

## IRPL: Giao thức định tuyến IPv6 có sự nhận thức về năng lượng cho mạng cảm biến không dây

### IRPL: An energy aware IPv6 routing protocol for wireless sensor networks

Vũ Chiến Thắng<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Tảo<sup>1</sup>, Lê Nhật Thăng<sup>2</sup>

Phùng Trung Nghĩa<sup>1</sup>, Vũ Mạnh Thủy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông Thái Nguyên

<sup>2</sup>Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

<sup>3</sup>Trường Cao đẳng Kinh tế - Kỹ thuật Thái Nguyên

e-Mail: vcthang@ictu.edu.vn; nvtao@ictu.edu.vn; thangln@ptit.edu.vn

ptnghia@ictu.edu.vn; vumanhthuy@gmail.com

#### Tóm tắt

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất giao thức định tuyến IRPL cải tiến. Giao thức IRPL sử dụng kết hợp hai thước đo định tuyến là chất lượng liên kết và trạng thái năng lượng còn lại của nút chuyển tiếp để lựa chọn tuyến đường tối ưu. Trong giao thức IRPL, những nút có chỉ số năng lượng còn lại dưới một ngưỡng cho trước sẽ không tham gia vào quá trình chuyển tiếp bản tin dữ liệu. Chúng tôi thay đổi ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại này để đánh giá những ảnh hưởng của việc lựa chọn ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại đến hiệu năng của toàn mạng. Kết quả đánh giá mô phỏng cho thấy, giao thức IRPL với ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại bằng 25% cho phép tăng thời gian sống của mạng lên đến 38% so với giao thức RPL ban đầu.

**Từ khóa:** Giao thức định tuyến RPL cải tiến, mạng cảm biến không dây, hệ điều hành Contiki, đánh giá hiệu năng mạng.

**Abstract:** In this paper, we propose IRPL protocol. IRPL protocol uses a combination of two routing metrics that are link quality and remaining energy state of preferred parent to select the optimal route. In IRPL, nodes with remaining energy index below a given threshold will not forward the data packet. We change this threshold to evaluate the impact of threshold to network performance. The results of simulation show that IRPL protocol with threshold is equal to 25 percentage enables increasing the lifetime of network up to 38 percentage compared with original RPL protocol.

**Keywords:** Improved IPv6 routing protocol, wireless sensor networks, contiki operating system, network performance evaluation.

#### 1. Giới thiệu

Hiện nay, IoT (Internet of Things) đang là một chủ đề nóng thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới. Nhiều chuẩn giao thức khác nhau đã được đề xuất cho mô hình mạng IoT. Một trong những chuẩn đó chính là việc sử dụng giao thức

IPv6 trên môi trường liên kết vô tuyến theo chuẩn IEEE 802.15.4.

Đề chuẩn hóa về mặt giao thức, tổ chức chuẩn hóa quốc tế IETF đã hình thành hai nhóm công tác đó là nhóm 6LoWPAN và nhóm RoLL. Nhóm 6LoWPAN thực hiện chuẩn hóa lớp thích ứng cần thiết với giao thức IPv6 trên các mạng sử dụng lớp vật lý IEEE 802.15.4. Nhóm RoLL thực hiện nhiệm vụ chuẩn hóa giao thức định tuyến IPv6 cho các thiết bị có tài nguyên hạn chế trên môi trường liên kết vô tuyến có tổn hao và công suất thấp. Nhóm RoLL đã đề xuất giao thức định tuyến RPL (IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) nhằm xây dựng một cấu trúc liên kết mạng bền vững qua các liên kết tổn hao công suất thấp với các yêu cầu trạng thái liên kết tối thiểu.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất và thiết kế một giao thức định tuyến IRPL (Improved RPL) cải tiến. Giao thức IRPL sử dụng kết hợp hai thước đo định tuyến là chất lượng liên kết ETX (Expected Transmission) và trạng thái năng lượng còn lại của nút chuyển tiếp để lựa chọn tuyến đường tối ưu. Mỗi nút mạng sẽ ước lượng được chỉ số năng lượng còn lại (EI – Energy Indicator). Chỉ số năng lượng còn lại này được so sánh với một ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại cho trước. Khi chỉ số năng lượng còn lại của một nút mạng dưới một ngưỡng cho trước tương ứng với trạng thái gần hết năng lượng, nút mạng đó sẽ không tham gia vào quá trình chuyển tiếp bản tin dữ liệu. Các nút mạng sử dụng bản tin DIO để gửi thông tin về trạng thái năng lượng còn lại đến các nút lân cận. Do vậy, các nút lân cận có thể nhận thức được những nút gần hết năng lượng và không lựa chọn những nút đó để chuyển tiếp bản tin dữ liệu. Chúng tôi thay đổi ngưỡng cho trước để đánh giá những ảnh hưởng của việc lựa chọn ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại đến hiệu năng của toàn mạng.

