

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 ĐÀ MIỀN

LUẬN ÁN TIẾN SĨ HỆ THỐNG THÔNG TIN

Đà Nẵng, Tháng 9 năm 2025

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ HỆ THỐNG THÔNG TIN
Mã số: 325478

Cán bộ hướng dẫn 1

Cán bộ hướng dẫn 2

TS Nguyễn Trần Quốc Vinh PGS.TS Lê Hoàng Sơn

Đà Nẵng - Tháng 9 năm 2025

Mục lục

Kí hiệu và viết tắt	iii
Danh mục các bảng	v
Danh mục các hình	vii
Giới thiệu	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY NGẦM ĐA MIỀN	8
1.1 Mạng cảm biến không dây	8
1.2 Các mở rộng của mạng cảm biến không dây	10
1.2.1 Mạng cảm biến không dây ngầm	10
1.2.2 Mạng cảm biến không dây ngầm đa miền	12
1.2.3 Ứng dụng	13
1.3 Các giao thức định tuyến	15
1.3.1 Các giao thức phổ biến	16
1.3.2 Tổng quan các giải pháp định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm	21
1.3.3 Tổng quan các giải pháp định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm đa miền	22
1.3.4 Một số nhận xét	24
1.4 Mô hình suy hao	25
1.4.1 Mô hình không vật cản, đa đường định tuyến	25
1.4.2 Mô hình suy hao trong mạng cảm biến không dây ngầm	26
1.5 Tối ưu hóa trong mạng cảm biến không dây	29
1.6 Môi trường mô phỏng và các tiêu chí đánh giá	32

1.6.1	Môi trường mô phỏng	32
1.6.2	Tiêu chí đánh giá	33
1.7	Kết luận chương	35
CHƯƠNG 2. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ĐỊNH TUYẾN TRÊN MẠNG		
CẢM BIẾN KHÔNG DÂY NGẦM ĐA MIỀN		36
2.1	Giới thiệu	36
2.2	Giải pháp định tuyến mới trên mạng cảm biến không dây ngầm đơn miền dựa trên phân cụm mờ	37
2.2.1	Ý tưởng	37
2.2.2	Mô hình toán học	38
2.2.3	Thuật toán FCM-WUSN	46
2.2.4	Độ phức tạp thuật toán	50
2.3	Giải pháp định tuyến mới trên mạng cảm biến không dây ngầm đa miền dựa trên độ đo cảm biến	51
2.3.1	Ý tưởng	51
2.3.2	Xây dựng độ đo cảm biến mới	53
2.3.3	Đánh giá về độ đo mới	58
2.3.4	Thuật toán Multi Graphs WUSN	61
2.3.5	Độ phức tạp thuật toán	70
2.4	Kết luận chương	71
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG		72
3.1	Thiết lập môi trường	72
3.1.1	Giới thiệu về môi trường mô phỏng	72
3.1.2	Xây dựng dữ liệu	74
3.1.3	Kịch bản đánh giá	77
3.2	Kết quả thực nghiệm	80
3.2.1	Kịch bản đánh giá đơn vùng	80
3.2.2	Kịch bản đa vùng - tiêu chí về thời gian sống mạng	84
3.2.3	Kịch bản đa vùng - tiêu chí số nút còn sống	87

3.2.4 Kịch bản đa vùng - tiêu chí năng lượng tiêu thụ	90
3.2.5 Kiểm định thống kê kết quả	92
3.3 Kết luận chương	94
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	96

KÝ HIỆU VÀ VIẾT TẮT

Số	Từ viết tắt	Từ tiếng Anh	Diễn giải/Tạm dịch
1	2D	Two Dimensions	Không gian hai chiều
2	3D	Three Dimensions	Không gian ba chiều
3	AG2AG	Aboveground to Above-ground	Kênh truyền thông giữa hai nút trên mặt đất
4	AG2UG	Aboveground to Under-ground	Kênh truyền thông từ trên mặt đất đến dưới mặt đất
5	AI	Artificial Intelligence	Trí tuệ nhân tạo
6	AS	Autonomous System	Hệ thống tự động
7	BGP	Border Gateway Protocol	Giao thức cổng biên
8	BS	Base Station	Trạm cơ sở
9	CIDR	Classless Inter-Domain Routing	Định tuyến giữa các miền trong lớp
10	CH	Cluster Header	Cụm trưởng
11	CM	Cluster Member	Cụm thành viên
12	CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection	Truy cập đa điểm cảm nhận sóng mang với phát hiện va chạm
13	ED	Energy dissipation	Năng lượng tiêu hao
14	EM	Electro Magnetic	Điện từ
15	FCM	Fuzzy C-Means Clustering	Phân cụm mờ C-Means
16	HLEACH	Hybrid-low Energy Adaptive Clustering Hierarchical Routing Protocol	Giao thức định tuyến phân lớp thích ứng năng lượng thấp lai
17	IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
18	IoUT	Internet of Underground Things	Internet vạn vật ngầm
19	LAN	Local Area Network	Mạng nội bộ

20	LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical Routing Protocol	Giao thức định tuyến phân lớp thích ứng năng lượng thấp
21	LSA	Linked State Algorithm	Thuật toán trạng thái liên kết
22	MEC	Multi-access Edge Computing	Tính toán biên đa truy cập
23	MI	Magnetic Induction	Cảm ứng từ
24	OSPF	Open Shortest Path First	Định tuyến theo đường đi ngắn nhất mở
25	PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems	Thu thập dữ liệu hiệu quả năng lượng trong hệ thống thông tin cảm biến
26	QoS	Quality of Service	Chất lượng của dịch vụ
27	RN	Relay Node	Nút chuyển tiếp
28	TDMA	Time Division Multiple Access	Truy cập đa điểm phân chia theo thời gian
29	UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Thiết bị không người lái
30	UG2AG	Underground To Above-ground	Kênh truyền thông từ dưới mặt đất lên trên mặt đất
31	WSN	Wireless Sensor Network	Mạng cảm biến không dây
32	WUSN	Wireless Underground Sensor Network	Mạng cảm biến không dây ngầm
33	LoRaWAN	Long Range Wide Area Network	Mạng diện rộng tầm xa

Danh mục các bảng

1.1	Tham số sử dụng để tính về các tính chất dưới lòng đất [1]	28
3.1	Giá trị tham số cho thực nghiệm [2]	77
3.2	Tham số cho các kịch bản	79
3.3	Thống kê tóm tắt cho dữ liệu x và y cho một bộ dữ liệu	79
3.4	Thời gian sống của mạng sau chạy FCM và FCM-WUSN cho 6 bộ dữ liệu	81
3.5	Tổng số nút còn sống và số nút còn sống dưới lòng đất của FCM và FCM-WUSN trong sáu bộ dữ liệu.	82
3.6	Kết quả của độ bền mạng theo số vòng chạy với 1 khu vực giữa FCM, FCM-WUSN và Multi-Graphs WUSN.	85
3.7	Kết quả của tuổi thọ mạng theo số vòng chạy với 6 bộ dữ liệu giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.	85
3.8	Kết quả của tuổi thọ mạng khi đặt các bộ dữ liệu vị trí BS khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.	86
3.9	Kết quả của các vòng chạy với các bộ dữ liệu phân phối khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS+HLEACH.	87
3.10	Kết quả của tổng số nút còn sống sau khi chạy 6 bộ dữ liệu giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.	89
3.11	Kết quả tiêu thụ năng lượng trong 1 khu vực giữa FCM, FCM-WUSN và Multi-Graphs WUSN.	90
3.12	Kết quả tiêu thụ năng lượng khi đặt các bộ dữ liệu vị trí BS khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.	91
3.13	Kết quả tiêu thụ năng lượng với phân phối khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS+HLEACH.	91

3.14 Phân tích ANOVA cho các nút ngầm còn sống	92
3.15 Phân tích ANOVA cho tuổi thọ mạng	93

Danh mục các hình

1.1 Mạng cảm biến không dây.	9
1.2 Các kênh truyền thông trong mạng cảm biến không dây ngầm	11
1.3 Ứng dụng đa miền cho mô hình nông nghiệp	13
1.4 Tổng quan về các giao thức định tuyến phổ biến	17
1.5 Tổng quan về các phương pháp giải bài toán tối ưu	31
2.1 Tổng quát về các giả thuyết mô hình mạng đề xuất	37
2.2 Mô hình hóa các thành viên của một cụm	39
2.3 Lưu đồ tổng quan về quá trình định tuyến mạng	46
2.4 Lưu đồ thuật toán FCM-WUSN	47
2.5 Ý tưởng tổng quát về mô hình truyền đa miền	52
2.6 Mô phỏng giả thuyết cho nhiều miền quan sát	53
2.7 Ví dụ về lựa chọn đường đi theo tiêu chí độ ảnh hưởng	57
2.8 Lưu đồ chung của mô hình định tuyến WUSN cho đa miền quan sát	62
2.9 Lưu đồ các bước về chọn đường đi ngắn nhất của một nút	67
3.1 Mô phỏng mạng cảm biến không dây và topology trong mạng.	74
3.2 Phân bố của các cảm biến cho bộ dữ liệu 100 nút 30% nút dưới mặt đất và 1 vùng quan sát	78
3.3 Phân bố của các cảm biến cho bộ dữ liệu 100 nút 30% nút dưới mặt đất và 1 vùng quan sát	79
3.4 Tổng năng lượng tiêu thụ cho thuật toán FCM và FCM-WUSN	80
3.5 Tổng số nút còn sống và số nút còn sống dưới lòng đất giữa FCM và FCM-WUSN.	81
3.6 Biểu đồ đường của số nút dưới lòng đất kết nối so với số vòng truyền thông cho 100 và 200 nút trong 1 khu vực.	86

3.7 Tổng số nút không kết nối dưới dạng đồ thị và tổng số nút còn sống trên bảng với các vị trí BS khác nhau trong 2 và 4 khu vực.	88
3.8 Tổng số nút còn sống và số nút còn sống dưới lòng đất cho 2 và 4 khu vực với các phân phối khác nhau.	90

PHẦN MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, mạng cảm biến không dây (WSN - Wireless Sensor Network) đã và đang được triển khai trong nhiều ứng dụng như giám sát nông nghiệp thông minh, quân sự, phát hiện tấn công hạt nhân, chẩn đoán sự hỏng hóc của thiết bị, giám sát bệnh nhân, và điều khiển phương tiện giao thông. Đặc biệt trong nông nghiệp thông minh, việc theo dõi và quản lý các yếu tố như tưới tiêu, kiểm soát sâu bệnh, và quản lý dinh dưỡng đất đóng vai trò quan trọng giúp tối ưu hóa tài nguyên và nâng cao năng suất cây trồng, hướng tới các phương pháp canh tác bền vững. Việc tích hợp WSN, Internet vạn vật và phân tích dữ liệu cho phép nông dân đưa ra quyết định chính xác và kịp thời, giảm thiểu tác động đến môi trường và tối đa hóa năng suất. Tuy nhiên, các nút cảm biến trong WSN có tài nguyên hạn chế, như khả năng tính toán, bộ nhớ, và năng lượng thấp. Để bao phủ các khu vực rộng lớn, một cảm biến đơn lẻ không đủ khả năng do phạm vi truyền thông hạn chế, vì vậy cần triển khai nhiều cảm biến kết nối với nhau để tạo thành mạng.

