

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM



MAI HÀ THI

GIẢI PHÁP ĐỊNH TUYỂN TỐI ƯU HÓA NĂNG
LƯỢNG TRÊN MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY
NGẦM ĐA MIỀN

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ HỆ THỐNG THÔNG TIN

Đà Nẵng, Tháng 9 năm 2025

PHẦN MỞ ĐẦU

Giới thiệu

Mạng cảm biến không dây (WSN) đang được triển khai rộng rãi trong nhiều ứng dụng, đặc biệt là nông nghiệp thông minh. Việc tích hợp WSN với IoT và phân tích dữ liệu giúp tối ưu hóa tài nguyên, nâng cao năng suất cây trồng. Tuy nhiên, các nút cảm biến trong WSN có tài nguyên hạn chế về tính toán, bộ nhớ và năng lượng, đồng thời cần triển khai nhiều cảm biến để bao phủ các khu vực rộng lớn.

Đối với mạng cảm biến không gian ngầm (WUSN), những hạn chế này trở nên rõ rệt hơn do môi trường khắc nghiệt dưới lòng đất. Độ ẩm cao, áp suất lớn và các chất ăn mòn làm giảm tuổi thọ cảm biến, đồng thời tín hiệu truyền thông cũng gặp khó khăn lớn do suy giảm bởi đất và vật liệu ngầm. Việc cung cấp năng lượng và bảo trì các cảm biến trong môi trường này cũng là những thách thức kỹ thuật và chi phí đáng kể.

Mạng Internet là hệ thống đa miền sử dụng giao thức BGP để trao đổi thông tin, đòi hỏi khả năng mở rộng và bảo mật cao. Trong mạng cảm biến đa miền, các nút chuyển tiếp giúp mở rộng kết nối nhưng vẫn thiếu giải pháp định tuyến cụ thể để tối ưu hóa phạm vi phủ sóng và tuổi thọ mạng. Việc tối ưu hóa định tuyến với nhiều ràng buộc vẫn còn khó khăn, và BGP gặp vấn đề trong việc phản hồi nhanh với thay đổi cấu trúc mạng.

Tính cấp thiết của đề tài

Những nghiên cứu về WUSN đã đạt được những bước tiến lớn trong việc tạo ra các giao thức định tuyến để tăng cường độ phủ sóng và độ tin cậy, nhưng vẫn còn một số vấn đề quan trọng cần được giải quyết. Tối ưu hóa năng lượng là một trong những mối quan tâm quan trọng nhất vì nó cần thiết để đảm bảo tính bền vững lâu dài của các mạng này. Tuy nhiên, có một số hạn chế như một

số điểm dưới đây:

- Khi tiếp cận WUSN, hầu hết các nhà nghiên cứu mô hình hóa suy hao đường truyền, truyền dữ liệu bằng LoRAWan và đánh giá mức tiêu thụ năng lượng.
- Các nghiên cứu trước đây chủ yếu đã áp dụng việc phát triển các giao thức định tuyến mạng vào các tập dữ liệu trong môi trường hai chiều.
- Hầu hết các giả thuyết mạng hiện tại đều đề cập đến mạng đồng nhất, trong khi mạng bất đồng nhất vẫn còn hạn chế trong nghiên cứu.
- Nhược điểm chính là thiếu một lý thuyết giải quyết việc truyền dữ liệu giữa các khu vực và tính đến thời gian sống liên vùng của mạng.
- Các nút chuyển tiếp hoặc nút thu trong cấu trúc mạng được sử dụng để giao tiếp với các nút dưới bề mặt xa trạm gốc. Cuối cùng, chi phí lắp đặt nút chuyển tiếp và trạm cơ sở có thể là khoảng chi phí lớn. Như vậy việc tối ưu hóa việc sử dụng các nút chuyển tiếp trong mạng sẽ là vấn đề cần giải quyết.

Nghiên cứu về định tuyến trong WUSN cần đặc biệt chú trọng đến những thách thức thực tế xuất phát từ tính chất riêng của các kênh truyền của chúng. Các mô hình định tuyến truyền thống thường không phù hợp do các đặc điểm tiêu tán năng lượng riêng biệt dưới lòng đất. Bài toán về tối ưu hóa năng lượng trên mạng cảm biến không dây đặc biệt mạng cảm biến không dây ngầm là việc chọn đường đi từ nút nguồn đến nút đích sao cho chi phí năng lượng tích lũy là thấp nhất, đồng thời có thể duy trì kết nối trong toàn mạng. Luận án này tập trung vào việc phát triển các giải pháp định tuyến mới, giải quyết trực tiếp vấn đề tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng trong các mô phỏng định tuyến của mạng WUSN, sử dụng mô hình năng lượng suy hao chính xác hơn. Mục tiêu là chứng minh hiệu quả của các giải pháp định tuyến này thông qua mô phỏng trên một hoặc nhiều khu vực, từ đó cho thấy tiềm năng kéo dài đáng kể tuổi thọ hoạt động tổng thể của mạng.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Luận án nghiên cứu và đề xuất các giải pháp tối ưu hóa năng lượng cho mạng cảm biến không dây ngầm, với mục tiêu phát triển các thuật toán và mô hình định tuyến có thể cải thiện hiệu suất năng lượng trong các điều kiện đơn hoặc đa miền quan sát.

- Mô hình hóa các cách định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm: Xây dựng các mô hình toán học cho các phương pháp định tuyến nhằm tối ưu hóa năng lượng trong mạng cảm biến không dây ngầm.
- Đề xuất thuật toán tối ưu hóa năng lượng: Nghiên cứu và phát triển các thuật toán định tuyến có khả năng tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng trong mạng cảm biến không dây ngầm, với khả năng hoạt động trong các miền quan sát đơn và đa.
- Cài đặt thực nghiệm các thuật toán đề xuất: Tiến hành triển khai và thử nghiệm các thuật toán trên môi trường thực tế hoặc mô phỏng để đánh giá hiệu quả về việc tiết kiệm năng lượng và duy trì thời gian sống trong mạng.
- Đánh giá và so sánh hiệu quả: Thực hiện các phép đo lường cụ thể để đánh giá hiệu quả của các thuật toán về năng lượng và độ tin cậy trong các mạng cảm biến không dây ngầm, với mục tiêu tăng cường hiệ

Đóng góp của luận án

Luận án nghiên cứu bài toán tối ưu hóa thời gian sống mạng WUSN với kiến trúc phân tầng dựa trên mô hình suy hao đường truyền. Nghiên cứu này xem xét việc tổ chức và quản lý dữ liệu truyền của các nút cảm biến trong mạng thông qua phân cụm theo từng vùng quan sát, và giới thiệu độ đo mới cho đa vùng quan sát. Tuy nhiên việc thiết kế một mô hình định tuyến WUSN là một thách thức chính mà luận án nhằm giải quyết. Bên cạnh đó, định tuyến trong mạng giúp tăng tuổi thọ của các nút cảm biến ngầm được sử dụng trong nhiều ứng dụng. Để đạt được mục tiêu chung này, luận án đặt ra các mục tiêu nghiên cứu cụ thể sau:

- Về mặt lý thuyết
 - **Đề xuất một mô hình định tuyến mạng dựa trên phương pháp phân cụm để tối ưu hóa năng lượng trong WUSN .**
 - Thứ nhất, luận án thiết kế mô hình toán học mới từ việc mở rộng thuật toán phân cụm cho WUSN bằng cách kết hợp các nút triển khai và ngầm. Để tối ưu hóa việc lựa chọn các cụm trưởng CH, luận án thiết lập hàm mục tiêu với mô hình tiêu thụ năng lượng và vị trí CH tùy chọn dựa trên biểu thức dạng đóng.
 - Thứ hai, luận án đề xuất một giao thức mạng phân cụm, bao gồm thuật toán lựa chọn CH tối ưu và phương pháp định tuyến hiệu quả. Giao thức này được thiết kế để áp dụng cho các nghiên cứu trường hợp thực tế, có tính đến các yếu tố như suy hao đường truyền. Các thực nghiệm đã được thực hiện để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình và giao thức đề xuất.
 - **Đề xuất một mô hình định tuyến mạng dựa trên đa đồ thị cho việc giám sát nhiều khu vực trong WUSN**
 - Xây dựng một mô hình toán học và các giải pháp cho mạng cảm biến không dây đồng nhất kết hợp các nút chuyển tiếp. Một số định lý và tính chất của mô hình toán học được đề xuất.
 - Xây dựng thuật toán định tuyến mới được đề xuất để tìm đường đi ngắn nhất của mỗi cảm biến thông qua một bảng băm.
 - Kết quả thực nghiệm hiệu quả của thuật toán mới so với các thuật toán liên quan.
- Về mặt ứng dụng: các mô hình và thuật toán định tuyến đề xuất giải quyết các thách thức trong mạng đa miền. Các thuật toán định tuyến là xương sống cho các hệ thống ứng dụng của mạng cảm biến không dây ngầm. Khả năng mở rộng định tuyến từ mạng đơn vùng đến đa miền trong việc tối ưu hóa năng lượng để tăng thời gian sống mạng trong các hệ thống phức tạp và đa dạng.

Cấu trúc của luận án

- **Giới thiệu:** Bối cảnh nghiên cứu được trình bày, tiếp theo là tổng quan và những hạn chế của giao thức định tuyến trong WSN. Các vấn đề nghiên cứu được xác định, cùng với các mục tiêu. Phương pháp tiếp cận và phương pháp nghiên cứu được phác thảo, chi tiết nội dung, phạm vi và giới hạn của nghiên cứu. Cuối cùng, những đóng góp chính và cấu trúc của luận án thảo luận.
- **Chương 1:** Giới thiệu về kiến thức về mạng cảm biến không dây ngầm, kiến trúc của mạng WUSN, các thành phần, và các mô hình truyền sóng đặc thù dưới lòng đất, nhấn mạnh sự ảnh hưởng của các yếu tố như tần số, độ sâu chôn lấp, độ ẩm và thành phần của đất đến suy hao tín hiệu. Bên cạnh đó các phần như bài toán tối ưu trong mạng, vấn đề định tuyến trong mạng đa chiều. Các khái niệm liên quan về mạng, phát biểu bài toán định tuyến và các ứng dụng của bài toán cũng được nêu trong chương này.
- **Chương 2:** Chương này tập trung vào việc đề xuất các phương pháp tối ưu hóa năng lượng để kéo dài tuổi thọ của WUSN trong cả môi trường đơn vùng và đa vùng. Trong đó, đặc biệt chú trọng đến giải pháp định tuyến liên vùng cho các kịch bản đa vùng. Việc mô hình hóa từ mô hình toán học đến việc xây dựng các thuật toán đề xuất đã được thực hiện và kiểm chứng thông qua phân tích. Phần cuối của chương sẽ trình bày cụ thể các thuật toán định tuyến mới được phát triển trong luận án.
- **Chương 3:** Chương này trình bày các thực nghiệm để chứng minh hiệu quả của các mô hình và thuật toán đã đề xuất ở Chương 2 thông qua các bằng chứng thực nghiệm. Các thuật toán sử dụng Matlab để thiết lập, với các tham số mạng, kênh truyền và năng lượng đã được định nghĩa rõ ràng. Các kịch bản thực nghiệm được thiết kế để so sánh hiệu năng của các thuật toán đề xuất (cho cả đơn vùng và đa vùng) với các thuật toán kinh điển như PEGASIS, HLEACH và FCM. Các kịch bản sẽ khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau như mật độ nút, sự thay đổi về độ sâu chôn lấp, và

các thuộc tính của đất.

- **Kết luận và hướng phát triển:** Chương kết luận sẽ tổng hợp lại những kết quả chính mà luận án đã đạt được. Điều này khẳng định lại các đóng góp khoa học chính: mô hình toán học WUSN mới, thuật toán định tuyến hiệu quả cho kịch bản đơn vùng, và giải pháp định tuyến cho kịch bản đa vùng, cùng với các kịch bản thực nghiệm về độ chính xác dựa trên các tiêu chí được đặt ra trong Chương 2 và 3. Bên cạnh đó cũng đưa ra các hạn chế còn tồn tại trong quá trình nghiên cứu. Từ đó đồng thời nhìn nhận các hạn chế còn tồn tại trong quá trình nghiên cứu. Phần cuối chương là hướng phát triển trong tương lai được thảo luận trong mạng WUSN.

Chương 1

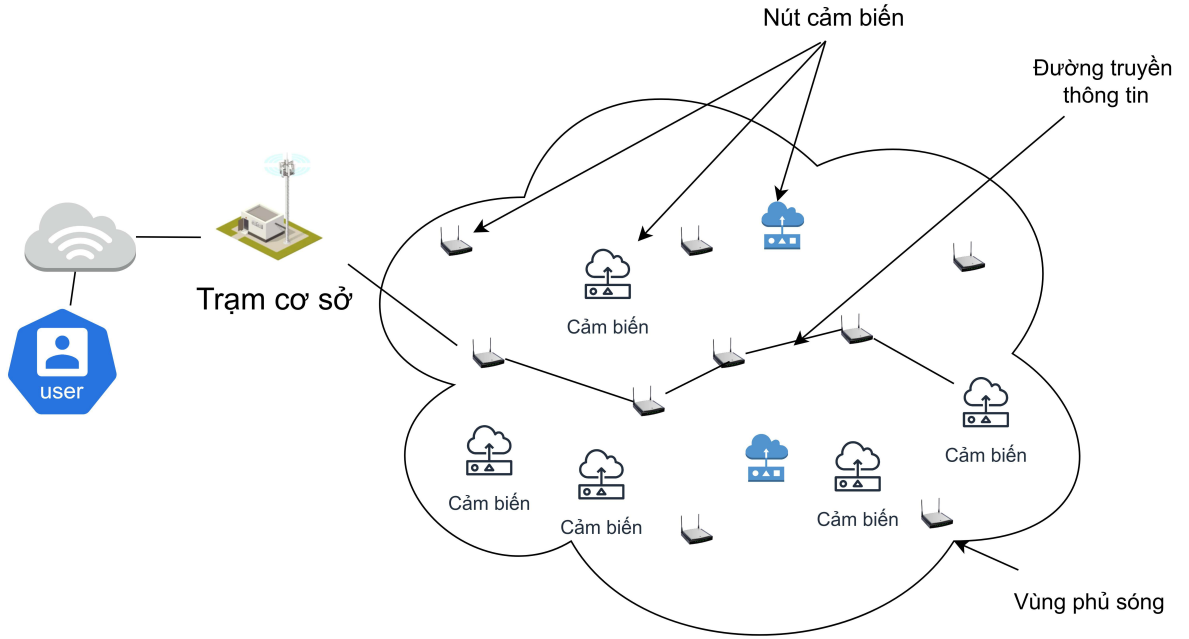
TỔNG QUAN VỀ MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY NGẦM ĐA MIỀN

1.1 Giới thiệu

Chương này trình bày tổng quan cơ sở lý thuyết về mạng cảm biến không dây và các mở rộng của nó cụ thể là mạng cảm biến không dây ngầm. Các hướng tiếp cận chính để giải bài toán tối ưu hóa về định tuyến trong mạng cảm biến theo hướng tiếp cận từ thuật toán heuristic và thuật toán cận xấp xỉ. Khái niệm về bước sóng trong mạng cảm biến không dây ngầm, các mô hình tính toán năng lượng trong WSN, mạng đa miền cũng được giới thiệu trong chương này. Phần cuối sẽ trình bày về các môi trường thực nghiệm và tiêu chí đánh giá các thực nghiệm trong WSN. Những khái niệm cơ bản này làm tiền đề cho những phương pháp định tuyến nhằm sử dụng năng lượng một cách hiệu quả trong mạng cảm biến không dây ngầm.