Phần còn lại của bài báo được bố cục như sau: Đầu tiên, chúng tôi giới thiệu về một số nghiên cứu có liên quan; Tiếp theo, chúng tôi đề xuất giải pháp thiết kế giao thức IRPL; Một số kết quả đánh giá hiệu năng của giao thức định tuyến IRPL được trình bày trong

mục 4 của bài báo; Cuối cùng, chúng tôi đưa ra một số kết luận cho bài báo.

## 2. Các nghiên cứu có liên quan

Năm 2008, tổ chức IETF đã hình thành nhóm công tác RoLL nhằm đưa ra những quy định cụ thể về các giải pháp định tuyến cho các mạng tổn hao công suất thấp. Nhóm RoLL đã xác định phạm vi giới hạn công việc tập trung vào bốn ứng dụng: Các mạng đô thị [1], tự động hóa tòa nhà [2], tự động hóa công nghiệp [3] và ngôi nhà tự động [4]. Dựa vào yêu cầu định tuyến được quy định trong các tài liệu ứng dụng, giao thức định tuyến RPL đã được thiết kế để có tính môđun hóa rất cao. Trong đó, phần cốt lõi của giao thức sẽ thực hiện những phần giống nhau giữa các yêu cầu định tuyến của từng ứng dụng cụ thể và các môđun bổ sung sẽ được thêm vào khi cần thiết phải giải quyết các yêu cầu riêng.

Giao thức định tuyến RPL đã được thực thi trên nhiều hệ điều hành khác nhau như Contiki [5], TinyOS [6]... Trong bài báo [5], các tác giả đã giới thiệu những kết quả đánh giá mô phỏng và thực nghiệm với giao thức RPL trên hệ điều hành Contiki. Giao thức RPL hiện tại chỉ sử dụng thước đo định tuyến chất lượng liên kết (ETX – Expected Transmission) với hàm mục tiêu MRHOF (Minimum Rank Objective Function with Hysteresis) để xây dựng cấu trúc liên kết mạng. Kết quả đánh giá thực nghiệm cho thấy các nút cảm biến Tmote Sky có thời gian sống kéo dài đến vài năm khi hoạt động với giao thức định tuyến RPL.

Trong bài báo [7], chúng tôi đã đưa ra một số kết quả đánh giá mô phỏng và thực nghiệm với giao thức RPL cho mạng cảm biến không dây. Các kết quả đánh giá cho thấy một nhược điểm của giao thức RPL hiện tại đó là sự mất cân bằng năng lượng giữa các nút mạng. Các nút mạng thuộc những tuyến đường có chất lượng liên kết tốt được sử dụng nhiều trong quá trình chuyển tiếp bản tin dữ liệu đến nút gốc. Các nút này sẽ hết năng lượng nhanh hơn và tạo thành các lỗ hổng trong mạng, làm giảm thời gian sống của mạng.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất giải pháp thiết kế giao thức định tuyến IRPL cải tiến có sự nhận thức về năng lượng nhằm khắc phục điểm yếu này của giao thức RPL hiện tại.

