

PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN PHÂN CỤM ĐỘNG THÍCH NGHI DỰA TRÊN LOGIC MỜ CHO CÁC MẠNG CẢM KHÔNG DÂY

DEVELOPING AN ADAPTIVE DYNAMIC CLUSTERING ALGORITHM BASED ON FUZZY LOGIC FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

Bùi Thị Nhi^{1,*}, Bùi Thị Phương¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.153>

TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất một thuật toán phân cụm động PMME thích nghi cho truyền dữ liệu trong mạng WSN, dựa trên giao thức MAC ưu tiên PMME (Priority MAC protocol for Multi-Event Wireless Sensor Network). Mục tiêu là giảm thiểu xung đột và độ trễ gói tin, đồng thời hỗ trợ định tuyến dữ liệu và tổ chức cụm động hiệu quả thông qua việc ứng dụng logic mờ. Thuật toán cho phép mở rộng quy mô cụm linh hoạt, trong đó các nút trưởng cụm (CH - Cluster Head) được lựa chọn tối ưu và khoảng cách giữa các nút trong cụm được duy trì để đảm bảo truyền dữ liệu ở mức tối đa mà không làm suy giảm các tham số mạng. Logic mờ được áp dụng nhằm tối ưu hóa quá trình chọn CH, xác định kích thước cụm phù hợp và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng. Kết quả mô phỏng cho thấy giải pháp PMME mang lại hiệu năng vượt trội so với các thuật toán định tuyến hiện có, đặc biệt trong việc cân bằng tiêu thụ năng lượng và kéo dài tuổi thọ mạng.

Từ khóa: Khả năng thích ứng với môi trường động, tính năng mở rộng, WSN ứng dụng logic mờ, định tuyến dữ liệu dựa trên PMME.

ABSTRACT

This paper proposes an adaptive PMME dynamic clustering algorithm for data transmission in WSN networks, based on the PMME Priority MAC protocol (Priority MAC protocol for Multi-Event Wireless Sensor Network). The goal is to minimize collisions and packet latency while supporting efficient data routing and dynamic cluster organization through the application of fuzzy logic. The algorithm allows for flexible cluster scalability, where cluster heads (CHs) are optimally selected and the distance between nodes in the cluster is maintained to ensure maximum data transmission without degrading network parameters. Fuzzy logic is applied to optimize the CH selection process, determine appropriate cluster size, and improve energy efficiency. Simulation results show that the PMME method delivers superior performance compared to existing routing algorithms, particularly in balancing energy consumption and extending network lifespan.

Keywords: Dynamic environment adaptation, Scalability, Fuzzy application WSN, PMME based data routing.

¹Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: btnhi@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/12/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Các thuật toán định tuyến dữ liệu hiệu quả cần đảm bảo việc truyền tải thông tin một cách tin cậy và kịp thời, đồng thời tối ưu hóa việc khai thác tài nguyên của mạng cảm biến. Trong mạng WSN, định tuyến dữ liệu kết hợp với logic mờ là một bài toán phức tạp, đặc biệt khi áp dụng các giải pháp phân cụm động [1, 2]. Những thuật toán định tuyến truyền thống thường thiếu khả năng

thích nghi với sự biến đổi của điều kiện mạng và chưa đảm bảo hiệu quả sử dụng năng lượng.

Hiện nay, các thuật toán định tuyến tiết kiệm năng lượng như CEDAR [3], FEEC [4], ERNSS-MCC [5], CL-HPWSR [6], MOTCO [7] và các biến thể chủ yếu tập trung tối ưu một hoặc hai tiêu chí, chẳng hạn như năng lượng còn lại hoặc khoảng cách truyền. Tuy nhiên, các giải pháp này vẫn tồn tại ba hạn chế chính: (i) cơ chế phân cụm tĩnh

hoặc kém linh hoạt dẫn đến hiện tượng tiêu thụ năng lượng tập trung tại một số nút; (ii) thiếu cơ chế phân loại và ưu tiên dữ liệu, làm gia tăng độ trễ đối với các thông tin quan trọng và (iii) chưa đảm bảo cân bằng tải lâu dài, gây tăng tỷ lệ nút chết cục bộ.

Trong nghiên cứu này, thuật toán PMME được đề xuất như một giải pháp phân cụm động kết hợp định tuyến đa chặng, với các đóng góp chính gồm: (1) cơ chế phân cụm thích nghi theo trạng thái mạng; (2) lựa chọn nút trưởng cụm (CH) dựa trên hàm mục tiêu đa tiêu chí (bao gồm bậc nút, năng lượng còn lại, khoảng cách và mức ưu tiên dữ liệu); (3) cơ chế định tuyến đa chặng tối ưu năng lượng kết hợp cân bằng tải; và (4) giải pháp làm mượt độ trễ nhằm đảm bảo chất lượng dịch vụ (QoS) ổn định. Kết quả thực nghiệm cho thấy PMME giúp giảm đáng kể số lượng nút chết so với các thuật toán hiện có, đồng thời vẫn duy trì thời gian thiết lập và xử lý dữ liệu ở mức thấp (ví dụ: khoảng 1,5ms cho thiết lập và ~3ms cho xử lý).