Đối với mạng cảm biến không gian ngầm (WUSN), các hạn chế càng trở nên rõ rệt. Môi trường ngầm như dưới lòng đất có điều kiện khắc nghiệt như độ ẩm cao, áp suất lớn, và các chất ăn mòn, làm giảm tuổi thọ và hiệu quả của các cảm biến. Ngoài ra, tín hiệu truyền thông cũng gặp khó khăn lớn, vì đất và các vật liệu ngầm có thể làm suy giảm tín hiệu vô tuyến, gây khó khăn trong việc duy trì kết nối [3]. Việc cung cấp năng lượng cho các cảm biến trong môi trường ngầm cũng là một thách thức lớn do khó tiếp cận và thay thế nguồn năng lượng. Bên cạnh đó, triển khai và bảo trì mạng cảm biến dưới lòng đất gặp khó khăn về cả mặt kỹ thuật lẫn chi phí, vì việc tiếp cận và sửa chữa các thiết bị cảm biến trong không gian ngầm rất phức tạp và tốn kém.

Các nghiên cứu trước đây thường phát triển mô hình tính toán suy hao trước khi sử dụng mạng LoRaWAN để truyền tải trong WUSN [4, 5]. Một số nghiên cứu khác tập trung vào phát triển các cảm biến kết nối với UAV hoặc gửi gói tin từ mặt đất lên không trung [6], trong khi trong [7] đã phát triển mô hình

suy hao đường truyền hỗn hợp để thu thập dữ liệu và kiểm tra các bất thường trong tập dữ liệu hiện tại. Nghiên cứu [8] áp dụng học sâu để mô hình hóa kênh trong WUSN, giúp chọn lựa các đường truyền tiết kiệm năng lượng nhất dựa trên cường độ tín hiệu và suy hao đường truyền. Tuy nhiên, phương pháp này gặp phải nhược điểm về tính toán phức tạp, điều này gây lo ngại về tính khả thi đối với các nút cảm biến có tài nguyên hạn chế trong WUSN. Ngoài ra, có một số chiến lược định tuyến WSN tiết kiệm năng lượng trong nông nghiệp chính xác, bao gồm các kỹ thuật phân cụm tĩnh, động và dựa trên vùng [9]. Các giao thức trong WUSN sử dụng hệ suy diễn mờ, như được mô tả trong nghiên cứu của Sambo và cộng sự [10], được thiết kế đặc biệt để dự đoán sự suy giảm cường độ sóng điện từ trong đất dựa trên các đặc tính điện môi của đất.

Mạng Internet là hệ thống đa miền mỗi miền được quản lý bởi nhà cung cấp dịch vụ và sử dụng chung giao thức BGP để trao đổi thông tin giữa các miền tự trị. BGP có hai loại: EBGp và IBGP, giúp xác định và cập nhật các tuyến đường truyền thông. Khi thiết kế mạng đa miền, cần chú trọng khả năng mở rộng và bảo mật. Trong mạng cảm biến đa miền, các nút chuyển tiếp giúp mở rộng kết nối giữa các miền. Một số nghiên cứu đã đề xuất tối ưu hóa phạm vi phủ sóng và kéo dài tuổi thọ mạng bằng các nút chuyển tiếp tối thiểu, nhưng chưa có giải pháp định tuyến cụ thể. Phân luồng hiệu quả đã được đề xuất để đáp ứng các ràng buộc của mạng, nhưng 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 [11].

- Hầu hết các nghiên cứu mô hình hóa suy hao đường truyền sử dụng mạng LoRaWAN để truyền dữ liệu và đánh giá mức tiêu thụ năng lượng khi tiếp cận WUSN, sau đó triển khai ứng dụng thu thập dữ liệu cho các ứng dụng nông nghiệp, điều này có thể dẫn đến việc bổ sung cảm biến.
- Các nghiên cứu trước đây chủ yếu áp dụng các giao thức định tuyến trong môi trường hai chiều. Mặc dù một số thí nghiệm đã được thực hiện trong môi trường 3D, nhưng vẫn chưa xem xét việc truyền sóng qua các môi trường khác nhau, như từ mặt đất lên không khí hoặc ngược lại.
- Hầu hết các giả thuyết mạng hiện tại tập trung vào mạng đồng bộ, trong khi

mạng bất đồng bộ vẫn ít được nghiên cứu. Các mạng cảm biến không đồng bộ được sử dụng để giám sát nhiều đối tượng, nhưng giả thuyết về quan sát đa đối tượng chưa được triển khai rộng rãi.

- Các kỹ thuật quản lý mạng không đồng bộ với nhiều khu vực quan sát hiện tại xử lý từng khu vực một cách độc lập và tổng hợp kết quả để đánh giá tuổi thọ mạng. Phương pháp này không phản ánh đúng thực tế, vì thiếu nguyên tắc giải quyết việc truyền dữ liệu giữa các vùng và xem xét tuổi thọ mạng giữa các khu vực.
- Các nút chuyển tiếp được sử dụng để giao tiếp với nút ngầm khi nút này nằm xa trạm gốc. Tuy nhiên, chi phí triển khai các nút chuyển tiếp và nút thu thập dữ liệu có thể cao, và khả năng phản hồi của cơ sở hạ tầng vẫn còn hạn chế.

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.

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.

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 hiệu quả năng lượng ít nhất 15% so với các phương pháp hiện có.

Các 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 luận án.

Luận án bao gồm các mục sau:

- **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 mạng WUSN.

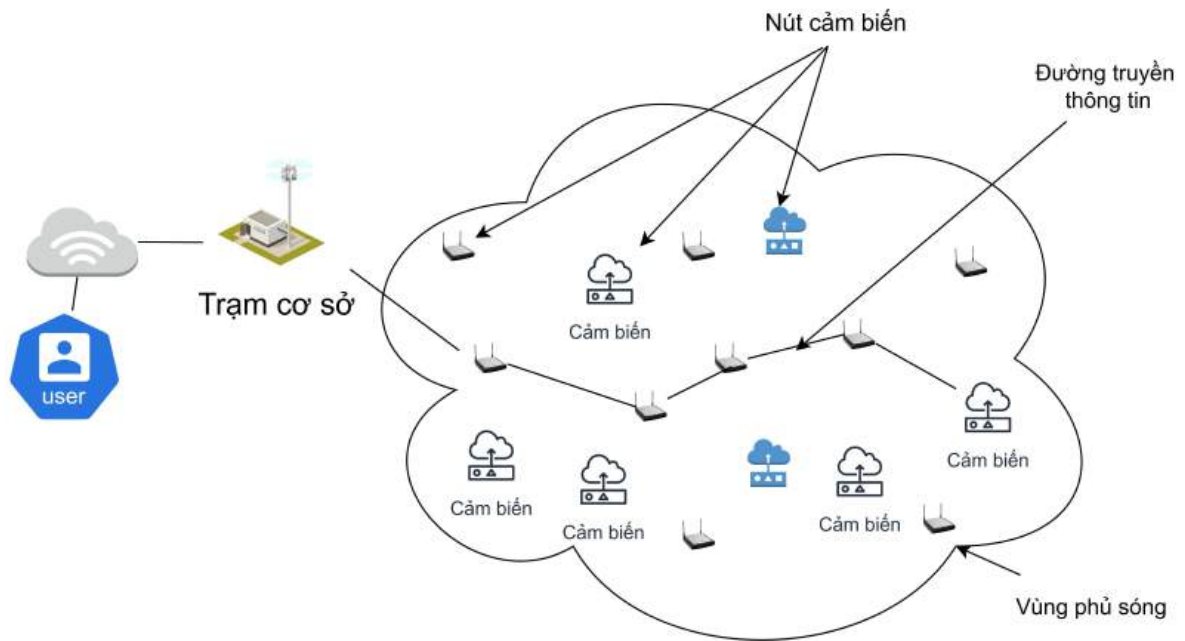
Chương 1

TỔNG QUAN VỀ MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY NGẦM ĐA MIỀN

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.

1.1 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 [12]. Mạng WSN đã được sử dụng trong nhiều ứng dụng, bao gồm giám sát động vật, môi trường [13], giám sát gas nước bị rò rỉ trong đất [14], và giám sát công trình [15], cũng như phát hiện cháy [16] và chăm sóc sức khỏe [17]. Các mạng này có khả năng thu thập dữ liệu về môi trường (ví dụ, đọc ánh sáng hoặc nhiệt độ) và sau đó gửi thông tin này đến trạm cơ sở. Lợi ích của chúng là các cảm biến này có thể được phân phối trong các môi trường mà việc giám sát bởi con người



Hình 1.1: Mạng cảm biến không dây.

sẽ quá nguy hiểm hoặc tốn kém. Những nút cảm biến nhỏ này bao gồm các thành phần: Các bộ vi xử lý rất nhỏ, bộ nhớ giới hạn, bộ phận cảm biến, bộ thu phát không dây, và nguồn năng lượng. Kích thước của các thiết bị cảm biến thay đổi từ to như hộp giấy cho đến nhỏ như hạt bụi và tùy thuộc vào từng ứng dụng [18].