## 3. Thiết kế giao thức IRPL

### 3.1 Mục tiêu thiết kế và những thách thức

Mục tiêu chính khi thiết kế giao thức IRPL là nhằm đảm bảo sự cân bằng năng lượng giữa các nút mạng thuộc những tuyến đường có chất lượng liên kết tốt và nâng cao thời gian sống của các nút mạng. Một số thách thức đặt ra khi thiết kế giao thức IRPL đó là:

Thứ nhất, cần phải xác định được chỉ số năng lượng còn lại trên mỗi nút mạng. Cách xác định chỉ số năng lượng còn lại trên mỗi nút mạng cần thực hiện được trên nhiều kiến trúc phần cứng khác nhau và không làm phát sinh thêm bất kỳ một chi phí nào về phần cứng. Chỉ số năng lượng còn lại này được so sánh với một ngưỡng cho trước để xác định trạng thái năng lượng của một nút mạng.

Thứ hai, cần phải đề xuất một thuật toán lựa chọn tuyến đường mới dựa trên hai thước đo định tuyến là chất lượng liên kết ETX và trạng thái năng lượng của nút chuyển tiếp. Tuyến đường chuyển tiếp bản tin dữ liệu được lựa chọn phải đảm bảo có chất lượng liên kết tốt đồng thời tránh được những nút mạng gần hết năng lượng.

### 3.2 Giải pháp thiết kế

Năng lượng còn lại trên mỗi nút cảm biến được xác định theo công thức:

$$E_{residual} = E_0 - E_{consumption} \quad (1)$$

Trong đó:  $E_{residual}$ ,  $E_0$ ,  $E_{consumption}$  lần lượt là năng lượng còn lại, năng lượng ban đầu và năng lượng tiêu thụ trên nút cảm biến.

Năng lượng tiêu thụ trên nút cảm biến được tính toán như sau [8]:

$$E_{consumption} = U(I_a t_a + I_t t_l + I_t t_t + I_r t_r + \sum_i I_{ci} t_{ci}) \quad (2)$$

Trong đó:  $U$  là điện áp nguồn cung cấp;  $I_a$ ,  $t_a$  là dòng tiêu thụ và thời gian mà bộ vi xử lý hoạt động ở chế độ tích cực (active mode);  $I_b$ ,  $t_b$  là dòng tiêu thụ và thời gian mà bộ vi xử lý hoạt động ở chế độ công suất thấp (low power mode);  $I_t$ ,  $t_t$  là dòng tiêu thụ và thời gian bộ thu phát vô tuyến ở chế độ truyền (transmit);  $I_r$ ,  $t_r$  là dòng tiêu thụ và thời gian bộ thu phát vô tuyến ở chế độ nhận (receive);  $I_{ci}$ ,  $t_{ci}$  là dòng tiêu thụ và thời gian hoạt động của các bộ phận khác như cảm biến, LED...

Trong bài báo này, chúng tôi đánh giá giao thức IRPL sử dụng phần cứng TUmote [9]. Bảng 1 trình bày mô hình năng lượng cho TUmote. Các số liệu về dòng tiêu thụ được lấy từ tài liệu kỹ thuật của các nhà sản xuất linh kiện.