1.2 Mạng cảm biến không dây

Mạng cảm biến không dây bao gồm một số lượng lớn các nút cảm biến có khả năng giao tiếp thông qua các kênh không dây để truyền tải dữ liệu đến trạm cơ sở. Mạng WSN đã được sử dụng trong nhiều ứng dụng, bao gồm giám sát động vật, môi trường, giám sát gas nước bị rò rỉ trong đất, và giám sát công trình, cũng như phát hiện cháy và chăm sóc sức khỏe. Các mạng này có khả năng thu thập dữ liệu về môi trường (ví dụ, đọc ánh sáng hoặc nhiệt độ) và sau



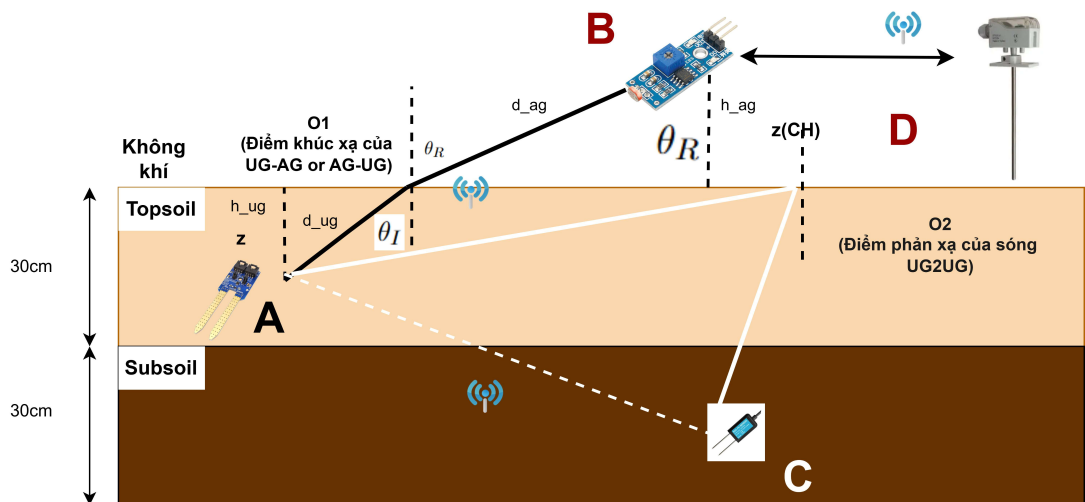
Hình 1.1: Mạng cảm biến không dây.

đó gửi thông tin này đến trạm cơ sở.

1.3 Các mở rộng của mạng cảm biến không dây

1.3.1 Mạng cảm biến không dây ngầm

Mạng cảm biến không dây ngầm (WUSN) gồm các nút cảm biến chôn dưới đất, truyền dữ liệu tới cổng thu (ngầm hoặc trên mặt đất) qua sóng điện từ (EM) hoặc giao tiếp từ trường cảm ứng (MI) [1, 2]. Dữ liệu được chuyển đa bước cho tới cổng thông tin, đóng vai trò nút đích [3].



Hình 1.2: Các kênh truyền thông trong mạng cảm biến không dây ngầm

Ba kênh truyền cơ bản [4] – minh hoạ ở Hình 1.2 – gồm:

- UG2UG (ngầm $\rightarrow$ ngầm): Hai nút dưới đất truyền tín hiệu xuyên qua các lớp đất (từ A tới C).
- UG2AG (ngầm $\rightarrow$ mặt đất): Nút dưới đất gửi dữ liệu lên nút/trạm trên mặt đất; tín hiệu phải xuyên đất rồi lan trong không khí ($A \rightarrow B$), đòi hỏi công suất cao và chịu suy hao lớn.
- AG2UG (mặt đất $\rightarrow$ ngầm): Nút/trạm trên mặt đất truyền xuống nút ngầm ($B \rightarrow A$), quy trình đảo ngược UG2AG.

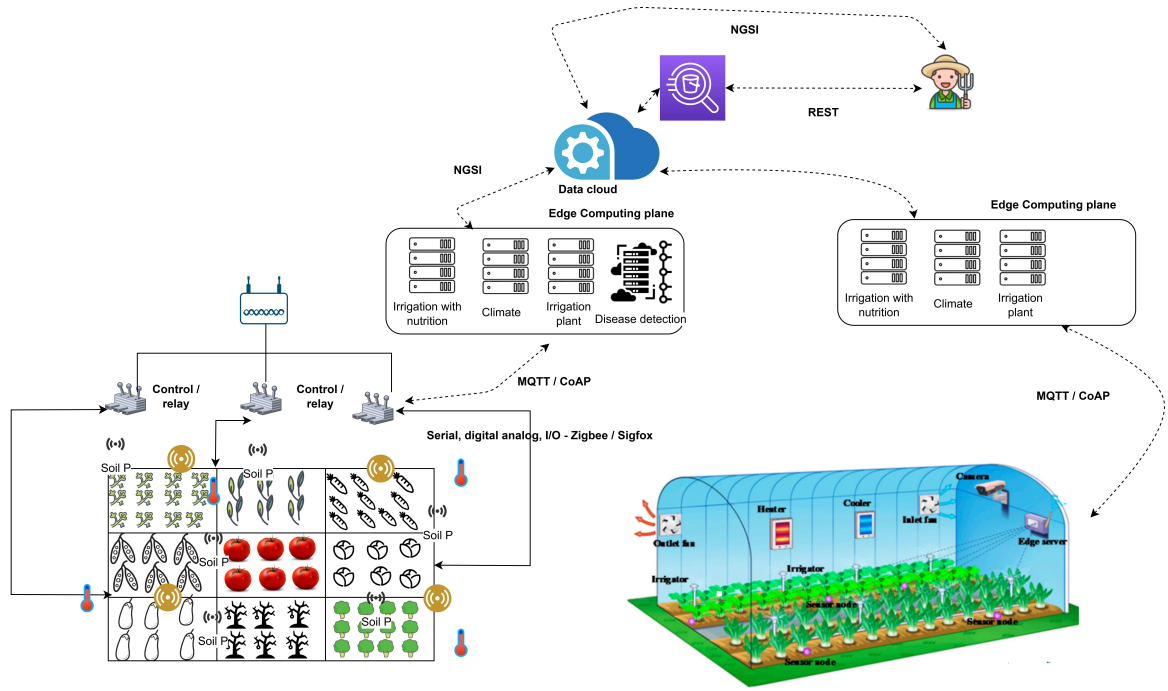
Các phương thức này phản ánh tính phức tạp của kênh truyền WUSN và là cơ sở lựa chọn giải pháp thiết kế giao tiếp, anten và quản lý năng lượng trong mạng.

1.3.2 Mạng cảm biến không dây ngầm đa miền

WUSN hoạt động hoàn toàn dưới lòng đất nên không cần cáp nối, khắc phục hạn chế của các hệ thống cũ phải đưa dây từ cảm biến ngầm lên bề mặt. Trong kiến trúc đa miền, mạng được chia thành nhiều miền (liên mạng con). Dữ liệu muốn tới trạm cơ sở (BS) phải được định tuyến xuyên miền: mỗi miền có bộ định tuyến riêng, giao thức nội miền tính đường trong miền, còn giao thức liên miền trao đổi thông tin giữa các bộ định tuyến để nối các miền lại với nhau.

Nghiên cứu hiện nay chủ yếu đo suy hao pathloss và tối ưu phần cứng, nhưng ít xét đến các tham số lớp mạng và mối liên hệ tiêu thụ năng lượng [5]. Ứng dụng thực tế rất đa dạng:

- Thành phố thông minh – cảm biến áp suất đặt trong ống dẫn khí/nước phát hiện rò rỉ; cảm biến ven biển đo rung động, nhiệt độ đất phục vụ cảnh báo thiên tai.
- Nông nghiệp chính xác – mỗi loại cây được gắn cảm biến chuyên biệt theo dõi dinh dưỡng đất, pH, nhiệt độ, độ ẩm (Hình 1.3) [6].



Hình 1.3: Ứng dụng đa miền cho mô hình nông nghiệp

1.4 Các giao thức định tuyến

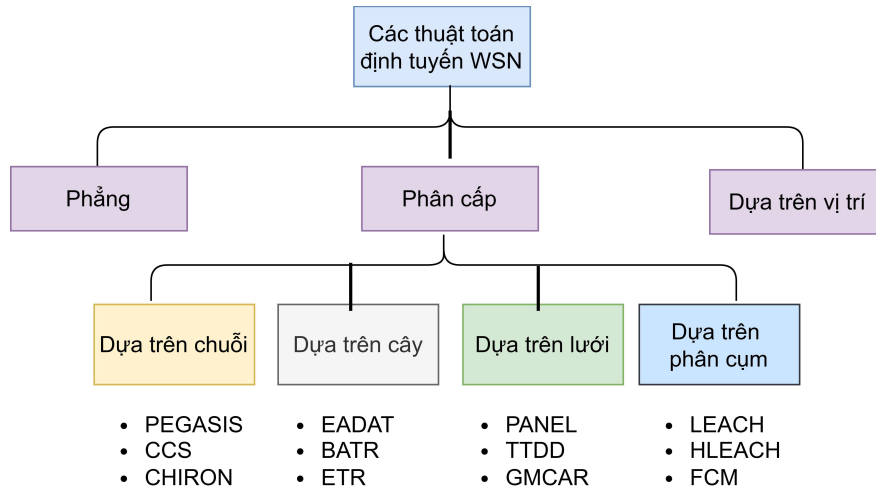
Định tuyến giúp router chọn đường cho gói tin bằng cách tra địa chỉ đích trong bảng định tuyến. Có hai cách:

- Định tuyến tĩnh – quản trị viên nhập thủ công các tuyến cố định.
- Định tuyến động – router tự trao đổi thông tin, gồm:
 - Vector khoảng cách: định kỳ gửi bảng định tuyến cho láng giềng; ít thông tin chi tiết, băng thông cập nhật cao.
 - Trạng thái liên kết: quảng bá LSA để mỗi router nắm toàn cảnh mạng, chạy thuật toán “đường ngắn nhất”; hội tụ nhanh, hỗ trợ CIDR/VLSM nhưng đòi hỏi CPU và bộ nhớ lớn.

L luận án sẽ tập trung nghiên cứu định tuyến động dạng trạng thái liên kết, trong đó các router trao đổi bản tin LSA theo từng vòng hội tụ để tối ưu đường đi.

1.4.1 Các giao thức phổ biến

Trong WSN, mật độ nút có thể tới 20 nút/m³, nghĩa là mạng có hàng trăm có thể lên đến hàng nghìn nút; vì vậy cần kiến trúc định tuyến bền vững



Hình 1.4: Tổng quan về các giao thức định tuyến phổ biến

[7]. Hình 1.4 tóm lược ba họ thuật toán chính nhằm rút ngắn đường truyền, giảm tiêu hao năng lượng và kéo dài tuổi thọ mạng [8]:

- Cấu trúc phẳng: mọi nút đồng cấp, truyền đa bước; nút gần BS làm nút chuyển tiếp.
- Cấu trúc phân cấp: chia cụm, cluster-head gom và chuyển dữ liệu. Nhánh chuỗi (PEGASIS, CCS, CHIRON), nhánh cây (EADAT, BATR, ETR) và PANEL.
- Cấu trúc theo vị trí: chọn tuyến đường đi dựa tọa độ địa lý.

Trong các giao thức trên thì trong luận án sử dụng các thuật toán FCM, LEACH, PEGASIS để so sánh với thuật toán đề xuất về hiệu năng.

1.4.2 Tổng quan các giải pháp định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm

Phần lớn nghiên cứu WUSN hiện nay ưu tiên mô hình hóa suy hao năng lượng, ít chú trọng tối ưu định tuyến. Một số nhóm thử nghiệm LoRaWAN thu thập dữ liệu, nhưng vẫn tập trung vào xây dựng mô hình tính suy hao đường truyền hơn là hiệu suất mạng [9–11]. Nguyễn Thị Tâm đề xuất chọn số nút chuyển tiếp để kéo dài thời gian sống [12], Panda mở rộng mô hình suy hao nhiều môi trường song thiếu cơ chế định tuyến [13]. Yao dùng phân cụm Otsu để tiết kiệm năng lượng nhưng chỉ dựa trên ảnh bề mặt, không áp dụng cho cảm

biên ngầm [14]. Các nghiên cứu 3D khác vẫn giới hạn bởi độ sâu hoặc coi mạng 2D [15]; bản nâng cấp FCM trong [16] chưa tính đến tổn hao lớn dưới đất.

Do đó, cấu trúc mạng tối ưu là yếu tố then chốt để đảm bảo độ tin cậy và tiết kiệm năng lượng cho WUSN. Luận án sẽ đề xuất kiến trúc ba chiều thông minh, xét đến giới hạn chôn sâu và vị trí cảm biến, ưu tiên truyền đa chặng ngắn thay vì vài bước nhảy dài nhằm giảm suy hao và kéo dài tuổi thọ mạng.

1.4.3 Tổng quan các giải pháp định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm đa miền

Internet là mạng đa miền: các hệ tự trị (AS) trao đổi lộ trình qua BGP, quyết định đường đi nhờ các thuộc tính AS Path, Local Pref [8, 17]. Bên trong từng miền, OSPF (link-state, thuật toán Dijkstra) tìm đường ngắn nhất nhưng chỉ dựa trên topo và phải bảo đảm khả năng mở rộng, bảo mật. Kiến trúc mạng mới đòi hỏi cơ chế định tuyến linh hoạt hơn các mô hình cũ [18].

Với WSN đa miền, các nút chuyển tiếp được thêm để mở rộng phủ sóng và kết nối. Nhiều công trình tối ưu số nút hoặc phạm vi bao phủ [19–22] nhưng chưa đề cập định tuyến 3D cụ thể. Các nghiên cứu phân luồng/ cải tiến BGP [23, 24] cải thiện chất lượng song vẫn khó đáp ứng kịp thời các ràng buộc động của mạng đa miền.