Thuật toán PMME được đề xuất tập trung vào quá trình hình thành các cụm cứng và cụm mềm thông qua việc áp dụng cải tiến của thuật toán K-means. Quá trình lựa chọn nút trưởng cụm (CH) được thực hiện dựa trên tính toán hiệu quả năng lượng của từng nút, đồng thời xét đến khoảng cách từ nút nguồn đến trạm gốc (BS). Theo hướng tiếp cận phân cụm động, PMME tích hợp cơ chế định tuyến dữ liệu ưu tiên nhằm giảm độ trễ và nâng cao tốc độ truyền dữ liệu [3]. Trong bối cảnh các mạng WSN tương lai phải đáp ứng sự gia tăng mạnh về số lượng thiết bị, giải pháp này trở nên đặc biệt cần thiết.

Những đóng góp chính của thuật toán PMME đối với bài toán định tuyến dữ liệu trong WSN bao gồm:

- Cung cấp cơ chế định tuyến hiệu quả, cho phép truyền dữ liệu tối đa trong các cụm với sự phân bố hợp lý của các nút CH, từ đó hỗ trợ hình thành các cụm có khả năng mở rộng tốt trong môi trường động.

- Áp dụng quy trình ba giai đoạn gồm: tính toán các tham số liên quan đến năng lượng, điều chỉnh để đảm bảo định tuyến hiệu quả và lựa chọn nút CH trong từng cụm.

- Quản lý và điều khiển các cụm ở mức độ phù hợp; trong đó mô hình năng lượng giúp phân biệt rõ nút CH với các nút thường, đảm bảo việc hình thành các cụm tối ưu.

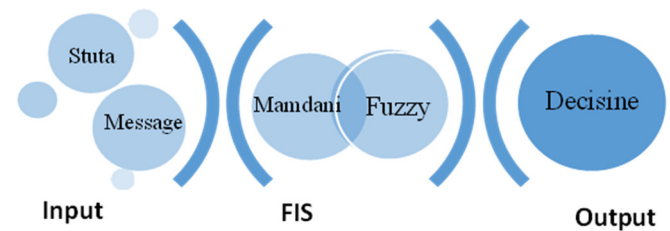
Cấu trúc của bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 trình bày các giải pháp nghiên cứu nhằm xây dựng thuật toán định tuyến dữ liệu dựa trên phân cụm động và giao thức ưu tiên. Phần 3 mô tả chi tiết thuật toán PMME được

đề xuất. Phần 4 trình bày thiết lập mô phỏng và phân tích, so sánh PMME với các thuật toán hiện có. Cuối cùng, Phần 5 đưa ra kết luận của nghiên cứu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thuật toán phân cụm động để định tuyến dữ liệu thích nghi

Hệ thống suy luận dựa trên logic mờ FIS (FuZZy Inference System) để tạo ra tập tuyến CH sử dụng các tham số hiệu quả để đo lường. Mô hình FIS có thể chọn ra các nút CH phù hợp nhất cho WSN.



Hình 1. Mô hình mờ hóa dữ liệu

Mô hình trên sử dụng hệ thống suy luận mờ FIS sử dụng các hàm thành viên cho hai biến đầu vào và đầu ra. Vì mỗi tham số đầu vào sẽ ảnh hưởng đến năng lượng tiêu thụ và tuổi thọ của WSN. Mô hình suy luận mờ FIS đã xác định được mối quan hệ này.

Thuật toán đề xuất PMME đảm bảo quá trình hình thành cụm hiệu quả và tiết kiệm năng lượng trong mạng cảm biến không dây có ứng dụng logic mờ. Việc so sánh mức năng lượng của các nút trước và sau khi đánh giá đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định cấu trúc cụm [8]. Theo đó, các nút trong mạng được phân thành hai loại chính: nút thường và nút trưởng cụm (CH), trong đó nút CH có mức tiêu thụ năng lượng cao hơn do đảm nhận vai trò điều phối và truyền tải dữ liệu.

Hiệu năng của thuật toán PMME được đánh giá thông qua các chỉ số như giải sai năng lượng, năng lượng còn lại và độ trễ đầu - cuối. Thuật toán ưu tiên các cơ chế điều khiển năng lượng hiệu quả, đồng thời hỗ trợ khả năng mở rộng của mạng, góp phần nâng cao hiệu suất tổng thể cho các hệ thống WSN ứng dụng logic mờ.

2.2. Giải pháp phân cụm thông minh tiết kiệm năng lượng cho hệ thống WSN

Thuật toán định tuyến dữ liệu dựa trên phân cụm động PMME được đề xuất mang lại các cơ chế giúp nâng cao khả năng mở rộng của cụm trong mạng. Ở mỗi vòng lặp, hệ thống tiến hành kiểm tra sự lặp lại của các nút đóng vai trò nút chủ, từ đó xác định và cập nhật tuyến đường truyền dữ liệu phù hợp [8]. Quá trình này đồng thời bao gồm việc tính toán các tham số liên quan đến

năng lượng, kết hợp với tối ưu hóa mạng WSN thông qua điều chỉnh hàm tiêu chuẩn và cập nhật các luật suy luận mờ, nhằm đảm bảo khả năng định tuyến linh hoạt, tiết kiệm năng lượng và lựa chọn nút trưởng cụm (CH) một cách tối ưu.