**Bảng 1. Mô hình năng lượng của TUmote**

Thành phần	Trạng thái	Dòng tiêu thụ
MSP430	Tích cực	1,95 mA
F1611[10]	Công suất thấp	0,0026 mA
CC2420 [10]	Truyền (0dBm)	17,4 mA
	Nhận	19,7 mA
SHT11[11]	Tích cực	0,55 mA

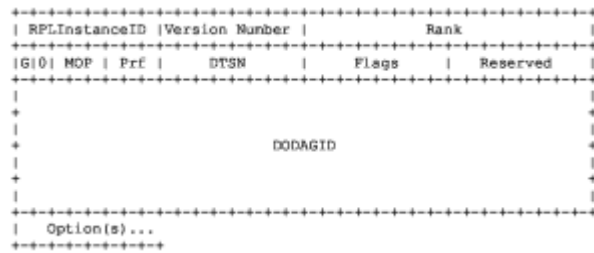
Trong mô hình năng lượng của TUmote, chúng tôi chỉ quan tâm đến các thành phần tiêu thụ năng lượng chính và bỏ qua các thành phần tiêu thụ năng lượng nhỏ khác.

Chỉ số năng lượng còn lại EI (Energy Indicator) trên mỗi nút cảm biến có thể được xác định theo công thức sau:

$$EI(\%) = \frac{E_{residual}}{E_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

Chỉ số năng lượng còn lại này được so sánh với một ngưỡng cho trước. Nếu chỉ số năng lượng còn lại thấp hơn ngưỡng cho trước tương ứng với trạng thái gần hết năng lượng thì nút cảm biến sẽ không tham gia vào quá trình chuyển tiếp bản tin dữ liệu trong mạng. Trạng thái năng lượng của nút cảm biến được mã hóa bằng 1 bit và được mang đi bởi trường cờ (Flags)

trong bản tin điều khiển DIO. Hình 1 mô tả cấu trúc bản tin điều khiển DIO [12].

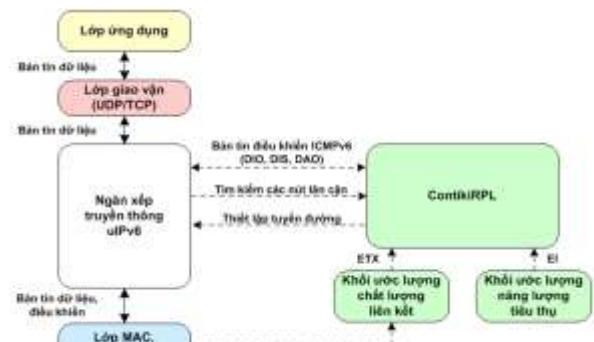


H.1 Cấu trúc bản tin điều khiển DIO

### 3.3 Thực thi thiết kế

Chúng tôi thực thi giao thức IRPL trên hệ điều hành Contiki. Contiki là một trong những hệ điều hành cho mạng cảm biến không dây phổ biến hiện nay [13]. Giao thức IRPL được xây dựng trên ngăn xếp truyền thông uIPv6 trong hệ điều hành Contiki. Hình 2 minh họa các thành phần chính của giao thức IRPL.

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. Chúng tôi mở rộng cấu trúc bảng định tuyến trong ContikiRPL để lưu thông tin về trạng thái năng lượng còn lại của các nút lân cận. Module ContikiRPL sử dụng thước đo định tuyến chất lượng liên kết ETX và trạng thái năng lượng còn lại của các nút lân cận để thiết lập tuyến đường trong mạng. Thông tin phản hồi về chất lượng liên kết được thực hiện bởi khối ước lượng chất lượng liên kết. Khối ước lượng năng lượng tiêu thụ có nhiệm vụ xác định chỉ số năng lượng còn lại của nút cảm biến. Chỉ số năng lượng còn lại được so sánh với một ngưỡng cho trước để xác định trạng thái năng lượng còn lại của nút cảm biến. Thông tin về chất lượng liên kết và trạng thái năng lượng còn lại này được gửi tới các nút lân cận thông qua bản tin DIO.



H.2 Thực thi giao thức IRPL trên Contiki

## 4. Đánh giá giao thức định tuyến IRPL

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một số kết quả đánh giá mô phỏng với giao thức IRPL. Chúng tôi so sánh hiệu năng giữa giao thức IRPL với giao thức RPL.