1.5 Mô hình suy hao

Trong WSN, suy hao và nhiễu quyết định chất lượng tín hiệu lẫn tuổi thọ mạng. Luận án tính năng lượng. Các liên kết giữa các nút trên mặt đất với nhau, mô hình không vật cản và đa đường sẽ được sử dụng để tính về năng lượng.

$$E_T(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{fs}}d^2 & \text{for } d < d_0 \\ lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{\text{mp}}d^4 & \text{for } d \geq d_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Đối với các nút là liên kết từ nút dưới mặt đất lên trên mặt đất thì luận án sử dụng mô hình điều chỉnh Friis của Akyildiz và các cộng sự [25]. Suy hao đường truyền tính toán L_{UG} (đơn vị dB) theo mô hình điều chỉnh Friis được đơn giản hóa trong phương trình dưới đây. Các giá trị α (1/m) và β (radian/m)

phụ thuộc vào điều kiện đất. Điều này là sự suy hao do sự hấp thụ vật liệu và sự thay đổi pha tương ứng.

$$L_{UG-AG}(dB) = 6.4 + 20 \log(d_{ug}) + 20 \log(\beta) + 8.62\alpha d_{ag} \quad (1.2)$$

L_{UG-AG} chỉ đo tỷ lệ suy hao; muốn ước tính năng lượng trong WSN từ đó xác định trong các hàm mục tiêu cần:

- **Bước 1 – dB $\rightarrow$ Công suất**

$$P = P_0 10^{\frac{L_{UG-AG}}{10}}, \quad P_0 = 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W} [26].$$

- **Bước 2 – Công suất $\rightarrow$ Năng lượng**

$$E = P t, \quad t = 15 \text{ phút} = 900 \text{ s} [27].$$

Quy trình tuân theo chuẩn IEC về chuyển đổi dB-W-J, giúp gộp mức suy hao điều chỉnh Friis vào tính tổng tiêu thụ mạng.

1.6 Môi trường mô phỏng và các tiêu chí đánh giá

L luận án sử dụng MATLAB làm công cụ mô phỏng lại các thuật toán từ nghiệm phương trình giải tích đưa ra. Các thuật toán định tuyến sẽ được đánh giá theo bốn tiêu chí chính, trình bày ngắn gọn như sau:

1. Thời gian sống mạng: Xác định thời điểm mạng ngừng hoạt động do mất kết nối hoặc vùng phủ sóng quan trọng; đây là mục tiêu hàng đầu cần kéo dài tối đa.
2. Năng lượng tiêu thụ: Đo tổng năng lượng dùng và mức cân bằng tải giữa các nút; tiết kiệm năng lượng góp phần giảm kích thước pin và tăng tuổi thọ mạng.
3. Độ trễ đến đích: Ưu tiên chọn đường ngắn, rút ngắn thời gian gói tin tới trạm thu, phù hợp với nút dùng vi-điều khiển ít bộ nhớ.
4. Tỷ lệ chuyển gói thành công: Phản ánh độ tin cậy truyền dữ liệu; đặc biệt quan trọng vì các nút không có bộ đệm lớn.

Trong luận án, hai thước đo trọng yếu là thời gian sống mạng và năng lượng tiêu thụ sẽ được dùng để so sánh, nhằm tìm được điểm cân bằng tối ưu giữa tuổi thọ, hiệu suất và độ tin cậy của mạng.

1.7 Kết luận chương

Chương này cung cấp cái nhìn tổng quan về mạng WUSN, bao gồm các khái niệm cơ bản và sự khác biệt giữa định tuyến nội miền và liên miền cũng như các thuật toán định tuyến phân cụm. Đặc biệt, luận án phân tích bài toán tối ưu hóa thời gian sống mạng. Đó là một yếu tố then chốt trong WSN. Chương này cũng giới thiệu các thuật toán định tuyến điển hình sẽ được sử dụng làm cơ sở so sánh trong phần thực nghiệm, đồng thời thiết lập khung mô phỏng và các tiêu chí đánh giá hiệu suất cụ thể cho các thuật toán được đề xuất trong các chương tiếp theo.

- Kết quả nghiên cứu này được công bố trong công trình [1] của luận án.

Chương 2

ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ĐỊNH TUYẾN TRÊN MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY NGẦM ĐA MIỀN

Mạng cảm biến không dây ngầm là mạng bao gồm các nút cảm biến được triển khai dưới lòng đất. Bài toán tối ưu thời gian sống của mạng cảm biến không dây ngầm được các nhà nghiên cứu quan tâm gần đây do các nút cảm biến được triển khai ở dưới đất bị cạn kiệt năng lượng nhanh chóng. Chương này đi sâu vào việc tìm các giải pháp định tuyến mới theo hướng mô hình hóa giải tích và đề xuất các thuật toán nhằm tối ưu hóa năng lượng tiêu hao và kéo dài thời gian sống trong toàn mạng. Hai bảng sau trình bày tổng quát về các giải pháp được triển khai trong luận án.

Giải pháp định tuyến mới trên mạng cảm biến không dây ngầm đơn miền dựa trên phân cụm mờ

Đối tượng giám sát: 1 khu vực và bộ cảm biến

Đóng góp chính

- Xây dựng mô hình tính toán năng lượng tiêu hao trong toàn mạng với việc xem xét việc truyền dưới lòng đất.
- Xây dựng thuật toán định tuyến dựa trên mô hình đã đưa ra.
- Xây dựng cơ sở dữ liệu về vị trí cảm biến với đặc tính dưới lòng đất và cài đặt thử nghiệm trên MATLAB để chứng minh mô hình chính xác của các thuật toán.

Giải pháp định tuyến mới trên mạng cảm biến không dây ngầm đa miền dựa trên độ đo cảm biến

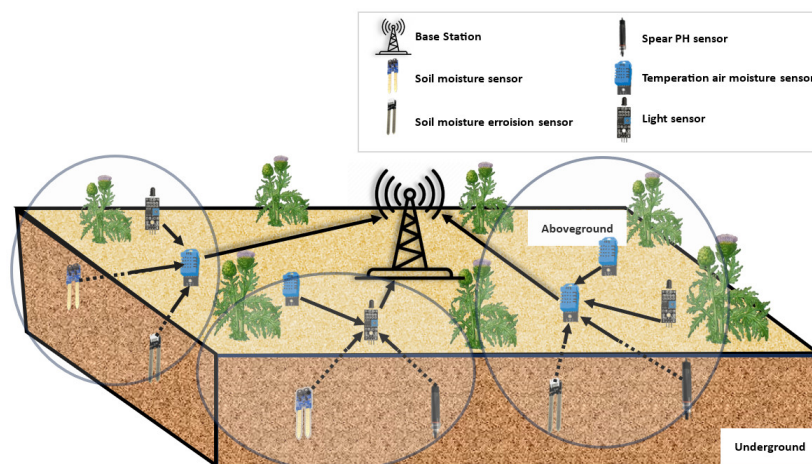
Đối tượng giám sát: k khu vực quan sát, k bộ cảm biến và p nút chuyển tiếp để kết nối các vùng với nhau

Đóng góp chính

- Xây dựng một độ đo mới không chỉ dựa vào khoảng cách, năng lượng còn lại, mà còn dựa trên ảnh hưởng đến các nút lân cận và loại cảm biến.
- Mô hình mạng mới cho định tuyến mạng cảm biến liên vùng và trong vùng dựa trên các nút chuyển tiếp.
- Các thuật toán xây dựng ma trận định tuyến với chỉ số mới và cập nhật toàn bộ mạng sau khi định tuyến.
- Xây dựng bộ dữ liệu về vị trí các cảm biến với các phân phối khác nhau và thể hiện độ sâu hoặc chiều cao của nút cảm biến.
- Thực nghiệm với các kịch bản khác nhau để chứng minh độ chính xác của mô hình mạng.

2.1 Giải pháp định tuyến mới trên mạng cảm biến không dây ngầm đơn miền dựa trên phân cụm mờ

Cho một mạng WUSN trong không gian ba chiều, có M nút cảm biến trong khu vực được phân bố đều và rải rác trên và dưới mặt đất để thu thập thông tin. Các cảm biến được gắn cố định theo vị trí và phân bố đồng đều trong cấu hình và chức năng. Các cảm biến được đặt trong phạm vi bao phủ lẫn nhau. Một số giả thuyết được đưa ra như sau với minh họa trong Hình 2.1:

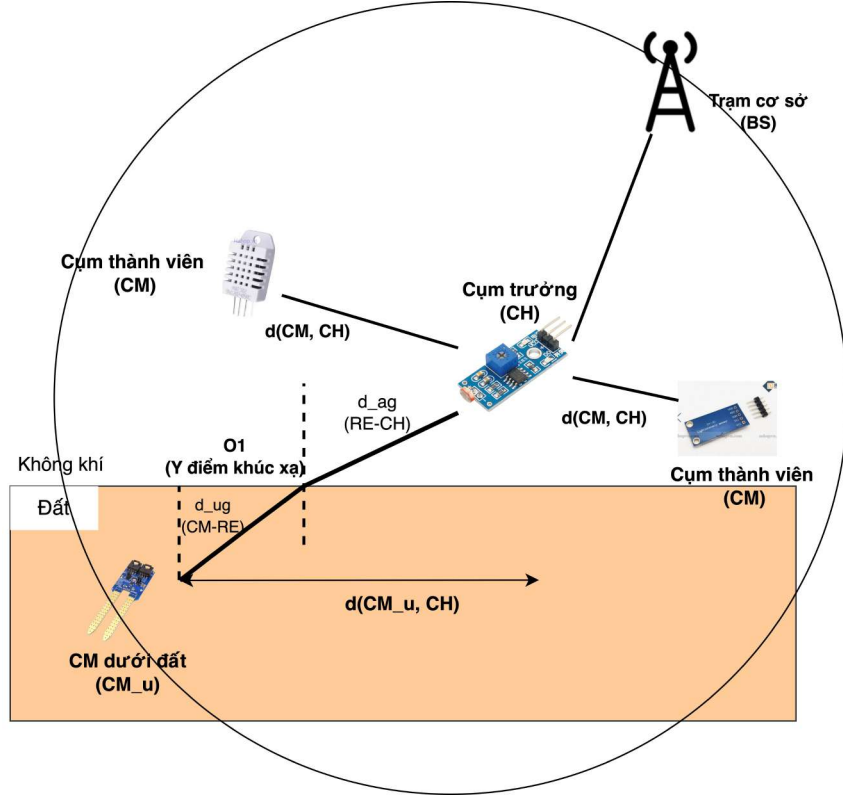


Hình 2.1: Tổng quát về các giả thuyết mô hình mạng đề xuất

- Năng lượng của các nút cảm biến được khởi tạo ban đầu là giống nhau, mặc dù trong mô hình các cảm biến được sử dụng cho các mục đích khác nhau.
- M các nút cảm biến được gán cho một cụm nhất định C . Số lượng nút trên mặt đất và dưới lòng đất được chia dựa trên tỷ lệ của các tập dữ liệu. Số lượng thành viên trong các cụm không giống nhau.
- Tất cả các thành viên CH đều được đặt trên mặt đất, và một cụm sẽ hình thành bao gồm các nút trên mặt đất và dưới mặt đất. Sau đó, các CH sẽ thu thập thông tin từ các nút ngầm và trên mặt đất, sau đó truyền thông tin đến BS. Lịch trình truyền tải sẽ được thiết lập với một giờ cố định.
- Trong một cụm, sẽ có k nút ngầm chịu trách nhiệm thu thập thông tin về dưới mặt đất đến các nút CH trên mặt đất.
- Giao tiếp đơn bước (single-hop) được sử dụng làm bước truyền trong mô hình này. Có nghĩa rằng các nút thành viên trong cụm kết nối trực tiếp với cảm biến CH và các CH chuyển tiếp dữ liệu đến BS trong phạm vi giao tiếp.
- BS sẽ được đặt cố định tại vị trí trung tâm của khu vực quan sát.
- Sau mỗi vòng, tất cả các nút sẽ được tính toán với năng lượng còn lại để BS xem xét cập nhật các nút trong mạng cho các vòng tiếp theo dựa trên năng lượng còn lại. Từ đó việc phân các nút cảm biến vào cụm cũng như phân cụm trưởng sẽ được tính toán lại.

2.1.1 Mô hình toán học

Luận án đề xuất mô hình định tuyến WUSN dựa trên phân cụm mờ (fuzzy clustering). Khác với phân cụm rõ, nơi mỗi nút chỉ thuộc một nhóm, phân cụm mờ cho phép một nút tham gia nhiều nhóm với mức độ khác nhau, phản ánh tốt tính không chắc chắn và dữ liệu chồng lấn. Cách tiếp cận này đặc biệt phù hợp với dữ liệu đa nguồn, đa đặc trưng trong mạng cảm biến ngầm. Thuật toán FCM của Bezdek [28] đã chứng minh phân cụm mờ cho chất lượng vượt trội khi các vùng cụm giao nhau, cơ sở để thiết kế giải pháp mới trong luận án.



Hình 2.2: Mô hình hoá các thành viên của một cụm

Các nghiên cứu trước chỉ xét năng lượng bề mặt, bỏ qua suy hao dưới đất. Luận án bổ sung thành phần suy hao này được tính theo mô hình Friis điều chỉnh cho liên kết cảm biến ngầm đến cụm trưởng [29] được đưa vào hàm mục tiêu định tuyến. Kết hợp phân cụm mờ với mô hình suy hao, giải pháp giúp tối ưu mạng WUSN trong điều kiện thực tế.

$$E_{CM_u-CH} = 6 + 20\log\|X_i - V_j\| + 20\log\beta + 8.69\alpha\|X_i - V_j\| \quad (2.1)$$

Định nghĩa [30] : Mô hình năng lượng tiêu hao toàn mạng đối với mạng như giả thuyết mạng ban đầu.

$$E_{total} = C(E_{CH-BS}) + (M - C)(E_{CM-CH}) + k(E_{CM_u-CH}) \quad (2.2)$$

Thông tin nhiễu và sự tiêu hao năng lượng là hai phần hàm tuyến tính

với nhau ta có thể viết lại công thức (2.2):

$$\begin{aligned}
E_{total} = & C(lE_{DA} + l\epsilon_{mp} \sum_{j=1}^C \|V_j - X_{BS}\|^4) \\
& + (M - C)(lE_{elec} + l\epsilon_{fs} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|X_i - V_j\|^2) \\
& + k(6 + 20\log\|X_i - V_j\| + 20\log\beta + 8.69\alpha\|X_i - V_j\|)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Luận án bổ sung thành phần suy hao dành cho các nút ngầm (từ hệ số k trở đi) vào công thức tính tổng năng lượng mạng. Mô hình mới xét riêng tổn hao khi tín hiệu đi qua đất và không khí, giúp ước tính chuẩn xác hơn năng lượng mất mát của nút ngầm và nâng cao hiệu quả toàn mạng.