Khi công nghệ phát triển, mạng cảm biến cũng phát triển theo. Khả năng làm cho tất cả các thành phần trở nên nhỏ hơn cũng như rẻ hơn đã dẫn đến sự tiến bộ hướng tới mạng cảm biến lý tưởng với hàng ngàn cảm biến được phân bố trong một khu vực rộng lớn để cảm nhận các điều kiện môi trường [19]. Khi nghiên cứu WSN, yếu tố then chốt chính là tuổi thọ thiết bị cảm biến, tức giới hạn năng lượng. Các nút cảm biến thường vận hành bằng pin, không thể thay thế hoặc sạc lại dễ dàng, nên bắt buộc phải tiêu thụ công suất cực thấp. Trong khi các mạng truyền thống ưu tiên tối đa chất lượng dịch vụ (QoS), thì các giao thức WSN lại ưu tiên bảo toàn năng lượng. Nghiên cứu trước đây của [18] thường giải quyết bài toán triển khai mạng ở các khu vực dễ tiếp cận bằng cách sử dụng các phương pháp lập kế hoạch trước hoặc lắp đặt thủ công, điều này có thể gây ra nhiều hạn chế. Loại triển khai này mang lại việc quản lý mạng tốt hơn và tiết kiệm năng lượng cho các nút cảm biến. Hơn nữa, việc định tuyến tốt cũng giúp giảm chi phí tổng thể của mạng vì việc bao phủ một khu vực với số lượng nút cảm biến tối thiểu có

thể thực hiện được trong triển khai thủ công. Từ đó có thể tối ưu hóa được năng lượng tiêu thụ cho toàn mạng và làm tăng thời gian sống trong toàn mạng. Một số đặc trưng chính của mạng cảm biến không dây [20]:

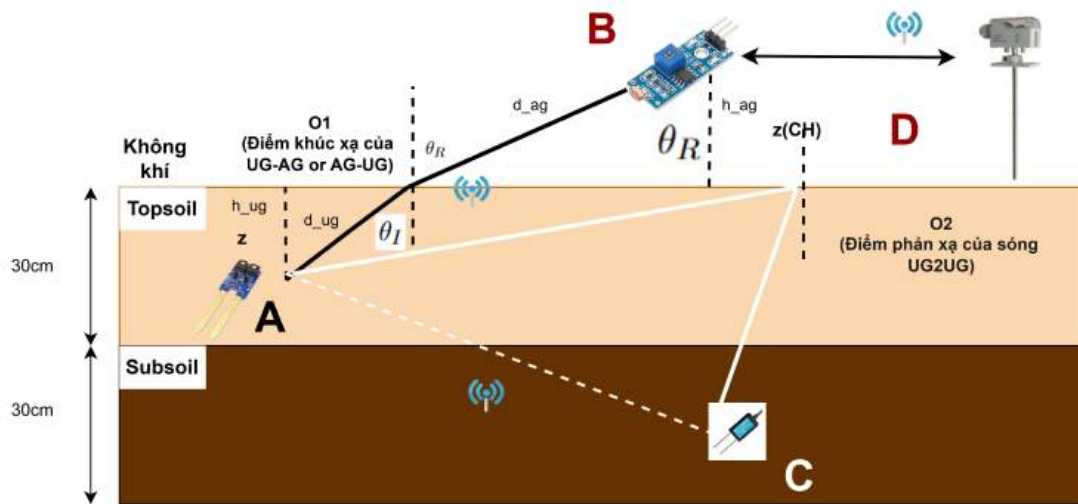
- Tự tổ chức cao: Mạng có khả năng tự lập và điều chỉnh cấu trúc mà hầu như không cần sự can thiệp của con người.
- Truyền thông không tin cậy: Giao tiếp theo kiểu quảng bá (broadcast) trong phạm vi hẹp, kèm định tuyến đa bước (multihop routing).
- Triển khai mật độ cao và hợp tác: Số lượng nút lớn, thường phối hợp với nhau để thu thập và tổng hợp dữ liệu.
- Topology động: Cấu hình mạng liên tục thay đổi do suy hao tín hiệu, dao động môi trường và hư hỏng nút.
- Tài nguyên giới hạn: Ngoài năng lượng, mỗi nút còn bị hạn chế về công suất phát, dung lượng bộ nhớ và khả năng xử lý.

Chính vì những đặc điểm này nên khi triển khai một mạng cảm biến không dây thì luận án đưa ra những chiến lược định tuyến mới để có thể thay đổi thiết kế lại với việc tối ưu hóa về năng lượng trong đường truyền.

1.2 Các mở rộng của mạng cảm biến không dây

1.2.1 Mạng cảm biến không dây ngầm

Mạng cảm biến không dây ngầm bao gồm các nút cảm biến chôn dưới lòng đất, được kết nối với các cảm biến ngầm hoặc cổng thông tin dưới mặt đất. Việc truyền thông ngầm được thực hiện bằng cách sử dụng sóng điện từ (EM) hoặc giao tiếp từ trường cảm ứng (MI) [21, 22]. WUSN có khả năng hoạt động trong những môi trường mà các mạng máy tính khác chưa từng hoạt động, và có tiềm năng cung cấp khả năng cảm biến và truyền thông hiệu quả năng lượng, bền vững và thời gian thực trong những môi trường này. Các nút cảm biến chôn dưới đất thu thập môi trường và gửi dữ liệu qua truyền thông đa điểm cho đến khi đến một cổng thông tin chôn dưới đất hoặc trên mặt đất, cổng này đóng vai trò giống như nút cuối [23]. Tùy thuộc vào yêu cầu, dữ liệu có thể được thu thập bởi một người



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

dùng di động ở mặt đất, hoặc có thể được truy cập qua một mạng cục bộ hoặc Internet. Do đó, đối với WUSN, dữ liệu được thu thập bởi các nút cảm biến chôn dưới đất phải được truyền tới người dùng cuối hoặc trạm cơ sở nằm trên mặt đất. WUSN sử dụng các phương pháp giao tiếp đặc biệt để truyền tải dữ liệu giữa các nút cảm biến và trạm cơ sở hoặc các nút khác trong mạng. Tùy thuộc vào vị trí của các nút và yêu cầu của ứng dụng, có thể có ba phương thức giao tiếp chính bao gồm giao tiếp ngầm đến ngầm, ngầm đến trên mặt đất, và trên mặt đến ngầm [24]. Mỗi phương thức này có những đặc điểm riêng biệt, phản ánh sự phức tạp và linh hoạt của các kênh truyền trong mạng cảm biến không dây ngầm. Được mô tả như trong hình vẽ 1.2 và các thông tin như sau:

- Giao tiếp Ngầm - Ngầm (UG2UG): Trong phương thức này, hai nút cảm biến chôn dưới mặt đất truyền tải điện từ qua các lớp đất đến bộ phát và đến bộ thu tín hiệu. Việc truyền tải diễn ra trong môi trường ngầm, nơi đất được chia ra làm hai vùng chính: đất mặt và đất tầng dưới. Được mô tả bằng truyền từ nút A qua nút C.
- Giao tiếp Ngầm - Mặt đất (UG2AG): Khi một nút cảm biến chôn dưới đất cần truyền dữ liệu đến một nút khác hoặc trạm cơ sở nằm trên mặt đất. Sóng điện từ lúc này sẽ phải xuyên qua một lớp đất ngầm và sau đó vượt qua lớp bề mặt tự do. Đối với kênh truyền này tạo ra một thách thức lớn đối với chất lượng tín hiệu cũng như năng lượng lớn trong quá trình truyền. Được mô tả

việc truyền từ nút A lên B.

- Giao tiếp Mặt Đất - Ngầm (AG2UG): Phương thức này tương tự như UG2AG nhưng ngược lại, khi một bộ phát trên mặt đất (có thể là nút hoặc trạm cơ sở) gửi dữ liệu đến một nút cảm biến chôn dưới đất. Dữ liệu được truyền từ bộ phát trên mặt đất xuống lớp dưới đất và tới các nút cảm biến dưới mặt đất. Được mô tả là việc truyền dữ liệu từ nút B ngược lại với A.

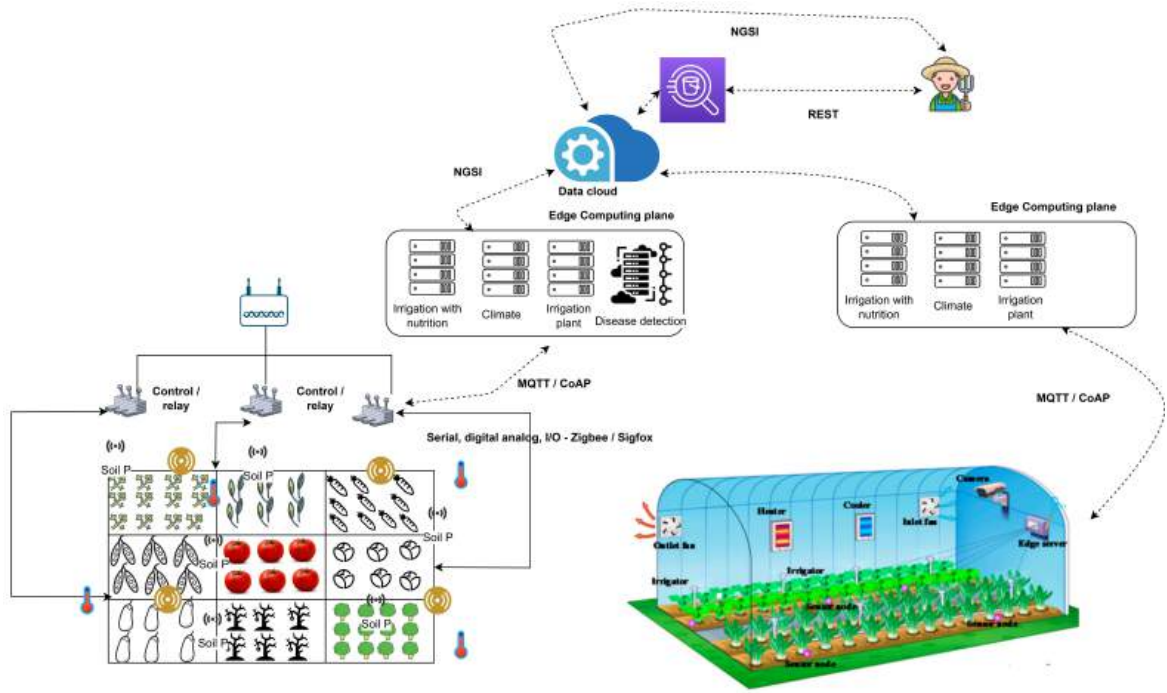
Sóng điện từ trong đất gặp phải sự mất mát do hấp thụ trong đất và sự suy giảm do khuếch tán, do độ từ thẩm của đất cao hơn so với không khí. Hơn nữa, độ từ thẩm của đất thay đổi theo độ ẩm của đất, điều này gây ra sự thay đổi về bước sóng. Những thay đổi này trong bước sóng ảnh hưởng đến hiện tượng cộng hưởng của ăng ten ngầm [25]. Do đó, việc thiết kế một WUSN trở nên phức tạp hơn so với một WSN sử dụng không khí làm kênh truyền thông.