### 4.1 Các tham số đánh giá

Chúng tôi đánh giá và so sánh hiệu năng giữa giao thức IRPL và giao thức RPL thông qua một số thước đo đánh giá sau.

#### 4.1.1 Tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu

Tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu DDR (Data Delivery Ratio) được xác định bằng tỷ số giữa số bản tin dữ liệu nhận được tại nút gốc và tổng số bản tin dữ liệu được gửi đi bởi tất cả các nút trong mạng.

$$DDR(\%) = \frac{N_{received}}{N_{data}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Trong đó:  $N_{received}$  là tổng số bản tin dữ liệu nhận được tại nút gốc;  $N_{data}$  là tổng số bản tin dữ liệu được gửi đi bởi tất cả các nút trong mạng. Tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu DDR càng cao thì hiệu quả truyền thông trong mạng càng tốt.

#### 4.1.2 Sự cân bằng năng lượng giữa các nút mạng

Để đánh giá sự cân bằng năng lượng giữa các nút mạng, chúng tôi dựa vào chỉ số năng lượng còn lại EI trên các nút mạng. Thước đo đánh giá sự cân bằng năng lượng EIB (Energy Indicator Balance) giữa các nút trong mạng được xác định theo công thức sau:

$$EIB = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\overline{EI} - EI_i)^2} \quad (5)$$

Trong đó:  $\overline{EI}$  là chỉ số năng lượng còn lại trung bình trên các nút mạng.

#### 4.1.3 Thời gian sống của mạng

Thời gian sống của mạng có thể được định nghĩa là khoảng thời gian bắt đầu một truyền dẫn đầu tiên ở trong mạng và kết thúc khi tỷ lệ phần trăm các nút hết năng lượng dưới một ngưỡng cho trước. Giá trị ngưỡng được thiết lập tùy thuộc vào từng ứng dụng. Định nghĩa này có liên quan đến thời gian sống của một nút mạng và không xét đến vai trò cụ thể của các nút mạng bị hết năng lượng. Nếu tỷ lệ phần trăm được thiết lập là 100% thì thời điểm nút đầu tiên trong mạng hết năng lượng cũng là thời điểm kết thúc thời gian sống của mạng.

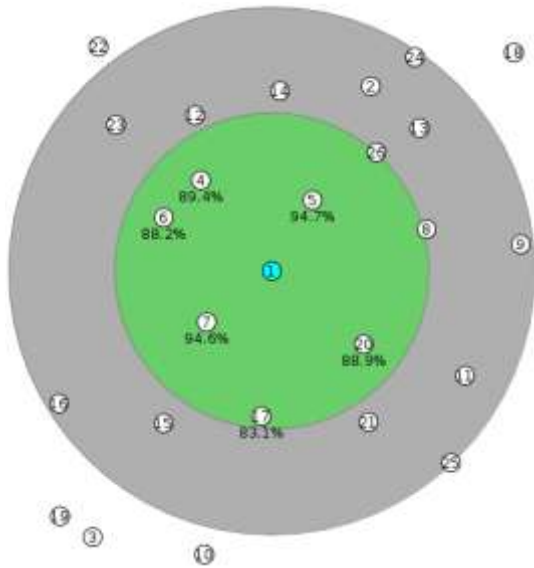
### 4.2 Kết quả đánh giá

Để đánh giá giao thức IRPL dựa trên mô phỏng, chúng tôi sử dụng công cụ mô phỏng Cooja [14]. Chúng tôi xét một DODAG bao gồm 26 nút mạng được phân bố ngẫu nhiên trong trường cảm biến có kích thước (100m x 100m). Bảng 2 tóm tắt kịch bản đánh giá mô phỏng với hai giao thức IRPL và RPL. Hình 3 là mô hình triển khai mạng gồm 26 nút. Các nút mạng định kỳ gửi bản tin dữ liệu về nút gốc (DODAG root) là nút số 1.