Luận án tập trung vào việc cực tiểu hóa năng lượng tiêu thụ trong toàn mạng, từ đó xây dựng hàm mục tiêu của mô hình như sau:

$$\begin{aligned}
J = & C \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|V_j - X_{BS}\|^4 \right) \\
& + (M - C) \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|X_i - V_j\|^2 \right) \\
& + k \left(6 - \frac{20}{\ln 10} + 20\log\beta + (8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|X_{i_{ug}} - V_j\| \right) \longrightarrow Min
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Mờ hóa hàm tính tổng năng lượng (2.4) được một hàm mục tiêu mới.

$$\begin{aligned}
J_{(u_{ij}, V)} = & C \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|V_j - X_{BS}\|^4 \right) \\
& + (M - C) \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|X_i - V_j\|^2 \right) \\
& + k \left(6 - \frac{20}{\ln 10} + 20\log\beta + (8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|X_{i_{ug}} - V_j\| \right) \longrightarrow Min
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Hàm mục tiêu của bài toán định tuyến được biểu diễn bởi (2.5), trong đó độ thuộc u_{ij} và tâm cụm V_j là hai yếu tố quan trọng cần được phân bổ cho mỗi cụm trong tình huống này. Cụ thể, u_{ij} đại diện cho độ thuộc của cảm biến i đối với cụm j trong mô hình phân cụm mờ, cho thấy mức độ cảm biến i thuộc về cụm j . Trong khi đó, V_j là tâm của cụm j , nơi mà dữ liệu từ các cảm biến trong cụm sẽ được tập trung và xử lý. Mục tiêu chính của bài toán là phân phối các

cảm biến giữa các cụm, sau đó chọn ra cụm trưởng CH. Dữ liệu sẽ được truyền từ CM đến CH và từ CH đến BS một cách trực tiếp. Sau mỗi vòng lặp, BS sẽ đánh giá năng lượng còn lại của các cảm biến trong mạng và từ đó có thể thực hiện tái phân cụm hoặc tái chọn CH nếu cần thiết. Để đảm bảo tính khả thi của mô hình, một số điều kiện về hạn chế giao tiếp được đưa vào, bao gồm các ràng buộc sau đây:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m = 1 \quad u_{ij} \in [0, 1]; \quad \forall i = 1, \bar{M} \quad (2.6)$$

$$\|X_i - V_j\| \leq 2Tr \quad (2.7)$$

$$\|V_j - X_{BS}\| \leq 9Tr \quad (2.8)$$

Bài toán tối ưu phi tuyến đặt các ràng buộc kết nối: cảm biến đến CH không quá $2Tr$; CH đến BS không quá $9Tr$ (BS có bán kính $\approx 8Tr$). Mỗi cảm biến chỉ tham gia một cụm, bảo đảm toàn mạng luôn liên thông. Khi giải tích hàm mục tiêu, luận án thu được hai nghiệm tường minh cho u_{ij} là độ thuộc của mỗi nút vào các cụm và V_j là tâm các cụm được chọn làm cụm trưởng chứng minh chi tiết được trình bày trong toàn văn.

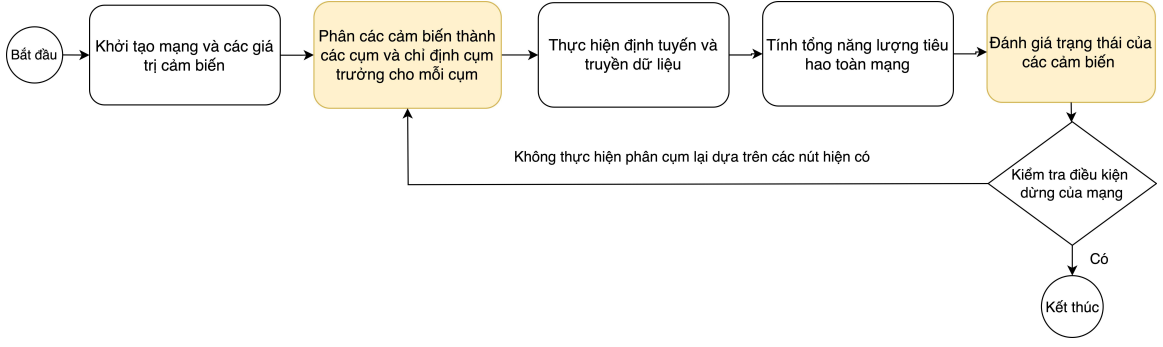
$$V_j = \frac{\frac{B}{A}}{\sqrt[3]{\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{2A}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{A} \right)^2 + \frac{B^3}{27A^3}}} - \sqrt[3]{\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{2A}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{A} \right)^2 + \frac{B^3}{27A^3}} + X_{BS} \quad (2.9)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^C \left(\frac{\epsilon_{mp}\|V_j - X_{BS}\|^4 + (M-C)\epsilon_{fs}\|X_i - V_j\|^2 + k\left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha\right)\|X_{iug} - V_j\|}{\epsilon_{mp}\|V_j - X_{BS}\|^4 + (M-C)\epsilon_{fs}\|X_i - V_j\|^2 + k\left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha\right)\|X_{iug} - V_j\|} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (2.10)$$

□

2.1.2 Thuật toán FCM-WUSN

Thuật toán khởi tạo vị trí, năng lượng, mức tín hiệu và tần suất lấy mẫu cho từng cảm biến, đồng thời xác định vùng phủ. Tiếp theo, các nút được phân



Hình 2.3: Lưu đồ tổng quan về quá trình định tuyến mạng

cụm và chọn cụm trưởng. Sau mỗi lần mạng cập nhật, thuật toán tái phân cụm dựa trên các nghiệm v_j và u_{ij} .

Algorithm 1 FCM-WUSN Thuật toán phân cụm FCM-WUSN

Đầu vào : Số lượng cảm biến M ; Số cụm C ; tham số mờ m ; tập các cảm biến $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$
Đầu ra : Ma trận độ thuộc μ , và ma trận các tâm cụm V

- 1: $t \leftarrow 1$
- 2: $j \leftarrow 1$
- 3: Khởi tạo ma trận độ thuộc u_{ij} thỏa mãn với ràng buộc (2.6)
- 4: **while** $\|u^t - u^{t-1}\| > \epsilon$ **do**
- 5: $t \leftarrow t + 1$
- 6: Tính vector tâm cụm V theo công thức (2.9)
- 7: Cập nhật lại ma trận độ thuộc u theo công thức (2.10)
- 8: **end while**
- 9:
- 10: **Chỉ định cụm cho mỗi nút:**
- 11: Lấy chỉ số j sao cho $U_{ij} = \max(U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{iC})$.
- 12: Cụm mà nút i thuộc về là cụm j .
- 13:
- 14: **While vòng lặp thêm điều kiện phân cụm trưởng cho mạng:**
- 15: **while** $j < C$ **do**
- 16: **if** $(d(X_i, V_j) = \min(\forall X_i \in C_j) \vee X_j \text{ trn mt } \emptyset t)$ **then**
- 17: **if** $d(X_i, BS) < 9Tr$ **then**
- 18: $X_i(CH) \leftarrow true$ – Phân làm cụm trưởng tại vị trí X_i
- 19: **end if**
- 20: **end if**
- 21: **if** $d(X_i, X_j(CH)) < 2Tr$ **then**
- 22: $X_i(non - CH) \leftarrow true$
- 23: **end if**
- 24: **end while**

Thuật toán FCM-WUSN cải tiến FCM: tính độ thuộc mờ cho mỗi nút theo cả khoảng cách lẫn suy hao năng lượng. Tâm cụm được xác lập, còn cụm trưởng được chọn trong các nút mặt đất nằm trong vùng phủ BS. Cách làm này phân cụm đồng nhất, tối ưu tài nguyên và giảm tiêu hao, giúp mạng WUSN ổn định hơn.

Giao thức định tuyến dựa trên cụm được đề xuất trong nghiên cứu này cho việc định tuyến hiệu quả trong WUSN thực hiện việc định tuyến các gói tin

Algorithm 2 Thuật toán định tuyến trong mạng

Đầu vào: Số lượng cảm biến M ; tập các cảm biến $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$; ngưỡng của tổng năng lượng $thresTotalEC$; ngưỡng số vòng dừng lại $thresStopRounds$; Vị trí BS BS

Đầu ra: $flagStopNetwork$

```

1:  $flagStopNetwork \leftarrow false$ 
2:  $totalEC \leftarrow 0$ 
3:  $deadNodes \leftarrow 0$ 
4:  $repeatRounds \leftarrow 0$ 
5: while  $flagStopNetwork = false$  do
6:   for  $i \leftarrow 1$  to  $M$  do
7:     for  $j \leftarrow 1$  to  $C$  do
8:       if  $d(X_i, X_j(CH)) > 2Tr$  then
9:         Tìm kết nối với một nút lân cận trong phạm vi  $2Tr$ , và đánh dấu kết nối.
10:      else
11:        Đánh dấu hai nút  $X_i$  và  $X_j(CH)$ 
12:      end if
13:    end for
14:  end for
15:  Tính toán  $totalEc$  dựa trên công thức (2.3)
16:  if
17:    ( $totalEC \leq thresTotalEC$  or  $deadNodes \geq thresDeadNode$ ) and  $repeatRounds = thresStopRounds$ 
18:  then
19:     $flagStopNetwork \leftarrow true$ 
20:  else
21:    if  $totalEC \leq thresTotalEC$  or  $deadNodes \geq thresDeadNode$  then
22:       $repeatRound \leftarrow repeatRound + 1$ 
23:    end if
24:    Cập nhật năng lượng và trạng thái của  $X_i$ .
25:  end if
26: end while

```

được thu thập bởi các CM đến CH thông qua các nút thành viên cụm hoặc trực tiếp. Các CH chuyển thẳng đến BS và duy trì tuyến đường để thực hiện việc định tuyến hiệu quả các gói dữ liệu. Thuật toán định tuyến mô tả cách cơ sở dữ liệu được lấy từ CMs đến BS.

2.1.3 Độ phức tạp thuật toán

Thuật toán 1: Phân cụm mờ FCM-WUSN Độ phức tạp của Thuật toán để hình thành cụm dựa trên thuật toán đề xuất FCM-WUSN dựa trên N điểm dữ liệu và C cụm. Tính toán tâm có $V : O(N \times C)$ cho mỗi lần lặp, Cập nhật giá trị thành viên $u : O(N \times C^2)$. Vì thuật toán FCM-WUSN lặp lại các bước này cho đến khi hội tụ (với T , độ phức tạp tổng thể của thuật toán FCM-WUSN là $O(T \times N \times C^2)$). Nếu số lượng cụm C và số lần lặp T là nhỏ, FCM-WUSN có thể hoạt động hiệu quả cho các bài toán phân cụm nhỏ đến vừa. Tuy nhiên, đối với các tập dữ liệu lớn và số lượng cụm lớn, độ phức tạp tính toán có thể trở thành một vấn đề. Từ đó, sau phần định tuyến, tại điểm

cuối của mỗi vòng, Thuật toán cập nhật lại trạng thái các nút trong mạng có thể giảm độ phức tạp FCM-WUSN bằng việc cập nhật lại các nút trong mạng, đặc biệt lọc các nút có năng lượng thấp rồi loại bỏ chúng khỏi quá trình phân cụm. Từ đó có thể dẫn đến được T nhỏ lại, giúp thuật toán đề xuất hoạt động hiệu quả hơn trong mạng cảm biến lớn.

Thuật toán 2: Định tuyến trong mạng Thuật toán 2 có các vòng lặp chính sau:

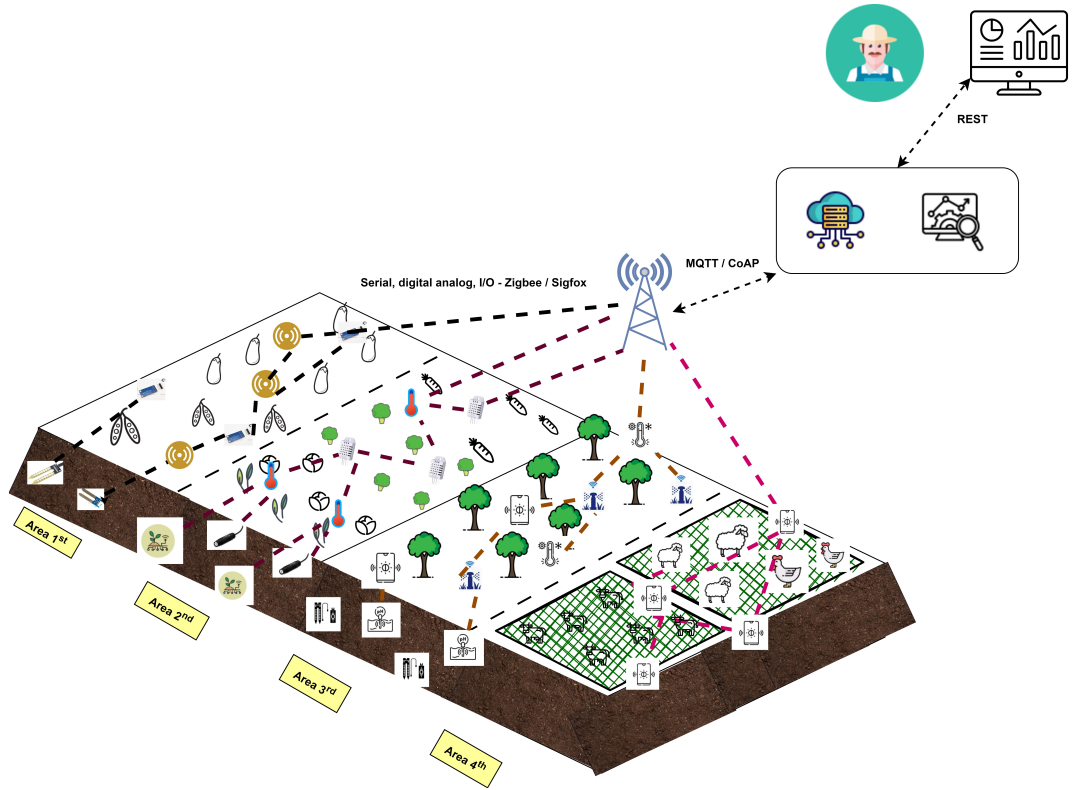
- Vòng lặp **While** (Dòng 5 - 15): Vòng lặp này tiếp tục cho đến khi `flagStopNk` được gán giá trị `true`. Vòng lặp có thể chạy tối đa `thresStopRounds` lần.
- Vòng lặp **For** thứ nhất (Dòng 7 - 10): Vòng lặp này duyệt qua tất cả các cảm biến từ 1 đến M , tức là vòng lặp này chạy M lần.
- Vòng lặp **For** thứ hai (Dòng 8 - 10): Vòng lặp này duyệt qua các cảm biến con của mỗi cảm biến từ 1 đến C . Do đó, vòng lặp này chạy C lần cho mỗi cảm biến trong vòng lặp ngoài.