Bên cạnh đó, giải pháp mờ hóa được áp dụng để đánh giá các tham số cơ bản của các nút trong cụm, giúp nâng cao độ chính xác trong quá trình ra quyết định [9]. Với tọa độ của nút trưởng cụm CH là (x_{ch}, y_{ch}) và tọa độ của trạm gốc BS là (x_{bs}, y_{bs}) , khoảng cách giữa các nút có thể được xác định theo công thức sau:

$$d(CH, BS) = \sqrt{(x_{ch} - x_{bs})^2 + (y_{ch} - y_{bs})^2} \quad (1)$$

Ví dụ: Tính $d(CH, BS)$ với các giá trị sau:

Giả sử: CH nằm tại tọa độ $(x_{ch}, y_{ch}) = (60, 50)$ mét, CH nằm tại tọa độ $(x_{bs}, y_{bs}) = (30, 25)$ mét.

Áp dụng công thức tính:

$$d(CH, BS) = \sqrt{(x_{ch} - x_{bs})^2 + (y_{ch} - y_{bs})^2}$$

Thay số ta có:

$$\begin{aligned} d(CH, BS) &= \sqrt{(60 - 30)^2 + (50 - 25)^2} \\ d(CH, BS) &= \sqrt{(30)^2 + (25)^2} = \sqrt{900 + 625} \\ &= \sqrt{1525} \approx 39,05(\text{mét}) \end{aligned}$$

Hãy xét vị trí của một nút cụm là $N(x_m, y_m)$. Khoảng cách giữa CH và nút trưởng được biểu diễn như sau:

$$d(CH, N) = \sqrt{(x_{ch} - x_m)^2 + (y_{ch} - y_m)^2} \quad (2)$$

Bậc của cụm đầu, $deg(CH)$, có thể được định nghĩa là số lượng các nút mà cụm đầu được kết nối trực tiếp. Nó có thể được biểu diễn như một số lượng các nút trong một bán kính nhất định từ cụm đầu:

$$deg(CH) = \sum_{i=1}^N I(d(CH, N_i) \leq r) \quad (3)$$

Trong đó: r là ngưỡng khoảng cách giữa nút tới CH, I bằng 1 nếu điều kiện bên trong là đúng và bằng 0 nếu điều kiện bên trong là sai và N_i biểu diễn cho từng nút trong mạng.

Hãy xét với các nút di động M trong một môi trường động [8,9]. Mỗi nút có năng lượng ban đầu tối đa và tìm kiếm kết nối mạng để truyền dữ liệu có kích thước gói m -bit. Thông thường, mô hình liên kết vô tuyến đối xứng [ref] tính toán năng lượng cần thiết để truyền dữ liệu thành công giữa các nút lân cận như sau:

$$E_{Tx}(m, d_i) = \begin{cases} m * E_c + p * \epsilon_{fsp} * d^2 & (\text{if } d_i < d_0) \\ m * E_c + p * \epsilon_{mpf} * d^4 & (\text{if } d_i \geq d_0) \end{cases} \quad (4)$$

Để truy xuất thành công kích thước gói dữ liệu m -bit đã truyền ở đầu thu, có mức năng lượng là:

$$E_{Rx}(m) = m * E_{elect} \quad (5)$$

Trong đó, d_i biểu thị khoảng cách tức thời của một nút cụm trong mỗi lần lặp. Các biến khác như $E_c \in f_{sp}$ và ϵ_{mpf} biểu thị tương ứng các tham số tiêu thụ năng lượng.

Giá trị ngưỡng của khoảng cách, được ký hiệu là d_{th} , được thiết lập trước khi phân bổ năng lượng cho từng nút

$d_{th} = \sqrt{\epsilon_{fsp} / \epsilon_{mpf}}$ nếu hai nút lân cận được định vị ở cùng một khoảng cách hoặc lớn hơn thì $d_{th} > d_i \sim d_0$. Ngược lại, nếu khoảng cách nhỏ hơn thì $d_{th} < d_i \sim d_0$.

Năng lượng được phân bổ cho một siêu nút luôn lớn hơn năng lượng của một nút bình thường. Hệ số năng lượng dư ϕ chính là phần năng lượng tăng thêm của nút CH so với nút trưởng:

$$E_{CH} = E_0 * (1 + \phi) * m * \theta_{d_{th}} \quad (6)$$

$$E_{norm} = E_0 * (1 - \theta_{d_{th}}) * p \quad (7)$$

Trong đó E_0 biểu thị năng lượng ban đầu được truyền trước khi truyền dữ liệu. Hệ số năng lượng dư ϕ là giá trị được thêm vào do sự xuất hiện của nó trong mỗi lần lặp lại. $\theta_{d_{th}} = \frac{\pi r^2}{M}$ biểu thị chuyển động tức thời của siêu nút trong khoảng cách được xác định trước khu vực M . Tổng phân phối năng lượng trong thuật toán PMME là:

$$E_{Total} = E_{CH} + E_{norm} \quad (8)$$

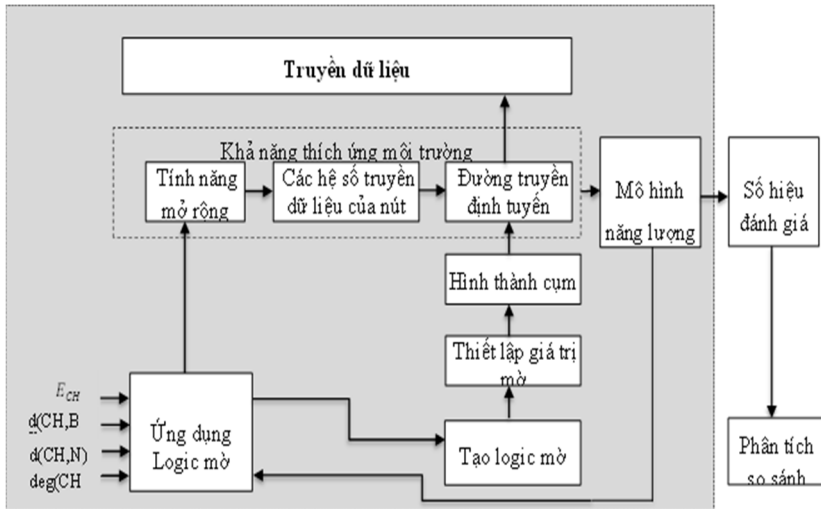
Theo cách này, mô hình điều khiển năng lượng thực sự chỉ định và phân biệt các nút cụm E_{CH} và E_{norm} . Hơn nữa, nó đảm bảo nhận dạng chính xác các nút cụm để hình thành cụm.

Đảm bảo các nút trong cụm đáp ứng các số liệu cần thiết như mức độ của siêu nút, năng lượng dự kiến trên mỗi cụm. Các nút không đáp ứng mức năng lượng sẽ bị loại khỏi quá trình hình thành cụm cho đến khi đạt được.

3. THUẬT TOÁN PMME TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG CHO WSN

3.1. Ứng dụng logic mờ để định tuyến thích nghi truyền dữ liệu

Việc áp dụng các luật mờ trong PMME được thực hiện thông qua việc tích hợp hệ suy luận mờ (Fuzzy Logic), cho phép các nút trong mạng tự động đưa ra quyết định một cách thông minh, thích nghi với điều kiện môi trường và tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng dựa trên dữ liệu cảm biến. Các tham số đầu vào mang tính biến động như mức năng lượng còn lại, khoảng cách hay trạng thái mạng được liên tục cập nhật, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình lựa chọn nút cụm và đặc biệt là nút trưởng cụm (CH). Nhờ cơ chế này, thuật toán PMME nâng cao độ chính xác trong phân cụm và cải thiện hiệu quả hoạt động tổng thể của mạng.



Hình 2. Sơ đồ hoạt động để định tuyến thích nghi truyền dữ liệu

Khả năng thích ứng của thuật toán PMME được duy trì thông qua cơ chế cập nhật liên tục dựa trên logic mờ, giúp hệ thống linh hoạt trước các biến động trong môi trường WSN. Các luật mờ có thể được bổ sung mới hoặc điều chỉnh nhằm phù hợp với trạng thái mạng tại từng thời điểm.

Thuật toán 1: Update Fuzzy Rules

Input: Fuzzy_Rules, Objective_Function

Output: Updated_Fuzzy_Rules

```

(1) Initialize Updated_Fuzzy_Rules = [];
(2) For each rule in current_Fuzzy_Rules
(3)   Get Fuzzy_Rules_Output = Fuzzy_Rules.evaluate(rule) on
(4)   Modified_Objective_Value = Objective_Function(Fuzzy_Rules_Output)
(5) If Modified_Objective_Value > threshold
then
(6)   rule = modify_Rule(rule)
(7)   Updated_Fuzzy_Rules.append(rule)
(8) End If
(9) End For
(10) For each new_Situation IN unaccounted Situations
(11) New Rule = Fuzzy_Rules.generateRule(new situation)
(12) Updated_Fuzzy_Rules.append(new rule)
(13) End For
(14) Return Updated_Fuzzy_Rules
(15) End