Hình 4, 5, 6 lần lượt là kết quả đánh giá mô phỏng so sánh tỷ lệ các nút còn sống trong mạng (ANR), tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu (DDR), sự cân bằng năng lượng (EIB) giữa giao thức IRPL và giao thức RPL.

**Bảng 2.** Kích bản đánh giá mô phỏng

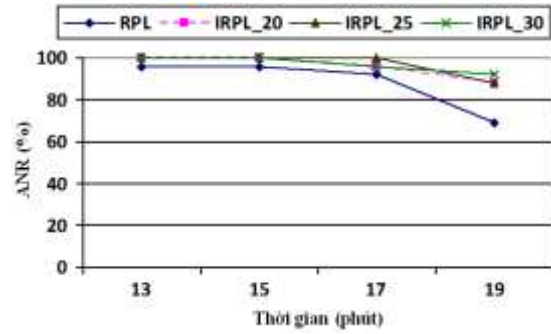
Các tham số	Giá trị
Mô hình truyền thông vô tuyến	UDI (Unit Disk Graph with Distance Interference)
Số nút mạng	26
Kích thước mạng	100m x 100m
Phạm vi phủ sóng của nút	Phạm vi truyền: 30m Phạm vi ảnh hưởng của nhiễu: 50m
Năng lượng ban đầu	10J
Chu kỳ gửi bản tin dữ liệu	15s
Nguồn gửi bản tin dữ liệu	Tất cả các nút trong mạng
Giao thức lớp MAC [15]	CSMA/ContikiMAC



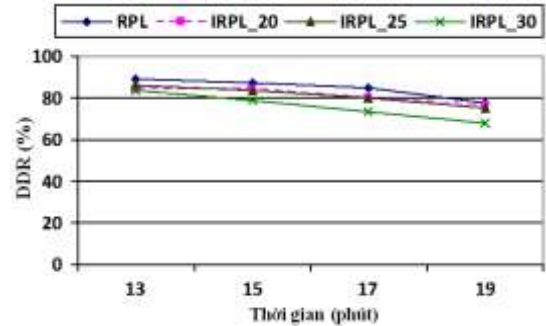
**H. 3** Mô hình triển khai mạng gồm 26 nút

Với giả sử ngưỡng để xác định thời gian sống của mạng bằng 100% thì kết quả đánh giá mô phỏng hình 4 cho thấy thời gian sống của các nút mạng khi mạng hoạt động theo giao thức IRPL được cải thiện tốt hơn so với giao thức RPL ban đầu. Hình 4 cũng cho thấy với ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại bằng 25% thì thời gian sống của mạng được cải thiện tốt nhất (tăng 38% so với giao thức RPL).

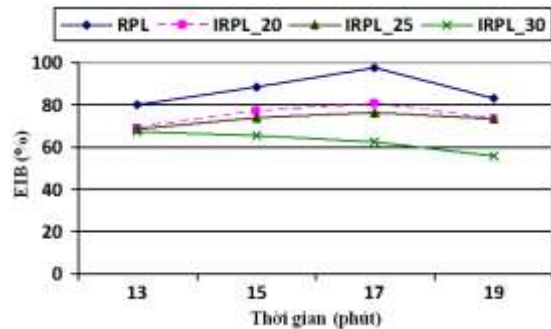
Kết quả mô phỏng ở hình 5 cho thấy tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu của giao thức IRPL thấp hơn so với giao thức RPL. Giao thức IRPL với ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại bằng 20% và 25% đảm bảo tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu DDR ở mức chấp nhận được so với giao thức RPL ban đầu. Giao thức IRPL với ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại ở mức 30% có tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu DDR thấp hơn so với giao thức IRPL ở ngưỡng 20%, 25% và thấp hơn nhiều so với giao thức RPL. Trong khoảng thời gian cuối của quá trình mô phỏng, do tỷ lệ các nút còn sống trong mạng giảm nên tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu DDR cũng giảm theo. Chúng tôi chỉ vẽ đồ thị ở phút thứ 19 bởi vì ứng với thời điểm này, các nút lân cận của nút gốc số 1 đã hết năng lượng. Vì vậy, các nút còn lại trong mạng không tìm được tuyến đường nào để gửi bản tin dữ liệu về nút gốc.