Mỗi lần lặp qua vòng lặp **For** thứ hai, các phép toán bên trong (kiểm tra điều kiện, tìm kết nối, đánh dấu kết nối, tính toán tổng năng lượng `totalEC`, và kiểm tra các điều kiện) mất $O(1)$ thời gian. Vậy độ phức tạp cho mỗi lần lặp trong vòng **While** là $O(M \times C)$. Nếu vòng **While** chạy tối đa `thresStopRounds` lần, tổng độ phức tạp của thuật toán sẽ là:

$$O(\text{thresStopRounds} \times M \times C) \quad (2.11)$$

2.2 Giải pháp định tuyến mới trên mạng cảm biến không dây ngầm đa miền dựa trên độ đo cảm biến

Thuật toán định tuyến phân cụm dựa trên FCM tiết kiệm năng lượng trong mạng đơn miền, nhưng dễ gây nghẽn và cạn pin nhanh ở nút cụm trưởng (CH). Trong WUSN, các nút ngầm ngoài vùng phủ CH còn bị mất liên lạc, khiến hao năng lượng gia tăng do môi trường đất. Vì vậy, cần chuyển sang định tuyến đa miền. Luận án đề xuất một độ đo mới để hình thành cấu trúc đa miền linh



Hình 2.4: Ý tưởng tổng quát về mô hình truyền đa miền

hoạt, giúp quét nhanh mọi miền quan sát, tận dụng đặc tính truyền dưới lòng đất và kéo dài tuổi thọ mạng WUSN quy mô lớn

Cho một mạng cảm biến không dây trong không gian ba chiều, nơi đó có k khu vực quan sát và mỗi khu vực có M nút cảm biến làm nhiệm vụ thu thập dữ liệu về các thông tin cả trên và dưới mặt đất. Phân bố của các cảm biến là phân bố đều ở cả trên và dưới mặt đất nhằm hỗ trợ việc thu thập thông tin một cách hiệu quả. Các cảm biến được đặt gần nhau và trong bán kính phủ sóng của nhau. Một số giả định được đưa ra như sau, như được minh họa trong Hình 2.4.

1. Một WUSN bao gồm k vùng, mỗi vùng có M nút cảm biến như trong Hình 2.5. Một tập hợp các nút cảm biến trong tất cả các vùng được xem xét:

$$S^k = \{S_1^k, \dots, S_M^k\}$$
2. Có l nút chuyển tiếp hoạt động như các nút trung gian để mở rộng vùng phủ sóng. $R = \{R_1, \dots, R_l\}$ cho toàn mạng. Tất cả các nút chuyển tiếp đều được đặt trên mặt đất. Các nút chuyển tiếp có năng lượng lớn và có thể giao tiếp liên vùng.
3. Các nút cảm biến ở trong một vùng có cấu hình giống nhau về năng lượng

đường đi. Điều này đảm bảo rằng tuyến đường được chọn tiết kiệm năng lượng, kéo dài tuổi thọ hoạt động của mạng. Đơn vị là J.

2. **Vị trí của cảm biến (D)** $^{[k]}v_j^{(2)}(x, y, z)$ đại diện cho vị trí của cảm biến v_j . Từ thông tin này, có thể xem xét đo khoảng cách giữa hai nút từ đó hình thành đường đi.
3. **Loại của cảm biến (T)** $^{[k]}v_j^{(3)}$ đại diện cho loại cảm biến. Thông thường, nó sẽ bằng k vùng. Cảm biến có thể truyền dữ liệu đến một cảm biến khác cùng loại.
4. **Độ ảnh hưởng giao tiếp của hàng xóm (N)** $^{[k]}v_j^{(4)} : N(^{[k]}v_j^{(i)})$ là các hàng xóm của cảm biến v_j . Nó đại diện cho ảnh hưởng của nút đó trong mạng dựa trên số lượng giao nhau của các nút láng giềng.
5. **Bán kính của cảm biến (R)** $^{[k]}v_j^{(5)}$ là giá trị bán kính của cảm biến v_j . Bán kính truyền thông của các khu vực khác nhau là khác nhau. Nó có thể được coi là một đánh giá về sức mạnh và độ tin cậy của các liên kết truyền thông giữa các khu vực.

Đánh giá về độ tương quan giữa hai cảm biến trong độ đo mới

EDTNR có thể được biểu diễn dưới dạng một vectơ trong không gian nhiều chiều tương ứng cho nhiều thành phần. $EDTNR = (E, D, T, N, R)$. Giải thích cho từng tiêu chí của sự tương quan giữa hai cảm biến như sau:

1. Sự chênh lệch lớn về năng lượng còn lại giữa hai nút dẫn đến sự tương quan thấp giữa hai nút cảm biến. Sự khác biệt năng lượng nhỏ giữa hai nút sẽ mang lại sự tương quan cao hơn.
2. Khoảng cách ngắn giữa hai cảm biến giúp tín hiệu mạnh hơn và truyền dữ liệu tốt hơn, do đó giảm độ trễ và tiết kiệm năng lượng. Ngược lại, nếu khoảng cách quá xa và vượt ra ngoài phạm vi kết nối, tín hiệu sẽ yếu đi, không thể truyền dữ liệu, dẫn đến sự tương quan thấp giữa hai nút.
3. Mối quan hệ giữa hai nút dựa trên loại khu vực. Nếu cùng một khu vực, giá trị mối quan hệ là 1. Nếu chúng không thuộc cùng một khu vực, chúng

không thể giao tiếp với nhau. Điều này sẽ được xử lý như cơ chế tương tự giữa các loại khu vực và phạm vi của các nút cảm biến.

4. Số lượng giao điểm của các nút cảm biến trong các vùng lân cận càng lớn, dẫn đến sự tương quan thấp. Nếu sự tương quan giữa hai cảm biến cao, chúng có thể được chọn làm điểm đến tiếp theo để truyền dữ liệu. Tuy nhiên, có quá nhiều nút trong các vùng lân cận của hai cảm biến. Điều này tạo ra các vòng lặp, và thông tin sẽ quay vòng trong các nút đó. Chúng không thể phá vỡ các vòng lặp để tìm ra các con đường mới để truyền tải về trạm cơ sở.

2.2.2 Đánh giá độ đo mới

Luận án đề xuất độ đo Flexmetric (F) dựa trên khoảng cách Euclid. F thỏa bốn tiêu chí của một metric và chi phối trực tiếp tiêu hao năng lượng, tầm truyền và bán kính phủ sóng. Đồng thời, F còn phải chứng minh được tính tương quan giữa các nút lân cận, bảo đảm phản ánh chính xác mức liên kết và tương tác của cảm biến trong khu vực.

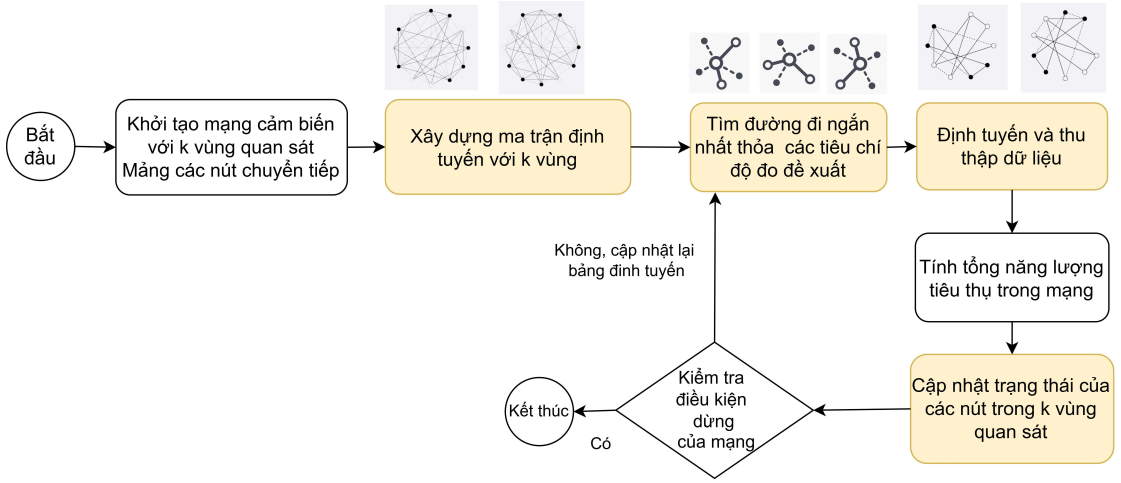
$$e^{-\|N_{[k]}v_j^{(4)} \wedge N_{[k]}v_l\|} + e^{-\|N_{[k]}v_j^{(4)} \wedge N_{[k]}v_t^{(4)}\|} > e^{-\|N_{[k]}v_t^{(4)} \wedge N_{[k]}v_l^{(4)}\|} \quad (2.13)$$

Với điều kiện $x > y$, $y > z$, $x > z$, áp dụng những giả định này vào các ràng buộc này.

$$\begin{cases} |y| < |x| + |y| - 2|y| \Leftrightarrow 2|y| < |x| \\ |z| < |y| + |z| - 2|z| \Leftrightarrow 2|z| < |y| \\ |z| < |z| + |x| - 2|z| \Leftrightarrow 2|z| < |x| \end{cases}$$

2.2.3 Thuật toán Multi Graphs WUSN

Đoạn lưu đồ khối Hình 2.6 mô tả quá trình hoạt động của một hệ thống mạng cảm biến, trong đó các nút cảm biến và các miền quan sát được kết nối và theo dõi liên tục. Hệ thống liên tục kiểm tra trạng thái nút; nếu có nút không đạt yêu cầu, tuyến được tái cấu hình, đồng thời tính toán năng lượng tiêu thụ và cập nhật trạng thái nhằm giữ hiệu suất tối ưu. Trong lớp nội vùng, cảm biến gửi dữ liệu về nút chuyển tiếp để xử lý hoặc nén; ở lớp liên vùng, các nút chuyển



Hình 2.6: Lưu đồ chung của mô hình định tuyến WUSN cho đa miền quan sát

tiếp đưa dữ liệu qua nhiều bước tới trạm cơ sở. Cấu trúc hai lớp này rút ngắn cự ly truyền, tiết kiệm năng lượng và nâng cao khả năng mở rộng mạng.

Algorithm 3 Xây dựng ma trận định tuyến

Đầu vào : k miền quan sát; số lượng cảm biến trong k vùng $M = [M_1, \dots, M_k]$ p số lượng nút chuyển tiếp trong vùng; danh sách các nút chuyển tiếp $RN = [RN_1, RN_2, \dots, RN_p]$; Danh sách tập cảm biến trong vùng thứ k^{th} $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$ trong đó có $X1 = [X_1^1, X_2^1, \dots, X_M^1]$

Đầu ra : Ma trận định tuyến

```

1: routingMatrix  $\leftarrow$  containers.Map()
2: while  $t < regions$  do
3:   while  $i < X_t$  do
4:      $j \leftarrow i + 1$ 
5:     while  $j < X_t$  do
6:       if khoảng cách  $(X_t^i, X_t^j) \leq 2radius(X_t^i)$  then
7:         Thiết lập  $X_t^j$  ở trong routingMatrix của  $X_t^i$ 
8:       end if
9:     end while
10:    if khoảng cách  $(X_t^i, BS) \leq 3radius(X_t^i)$  then
11:      Đánh dấu  $X_t^i$  có thể kết nối BS
12:    end if
13:  end while
14: end while

```

Ma trận kết nối được lập ngay từ đầu để ghi rõ quan hệ giữa cảm biến, nút chuyển tiếp và mọi liên kết khả thi trong mỗi khu vực. Do các nút chôn cố định, ma trận chỉ cần tạo một lần và những liên kết không thiết lập được ban đầu cũng không thay đổi về sau. Nhờ đó, mọi truy vết hay tối ưu đường truyền sau này chỉ việc tra cứu ma trận, không phải tái cấu hình.

Việc đánh dấu các nút có thể truyền thẳng tới trạm gốc bảo đảm dữ liệu đi nhanh và ổn định. Thông tin kết nối lưu hệ thống trong ma trận giúp hình thành định tuyến đơn giản và truy xuất thuận tiện. Khi kiểm thử hay cải tiến,

chỉ cần tham chiếu ma trận, giảm tối đa thao tác phức tạp.

Algorithm 4 Tìm đường đi ngắn nhất của một nút

Đầu vào : chỉ số nút đang xét, ma trận định tuyến; mảng các nút chuyển tiếp kết nối BS
Đầu ra : shortest-path from index-node

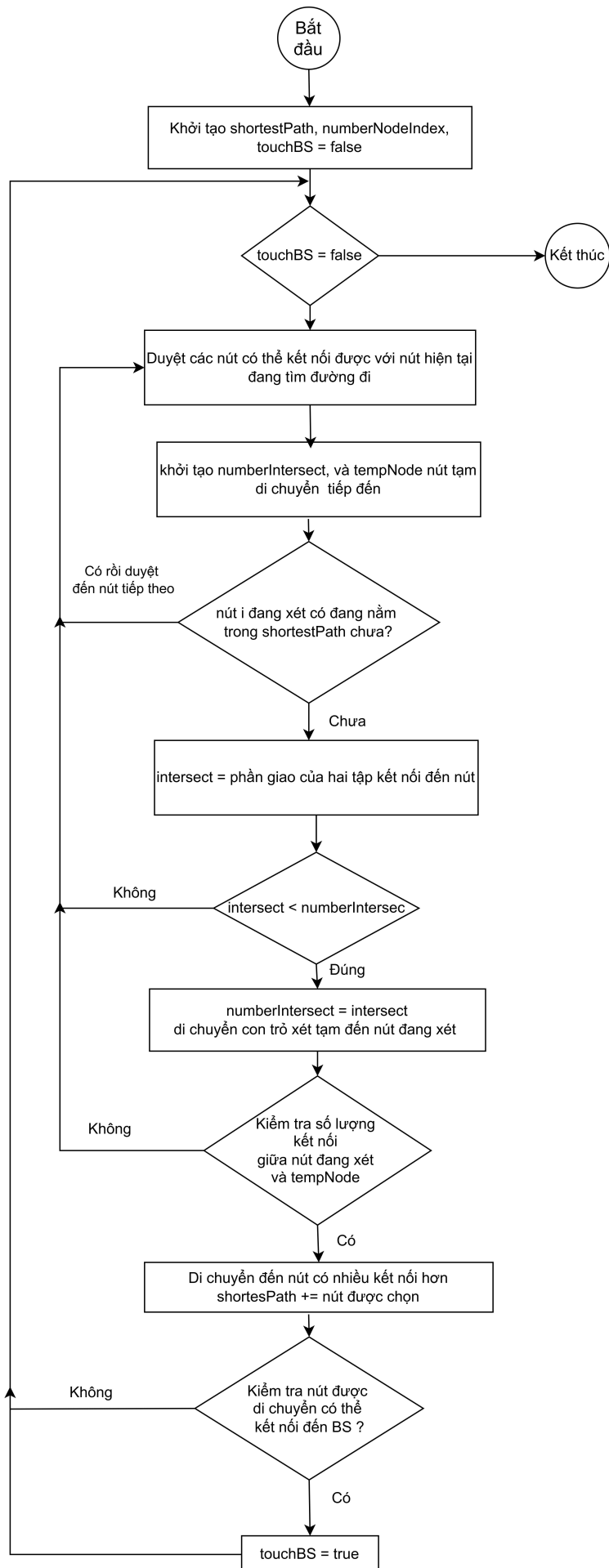
```

1:  $touchBS \leftarrow false$ 
2: Khởi tạo  $shortestPath(1, 1) \leftarrow index - node$ 
3: Lấy ra được tập các nút liên kết  $X_t$  từ bảng định tuyến  $connectedNodes$ 
4:  $index \leftarrow 1$ 
5: while  $touchBS = false$  do
6:   Khởi tạo  $numConIntersect \leftarrow maxNumInter$ 
7:   Khởi tạo vị trí đến tiếp theo  $numberIndex \leftarrow maxIndex$ 
8:   Vòng lặp tìm ra được nút tiếp theo có kết nối thuận lợi để truyền tiếp năng lượng
9:   for  $l$  do lặp trong node  $i$  trong  $connectedNodes$ 
10:    if  $n$  then node  $i$  không trong  $shortestPath$ 
11:       $intersectSet1 = getConnectTableNodes(i)$ 
12:       $intersectSet2 = getConnectableNodes(lastNodeInShortestPath)$ 
13:       $intersect = intersectSet1 \cap intersectSet2$ 
14:      if  $intersect \leq numConIntersect$  then
15:         $numConIntersect \leftarrow intersect$ 
16:         $numberIndex \leftarrow X_t^i$ 
17:      else
18:        if  $numberIndex \neq maxIndex$  &  $C = numConIntersect$  then
19:           $N_{ti} \leftarrow size(X_t^i)$ 
20:           $N_{te} \leftarrow size(X_t^{numberIndex})$ 
21:          if  $N_{te} > N_{ti}$  then
22:             $numberIndex \leftarrow X_t^i$ 
23:          end if
24:        end if
25:      end if
26:    end if
27:  end for
28:   $index \leftarrow index + 1$ 
29:  Kiểm tra xem thử sau phần tìm thì phần đường đi hiện tại có tối được với lại BS
30:   $shortestPath(1, index) \leftarrow numberIndex$ 
31:  if  $X_t^{numberIndex}$  ket noi den BS then
32:     $touchBS \leftarrow true$ 
33:  else
34:    if  $numberIndex \neq maxIndex$  then
35:       $X_t \leftarrow routing - matrix_{numberIndex}$ 
36:    else
37:       $touchBS \leftarrow true$ 
38:    end if
39:  end if
40: end while