```

Thuật toán 2: Energy driven model

Input: Cluster Nodes

Output: Energy per cluster group // Năng lượng sử dụng trên mỗi nhóm cụm

```

(1) Initialize E_Total, E_Rx, E_Tx
(2) For i = 1 to N // mỗi nút trong cụm
(3) Compute distance d(CH, node) // Khoảng cách giữa nút CH và nút thường
(4) If d(CH, node) < threshold then
(5)   E_Tx = energy model for a short distance // năng lượng truyền cho khoảng cách gần nhất
(6) Else
(7)   E_Tx = energy model for long distance // năng lượng truyền cho khoảng cách xa nhất
(8) End If
(9) E_Rx = energy required to receive data // năng lượng cần thiết để thu dữ liệu
(10) E_Total = E_Tx + E_Rx
(11) Return E_Total
(12) End

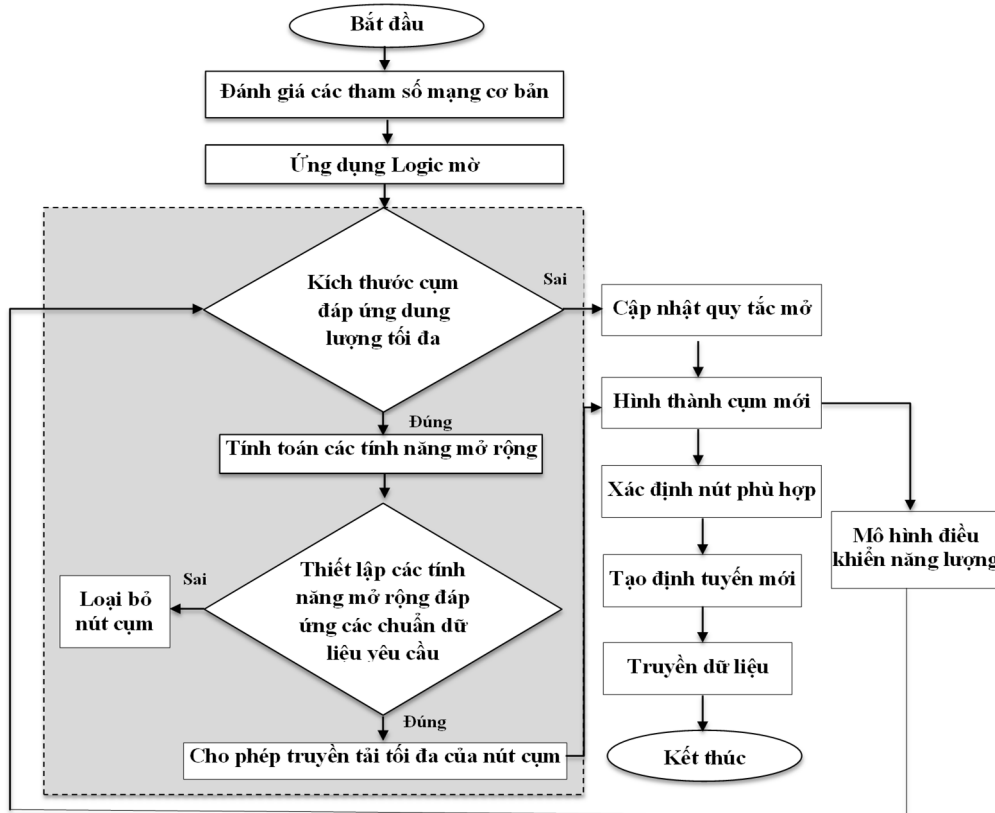
```

Sau mỗi lần cập nhật, thuật toán được kiểm chứng thông qua quá trình thử nghiệm chặt chẽ để đảm bảo tính ổn định và nâng cao hiệu quả hoạt động. Nhờ đó, PMME không chỉ thích nghi tốt với điều kiện mạng động mà còn duy trì hiệu năng tối ưu trong quá trình vận hành.

3.2. Mô hình luồng xử lý thuật toán PMME đề xuất

Trong phần này, chúng tôi trình bày đánh giá toàn diện đối với thuật toán PMME đề xuất, tập trung vào hiệu quả sử dụng năng lượng và khả năng mở rộng của cấu trúc cụm. Thuật toán được tăng cường bởi cơ chế học thông minh (mạng nơ-ron tích hợp), cho phép thích ứng linh hoạt với các biến động của hàm mục tiêu, từ đó nâng cao độ chính xác trong việc lựa chọn nút cụm.

Nhờ đó, PMME không chỉ đảm bảo quá trình lựa chọn nút trưởng cụm (CH) một cách hiệu quả mà còn hỗ trợ hình thành các cụm có khả năng mở rộng, đáp ứng tốt các điều kiện mạng thay đổi và nâng cao hiệu năng tổng thể của hệ thống.



Kết quả mô phỏng được tính toán dựa trên giá trị trung bình của 10 lần chạy cho mỗi kịch bản, nhằm đảm bảo tính khách quan và độ tin cậy. Kết quả cho thấy mô hình tối ưu năng lượng sử dụng thuật toán PMME giúp các nút cảm biến duy trì mức năng lượng ổn định, đồng thời nâng cao hiệu quả hoạt động của mạng WSN. Việc ứng dụng logic mờ góp phần cải thiện đáng kể hiệu suất tổng thể, đặc biệt trong việc tối ưu tiêu thụ năng lượng và kéo dài tuổi thọ mạng.

Hình 3. Sơ đồ thuật toán PMME để xuất

Đồng thời, nghiên cứu đã làm rõ quá trình hình thành cụm và đặc biệt nhấn mạnh hiệu quả cũng như khả năng mở rộng trong định tuyến dữ liệu mà thuật toán PMME mang lại. Cơ chế lựa chọn các nút trong cụm, đặc biệt là nút trưởng cụm (CH), được thể hiện rõ ràng; sự khác biệt giữa nút thường và nút CH có thể được minh họa thông qua các ký hiệu hoặc màu sắc khác nhau.

Quá trình lựa chọn CH đóng vai trò then chốt, bởi đây là nút đảm nhiệm chức năng thu thập, tổng hợp và truyền dữ liệu về trạm gốc. Do đó, việc xác định CH được thực hiện dựa trên các tiêu chí liên quan đến năng lượng và trạng thái mạng, giúp tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng và nâng cao hiệu quả hoạt động tổng thể của hệ thống.