1.2.2 Mạng cảm biến không dây ngầm đa miền

WUSN được triển khai hoàn toàn dưới lòng đất, loại bỏ sự cần thiết của các kết nối dây, khác với các phương pháp truyền thống phụ thuộc vào các cảm biến chôn dưới đất được nối với bề mặt. Mạng đa miền là một hệ thống mạng phức tạp, bao gồm nhiều mạng con còn được gọi là miền liên kết với nhau. Để truyền dữ liệu giữa hai điểm như từ một miền đến BS cần phải xác định đường đi, hay còn gọi là định tuyến đi qua các miền, mỗi miền có một bộ định tuyến để thực hiện tính toán đường đi. Quá trình định tuyến liên miền được thực hiện nhờ sự tương tác trao đổi thông tin giữa các bộ định tuyến. Có hai loại định tuyến chính để thực hiện định tuyến là giao thức định tuyến nội miền và giao thức định tuyến liên miền.

Các mô hình hiện tại trong nghiên cứu dưới lòng đất chủ yếu tập trung vào các phép tính suy hao đường truyền (pathloss) và các thiết bị phần cứng, nhưng lại bỏ qua môi trường mạng và các tham số của nó. Các thành phần thiết kế mạng truyền thông thường được đánh giá một cách riêng biệt liên quan đến việc tiêu thụ năng lượng [26].

Hơn nữa, việc giám sát các đối tượng quan sát đa dạng trong nhiều lĩnh vực



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

là rất quan trọng cho các ứng dụng cả trên và dưới mặt đất. Trong hệ thống thành phố thông minh, các cảm biến áp suất được lắp đặt dưới lòng đất trong các ống dẫn khí hoặc nước trong khu dân cư để phát hiện rò rỉ trong quá trình vận chuyển các khí này. Các cảm biến ở các khu vực ven biển của thành phố theo dõi độ rung của mặt đất và nhiệt độ đất để phục vụ phân tích dự báo trong tương lai. Các cảm biến sẽ thu thập dữ liệu, mà trạm cơ sở trung tâm sẽ tổng hợp và xử lý để phục vụ cho các ứng dụng cảnh báo đa dạng. Hơn nữa, các thiết bị này còn được ứng dụng trong nông nghiệp chính xác như minh họa trong Hình 1.3. Khu vực nông nghiệp với các loại cây trồng khác nhau được trang bị các cảm biến riêng biệt cho mỗi loại cây để thu thập dữ liệu chính xác về nhu cầu dinh dưỡng của đất, độ axit, nhiệt độ và độ ẩm không khí [3].

1.2.3 Ứng dụng

Việc giải quyết vấn đề tối ưu hóa định tuyến trong mạng đa miền sẽ tạo nền tảng vững chắc cho việc phát triển các dịch vụ ưu việt về độ trễ, băng thông và nhiều yếu tố quan trọng khác, từ đó nâng cao chất lượng dịch vụ cho người dùng cuối. Song song với đó, sự phát triển mạnh mẽ của WUSN đã thúc đẩy sự ra đời của các hệ thống trong lĩnh vực Internet vạn vật ngầm, mở ra nhiều ứng dụng tiềm

năng như giám sát sạt lở đất, cứu hộ người bị nạn trong thảm họa động đất hoặc lũ lụt, phát hiện mỏ, giám sát môi trường sinh thái và canh tác nông nghiệp chính xác [27]. Mở rộng hơn, khả năng quan sát trên diện rộng của mạng đa miền còn đóng vai trò quan trọng trong sự phát triển của các lĩnh vực như thành phố thông minh và các ứng dụng quân sự:

- Mạng truyền thông đa miền có cơ chế quản lý và bảo mật riêng biệt, mang lại tính linh hoạt trong việc mở rộng mà không phụ thuộc vào số lượng miền. Kỹ thuật định tuyến được phát triển để tối ưu hóa tài nguyên và nâng cao chất lượng dịch vụ. Trong SD-WAN, mô hình đa miền giúp tối ưu hóa quản lý và cải thiện hiệu suất mạng lớn với kết nối phân tán [28]. Trong điện toán đám mây, mạng đa miền là nền tảng cho Multi-Cloud và Hybrid Cloud, đảm bảo kết nối ổn định và định tuyến hiệu quả [29]. Trong 5G và IoT, mạng đa miền hỗ trợ điện toán biên đa truy cập (MEC), mang lại khả năng tính toán và lưu trữ thuận tiện cho các ứng dụng yêu cầu độ trễ thấp và băng thông cao [30, 31]. Mạng đa miền cũng hỗ trợ truyền thông dưới lòng đất, giúp giám sát và phát hiện các vấn đề khó kiểm soát trong các khu vực ẩn giấu.
- Trong mạng cảm biến, các nút cảm biến và trạm thu thập dữ liệu theo dõi thông tin môi trường, với dữ liệu truyền qua nhiều điểm trung gian đến đích. Khi nhiều mạng cảm biến cùng tồn tại, chúng sử dụng giao thức và đơn vị điều hành khác nhau. Tối ưu định tuyến giữa các mạng cảm biến đa miền nhằm nâng cao hiệu suất mạng [32].
- Trong nông nghiệp thông minh, đặc điểm của môi trường nông nghiệp cho thấy một giải pháp mạng đơn lẻ không thể đáp ứng tất cả các ứng dụng [33]. Các cảm biến nông nghiệp được phân bố ở nhiều khu vực như nhà kính, ruộng đất ngoài trời và khu vực dưới lòng đất. Việc tích hợp thông tin từ các loại cảm biến này trong một hệ thống nông nghiệp thông minh lớn giúp nâng cao độ chính xác trong các quyết định về tưới tiêu và điều hòa không khí cho nông dân [34]. Vì vậy, việc tối ưu hóa kích thước mạng, định tuyến trong nội bộ một miền và giữa các miền, mật độ các nút và khoảng cách truyền trở thành những vấn đề nghiên cứu quan trọng để cải thiện khả năng tương tác trong

IoT nông nghiệp.

- Trong lĩnh vực quân sự, sự phối hợp hiệu quả giữa các đơn vị như không quân, lục quân, hải quân và tác chiến không gian mạng sẽ nâng cao năng lực tác chiến. Mạng lưới kết nối thông tin giữa các đơn vị này tạo thành mạng đa miền, giúp khai thác thông tin đặc trưng từ mỗi đơn vị, bao gồm cả thông tin thu thập từ dưới lòng đất thông qua các cảm biến địa chấn và radar xuyên đất [35]. Ví dụ, quá trình thu thập thông tin từ cảm biến và thiết bị, xử lý bằng trí tuệ nhân tạo và truyền tải tới các đơn vị chỉ huy cần được tối ưu hóa về tốc độ và vị trí truyền trên mạng đa miền. Những thông tin này hỗ trợ quyết định kịp thời của chỉ huy, đồng thời nâng cao khả năng tác chiến phối hợp giữa các đơn vị quân đội.
- Trong hệ thống thành phố thông minh, các cảm biến áp suất được lắp đặt dưới lòng đất trong các đường ống gas hoặc nước tại các khu dân cư để phát hiện rò rỉ trong quá trình vận chuyển [36, 37]. Cảm biến ở khu vực ven biển giám sát rung động mặt đất và nhiệt độ đất phục vụ cho phân tích dự đoán trong tương lai. Dữ liệu thu thập từ các cảm biến sẽ được trạm cơ sở trung tâm tổng hợp và xử lý trước khi sử dụng cho các ứng dụng cảnh báo đa dạng. Việc giám sát này giúp phát hiện sớm các vấn đề khó kiểm soát tại các khu vực ẩn giấu như dưới lòng đất.

Vì vậy, việc nghiên cứu giải pháp định tuyến nhằm tối ưu hóa năng lượng truyền kéo dài thời gian sống cho mạng đa miền ngầm mang tính ứng dụng cao và có tầm ảnh hưởng đáng kể.

