi sử dụng hàm mục tiêu MRHOF đạt được hiệu quả tốt hơn so với trường hợp sử dụng hàm mục tiêu OF0. Trong điều kiện chất lượng môi trường truyền sóng không tốt, hàm mục tiêu MRHOF cho hiệu quả tốt hơn rõ rệt so với hàm mục tiêu OF0. Các kết quả mô phỏng này rất có ý nghĩa trước khi chúng tôi tiến hành triển khai những thực nghiệm đối với giao thức RPL.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. -P. Vasseur and A. Dunkels, *Interconnecting Smart Object with IP: The Next Internet*, Morgan Kaufmann Publishers, 2010.
- [2] J. Haase, G. Zucker, and M. Alahmad, "Energy Efficient Building Automation: A survey paper on approaches and technologies for optimized building operation," in *Proceedings of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2014, pp. 5350-5356.
- [3] K. Agarwal, A. Agarwal, and G. Misra, "Review and Performance Analysis on Wireless Smart Home and Home Automation using IoT," in *Proceedings of the Third International conference on I-SMAC*, Dec. 2019, pp. 629-633.
- [4] K. Begum and S. Dixit, "Industrial WSN using IoT: A survey," in *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT 2016)*, March 2016, pp. 499-504.
- [5] S. Sidid and S. Gaur, "Smart Grid Building Automation based on Internet of Things," in *Proceedings of the 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, April 2017, pp. 1-4.
- [6] S. Gera, M. Mridul, and S. Sharma, "IoT based Automated Health Care Monitoring System for Smart City," in *Proceedings of the 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, April 2021, pp. 364-368.
- [7] T. Tsvetkov, *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks*, Seminar SN SS2011 : Network Architectures and Services, July 2011.
- [8] J. Vasseur, M. Kim, K. Pister, N. Dejean, and D. Barthel, *Routing Metrics used for Path Calculation in Low Power and Lossy Networks*, IETF RFC 6551, March, 2012.
- [9] O. Gnawali and P. Levis, *The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function*, RFC 6719, Sep. 2012.
- [10] P. Thubert, Ed., *Objective Function Zero for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*, RFC6552, March 2012.
- [11] F. Österlind, A. Dunkels, J. Eriksson, N. Finne, and T. Voigt, "Cross-level Sensor Network Simulation with Cooja," in *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Practical Issues in Building Sensor Network Applications*, Tampa, Florida, USA, 2006, pp. 641-648.
- [12] C. T. Vu and N. T. Le, "Performance Evaluation of IPv6 Routing Protocol for Wireless Sensor Network," *Journal of Military Science and Technology*, vol. 38, pp. 51-58, 2015.
- [13] N. Tsiftes, J. Eriksson, and A. Dunkels, "Low-Power Wireless IPv6 Routing with ContikiRPL," in *Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ACM/IEEE IPSN)*, Stockholm, Sweden, 2010, pp. 406-407.
- [14] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing," in *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, 2003, pp. 134-146.
- [15] T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, T. Clausen, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, and J. Vasseur, *RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*, IETF RFC 6550, March, 2012.
- [16] A. Boukerche, *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*, John Wiley & Sons Inc., ISBN: 9780470396360, 2008.
- [17] A. Dunkels, *The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol*, SICS technical report, December 2011.