**H. 4** So sánh tỷ lệ các nút còn sống trong mạng



**H. 5** So sánh tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu



**H. 6** So sánh sự cân bằng năng lượng giữa các nút mạng

Kết quả mô phỏng ở hình 6 cho thấy giao thức IRPL đảm bảo được sự cân bằng năng lượng giữa các nút mạng tốt hơn so với giao thức RPL ban đầu. Điều này được thể hiện bởi đường cong EIB của giao thức IRPL trong cả ba trường hợp tương ứng với các ngưỡng 20%, 25%, 30% đều thấp hơn so với đường cong EIB giao thức RPL.

Tổng hợp các kết quả mô phỏng ở hình 4, 5 cũng cho thấy giao thức IRPL với ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại bằng 25% đạt được hiệu quả tốt nhất về thời gian sống của mạng đồng thời cũng đảm bảo được tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu DDR ở mức chấp nhận được so với giao thức RPL ban đầu.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất và thực thi giao thức định tuyến IRPL có sự nhận thức về năng lượng cho mạng cảm biến không dây. Chúng tôi thay đổi ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại để đánh giá ảnh hưởng của ngưỡng này đến hiệu năng của toàn mạng. Kết quả đánh giá mô phỏng cho thấy, giao thức IRPL

với ngưỡng chỉ số năng lượng còn lại bằng 25% đạt được một số tiêu chí quan trọng đó là: Tăng được thời gian sống của mạng (tăng 38% so với giao thức RPL); Đảm bảo được sự cân bằng năng lượng giữa các nút mạng; Đạt được tỷ lệ chuyển phát bản tin dữ liệu trong mạng ở mức chấp nhận được so với giao thức RPL ban đầu.

Trong thời gian tới, chúng tôi sẽ tiếp tục thực hiện một số đánh giá thực nghiệm với giao thức IRPL nhằm kiểm chứng lại các kết quả mô phỏng đã thực hiện.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Dohler M, Watteyne T, Winter T, Barthel D, "Routing requirements for urban low-power and lossy networks", RFC5548, IETF, May 2009.
- [2] Martocci J, De Mil P, Vermeulen W, Riou N, "Building automation routing requirements in low-power and lossy networks", RFC5867, IETF, June 2010.
- [3] Pister K, Thubert P, Dwars S, Phinney T, "Industrial routing requirements in low-power and lossy networks", RFC5673, IETF, October 2009.
- [4] Brandt A, Buron J, Porcu G, "Home automation routing requirements in low-power and lossy networks", RFC 5826, IETF, April 2010.
- [5] 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, April 2010.
- [6] JeongGil Ko, Stephen Dawson-Haggerty, Omprakash Gnawali, David Culler, Andreas Terzis, "Evaluating the performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS", in Proceedings of the Workshop on Extending the Internet to Low power and Lossy Networks (IP+SN), USA, 2011.
- [7] Vũ Chiến Thắng, Lê Nhật Thăng, "Đánh giá hiệu năng giao thức định tuyến IPv6 cho mạng cảm biến không dây", Tạp chí nghiên cứu khoa học công nghệ và quân sự, ISSN 1859-1043, số 38, 8/2015.
- [8] Adam Dunkels, Fredrik Osterlind, Nicolas Tsiftes, Zhitao He, "Software-based Online Energy Estimation for Sensor Nodes", Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors, 2007.
- [9] Vũ Chiến Thắng, Nguyễn Chấn Hùng, Lê Nhật Thăng, "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), trang 103-109, 2013.
- [10] <http://ti.com>, [Online].
- [11] <http://www.sensirion.com>, [Online].
- [12] T. Winter et al, "RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks", RFC 6550, March 2012.
- [13] Thang Vu Chien, Hung Nguyen Chan, Thanh Nguyen Huu, "Operating System for Wireless Sensor Networks and an Experiment of Porting ContikiOS to MSP430 Microcontroller", Journal of Computer Science and Information, Vol 5, Issue 1, February 2012, ISSN: 2088-7051, pp. 50-56.
- [14] Fredrik Österlind, Adam Dunkels, Joakim Eriksson, Niclas Finne, and Thiemo Voigt, "Cross-level sensor network simulation with cooja", In Proceedings of the First IEEE International Workshop on Practical Issues in Building Sensor Network Applications (SenseApp 2006), Tampa, Florida, USA, November 2006.
- [15] A. Dunkels, "The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol", SICS technical report, December 2011.