1.3 Các giao thức định tuyến

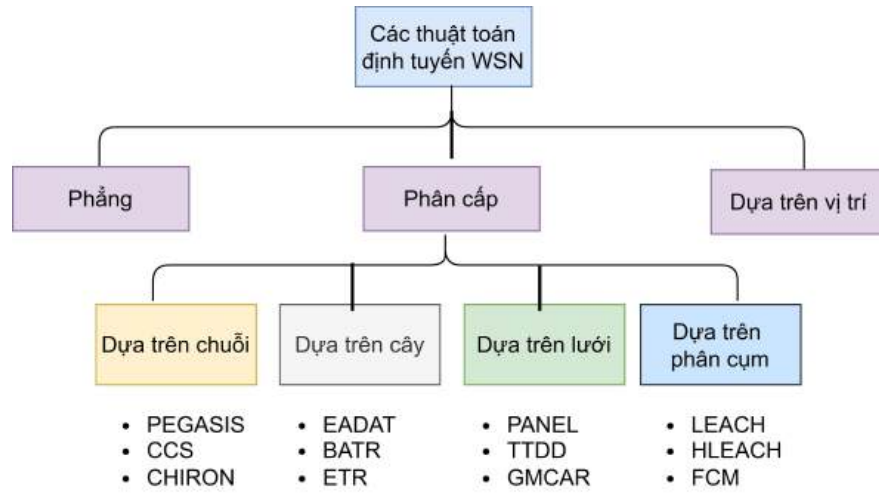
Định tuyến là chức năng của router, giúp xác định lộ trình cho các gói tin từ nguồn đến đích qua hệ thống mạng. Router sử dụng địa chỉ IP đích trong gói tin và tham chiếu vào bảng định tuyến (routing table) để tìm ra đường đi thích hợp. Mỗi mục trong bảng định tuyến tương ứng với một mạng mà router có thể chuyển tiếp, có thể là mạng mà router trực tiếp kết nối hoặc là mạng mà router học được thông qua cấu hình định tuyến.

Trong mạng máy tính, định tuyến có hai loại chính: định tuyến tĩnh và định tuyến động. Định tuyến tĩnh là khi router sử dụng các tuyến đường cố định, được cấu hình thủ công bởi người quản trị mạng. Ngược lại, định tuyến động là khi router sử dụng các tuyến đường thay đổi, được tạo ra qua việc trao đổi thông tin định tuyến giữa các router thông qua các giao thức định tuyến động. Định tuyến động có thể được chia thành hai loại chính: dựa trên vector khoảng cách và trạng thái liên kết [38]:

- Vector khoảng cách: Các router sử dụng định tuyến distance vector định kỳ cập nhật bảng định tuyến và gửi cho các router láng giềng. Các router này không biết chi tiết về tuyến đường hay các router trung gian, chỉ chọn đường đi dựa trên kết quả của router láng giềng. Phương pháp này tốn băng thông vì cập nhật định kỳ và khi có thay đổi, router phát hiện đầu tiên sẽ cập nhật bảng và thông báo cho các router khác.
- Trạng thái liên kết: Trong các giao thức định tuyến link-state, các router trao đổi thông tin quảng bá trạng thái liên kết (LSA) để xây dựng và duy trì cơ sở dữ liệu về cấu trúc mạng. Thông tin này được gửi dưới dạng multicast. Mỗi router có cái nhìn đầy đủ về mạng và sử dụng thuật toán chọn đường ngắn nhất để tìm đường đi tối ưu đến các mạng đích. Khi các router hội tụ xong, chúng chỉ cập nhật định tuyến khi có thay đổi, giúp hội tụ nhanh và tiết kiệm băng thông. Giao thức trạng thái liên kết hỗ trợ CIDR (Classless Inter Domain Routing) và VLSM (Variable Length Subnet Mask), là lựa chọn phù hợp cho mạng lớn, nhưng yêu cầu bộ nhớ và khả năng xử lý CPU cao trên các router.

1.3.1 Các giao thức phổ biến

Trong mạng cảm biến, hàng trăm đến hàng nghìn nút được phân bố khắp khu vực cảm biến, với mật độ có thể đạt đến $20nt/m^3$ [20]. Với số lượng nút cảm biến lớn như vậy, việc xây dựng một cấu hình mạng ổn định là cần thiết. Hình 1.4 minh họa các cây phân cấp tổng quan về các thuật toán định tuyến trong WSN, nhằm tối ưu hóa đường truyền dữ liệu từ các nút đến trạm cơ sở (BS), giảm thiểu



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

năng lượng tiêu thụ và kéo dài tuổi thọ của mạng. Các thuật toán này được chia thành ba nhóm chính [38]:

- Cấu trúc phẳng: tất cả các nút cảm biến đều ngang hàng và đồng nhất về hình dạng cũng như chức năng. Các nút giao tiếp với BS qua multi-hops, sử dụng các nút ngang hàng làm bộ tiếp sóng. Với phạm vi truyền cố định, các nút gần BS hơn sẽ đảm bảo vai trò của bộ tiếp sóng đối với một số lượng nguồn lớn. Giả thiết rằng tất cả các nguồn đều dùng chung một tần số để truyền dữ liệu, vì vậy có thể chia sẻ thời gian.
- Cấu trúc phân cấp: chia mạng thành các cụm, mỗi cụm có một cụm trưởng thực hiện thu thập và chuyển tiếp dữ liệu. Các nút thành viên trong cụm chỉ truyền dữ liệu tới cụm trưởng, giúp giảm thiểu việc truyền tải dữ liệu trực tiếp về BS. Các thuật toán trong nhóm này.
 - Dựa trên chuỗi: PEGASIS [39], Chain-based Clustering Scheme (CCS) [40], CHIRON [41].
 - Dựa trên cây: EADAT (Energy Aware Data Aggregation Tree) [42], BATR (Balanced and Adaptive Tree Routing), ETR (Energy Tree Routing)
 - PANEL (Position-based Adaptive Network Energy-efficient Load balancing).
- Dựa trên vị trí: hệ thống sử dụng thông tin vị trí địa lý để định tuyến chọn đường đi tối ưu dựa vào tọa độ của các nút.

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.

LEACH

Heinzelman và các cộng sự [43] đã giới thiệu giao thức LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) cho WSN, kết hợp giữa phân cụm và phân cấp. LEACH chia mạng thành các cụm nhỏ, chọn một nút làm cụm trưởng trong mỗi cụm. Nút này sẽ thu thập, xử lý dữ liệu từ các nút thành viên và gửi dữ liệu đã xử lý về trạm BS, giúp giảm chi phí truyền thông toàn cục. Quá trình hoạt động của LEACH diễn ra theo các vòng, mỗi vòng bắt đầu bằng pha thiết lập, tiếp theo là hình thành các cụm và chọn cụm trưởng trước khi truyền dữ liệu. Vì nút cụm trưởng tiêu tốn nhiều năng lượng, LEACH sử dụng cơ chế luân phiên chọn cụm trưởng để tránh tiêu hao năng lượng quá mức ở một nút. Quyết định lựa chọn cụm trưởng được tính dựa trên công thức sau:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1-P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{Nếu } n \in G \\ 0 & \text{Trong trường hợp còn lại} \end{cases} \quad (1.1)$$

Trong đó T_n là giá trị ngưỡng, R là tỷ lệ % mong muốn của nút cụm trưởng, r là vòng hiện tại, G tập các nút không được làm cụm trưởng trong vòng $1/P$ vòng cuối. Như vậy đối với công thức trên thì mỗi nút sẽ được làm cụm trưởng đúng một lần trong $1/P$ vòng. Sau khi chọn được nút cụm trưởng nó sẽ dùng mô hình TDMA cho các nút theo từng cụm để quảng bá và truyền thông tin trong pha ổn định.

HLEACH

Thuật toán HLEACH (Hierarchical Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [44] dựa trên nguyên lý của thuật toán LEACH, sử dụng phương pháp ngẫu nhiên để chọn các cụm trưởng (CH) cho các cụm. Một số cải tiến trong HLEACH đề xuất sử dụng ngưỡng năng lượng còn lại của các cảm biến để chọn các nút làm ứng cử viên cho vị trí cụm trưởng. Tuy nhiên, HLEACH áp dụng cơ chế phân cấp, trong đó các cụm trưởng có thể chia sẻ công việc với các nút trưởng cấp cao hơn. Điều này giúp quản lý và xử lý dữ liệu trong mạng mà không làm tăng gánh nặng

Thuật toán 1.1 Thuật toán LEACH [43]

Đầu vào : $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$
Đầu ra : Cụm C_k ($k = 1, \dots, K$)

- 1: **for** each cảm biến s_i **do**
- 2: Tính $T(i)$ theo công thức trên
- 3: Sinh số ngẫu nhiên $R_i \in (0, 1)$
- 4: **if** $T(n) > R_i$ **then**
- 5: $CH(i) = true$
- 6: **else**
- 7: $CM(i) = true$
- 8: **end if**
- 9: **end for**
- 10: **for** $CH(i)$ **do**
- 11: Gửi thông tin quảng bá CH tới tất cả các nút lân cận
- 12: **end for**
- 13: **for** $CM(i)$ **do**
- 14: Tính khoảng cách đến CH_k theo không gian 3 chiều
- 15: **if** $d(CM(i), CH_k) \rightarrow min$ **then**
- 16: $CM(i)$ được thêm vào C_k
- 17: **end if**
- 18: **end for**

cho từng nút, từ đó kéo dài tuổi thọ của mạng và giảm số lần tái phân cụm.