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG

4.1. Các thông số sử dụng trong quá trình mô phỏng

Trong mô hình mô phỏng, diện tích mạng được giả định là $300 \times 300m^2$, với 200 nút cảm biến được phân bố ngẫu nhiên trong không gian. Mỗi nút được khởi tạo với mức năng lượng ban đầu là 2 Joule. Các tham số tiêu thụ năng lượng được thiết lập gồm năng lượng điện tử $E_c = 10$ nJ/bit và hệ số suy hao đường truyền $\epsilon_{mpf} = 20pJ/bit/m^2$. Kích thước mỗi gói dữ liệu là 100 bit, được truyền giữa các nút theo chu kỳ 50 micro giây, với tốc độ 200 gói/giây và phạm vi truyền trong khoảng từ 10 đến 20m.

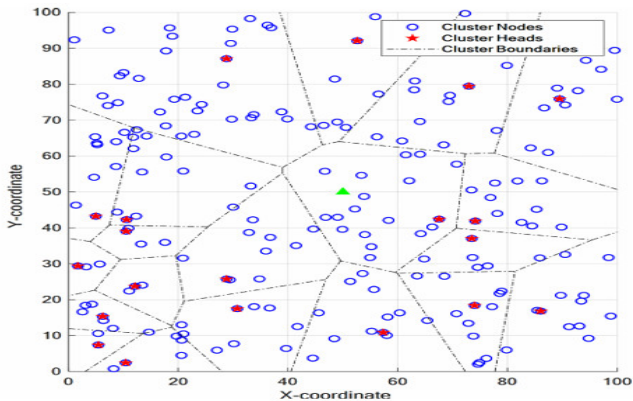
Bảng 1. Bảng tham số sử dụng để mô phỏng

Tham số	Giá trị
Diện tích mô phỏng	$300 \times 300m^2$
Số nút cảm biến sử dụng	200
Nút chìm	1
Các loại nút không đồng nhất	Nút thường, nút CH
Năng lượng: nút thường	1 Joule
Năng lượng: nút CH	2 Joules
Khoảng cách truyền	15m
Kích thước gói dữ liệu	100 bits
Tốc độ truyền gói dữ liệu	200 gói/giây
E_c	10nJ/bit
ϵ_{fsp}	$20pJ/bit/m^2$
ϵ_{mpf}	$0.0012pJ/bit/m^4$
Số lần mô phỏng	10

4.2. Thiết lập cụm tối ưu với khả năng mở rộng trong môi trường động

Hình 4 minh họa quá trình hình thành cụm theo thuật toán PMME để xuất, hướng tới mục tiêu tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng và nâng cao khả năng định tuyến dữ liệu có tính mở rộng. Hình 4 cũng thể hiện rõ cơ chế lựa chọn

các nút thường và nút trưởng cụm (CH) trong mạng cảm biến không dây (WSN), qua đó phản ánh cách tổ chức cụm hiệu quả mà thuật toán PMME mang lại.



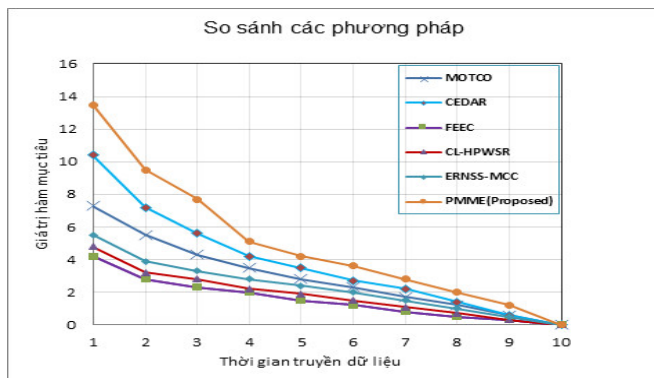
Hình 4. Mô hình phân cụm được thiết lập thông qua thuật toán PMME để xuất

Khả năng mở rộng của thuật toán PMME được thể hiện thông qua việc dễ dàng tích hợp các nút mới vào các cụm hiện có, đồng thời cho phép cấu trúc cụm thích nghi linh hoạt với sự thay đổi của điều kiện mạng. Hình 4 minh họa trực quan cấu trúc mạng khi áp dụng PMME, làm nổi bật quá trình lựa chọn các nút trọng yếu và cơ chế hình thành cụm hiệu quả, có khả năng mở rộng.

4.3. Hệ thống suy luận mờ sử dụng các hàm tiêu chuẩn

Hình 5 minh họa trực quan hiệu quả của các giải pháp phân cụm thông qua sự biến thiên của hàm mục tiêu tương ứng. Sự khác biệt về giá trị hàm mục tiêu giữa các thuật toán như CEDAR [3], ERNSS-MCC [4], FEEC [5], CL-HPWSR [6] và MOTCO [7] phản ánh rõ mức độ tối ưu và hiệu suất của từng giải pháp. Mỗi thuật toán được biểu diễn bằng một hoặc nhiều điểm dữ liệu, thể hiện kết quả đạt được theo các tiêu chí đánh giá của hàm mục tiêu.

Kết quả cho thấy, thuật toán PMME đề xuất đạt giá trị hàm tiêu chuẩn tốt hơn so với các giải pháp trước đó, qua đó khẳng định khả năng tối ưu hóa hiệu năng phân cụm và nâng cao hiệu quả hoạt động của mạng WSN.