**Vũ Chiến Thắng** sinh năm 1983 tại Thái Nguyên, Việt Nam. Anh nhận bằng Kỹ sư về Điện tử Viễn thông của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2006, Thạc sĩ về Kỹ thuật Điện tử của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2008. Anh nhận bằng Tiến sĩ về Điện tử Viễn thông của Viện nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa năm 2015. Từ năm 2006 đến nay, anh là Giảng viên của trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông Thái Nguyên (ICTU), Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là thiết kế và thực hiện các hệ thống đo lường, điều khiển, các hệ thống nhúng và hệ thống mạng cảm biến không dây.



**Nguyễn Văn Tảo** sinh năm 1973 tại Hải Dương, Việt Nam. Anh nhận bằng Tiến sĩ về Công nghệ thông tin năm 2009 của Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam. Từ năm 2001 đến nay, anh là Giảng viên của trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông Thái Nguyên (ICTU), Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính hiện nay là các phương pháp xử lý ảnh, an toàn và bảo mật thông tin, thiết kế và thực hiện các ứng dụng của Internet of Things.



**Lê Nhật Thăng** sinh năm 1973 tại Hà Nội, Việt Nam. Anh nhận bằng Kỹ sư về *Điện tử Viễn thông* của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST) năm 1995, Thạc sĩ về *Kỹ thuật Viễn thông* của Viện Công nghệ Châu Á (AIT), Thái Lan năm 2000, Tiến sĩ về *Công nghệ Thông tin và Truyền thông* của trường Đại học Trento, Italy năm 2006. Hiện nay, anh là Giảng viên tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT), Hà Nội. Hướng nghiên cứu chính là mô hình hóa và mô phỏng, phân tích và đánh giá hiệu năng mạng, lý thuyết hàng đợi và ứng dụng, QoS, các kỹ thuật định tuyến và chuyển mạch, mạng NGN.



**Vũ Mạnh Thủy** sinh năm 1981 tại Thái Nguyên, Việt Nam. Anh nhận bằng Kỹ sư về *Tự động hóa* tại Trường Đại Học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên năm 2004, bằng Thạc sĩ *Kỹ thuật Điều khiển tự động* tại Trường Đại Học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên năm 2009. Hiện nay, anh là Giảng viên của trường Cao đẳng Kinh tế - Kỹ thuật, Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là thiết kế, thực hiện các hệ thống nhúng và hệ thống mạng công nghiệp.



**Phùng Trung Nghĩa** sinh năm 1980 tại Thái Nguyên, Việt Nam. Anh nhận bằng Tiến sĩ về *Khoa học thông tin* năm 2013 của Viện khoa học công nghệ tiên tiến Nhật Bản (JAIST). Từ năm 2003 đến nay, anh là Giảng viên của trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông Thái Nguyên (ICTU), Đại học Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính hiện nay là các phương pháp xử lý tín hiệu âm thanh, tiếng nói, y sinh, học máy trong xử lý tín hiệu, thiết kế và thực hiện các ứng dụng của Internet of things.