FCM

Bezdek và các cộng sự [45] đã phát triển thuật toán Fuzzy C-Means (FCM), đưa ra khái niệm cụm chồng lấp để giải quyết vấn đề nhập nhằng dữ liệu. Nghĩa là một đối tượng có thể thuộc vào nhiều cụm và độ thuộc vào các cụm là độ mờ. Kết quả thực nghiệm cho thấy FCM mang lại hiệu suất tốt hơn so với thuật toán phân cụm K-Means là phân cụm rõ ràng (phân cụm cứng). Trong bài toán phân cụm, với tập dữ liệu $X = \{x_i, x_i \in \mathbb{R}^K, i = 1, \dots, N\}$. mục tiêu là tìm điểm đại diện cho mỗi cụm từ đó xác định xem đối tượng dữ liệu x_i có thuộc vào một cụm cụ thể nào hay không thông qua giá trị độ thuộc u_{ci} . Thuật toán FCM sử dụng quy trình lặp để xấp xỉ cực tiểu hàm mục tiêu J_{FCM}

$$J_{FCM} = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N u_{ci}^m d_{ci}^2 \quad (1.2)$$

Trong đó u_{ci} là độ thuộc của đối tượng i đối với cụm thứ c , C số lượng cụm, m tham số mờ, x_i là đối tượng thứ i của tập X , V_c là tâm cụm thứ c . Từ đó ma trận độ thuộc $U = \{u_{ci}\}$

$$u_{ci} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ci}}{d_{ij}} \right)} \quad (1.3)$$

Ma trận các tâm cụm $V = \{V_c\}$ được xác định bằng công thức sau

$$v_c = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m} \quad (1.4)$$

Thuật toán 1.2 Thuật toán FCM [45]

Đầu vào : $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$, tham số mờ m , ngưỡng sai số ϵ ; số vòng lặp tối đa τ_{\max}

Đầu ra : Tập các cụm kết quả

- 1: Khởi tạo ma trận hàm thuộc $U = [u_{ci}]$ thỏa mãn: $\sum_{c=1}^C u_{ci} = 1$ với $i = 1, \dots, N$
 - 2: Khởi tạo biến đếm số vòng lặp $\tau = 0$
 - 3: **while do** $\|U^{(\tau+1)} - U^{(\tau)}\| \geq \epsilon$ và $\tau < \tau_{\max}$
 - 4: Tính vector tâm cụm g_c theo công thức 1.4
 - 5: Cập nhật lại U theo công thức 1.3
 - 6: $\tau = \tau + 1$
 - 7: **end while**
 - 8: Xuất ra các cụm kết quả
-

PEGASIS

Lindsey và các cộng sự [39] đưa ra cải tiến với giao thức LEACH với ý tưởng là mỗi nút chỉ cần giao tiếp với nút láng giềng gần nhất với nó và các nút này lần lượt thay nhau truyền tiếp đến BS. Các nút được tổ chức để tạo thành một chuỗi, chuỗi này được thực hiện bằng cách sử dụng thuật toán tham lam bắt đầu từ một vài nút cảm biến. Mục tiêu chính của PEGASIS là giảm thiểu năng lượng tiêu thụ khi truyền dữ liệu về BS mà không giảm chất lượng dữ liệu. Các bước chính của PEGASIS:

- Bước 1: Xây dựng chuỗi bằng thuật toán tham lam. Thuật toán này xây dựng chuỗi bắt đầu từ nút xa trạm cơ sở nhất, coi đây là nút đầu tiên của chuỗi. Nút cuối của chuỗi sẽ tìm nút gần nhất từ tập các nút chưa tham gia vào chuỗi. Nút gần nhất này sau đó được chọn và trở thành nút cuối mới của chuỗi. Quá trình này tiếp tục lặp lại cho đến khi tất cả các nút đều được đưa vào chuỗi. Thuật toán 1.3 mô tả việc này
- Bước 2: Lựa chọn cụm trưởng - Việc chọn cụm trưởng trên chuỗi từ bước 1, các yếu tố của một nút được xem xét một nút trong chuỗi là cụm trưởng bằng năng lượng còn lại một nút, hoặc dựa vào vị trí khoảng cách của nút đó đến các nút lân cận và so với BS.

- Bước 3: Truyền dữ liệu - các nút trong chuỗi sẽ gửi dữ liệu của mình đến cụm trưởng và BS.
- Bước 4: Cập nhật chuỗi - khi một nút trưởng hết năng lượng, một nút khác trong chuỗi sẽ thay thế vị trí từ đó đảm bảo duy trì hoạt động của chuỗi.

Thuật toán 1.3 Thuật toán tham lam trong PEGASIS tạo ra chuỗi [39]

Đầu vào : $X = [X_1, X_2, \dots, X_M] \tau_{\max}$

Đầu ra : Các chuỗi đầu ra

- 1: $N =$ tập tất cả các nút
- 2: $END =$ nút xa trạm cơ sở nhất
- 3: $chain = \{END\};$
- 4: $N = N - \{END\};$
- 5: **while** $N \neq NULL$ **do**
- 6: $END =$ Tìm nút gần nhất(N, END)
- 7: Thêm vào ($chain, END$)
- 8: $N = N - \{END\};$

10: **end while**

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

Nhiều nghiên cứu đã xem xét việc triển khai các hệ thống ứng dụng trong WUSN, đặc biệt là việc xác định năng lượng tiêu hao khi truyền tải dữ liệu giữa các môi trường đất và nước. Mặc dù một số nghiên cứu đã áp dụng mô hình mạng LoRaWAN để định tuyến dữ liệu trong các mạng cảm biến, cho phép thu thập và truyền tải thông tin từ các nút [10, 46, 47], nhưng phần lớn các nghiên cứu này lại ưu tiên phát triển mô hình tính toán suy hao năng lượng hơn là tập trung vào việc nghiên cứu sâu về các phương thức định tuyến và tối ưu hóa hiệu suất của mạng. Trong nghiên cứu của Nguyễn Thị Tâm và cộng sự [1], phương pháp lựa chọn số lượng nút chuyển tiếp trong WUSN đã được đề xuất để kéo dài thời gian sống của mạng. Một nghiên cứu khác của Hitesh Panda và cộng sự [48] cũng mở rộng mô hình suy hao nhiều đối tượng nhưng vẫn thiếu phần định tuyến trong mô hình đề xuất.

Yin-Di Yao và cộng sự [49] đề xuất các giải pháp để tối ưu hóa năng lượng trong WUSN. Trong nghiên cứu này đã áp dụng thuật toán phân cụm Otsu dựa trên góc quay của camera gắn trên trạm cơ sở, nhằm giảm năng lượng tiêu thụ toàn mạng. Tuy nhiên, nghiên cứu này không thực sự áp dụng cho các nút cảm

biến chôn dưới lòng đất, mà chỉ sử dụng dữ liệu từ hình ảnh quét để đo độ ẩm đất phục vụ cho hệ thống tưới tiêu. Trong khi đó, nghiên cứu [50] xem xét một WUSN trong địa hình ba chiều nhưng vẫn bị giới hạn bởi độ cao và độ sâu của các nút cảm biến và nút chuyển tiếp. Akyildiz và cộng sự trong nghiên cứu [51] đã phân tích khả năng kết nối của mạng cảm biến không dây ngầm với mô hình khúc xạ, nhưng phạm vi truyền thông của mạng chỉ được xem xét trong không gian hai chiều. Cũng trong các nghiên cứu trước đây, một thuật toán phân cụm mới mở rộng từ phương pháp FCM đã được đề xuất trong [2], tuy nhiên, nghiên cứu này không tính đến sự mất mát năng lượng lớn hơn khi các nút cảm biến được chôn dưới lòng đất.

Việc thiết kế cấu trúc mạng phù hợp cho WUSN đóng vai trò quan trọng đối với độ tin cậy của mạng và việc bảo tồn năng lượng. Các cấu trúc mạng WUSN thường có sự khác biệt rõ rệt so với mạng cảm biến trên mặt đất do vị trí triển khai thiết bị được lên kế hoạch, đặc biệt là việc đào hố để triển khai các nút cảm biến. Mạng ba chiều sẽ là lựa chọn phổ biến trong WUSN, với các thiết bị được triển khai ở độ sâu khác nhau tùy thuộc vào ứng dụng cảm biến. Luận án tập trung vào việc đề xuất giải pháp thiết kế cấu trúc mạng thông minh nhằm tiết kiệm năng lượng cho WUSN. Ngoài việc xem xét về địa hình trong không gian 3D còn cần phải xem xét một số ràng buộc vật lý trong vị trí của các cảm biến. Vì suy hao năng lượng tỷ lệ thuận với khoảng cách giữa bộ phát và bộ thu, việc tối ưu hóa năng lượng có thể đạt được bằng cách thiết kế một cấu trúc mạng với nhiều bước nhảy khoảng cách ngắn, thay vì chỉ tập trung vào một số bước nhảy dài.

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

Internet là một mạng đa miền, nơi các miền tự trị được kết nối và quản lý độc lập [52]. Giao thức BGP đóng vai trò là giao thức định tuyến liên miền, cho phép các miền trao đổi thông tin về lộ trình thông qua giao thức TCP. BGP sử dụng các thuộc tính như AS Path và Local Preference để xác định đường đi tốt nhất giữa các miền [38].

Trong mạng nội bộ của BGP, giao thức định tuyến nội miền Open Shortest

Path First (OSPF) được sử dụng [38]. Giao thức này, thuộc loại liên kết trạng thái, sử dụng thuật toán Dijkstra để tìm đường đi ngắn nhất. OSPF chia mạng thành các khu vực nhỏ nhằm giảm bớt tải khi tính toán định tuyến và hỗ trợ việc chia sẻ thông tin trạng thái liên kết giữa các router. Tuy nhiên, hạn chế của OSPF là việc tính toán đường đi ngắn nhất chỉ dựa trên vị trí của các nút mà không xét đến các yếu tố vật lý khác của mạng. Do đó, khi thiết kế kỹ thuật định tuyến trong mạng đa miền, cần chú trọng đến hai yếu tố chính: khả năng mở rộng và tính bảo mật, để đảm bảo sự trao đổi thông tin an toàn giữa các miền [38]. Với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ mạng, việc tìm kiếm các giải pháp định tuyến hiệu quả trong môi trường đa miền ngày càng được quan tâm. Mục tiêu là phát triển các giải pháp mới để áp dụng vào các kiến trúc mạng hiện đại, vì các mô hình truyền thông truyền thống không còn đáp ứng đủ các yêu cầu phức tạp của mạng đa miền hiện đại [11].

Đối với mạng cảm biến đa miền, các nút chuyển tiếp được coi là giải pháp để mở rộng vùng kết nối và khả năng liên kết giữa các miền. Chaofan và cộng sự trong [53] đề xuất giải pháp đặt các nút chuyển tiếp nhằm tối ưu hóa phạm vi phủ sóng và kết nối trong mạng WSN. Cũng với mục tiêu này, các nghiên cứu khác như [54–56] đề xuất triển khai số lượng nút chuyển tiếp tối thiểu để kéo dài thời gian sống của mạng. Ying Xu và cộng sự trong nghiên cứu [57] cũng đã nghiên cứu về tối ưu hóa phạm vi bao phủ trong mạng, đồng thời đưa ra các mục tiêu về năng lượng tiêu thụ, phạm vi phủ sóng và cân bằng năng lượng trong mạng. Tuy nhiên, những nghiên cứu trên chưa đề xuất giải pháp cụ thể về định tuyến trong mạng, và các nút kết nối với nhau vẫn chỉ được xem xét trong không gian 2D.