Hình 5. Mức năng lượng của từng nút cụm sau một số lần lặp

Bảng 2 trình bày kết quả đánh giá thời gian phản hồi và thời gian xử lý của thuật toán PMME đề xuất. Kết quả cho thấy các chỉ số này đạt mức thấp hơn so với các giải pháp so sánh, qua đó khẳng định hiệu quả của thuật toán. Cụ thể, thời gian phản hồi khoảng 1,5ms tương ứng với quá trình phát thông điệp để xuất nút trưởng cụm (CH) và truyền gói tin ngắn từ các nút đến trạm gốc (BS). Trong khi đó, thời gian xử lý khoảng 3ms phản ánh thời gian cần thiết để một CH thực hiện các tác vụ nội bộ như thu thập, tổng hợp và xử lý dữ liệu từ các nút thành viên.

Các giá trị này được lựa chọn hợp lý và phù hợp với mục tiêu tối ưu hiệu năng của hệ thống, đồng thời góp phần cải thiện các chỉ số quan trọng khác như giảm số lượng nút chết, tăng năng lượng còn lại và giảm độ trễ đầu - cuối của mạng.

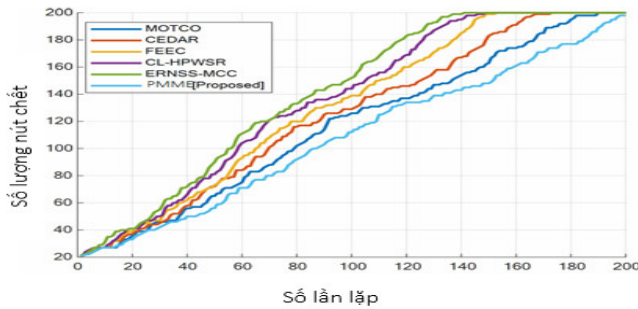
Bảng 2. Phân tích so sánh các thuật toán định tuyến dữ liệu khác nhau

Method	Number of dead nodes (%)	End-to-end delay (ms)	Remaining energy (%)	Response time (ms)	Processing time (ms)
PMME (đề xuất)	5	2	75	1,5	3
ERNSS-MCC [4]	12	4	60	2,5	5
CL-HPWSR [6]	15	5	58	3	6
FEEC [5]	17	5,5	55	3,5	7
CEDAR [6]	20	6	50	4	8
MOTCO [7]	22	6,5	48	4,5	9

4.4. Đánh giá sự suy giảm nút (nút chết) và độ trễ truyền đầu - cuối

Quá trình đánh giá số lượng nút chết theo các vòng lặp được minh họa trong hình 6. Trong mạng WSN, nút chết là những nút đã cạn kiệt năng lượng và không còn khả năng tham gia vào các hoạt động như truyền và nhận dữ liệu. Do đó, số lượng nút chết là một chỉ số quan trọng phản ánh tuổi thọ và hiệu quả hoạt động của mạng cũng như cấu trúc cụm.

Đối với thuật toán PMME đề xuất, việc phân tích nút chết đóng vai trò then chốt trong việc đánh giá hiệu năng, đặc biệt khi thuật toán hướng tới mục tiêu tối ưu năng lượng, nâng cao khả năng mở rộng và cải thiện tốc độ truyền dữ liệu. Kết quả cho thấy PMME góp phần kéo dài tuổi thọ mạng và duy trì hoạt động ổn định của các cụm trong môi trường mạng động.



Hình 6. Số lượng nút chết theo từng vòng lặp đối với các giải pháp khác nhau

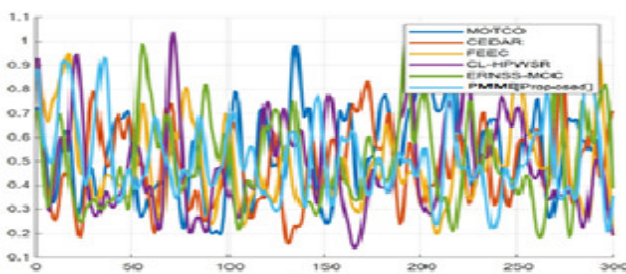
Thuật toán PMME đề xuất cho thấy hiệu năng vượt trội so với các giải pháp trước đó như CEDAR, ERNSS-MCC, FEEC, CL-HPWSR và MOTCO trong việc tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng và giảm số lượng nút chết. Kết quả này khẳng định tính hiệu quả của PMME trong việc thực hiện định tuyến tiết kiệm năng lượng đồng thời đảm bảo khả năng mở rộng trong mạng WSN ứng dụng logic mờ.

Qua nghiên cứu cho thấy PMME đặc biệt phù hợp cho bài toán quản lý năng lượng của các nút trong mạng, góp phần giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng tổng thể. Đây là yếu tố quan trọng trong thiết kế và triển khai các hệ thống mạng cảm biến không dây, giúp duy trì quá trình truyền dữ liệu ổn định và liên tục trong thời gian dài.