```

Quá trình tìm đường đi ngắn nhất giữa các nút trong một mạng là một phần quan trọng trong các thuật toán định tuyến, đặc biệt trong các mạng truyền thông hoặc các mạng cảm biến không dây. Sau khi thuật toán tìm ra đường đi ngắn nhất từ một nút đến các nút khác, bước tiếp theo là thực hiện định tuyến trong toàn mạng, đảm bảo rằng dữ liệu có thể được truyền tải một cách hiệu quả từ nguồn đến đích.

Nghiên cứu này tập trung vào việc tối ưu hóa định tuyến trong Mạng cảm biến không dây ngầm đa đồ thị bằng cách chọn từng nút trong ma trận định



Hình 2.7: Lưu đồ các bước về chọn đường đi ngắn nhất của một nút

Algorithm 5 Thuật toán định tuyến tổng quát trong mạng

Đầu vào : k vùng quan sát; số lượng cảm biến trong k vùng $M = [M_1, \dots, M_k]$ p số lượng nút chuyển tiếp trong vùng; danh sách các nút chuyển tiếp $RN = [RN_1, RN_2, \dots, RN_p]$; Danh sách tập cảm biến trong vùng thứ k^{th} $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$ trong đó có $X1 = [X_1^1, X_2^1, \dots, X_M^1]$; năng lượng khởi tạo toàn mạng; $\alpha = 0.03, \beta = 0.1$: các hệ từ thẩm giả định trong đất

Đầu ra : flagStopNetwork

```

1: routingMatrix  $\leftarrow$  containers.Map()
2: while flagStopNetwork = false do
3:   while  $t < regions$  do
4:     while  $i < X_t$  do
5:       shortestPath $_t^i \leftarrow$  Algorithm 2
6:       if nút đang xét đã kết nối đến BS then
7:         while  $j \leq shortestPath_t^i.size() - 1$  do
8:            $next \leftarrow j + 1$ 
9:           Tính năng lượng cho việc truyền - dựa vào cách tính được định nghĩa năng lượng theo
           độ đo đề xuất
10:          if  $next = shortestPath_t^i.size()$  then
11:            Đánh dấu nút  $X_t^j$  kết nối được của nút  $X_t^i$  trong ma trận định tuyến
12:          end if
13:        end while
14:      end if
15:    end while
16:    Tính tổng năng lượng tiêu thụ totalEC và số lượng nút kết nối connectedNodes
17:    if  $totalEC \leq (\alpha initEnergy X_t.size()) \mid (X_t.size() - connectedNodes) \leq (\beta X_t.size())$  then
18:      flagStopNetwork  $\leftarrow$  true
19:    else
20:      Cập nhật lại trạng thái dựa trên thuật toán
21:    end if
22:  end while
23: end while

```

tuyến và xác định đường đi ngắn nhất từ các nút này đến BS. Việc lựa chọn nút tiếp theo để truyền tải bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như loại cảm biến, khoảng cách, mức năng lượng và tác động của các nút lân cận trong tập hợp. Lưu đồ của thuật toán định tuyến được đề xuất được chi tiết trong thuật toán trên (4). Các nút chuyển tiếp được cân nhắc có thể truyền qua được nhiều miền làm nhiệm vụ trung chuyển đối với những nút hoặc miền nằm xa trạm BS. Thuật toán định tuyến sẽ tính toán và điều chỉnh các tuyến đường sao cho tối ưu với tài nguyên mạng hiện có, bao gồm cả việc cập nhật năng lượng của mạng.

2.2.4 Độ phức tạp thuật toán

Thuật toán xây dựng ma trận định tuyến: sẽ chạy qua k regions, và với mỗi nút cảm biến sẽ duyệt qua các cảm biến khác, như vậy ta sẽ có $\frac{X_t(X_t-1)}{2}$. Như vậy với hai vòng lặp lồng nhau thì ta sẽ có độ phức tạp của thuật toán sẽ là $O(regions \times X_t^2)$

Thuật toán tìm đường đi ngắn nhất : Độ phức tạp của thuật toán tìm đường đi ngắn nhất một nút đến BS $O(n \times t)$ trong thực hiện t lần, và vòng

lập ngoài có thể lặp tối đa n lần. t là số lượng nút ở trong *connectedNodes* và n số bước cần thiết để đến BS.

Thuật toán định tuyến tổng quát: Thuật toán sẽ chạy đến khi nào biến *flagStopNetwork* được thay đổi thành *true*, bên trong vòng lặp chính, thì sẽ có vòng lặp này số lần là số lượng vùng quan sát *regions* như vậy sẽ có độ phức tạp $O(\text{regions})$ tại dòng số 3. Tại dòng số 4 thì có được các nút trong mỗi vùng là X_t . Sau từ đó duyệt qua các nút và đi tìm đường đi ngắn nhất tới BS, độ phức tạp này phụ thuộc vào thuật toán 4. Dòng số 8 thuật toán có *shortestPath_tⁱ.size()* và thực hiện tính toán năng lượng truyền tải từ đó có độ phức tạp $O(k')$ trong đó có $k' = \text{shortestPath_tⁱ.size()}$ là số lượng bước trong đường đi. Từ đó có tổng độ phức tạp tổng thể của thuật toán này được mô tả

$$O(\text{regions} \cdot X_t \cdot k \cdot n \cdot t + \text{regions} \cdot M \cdot z)$$

Thuật toán cập nhật bảng định tuyến: Độ phức tạp phần cập nhật lại bảng định tuyến $O(\text{regions} \times M \times z)$ trong đó M là số lượng nút trong mỗi vùng, và z là số nút chuyển tiếp liên kết của các nút.

2.3 Kết luận chương

Chương 2 giới thiệu hai mô hình định tuyến WUSN, được xây dựng bằng khai triển Taylor và kiểm chứng bằng bất đẳng thức Cauchy để chứng minh tính ổn định, hội tụ và tiết kiệm năng lượng. Mô hình đa vùng thu thập, gộp dữ liệu qua các bước nhảy ngắn đến nút chuyển tiếp hoặc cụm trưởng, còn mô hình liên vùng truyền đa bước giữa các vùng tới trạm gốc; mọi chi phí đường đi được lưu trong ma trận định tuyến. Thuật toán phân cụm mờ tối ưu hóa định tuyến cho từng miền quan sát, trong khi một độ đo mới giúp lập bảng định tuyến nhanh cho cấu trúc đa miền. Kết quả nghiên cứu này được công bố trong công trình [2, 3] của luận án, và một công trình đang trong quá trình review [5].

Chương 3

KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1 Thiết lập môi trường

Chương này mô tả cách thử nghiệm và đánh giá các mô hình định tuyến WUSN trên bộ dữ liệu tọa độ nút tự xây dựng, nhằm kiểm chứng hiệu quả và độ tin cậy thuật toán. Tác giả phân tích các tập dữ liệu và môi trường mô phỏng từng nghiên cứu trước, chỉ ra ưu-nhược điểm, độ chính xác, khả năng tái hiện điều kiện ngầm và hạn chế khi triển khai thực tế.

3.1.1 Giới thiệu về môi trường mô phỏng

Mạng cảm biến ngầm đa miền gồm nhiều cụm nút chôn; mỗi miền tự định tuyến nội bộ rồi chuyển dữ liệu lên gateway hoặc trạm gốc, nên cần tối ưu đồng thời lộ trình trong miền và giữa miền để giảm năng lượng và giữ ổn định các nút ngầm. Phần thực nghiệm sẽ: so sánh phân cụm của thuật toán mới với FCM; đo tổng năng lượng tiêu hao, tuổi thọ (số vòng), số nút chết và nút chết ngầm; đối chiếu FCM-WUSN với thuật toán đề xuất trên một khu vực mẫu; và kiểm tra thuật toán mới qua nhiều kịch bản đa vùng với các phân bố Gamma, Poisson, Gaussian, nhiều gateway và vị trí BS nhằm đánh giá khả năng liên vùng.

3.1.2 Xây dựng dữ liệu

Tối ưu hóa hiệu suất định tuyến trong mạng WUSN, việc xây dựng một bộ dữ liệu chất lượng cao đóng vai trò cực kỳ quan trọng. Bộ dữ liệu này không chỉ là nền tảng vững chắc cho việc phát triển mà còn là công cụ thiết yếu để đánh giá các thuật toán định tuyến hiệu quả. Luận án này tập trung vào việc tạo lập một bộ dữ liệu đặc thù, bao gồm tọa độ chính xác của các nút cảm biến

được triển khai dưới lòng đất. Quá trình thu thập và tổ chức dữ liệu tọa độ cho các nút cảm biến ngầm gặp phải nhiều thách thức riêng biệt, đặc biệt là sự phức tạp trong việc xác định chiều sâu và độ cao chính xác của cảm biến. Để giải quyết vấn đề này, bộ dữ liệu của luận án được thiết kế để mô phỏng chân thực các kịch bản triển khai đa dạng, từ đó cung cấp một môi trường thử nghiệm đáng tin cậy để kiểm tra và so sánh các thuật toán định tuyến khác nhau.

Các nguyên tắc thiết kế và xây dựng bộ dữ liệu Từ mục tiêu sẽ có được một bộ dữ liệu là vị trí các nút cảm biến phục vụ định tuyến trong WUSN. Dựa trên cơ sở khoa học cho việc xây dựng từ Linear Congruential Generator và Middle Square Method. Sau đó tích hợp những tiêu chuẩn về lựa chọn hoặc loại trừ để có những bộ dữ liệu sử dụng. Các bước trình bày cho nguyên tắc thiết kế được đưa ra như sau:

- **Bước 1:** Xác định tập tọa độ (x, y, z) ; x, y là vị trí ngang, z cho biết cảm biến nằm trên hay dưới mặt đất.
- **Bước 2:** Sinh dữ liệu ngẫu nhiên
 - **LCG:** $X_{n+1} = (aX_n + c) \bmod m$ để tạo dãy gốc.
 - **MSM:** Dùng X_n từ LCG, bình phương rồi lấy dãy chữ số giữa làm giá trị tiếp theo, giúp phá lặp và tăng tính ngẫu nhiên.
- **Bước 3:** Sàng lọc theo tiêu chí định tuyến (bán kính phủ sóng, mật độ, phân bố); loại các điểm ngoài vùng quan sát, tọa độ âm hoặc trùng lặp.

3.1.3 Kịch bản đánh giá

Kịch bản	Mô tả
S1	Phân Tích Yếu tố ngầm Đánh giá tổng mức tiêu thụ năng lượng và số lượng nút kết nối ngầm.
S2	Đánh giá hiệu suất định tuyến Để đánh giá mức độ hiệu quả của việc định tuyến dữ liệu trong việc kéo dài tuổi thọ của mạng ở nhiều khu vực khác nhau.
S3	Đánh giá hiệu suất sử dụng liên đồ thị của nút chuyển tiếp Để đánh giá tác động của các nút chuyển tiếp lặp và các điều kiện đặt trạm gốc (BS)
S4	Kiểm Tra Phương Sai Thuật Toán với Các Phân Phối Khác Nhau Chứng minh khả năng của phương pháp được đề xuất qua các phân phối khác nhau.

Bảng 3.1: Thời gian sống mạng của FCM và FCM-WUSN trong sáu bộ dữ liệu

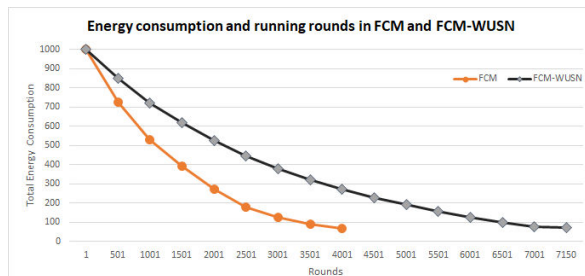
	100 nodes & 10% UN	100 nodes & 20% UN	100 nodes & 30% UN	200 nodes & 10% UN	200 nodes & 20% UN	200 nodes & 30% UN
Số vòng chạy						
FCM	4555.5	4198.5	4669.3	5823.8	5972.1	5460
FCM-WUSN	8085.1	8582.4	8459.2	11230.8	10817.4	10429.3
Năng lượng tiêu thụ (J)						
FCM	950.017	950.018	950.01	1900.022	1900.019	1900.01
FCM-WUSN	953,214	958.41	958.41	1905.6	1912.022	1886.1

3.2 Kết quả của các thí nghiệm định tuyến WUSN trong một khu vực

Kết quả thử nghiệm từ việc đánh giá kỹ thuật tối ưu hóa năng lượng WUSN được trình bày ở đây. Các thử nghiệm đã xem xét cách các giải pháp được đề xuất cải thiện việc sử dụng năng lượng, tuổi thọ mạng và hiệu quả truyền dữ liệu.