Trong nghiên cứu của Zang và cộng sự [58], phương pháp phân luồng hiệu quả trong mạng đa miền đã được đề xuất để đáp ứng các ràng buộc của mạng. Tuy nhiên, tối ưu hóa định tuyến trong mạng đa miền với nhiều ràng buộc vẫn là một bài toán khó, và phương pháp giải quyết chủ yếu dựa trên việc xác định trước thứ tự các miền cần đi qua, từ đó tìm ra tuyến đường tối ưu nhất. Buzzi và cộng sự trong nghiên cứu [59] đã đề xuất cải tiến giao thức BGP liên miền để đảm bảo chất lượng mạng, nhưng BGP vẫn không phản hồi ngay lập tức đối với sự thay đổi

trong cấu trúc mạng, đặc biệt là đối với các hệ thống có các yêu cầu ràng buộc cụ thể.

1.3.4 Một số nhận xét

Việc tổng quan các giải pháp định tuyến trong WUSN trong đa miền, có thể đưa ra được những nhận xét như sau:

- Phần lớn các nghiên cứu tập trung vào việc mô hình hóa suy hao đường truyền, sử dụng mạng LoRaWAN để truyền dữ liệu, và đánh giá mức tiêu thụ năng lượng trong WUSN. Sau đó, các ứng dụng được phát triển để thu thập dữ liệu liên quan đến từng ứng dụng nông nghiệp, quân sự hoặc ứng dụng cảnh báo trong thành phố thông minh. Các nghiên cứu trước chưa làm rõ được việc truyền dữ liệu ở các nút cảm biến.
- Nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào việc cải tiến các giao thức định tuyến mạng bằng cách sử dụng các tập dữ liệu nằm trong các môi trường 2D. Nhiều nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm trong môi trường 3D; tuy nhiên chỉ mới quan tâm về địa hình không quan tâm về tính vật lý của việc truyền. Như vậy năng lượng truyền được tính toán trong các mô hình là chưa được chính xác nếu môi trường truyền của hai nút cảm biến khác nhau không trong không khí.
- Các giả thuyết mạng hiện tại chủ yếu tập trung vào các mạng đồng bộ, trong khi nghiên cứu về các mạng bất đồng bộ vẫn còn hạn chế. Mạng cảm biến bất đồng bộ phục vụ mục đích giám sát các đối tượng quan sát khác nhau; tuy nhiên, khái niệm quan sát đa đối tượng vẫn chưa được triển khai đầy đủ trong các ứng dụng thực tiễn.
- Các mạng không đồng bộ với nhiều khu vực quan sát hiện nay thường được quản lý bằng cách xử lý độc lập từng khu vực, sau đó tổng hợp kết quả để đánh giá hiệu suất chung. Tuy nhiên, phương pháp này thiếu tính chính xác trong việc phản ánh thực tế hoạt động của mạng. Hạn chế lớn nhất là việc thiếu một cơ chế thống nhất để điều phối việc truyền dữ liệu giữa các khu vực và đánh giá tuổi thọ mạng một cách tổng thể trên toàn hệ thống. Trong cấu

trúc mạng, các nút chuyển tiếp hoặc nút thu thập dữ liệu đóng vai trò là cầu nối liên lạc với các nút ngầm, vốn thường nằm ở khoảng cách xa so với trạm cơ sở.

1.4 Mô hình suy hao

Trong mạng cảm biến không dây, khi sóng truyền đi từ bộ phát đến bộ thu, sự suy hao năng lượng và độ nhiễu của sóng là hai yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng tín hiệu, và thời gian sống của toàn hệ thống. Năng lượng tiêu hao trong luận án được tính theo mô hình không vật cản và đa đường định tuyến khi truyền cảm biến trên mặt đất. Đối với đường truyền từ các nút dưới mặt đất lên trên mặt đất, luận án tính năng lượng suy hao bằng mô hình Modified Friis do Akyildiz và cộng sự đưa ra [60]. Năng lượng này phụ thuộc nhiều vào các yếu tố như khoảng cách truyền, sự suy hao trong các kênh truyền và mô hình truyền sóng. Công suất phát tăng để truyền tín hiệu trong khoảng cách xa hơn. Độ nhiễu cũng sẽ tăng theo tỷ lệ thuận với năng lượng tiêu hao vì năng lượng tín hiệu bị suy hao (do khoảng cách dài hoặc tính chất môi trường ngầm), tín hiệu trở nên kém rõ ràng hơn và dễ bị nhiễu từ các yếu tố bên ngoài. Nhiễu có thể làm tăng tác động của suy hao khi tín hiệu yếu đặc biệt trong môi trường dưới mặt đất, nơi các yếu tố gây suy hao mạnh và độ nhiễu cao có thể làm giảm đáng kể chất lượng truyền toàn mạng.

1.4.1 Mô hình không vật cản, đa đường định tuyến

Trong WUSN, việc thay pin hay nạp thêm năng lượng tại chỗ hầu như bất khả thi; vì thế, thời gian hoạt động của nút gần như gắn liền với tuổi thọ pin. Tuy nhiên, một nút cảm biến là một thiết bị điện rất nhỏ với nguồn năng lượng hạn chế. Trong mạng cảm biến mà đường truyền là cấu trúc phân cấp, mỗi nút vừa đóng vai trò thu thập dữ liệu, vừa đảm nhiệm truyền tiếp dữ liệu cho các nút khác. Khi một vài nút hết năng lượng hoặc gặp sự cố, cấu trúc mạng buộc phải thay đổi, kéo theo việc tổ chức lại tuyến đường truyền và tái cấu trúc mạng [61]. Do đó, tối ưu hóa và quản trị năng lượng trở thành vấn đề cốt lõi. Chính điều này đã dẫn đến nhiều nghiên cứu phát triển hàng loạt thuật toán và giao thức mới,

hướng đến việc ước lượng và tiết kiệm năng lượng cho toàn mạng WSN. Việc xác định các tính năng lượng tiêu hao trong các mô hình sẽ khác nhau của giao thức.

Trong mô hình này, cả hai kênh không vật cản và đa đường định tuyến đều được sử dụng, tùy thuộc vào khoảng cách giữa bộ phát và bộ thu. Khi khoảng cách nhỏ hơn một giá trị ngưỡng d_0 thì mô hình không vật cản fs được sử dụng; ngược lại, mô hình đa đường định tuyến mp được sử dụng. Gọi giá trị E_{elec} , fs và mp lần lượt là năng lượng cần thiết cho mạch điện tử và bộ khuếch đại trong không gian không vật cản, đa đường định tuyến. Năng lượng cần thiết cho sóng radio để truyền tải một thông điệp l – bit qua khoảng cách d được tính như công thức sau [62].

$$E_T(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 & \text{for } d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4 & \text{for } d \geq d_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Ngoài ra năng lượng cần thiết cho sóng radio để nhận thông tin l – bit được tính bằng

$$E_R(l) = lE_{elec} \quad (1.6)$$

E_{elec} phụ thuộc vào nhiều yếu tố như mã hóa, điều chế, cơ chế lọc và trải tín hiệu trong khi năng lượng khuếch đại $\epsilon_{fs}d^2/\epsilon_{mp}d^4$ sẽ phụ thuộc vào khoảng cách giữa bộ phát và bộ thu cũng như tỷ lệ lỗi bit khả năng chấp nhận được luận án sử dụng mô hình giả định một mô hình đơn giản là radio bị tiêu hao $E_{elec} = 50nJ/bit$ để vận hành mạch điện truyền hoặc thu và $\epsilon_{amp} = 100pJ/bit/m^2$ cho các bộ khuếch đại tín hiệu truyền để đạt giá trị chấp nhận được $\frac{E_b}{N_o}$. Các tham số này sẽ tốt hơn so với các trạng thái được thiết kế cho radio hiện nay. Luận án sử dụng mô hình tính năng lượng này đối với những cảm biến được đặt trên mặt đất khi truyền. Đây là mô hình đơn giản nhất để áp dụng, vì sự lan truyền sóng radio có tính biến động rất cao và rất khó để mô phỏng và tính năng lượng.

1.4.2 Mô hình suy hao trong mạng cảm biến không dây ngầm

Đặc tính của kênh truyền thông trong WUSN rất khác biệt so với kênh truyền thông không gian tự do truyền thống. Sự khác biệt này được gây ra bởi cơ chế lan truyền sóng trong kênh ngầm. Sóng EM tương tác với môi trường đất và thể hiện những đặc tính khác biệt, từ đó dẫn đến việc suy hao cao hơn. Các

tính chất vật lý của kết cấu đất, độ ẩm đất, nhiệt độ đất và mật độ khối lượng tác động đến việc lan truyền sóng ngầm. Những sự tương tác này gây ra những hư hỏng trong kênh truyền, và chúng sẽ bị thay đổi theo không gian và thời gian truyền [23].