Bảng 3. Phân tích so sánh độ trễ giữa các thuật toán khác với PMME

Thuật toán	Độ trễ TB (ms)	Độ trễ giảm so với CEDAR(%)
CEDAR	250	0
ERNSS- MCC	230	8
FEEC	210	16
CL-HPWSR	190	24
MOTCO	170	32
PMME (đề xuất)	140	44

Kết quả trong bảng 3 cho thấy thuật toán PMME đề xuất giúp giảm đáng kể độ trễ so với các giải pháp hiện có. Cơ chế làm mịn độ trễ được áp dụng dưới dạng giá trị trung bình có trọng số theo thời gian, nhờ đó hạn chế dao động ngắn hạn và ổn định tín hiệu quá trình truyền dữ liệu.



Hình 7. Biến thiên năng lượng trung bình trên các nút cụm qua các lần lặp

Phân tích trong hình 7 tập trung vào độ trễ đầu - cuối, thể hiện cả giá trị độ trễ thực tế và độ trễ sau khi được làm mịn khi áp dụng thuật toán PMME. Kết quả cho thấy PMME không chỉ cải thiện mức độ trễ tổng thể mà còn nâng cao tính ổn định của hệ thống, đáp ứng tốt các yêu cầu về chất lượng dịch vụ trong mạng WSN.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khẳng định hiệu quả vượt trội của thuật toán PMME đề xuất trong bài toán định tuyến dữ liệu tiết kiệm năng lượng dựa trên cơ chế phân cụm động cho mạng WSN ứng dụng logic mờ. Thuật toán PMME tích hợp cơ chế phân cụm thích nghi, cho phép hệ thống linh hoạt trước các điều kiện mạng thay đổi. Việc khai thác và đánh giá các tham số liên quan đến năng lượng, kết hợp điều chỉnh hàm mục tiêu và cập nhật các luật mờ, góp phần nâng cao độ chính xác trong quá trình lựa chọn nút trưởng cụm (CH).

Mô hình đề xuất cải thiện hiệu suất mạng thông qua việc phân bổ năng lượng hợp lý giữa các nút dựa trên vai trò chức năng, đồng thời đảm bảo mỗi nút hoạt động trong ngưỡng năng lượng phù hợp. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán PMME đạt hiệu quả sử dụng năng lượng cao hơn so với các giải pháp hiện có như CEDAR, ERNSS-MCC, FEEC, CL-HPWSR và MOTCO. Cụ thể, số lượng nút chết giảm đáng kể, qua đó kéo dài tuổi thọ mạng và nâng cao khả năng truyền dữ liệu của các nút trong cụm.

Những cải tiến này cho thấy PMME là một giải pháp tiềm năng cho các ứng dụng yêu cầu thời gian thực trong mạng WSN. Trong tương lai, nghiên cứu sẽ tiếp tục được mở rộng theo hướng tích hợp các thuật toán tối ưu hóa tiên tiến nhằm nâng cao hơn nữa khả năng mở rộng, tính thích nghi và hiệu quả năng lượng của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Haseeb K., Almogren A. S., Islam N., Ud Din I., Jan Z., "An energy-efficient and secure routing protocol for intrusion avoidance in fuzzy-Based WSN," *Energies*, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12214174>
- [2]. Roberts M. K., Ramasamy P., "An improved high-performance clustering-based routing protocol for wireless sensor networks in fuzzy," *Telecommunication Syst.*, 82, 45-59, 2022.
- [3]. Mohseni M., Amirghafouri F., Pourghableh B., "CEDAR: A cluster-based energy-aware data aggregation routing protocol in the internet of things using the Capuchin search algorithm and fuzzy logic," *Peer-to- Peer Netw. Appl.* 16, 189-209, 2022.

- [4]. AnuMonisha A., Reshmi T. R., Murugan K., "ERNSS-MCC: Efficient relay node selection scheme for mission-critical communication using machine learning in VANET," *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, 16, 1761-1784, 2023.
- [5]. Rai A. Kumar, Daniel A. K., "FEEC: Logic mờ kết hợp IOT based energy efficient clustering protocol for WSN," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manage.*, 14(1), 297-307, 2023.
- [6]. Kumar A., Dhaliwal B. S., Singh D., "CL-HPWSR: Cross-layer-based energy efficient cluster head selection using hybrid particle swarm wild horse optimizer and stable routing in fuzzy-enabled smart farming applications," *Trans. Emerg. Telecommunications Technol.* 34, 2023. <https://doi.org/10.1002/ett.4725>.
- [7]. John J., Rodrigues P., "MOTCO: Multi-objective taylor crow optimization algorithm for cluster head selection in energy aware wireless sensor network," *Mob. Networks*, 1509-1525, 2019.
- [8]. Arya G., Bagwari A., Chauhan D. S., "Performance analysis of deep learning based routing protocol for an efficient data transmission in 5G WSN communication," *IEEE Access.* 1-1, 2022. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3142082>
- [9]. Kalyani G., Chaudhari S. S., "Cross-layer security MAC aware routing protocol for fuzzy networks," *Wireless Pers. Commun.*, 123, 935-957, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-09163-y>
- [10]. Tan N. D., Nguyen D., Hoang H., Le T., "EEGT: Energy efficient Grid-based routing protocol in wireless sensor networks for fuzzy applications," *Comput.*, 12, 103, 2023.

AUTHORS INFORMATION

Nhi Thi Bui, Phuong Thi Bui

Faculty of Electronic and Computer Engineering, University of Economics
- Technology for Industries, Vietnam