3.2.1 Các kết quả thực nghiệm chính

Trong phần này, các kết quả thực nghiệm xác thực các thuật toán đề xuất được trình bày. Các kịch bản được đưa ra để so sánh FCM và FCM-WUSN trong việc phân cụm và tổng hợp dữ liệu. Kết quả có thể thấy trong Hình 3.1 giữa tổng mức tiêu thụ năng lượng và số vòng sau khi chạy FCM và FCM-WUSN. Chúng tôi đã chọn kết quả trung bình từ mười lần chạy của các tập dữ liệu (100 nút và 10% nút ngầm) trong sáu loại tập dữ liệu.



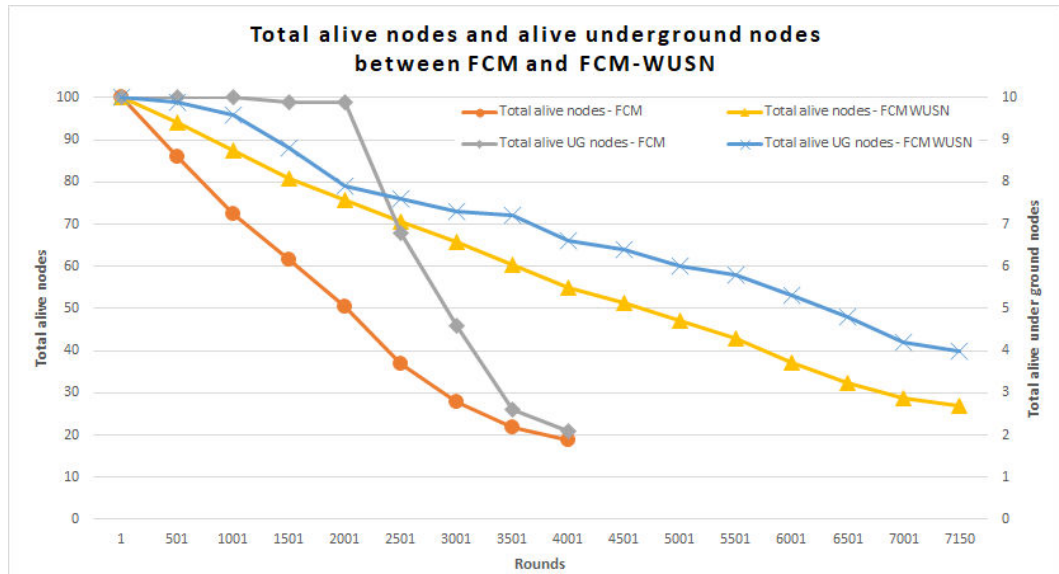
Hình 3.1: Tổng mức tiêu thụ năng lượng của FCM và FCM-WUSN

Bảng trên là kết quả của trung bình 10 lần chạy chứng minh FCM-WUSN luôn trội hơn FCM ở cả 6 bộ dữ liệu: tuổi thọ mạng tăng đáng kể ($2.1 \times$ khi 100 nút, 20 % chôn ngầm; đạt ≈ 4969 vòng với 200 nút, 30% chôn ngầm) trong

Bảng 3.2: Tổng số nút sống và nút ngầm sống của FCM và FCM-WUSN trong sáu tập dữ liệu

	100 nodes & 10% UN	100 nodes & 20% UN	100 nodes & 30% UN	200 nodes & 10% UN	200 nodes & 20% UN	200 nodes & 30% UN
Tổng số nút còn sống						
FCM	16.3	16	15.4	29.3	27.7	29.1
FCM-WUSN	19.4	19.3	19.1	39.2	39.2	43
Số nút dưới lòng đất còn sống						
FCM	1.9	5.8	6.5	3.5	11.1	14.8
FCM-WUSN	2.8	7	9.8	6.3	16.6	23.2

khi năng lượng chỉ nhích lên $\approx 0,02\%$.



Hình 3.2: Tổng số nút sống, và nút sống dưới lòng đất giữa FCM và FCM-WUSN

Hình 3.2 cho thấy tổng số nút sống và nút sống dưới lòng đất giữa hai thuật toán FCM và thuật toán đề xuất. Kết quả có thể kết luận rằng số lượng nút ngầm trong FCM không thay đổi trong 2000 vòng đầu tiên so với thuật toán đề xuất, nhưng sau vòng 2172, số lượng này giảm nhanh từ 10 xuống 3 nút vào vòng 3174. Mặt khác, số lượng nút ngầm trong thuật toán FCM-WUSN giảm chậm, với sự giảm 1 nút bắt đầu từ vòng đầu tiên đến vòng thứ 1337th. Cuối cùng, số lượng nút chết dưới lòng đất của thuật toán đề xuất vẫn ít hơn so với FCM. Giải thích cho sự hình thành của cụm dựa trên Thuật toán 1 dẫn đến sự hài hòa của các nút trên và dưới mặt đất. Các nút dưới lòng đất không cần phải truyền dữ liệu đến CH xa, dẫn đến việc tiêu tốn năng lượng nhanh chóng.

Bảng 3.2 cho thấy trung bình của mười lần chạy cho mỗi loại dữ liệu và kỹ thuật đối với các nút sống của mạng. Các phát hiện cho thấy rằng kỹ thuật

được đề xuất vượt trội hơn thuật toán FCM về tổng thể và các nút sống dưới lòng đất. So với thuật toán FCM, kỹ thuật được đề xuất thành công hơn 1,19 lần trong việc đánh giá một tập dữ liệu gồm 100 nút, với 10% nằm dưới mặt đất. Đối với một tập dữ liệu gồm 200 nút với 30% nút nằm dưới mặt đất, phương pháp được đề xuất cao hơn khoảng 14 nút so với thuật toán FCM.

Sự phân phối của sáu tập dữ liệu có thể ảnh hưởng đến chu kỳ chạy của mạng và các nút sống. Khi xử lý dữ liệu cảm biến dưới bề mặt với phân phối rộng lớn, phương pháp FCM-WUSN hiệu quả hơn 1.2 lần và 1.4 lần so với thuật toán FCM với 100 và 200 nút, tương ứng. Với cùng số lượng nút cảm biến nhưng số lượng nút ngầm khác nhau, các thuật toán FCM-WUSN và FCM cho thấy sự khác biệt 4 nút trong tổng số nút sống, từ 9.9 nút với dữ liệu và 200-10% nút ngầm đến 13.9 nút với dữ liệu và 30% nút ngầm.

3.2.2 Những rút ra được từ thực nghiệm

Nghiên cứu này được khuyến nghị để triển khai một nghiên cứu trường hợp thực tế như nông nghiệp thông minh với việc thiết lập các biến của BS, số lượng cảm biến trong mạng và vị trí đặt cảm biến. Tóm lại, ba phát hiện chính được trình bày sau khi tiến hành các thí nghiệm.

- Hiệu suất về tuổi thọ mạng và số nút còn sống cho các nút trên mặt đất và dưới mặt đất đã được cải thiện đáng kể khi sử dụng FCM-WUSN. Phương pháp đề xuất có tuổi thọ mạng cao gấp 2,1 lần so với phương pháp phân cụm tiêu chuẩn, FCM. Thuật toán FCM-WUSN có số nút sống (tổng và ngầm) nhiều gấp 1,4 lần so với phương pháp FCM. Điều này hầu như không thay đổi khi chạy các tập dữ liệu với nhiều cảm biến hơn trong mạng và định vị cảm biến dựa trên độ sâu của cảm biến khi triển khai dưới lòng đất.
- Sau các thực nghiệm, việc triển khai một số lượng lớn cảm biến ngầm cải thiện tổng số cảm biến sống và các nút ngầm với thuật toán truyền thống như FCM. Do đó, vùng quan sát dưới bề mặt của thuật toán FCM-WUSN vẫn lớn hơn và kéo dài hơn so với thuật toán FCM.
- Thuật toán có một số nhược điểm. Việc sử dụng năng lượng vẫn không hiệu

quả. Mức tiêu thụ năng lượng cao hơn 1.0002 lần so với FCM. Năng lượng suy hao đường truyền dữ liệu giữa đất và không khí gây ra điều này.

3.3 Kết quả của các thực nghiệm định tuyến WUSN ở nhiều khu vực

3.3.1 Kết quả thí nghiệm cho nhiều khu vực quan sát khác nhau

Phần này thảo luận về kết quả của các kịch bản. Đánh giá dựa trên số vòng hoạt động, độ bền mạng, chi phí năng lượng trong quá trình truyền dữ liệu từ các nút đến trạm gốc, và số lượng các nút hoạt động. Xem xét số lượng khu vực quan sát, số lượng cảm biến mỗi khu vực, vị trí trạm gốc, và sự phân bố khác nhau của các cảm biến trên các khu vực khi phân tích đặc điểm của thuật toán.

Tiêu chí cho tuổi thọ của mạng

Mạng được xem là hết hoạt động khi chỉ còn 10% nút hoạt động hoặc 5% năng lượng, nên cân bằng tải là then chốt. Ở kịch bản 1, thuật toán Multi-Graphs-WUSN kéo dài tuổi thọ gấp 1,4 lần FCM-WUSN và 3 lần FCM nhờ tính đến kết nối ngầm. Trong kịch bản 2, Multi-Graphs-WUSN luôn vượt PEGASIS ở cả 2 và 4 vùng; chênh lệch cao nhất gần 10 000 vòng (4 vùng, 100 nút, 10 % ngầm). Khi tăng lên 200 nút và tỉ lệ ngầm cao hơn, PEGASIS thu hẹp khoảng cách (từ 1,259 lần xuống 1,008 lần) nhưng vẫn chưa vượt Multi-Graphs-WUSN.

Trong kịch bản số 3, Multi Graphs-WUSN vẫn cho thấy hiệu suất vượt trội khi BS được đặt ở vùng phía Bắc và Đông với tỷ lệ phần trăm lần lượt là 41.72% và 47.78% về hiệu suất trong thời gian sống. Tuy nhiên khi đặt BS tại khu vực phía Tây và Nam, PEGASIS lại cho hiệu suất về thời gian sống cao hơn với tỷ lệ phần trăm là 58.41% và 43.31%. Multi Graphs-wusn có khả năng xử lý tốt hơn khi mở rộng từ 2 vùng quan sát đến 4 vùng quan sát đặt biệt khi đặt BS ở vị trí phía Bắc (31.61%) và Đông (62.69%). PEGASIS cho thấy sự ổn định khi mở rộng, nhưng không có sự tăng trưởng về thời gian sống của mạng mạnh mẽ như với thuật toán đề xuất.

So với mô hình ghép PEGASIS + HLEACH (mỗi thuật toán phụ trách

một vùng, tương đương bốn vùng toàn mạng), Multi-Graphs-WUSN gần như luôn dẫn trước. Tuổi thọ mạng tăng rõ ở Gamma (16 522 vs 14 193 vòng) và Gauss quy mô nhỏ (13 713 vs 9 568). Với Poisson nhỏ, PEGASIS nhỉnh hơn 5 401 vòng, nhưng khi nhân đôi vùng quan sát, Multi-Graphs đảo ngược thế trận, dài gấp 2,5 lần (9 976 vs 3 978). Gamma tiếp tục giữ ưu thế; Gauss mở rộng, PEGASIS + HLEACH chỉ còn hơn 842 vòng. Phân bố đều, Multi-Graphs-WUSN vẫn dẫn đầu ở mọi quy mô.

Tiêu chí của Tổng số Nút Sống và Nút Dưới Đất Sống

Trong kịch bản 1, kết quả cho thấy rằng thuật toán đề xuất cải thiện độ bao phủ cho các nút kết nối trong khi tính đến yếu tố ngầm. Tất cả 10 nút kết nối với trạm gốc trong những vòng đầu tiên của một kịch bản với 100 nút hoạt động ở mức 10%. Điều này tăng độ chính xác của dữ liệu và số vòng hoạt động. Số lượng nút còn lại giảm 2 so với trường hợp 30% nút nằm dưới lòng đất. Mở rộng kịch bản để bao gồm 10-30% nút ngầm cải thiện hiệu quả của phương pháp đề xuất cho các nút ngầm còn lại. Việc phân phối dữ liệu đồng đều đến tệp giảm khả năng tập trung không cần thiết vào nút CH, như đã thấy trong tình huống FCM-WUSN. Do đó, nhiều nút dưới bề mặt hơn vẫn còn lại.

Với phân bố đều, di chuyển BS quyết định số nút còn sống. Khi đặt ở Bắc hoặc Đông, Multi-Graphs WUSN giữ lại nút nhiều hơn PEGASIS 2,4 lần và 1,8 lần (2 vùng) hoặc 1,7 lần và 2,6 lần (4 vùng); đặt sang Tây giảm lợi thế (1 nút), còn Nam kém PEGASIS 9 nút. Ở các phân bố Gamma, Gaussian, Poisson kết quả dao động: Multi-Graphs vượt PEGASIS + HLEACH trong Gamma và Gaussian (Gaussian +4 nút); Poisson nhỏ nghiêng về PEGASIS + HLEACH (+2 nút), nhưng khi tăng số vùng, Multi-Graphs nhảy vọt > 5 lần, còn Gamma vẫn đưa đến kết quả hơn 2,1 lần.

Tiêu chí tiêu thụ năng lượng

Trong kịch bản 1, Multi-Graphs WUSN tiêu hao nhiều nhất: cao hơn FCM-WUSN khoảng 400 J khi 100 nút (10 % ngầm) và vẫn nhỉnh hơn khi tăng lên 200 nút, chỉ giảm 24 J khi tỷ lệ nút ngầm lớn hơn. Kết quả xác nhận năng

lượng càng thấp khi có nhiều nút kết nối và tỷ lệ thuận với tuổi thọ mạng. Ở các phân bố Gamma, Gaussian và Poisson trên vùng quan sát rộng, Multi-Graphs lại tiết kiệm hơn: diện năng giảm 30,3 % (Gamma, 4 vùng) và 61,9 % (Poisson), còn Gamma 2 vùng chỉ giảm 1,36 %. Tuy nhiên, với Gaussian 4 vùng, Multi-Graphs dùng năng lượng nhiều hơn PEGASIS+HLEACH 24,8 %, cho thấy thuật toán có thể kém hiệu quả khi mạng mở rộng và cảm biến được phân bố quá dày.

3.4 Đánh giá

Chúng tôi cũng đã sử dụng Phân tích Phương sai hai chiều (ANOVA) (bao gồm các tập dữ liệu và phương pháp) để xác định xem các nút sống ngầm của mạng FCM-WUSN có liên kết với độ bền của mạng hay không. Các kết quả số học của các thuật toán được kiểm tra bằng phương pháp ANOVA hai chiều với sự lặp lại. Mô hình của chúng tôi đánh giá để chứng minh điểm chính: *"Nút ngầm sống của mạng FCM-WUSN cao hơn một chút so với FCM nhưng tuổi thọ mạng thì tốt hơn nhiều so với FCM."*

Một phân tích phương sai hai chiều (two-way ANOVA) đã được thực hiện để kiểm tra sự biến thiên của thí nghiệm bằng cách xem xét số lượng nút ngầm sống và số chu kỳ chạy như là tuổi thọ của mạng. Các kết quả số của các phương pháp được phân tích bằng ANOVA hai chiều với sự lặp lại. Các hiệu ứng của các phương pháp và các tập dữ liệu đối với các kết quả thu được được xem xét với mức ý nghĩa $\alpha = 0.05$. Các giả thuyết không của phân tích này được mô tả khi chúng tôi công nhận các cột sau đây là các phương pháp:

- H_0 : Số lượng nút sống ngầm phụ thuộc vào bất kỳ phương pháp nào như FCM hoặc FCM-WUSN.
- H_1 : Số lượng nút sống ngầm không phụ thuộc vào bất kỳ phương pháp nào như FCM hoặc FCM-WUSN.

Và giả thuyết không khác của phân tích này được mô tả khi ghi nhận các hàng theo dõi là các tập dữ liệu khác nhau:

- H_0 : Số lượng nút sống ngầm phụ thuộc vào bất kỳ thay đổi nào của giá trị

đầu vào như tăng số lượng cảm biến và thay đổi tỷ lệ giữa các nút trên mặt đất và nút ngầm.

- H_1 : Số lượng nút sống dưới lòng đất không bị ảnh hưởng bởi bất kỳ thay đổi nào của giá trị đầu vào như tăng số lượng cảm biến và thay đổi tỷ lệ giữa các nút trên mặt đất và dưới lòng đất.

Cả hai thuật toán và tập dữ liệu đều có giá trị P lần lượt là 0.01071 và 0.0007. Các hàng và cột sau đây có giá trị P dưới 0.05. Hai ý tưởng này về số lượng nút sống dưới lòng đất bị bác bỏ. Số lượng nút sống dưới lòng đất chỉ dựa vào phương pháp và thống kê. Các hiệu ứng tuổi thọ mạng của FCM và FCM-WUSN sử dụng các tiêu chí ANOVA khác nhau. Giá trị P của thuật toán và tập dữ liệu đều dưới 0.05. Điều đó có nghĩa là độ bền của mạng phụ thuộc vào phương pháp hoạt động và có thể thay đổi theo từng tập dữ liệu.

3.5 Tổng kết Chương 3

Chương luận án về thí nghiệm và kết quả chi tiết các phương pháp, tập dữ liệu và kết quả. Chương sau đó thảo luận về các biện pháp hiệu suất, xu hướng và phân tích thống kê của các thử nghiệm này, điều này xác nhận các giả thuyết của luận án.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Những kết quả chính của luận án

Nghiên cứu nhằm đề xuất phát triển các chiến lược định tuyến tiết kiệm năng lượng trong các mạng cảm biến không dây ngầm, giải quyết cả cấu hình đơn và đa khu vực:

- **Thứ nhất**, mô hình định tuyến mới trong Mạng Cảm Biến Ngầm Không Dây bao gồm hai đóng góp chính: tính toán suy hao đường truyền trong mô hình và định tuyến để ước tính độ bền của mạng. Để giải quyết mô hình đề xuất với một mạng ngầm cụ thể, luận án đã áp dụng Taylor series level 1.
- Luận án này đề xuất thuật toán FCM-WUSN để phân cụm dựa trên phương sai mô hình. Phương pháp được đề xuất có tuổi thọ mạng gấp 2,1 lần so với phương pháp phân cụm thông thường cụ thể là FCM. Phương pháp FCM-WUSN có số nút sống (được tính tổng và các nút ngầm) nhiều hơn 1.4 lần so với thuật toán FCM. Hơn nữa khi mở rộng ra quan sát với số lượng cảm biến nhiều hơn là 200 và số lượng dưới lòng đất là 30% thì các nút sống dưới lòng đất của FCM nhỏ hơn hơn 1,6 lần so với của FCM-WUSN.
- **Thứ hai**, Định tuyến đa vùng được hỗ trợ bởi các nút chuyển tiếp trong đồ thị. Đề xuất một độ đo mới với năm yếu tố chính: năng lượng, loại cảm biến, khoảng cách giữa các nút, ảnh hưởng của các nút lân cận và bán kính truyền thông của nút. Từ đó xây dựng các thuật toán định tuyến liên vùng.
- Các thực nghiệm trong luận án chỉ ra rằng tuổi thọ của mạng đã được cải thiện đáng kể; trong một khu vực đơn lẻ, nó cao hơn 1,6 lần so với thuật toán FCM-WUSN trước đó, trong khi ở nhiều khu vực, nó trung bình cao

hơn 1,8 lần so với thuật toán PEGASIS.

- Sau phần thực nghiệm, với phân bố đều thì đưa ra được kết quả tốt hơn về mọi mặt như thời gian sống mạng, tổng năng lượng tiêu hao trong mạng và số lượng nút còn sống. Kết quả này không thay đổi khi ta khi ta tăng số vùng quan sát lên gấp đôi từ 2 thành 4. Nếu nhưng trong tương lai hệ thống nào không thể phân bố đều, thì phân bố theo dạng Gauss cũng là phân bố cho kết quả tốt như trên. Đối với thời gian sống trong mạng, thuật toán Multi Graphs-WUSN có số vòng được lâu hơn, số lượng nút còn sống cũng được nhiều hơn (32 nút so với 23 nút của thuật toán PEGASIS).

- Vị trí trạm cơ sở cũng là một yếu tố mà chúng tôi rút ra được từ kết quả thực nghiệm. Nếu đặt BS tại vị trí bên phía đông của khu vực quan sát, thời gian sống của mạng được kéo dài hơn, có thể tìm được và truyền các nút cảm biến theo cân bằng năng lượng nên số lượng nút còn sống cũng cao hơn. Kết quả này không đổi khi ta tăng từ 2 vùng quan sát thành 4 vùng.

- Số lượng nút relay nodes cần sử dụng trong mạng, trong thực nghiệm ta sử dụng 50 nút làm nhiệm vụ trung chuyển thông tin liên vùng với nhau. Ta thấy rằng số lượng relay nodes được sử dụng nhiều nhất tại 3 địa điểm vùng: các vùng biên giáp giữa các miền với nhau, và cảm biến ở gần vị trí của trạm cơ sở, các nút chuyển tiếp nằm ở gần các nút cảm biến chôn dưới lòng đất nhưng ở vùng xa. Đối với 50 nút, chỉ có 27 nút cảm biến được sử dụng thường xuyên.

Mặt hạn chế của luận án

Ngoài các kết quả nghiên cứu đã thu được, các cuộc điều tra được trình bày trong công trình này còn có một số hạn chế, bao gồm: Dữ liệu được sử dụng trong phần thí nghiệm là dữ liệu tự tạo. Thí nghiệm định tuyến chưa được thực hiện trong các môi trường cụ thể như NS2 hoặc NS3, OMET++.

Hiện tại luận án chỉ giải quyết được vấn đề xác định được nút tiếp theo hoặc cơ chế đường đi dựa vào khoảng cách, năng lượng chưa tích hợp về tín hiệu đường truyền băng thông, chất lượng gói tin. Việc định tuyến đa miền các nút

chuyển tiếp đang đóng vai trò kết nối các miền khác nhau giúp tăng khả năng liên kết trao đổi liên miền. Tuy nhiên chưa có một quy trình triển khai cụ thể nhằm xác định số lượng các nút chuyển tiếp tối ưu, phân tích chi phí và lợi ích khi sử dụng các nút chuyển tiếp trong mạng.

Các phát triển trong tương lai của luận án

Hướng đi tiếp theo của nghiên cứu có thể được phát triển các hướng sau đây:

- Đánh giá thuật toán đề xuất với những bộ dữ liệu khác nhau lớn hơn.
- Triển khai thuật toán trong các khung mô phỏng định tuyến mạng thay thế, bao gồm NS2 hoặc OMET++. Có nghĩa rằng sẽ tích hợp về tính chất gói tin, băng thông trong đường truyền, tín hiệu truyền giữa các nút dưới lòng đất với những vật cản trong đất.
- Nghiên cứu tích hợp các thuật toán meta-heuristic để tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng trong WUSN có thể được coi là sự cải tiến và phát triển.
- Nghiên cứu để đưa ra quy trình triển khai các nút chuyển tiếp cho định tuyến với môi trường đa miền.
- Triển khai và tích hợp nghiên cứu đề xuất vào các hệ thống được thiết kế để giám sát sức khỏe cây trồng trong lĩnh vực nông nghiệp đối với một miền giám sát. Đối với đa miền, có thể thử nghiệm mô hình định tuyến cho nhiều hệ thống quan sát khác nhau.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. C. Vuran and I. F. Akyildiz, “Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium,” *Physical Communication*, vol. 3, no. 4, pp. 245–254, 2010.
- [2] S. Kisseleff, B. Sackenreuter, I. F. Akyildiz, and W. H. Gerstacker, “On capacity of active relaying in magnetic induction based wireless underground sensor networks,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 6541–6546, IEEE, 2015.
- [3] L. Li, M. C. Vuran, and I. F. Akyildiz, “Characteristics of underground channel for wireless underground sensor networks,” in *Proceedings of Med-Hoc-Net*, vol. 7, pp. 13–15, 2007.
- [4] B. Yuan, H. Chen, and X. Yao, “Optimal relay placement for lifetime maximization in wireless underground sensor networks,” *Information Sciences*, vol. 418-419, pp. 463–479, 2017.
- [5] A. Alrabea, O. Alzubi, and J. Alzubi, “A task-based model for minimizing energy consumption in wsns,” *Energy Systems*, vol. 13, pp. 671–688, 2022.
- [6] N. Zhang, M. Wang, and N. Wang, “Precision agriculture—a worldwide overview.,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, pp. 113–132, 2002.
- [7] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. Wireless Communications and Mobile Computing, John Wiley & Sons, 2010.
- [8] P. Pandya, “Chapter e73 - transmission control protocol/internet protocol packet analysis,” in *Computer and Information Security Handbook (Third Edition)* (J. R. Vacca, ed.), pp. e205–e218, Boston: Morgan Kaufmann, third edition ed., 2013.
- [9] S. Phaiboon and P. Phokharatkul, “Wireless underground sensor network path loss models for durian tree,” in *2021 Photonics Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, pp. 284–288, 2021.

- [10] F. K. Banaseka, F. A. Katsriku, J.-D. Abdulai, K. S. Adu-Manu, and F. Engmann, “Signal propagation models in soil medium for the study of wireless underground sensor networks: A review of current trends,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2021, pp. 8836426:1–8836426:12, 2021.
- [11] D. Wohwe Sambo, B. O. Yenke, A. Förster, J. Ndong, P. Dayang, and I. Sarr, “A new fuzzy logic approach for reliable communications in wireless underground sensor networks,” *Wireless Networks*, vol. 28(7), 3275–3292, 2022.
- [12] N. T. Tam, H. T. T. Binh, D. A. Dung, P. N. Lan, L. T. Vinh, B. Yuan, and X. Yao, “A hybrid clustering and evolutionary approach for wireless underground sensor network lifetime maximization,” *Information Sciences*, vol. 504, pp. 372–393, 2019.
- [13] M. D. Hitesh Panda and B. Sahu, “A generalized mixed path loss (mpl) model for wireless underground sensor networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 8, 03 2023.
- [14] Y.-D. Yao, X. Li, Y.-P. Cui, J.-J. Wang, J.-J. Wang, and C. Wang, “Energy-efficient routing protocol based on multi-threshold segmentation in wireless sensors networks for precision agriculture,” in *IEEE SENSORS JOURNAL - IEEE Sensors Council*, vol. 22, APRIL 1, 2022.
- [15] D. Wu, D. M. Chatzigeorgiou, K. Youcef-Toumi, S. Mekid, and R. Ben-Mansour, “Channel-aware relay node placement in wireless sensor networks for pipeline inspection,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 3510–3523, 2014.
- [16] L. H. S. Dang Thanh Hai, Nguyen Thi Tam and L. T. Vinh, “A novel energy-balanced unequal fuzzy clustering algorithm for 3d wireless sensor networks,” in *SoICT '16: Proceedings of the 7th Symposium on Information and Communication Technology*, p. 180–186, December 2016.
- [17] P. Maigron, “World - autonomous system number statistics - sorted by number,” 2019. Truy cập ngày 3 tháng 9 năm 2024.
- [18] D. King and A. Farrel, “Rfc 6805: The application of the path computation element architecture to the determination of a sequence of domains in mpls and gmpls,” 2012.
- [19] C. Ma, W. Liang, and M. Zheng, “Set covering-based approximation algorithm for delay constrained relay node placement in wireless sensor net-

- works,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 59, pp. 1–9, 2015.
- [20] D. Yang, X. Fang, and G. Xue, “Near-optimal relay station placement for power minimization in wimax networks,” in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, pp. 1–6, IEEE, 2011.
 - [21] F. Che, E. L. Lloyd, J. O. Hallstrom, and S. S. Ravi, “Topology control with a limited number of relays,” in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2012)*, pp. 1–6, IEEE, 2012.
 - [22] Y. Xu, O. Ding, R. Qu, and K. Li, “Hybrid multi-objective evolutionary algorithms based on decomposition for wireless sensor network coverage optimization,” *Applied Soft Computing*, vol. 68, pp. 268–282, 2018.
 - [23] J.-P. Vasseur and R. Zhang, “Mpls inter-autonomous system (as) traffic engineering (te) requirements.” RFC 4216, Nov. 2005.
 - [24] L. Buzzi, M. Conforto Bardellini, D. Siracusa, G. Maier, F. Paolucci, F. Cugini, L. Valcarenghi, and P. Castoldi, “Hierarchical border gateway protocol (hbgp) for pce-based multi-domain traffic engineering,” in *2010 IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, 2010.
 - [25] I. F. Akyildiz, Z. Sun, and M. C. Vuran, “Signal propagation techniques for wireless underground communication networks,” *Physical Communication*, vol. 2, no. 3, pp. 167–183, 2009.
 - [26] W. Ward and B. Barrow, “Another view of dimensions and db,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 60, no. 6, pp. 743–743, 1972.
 - [27] M. Lustgarten and B. Barrow, “Expressing watts per hertz in decibel units,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 59, no. 11, pp. 1640–1640, 1971.
 - [28] J. C. Bezdek, “Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms,” *Plenum Press*, vol. 1, pp. 1–224, 1984. ISBN: 0-306-41835-X.
 - [29] D. Abdorahimi and A. Sadeghioon, “Comparison of radio frequency path loss models in soil for wireless underground sensor networks,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 8, p. 35, 06 2019.
 - [30] W. Lu, X. Xu, G. Huang, B. Li, Y. Wu, N. Zhao, and F. R. Yu, “Energy efficiency optimization in swipt enabled wsns for smart agriculture,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 6, pp. 4335–4344, 2021.