Mô hình suy hao đường truyền Modified Friis dựa trên phương trình truyền dẫn của Friis, được thiết kế ban đầu cho truyền thông không gian tự do [63]. Tuy nhiên, mô hình cải tiến Friis do Akyildiz và cộng sự [23] đề xuất đã xem xét sự suy hao đường truyền do sự suy giảm trong lòng đất với $L_{UG-AG} = L_{UG} + L_{AG}$. Trong đó L_{UG} biểu thị sự suy hao do sự khác biệt về bước sóng của tín hiệu trong đất và bước sóng của tín hiệu trong không khí. đại diện cho sự suy hao trong truyền dẫn. Suy hao L_{AG} xem xét cả sự suy hao trong không gian tự do và sự suy hao trong đất [60].

$$L_{UG}(dB) = 154 - 20 \log(d_{ug}) + 20 \log(\beta) \quad (1.7)$$

$$L_{AG}(dB) = 8.69\alpha d_{ag} \quad (1.8)$$

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.

$$L_{UG-AG}(dB) = 6.4 + 20 \log(d_{ug}) + 20 \log(\beta) + 8.62\alpha d_{ag} \quad (1.9)$$

Trong đó thì d_{ag} và d_{ug} là khoảng cách tín hiệu được truyền của sóng điện từ từ đất lên không khí, hai khoảng cách này được tính với công thức như sau dựa vào độ cao của nút cảm biến ở phía trên là h_{ag} và độ sâu của nút cảm biến đặt dưới lòng đất h_{ug} . Bên cạnh đó θ_I và θ_R là hai góc tới và góc khúc xạ của phần truyền từ mặt đất lên không khí.

$$d_{ag} = \frac{h_{ag}}{\cos \theta_R} \quad d_{ug} = \frac{h_{ug}}{\cos \theta_I} \quad (1.10)$$

Các hằng số α và β là các yếu tố chính của mô hình suy hao đường truyền điều chỉnh Friis thông thường và gồm các phần thực và phần ảo lan truyền phức

Bảng 1.1: Tham số sử dụng để tính về các tính chất dưới lòng đất [1]

Tham số	Giá trị	Mô tả
d_{US}	20 m	Độ sâu của các cảm biến
d_{AS}	25 m	Chiều cao của cảm biến trên mặt đất
f	300 MHz	Tần số hoạt động sóng vô tuyến
m_v	10%	Độ ẩm thể tích của đất
p_b	1.5 g/cm ³	Khối lượng riêng của đất là lượng đất khô trên một đơn vị thể tích đất. Khối lượng này tính đến cả chất rắn và không gian lỗ rỗng.
S	50%	Mật độ của các hạt đất rắn được biểu thị bằng tỷ lệ giữa tổng khối lượng của chúng với tổng thể tích của chúng.
C	15%	Phần khối lượng của cát biểu thị tỷ lệ cát so với toàn bộ thành phần.
η	3	Hệ số suy giảm trong không khí
n_1	1.55	Chỉ số khúc xạ của đất
n_2	1	Chỉ số khúc xạ trong không khí

với hằng số γ .

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right)} \quad (1.11)$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right)} \quad (1.12)$$

Độ từ thẩm trong chân không μ_0 và độ điện thẩm trong không gian tự do ε_0 có mối quan hệ với vận tốc ánh sáng trong chân không qua công thức $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$. Hơn nữa, hầu hết các loại đất không chứa các nguyên tố kim loại, vì vậy độ từ thẩm bị bỏ qua ($\mu_r = 1$). CDC được liên kết với mô hình điện thẩm pha trộn bán thực nghiệm do Peplinski đưa ra [64]. Các giá trị tham số cho việc tính toán năng lượng truyền của các nút chôn dưới lòng đất trong phần thực nghiệm của luận án sẽ được thiết lập giá trị theo Bảng 1.1.

$L_{UG-AG}(dB)$ được tính theo công thức là Decibel (dB) đại diện cho đơn vị đo về tỷ lệ cường độ sóng, tuy nhiên việc mô hình hóa trong luận án được sử dụng để tính toán tổng năng lượng tiêu thụ trong mạng WSN. Theo tiêu chuẩn IEEE đã đưa ra cách chuyển đổi giữa mức độ sóng (dB) và công suất (Watt), và từ đây ta có thể tính được năng lượng tiêu thụ từ công suất đưa ra [65]. Quy lại, việc chuyển từ đơn vị dB sang J sẽ có những bước như sau:

- Bước 1: Mối tương quan giữa cường độ sóng và công suất, vì mức độ sóng không phải là một giá trị tuyệt đối mà là tỷ lệ giữa hai giá trị công suất là

công suất và công suất tham chiếu. $P = P_0 \times 10^{\frac{L(dB)}{10}}$. Trong đó $L(dB)$ là cường độ sóng suy hao ta thu được từ công thức điều chỉnh Friis, và P_0 là công suất tham chiếu ví dụ như có $1mW = 10^{-3}W$ [66].

- Bước 2: Sau khi có giá trị của công suất, thì ta sẽ tính giá trị năng lượng từ công suất, năng lượng là sự phản ánh công suất truyền theo thời gian [67]. Lịch thu dữ liệu từ các nút thu thập dữ liệu đến trạm cơ sở theo thời gian là 15 phút một lần. $E = P \times t$ trong đó E là năng lượng tính bằng Joules (J), P là công suất tính bằng watt (W), và t là thời gian được tính bằng giây (s).

1.5 Tối ưu hóa trong mạng cảm biến không dây

Trong môi trường tài nguyên hạn chế của WSN, khi thiết lập hệ thống cần tối ưu hóa việc phân bổ tài nguyên để đạt hiệu quả cao nhất, gia tăng lợi ích và giảm thiểu chi phí, rủi ro. Bài toán tối ưu hóa trong WSN liên quan đến việc cải thiện hiệu suất mạng, chẳng hạn như tối ưu hóa việc sử dụng băng thông, năng lượng, và tài nguyên tính toán. Việc áp dụng các phương pháp tối ưu không chỉ nâng cao công suất tài nguyên mà còn giúp đảm bảo sự phát triển bền vững và duy trì lợi thế cạnh tranh trong môi trường đầy thách thức.

Các bài toán tối ưu là quá trình tìm lời giải tốt nhất cho một hàm mục tiêu trong tập hợp các lời giải khả thi. Một cách phân loại bài toán tối ưu là dựa vào miền giá trị của các biến, bao gồm hai loại chính: tối ưu liên tục và tối ưu rời rạc. Tối ưu liên tục tìm giá trị tối ưu của một hàm liên tục trên một miền xác định, trong khi tối ưu rời rạc tìm giá trị tối ưu trong một miền có các giá trị riêng biệt [68].

Bài toán tối ưu tổng quát có thể được phát biểu dưới dạng tìm cực tiểu (hoặc cực đại) của một hàm $f(x)$ như sau:

$$\min f(x), \quad \text{với } x \in D \quad (P_1) \quad (1.13)$$

Trong đó, $D \subseteq \mathbb{R}^n$ là tập nghiệm khả thi (hay còn gọi là tập nghiệm chấp nhận được), và $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ là hàm mục tiêu. Mỗi điểm $x \in D$ được gọi là một nghiệm khả thi hay phương án khả thi. Điểm $x^* \in D$, sao cho $f(x^*) \leq f(x) \forall x \in D$,

được gọi là nghiệm tối ưu (hay nghiệm tối ưu toàn cục) của bài toán P_1 . Giá trị tối ưu (hay giá trị cực tiểu) của bài toán P_1 được ký hiệu là [68]:

$$\min_{x \in D} f(x) \quad \text{hoặc} \quad \min\{f(x) \mid x \in D\}$$

Nếu bài toán P_1 có nghiệm tối ưu là x^* , thì $f(x^*) = \min_{x \in D} f(x)$. Trong đó ký hiệu $\arg \min\{f(x) \mid x \in D\}$ là tập nghiệm tối ưu của bài toán. Nếu bài toán có nghiệm tối ưu là x^* , ta có $x^* = \arg \min\{f(x) \mid x \in D\}$. Điểm x^* được gọi là nghiệm tối ưu cực bộ của bài toán P_1 nếu tồn tại ít nhất một vùng lân cận ϵ của điểm $x^* \in D$, sao cho:

$$f(x^*) \leq f(x) \quad \forall x \in B(x^*, \epsilon) \cap D \quad \text{và} \quad x \neq x^*$$

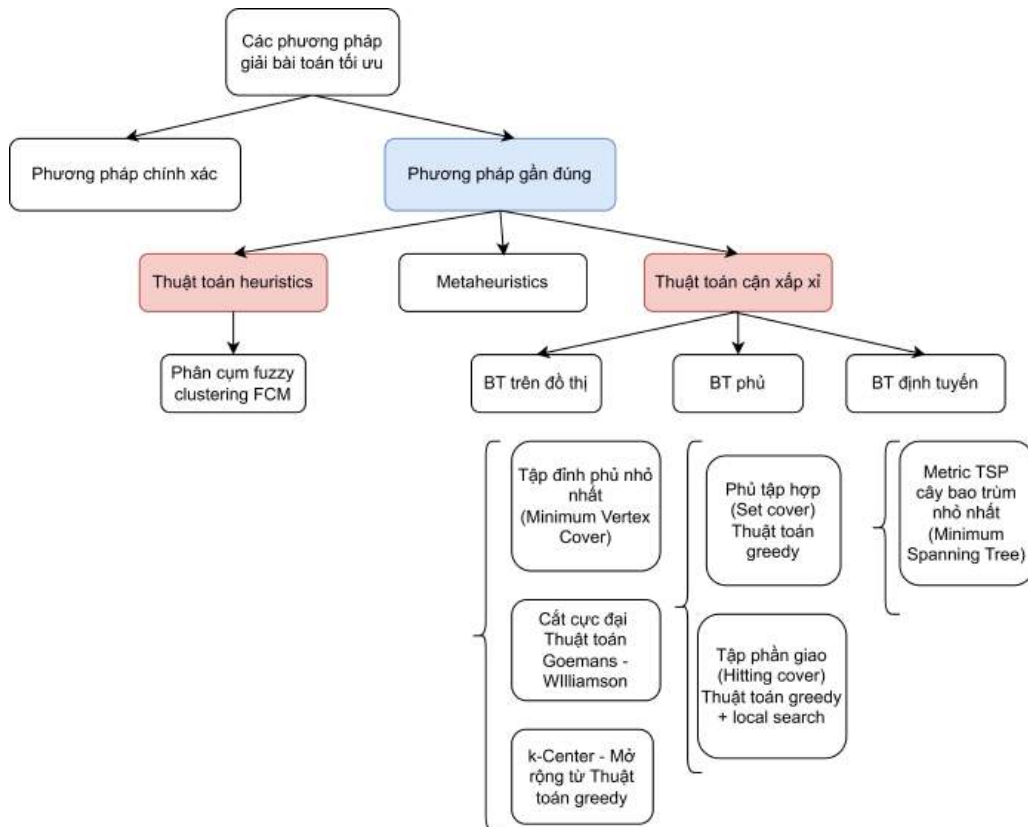
Trong đó, $B(x^*, \epsilon) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - x^*\| < \epsilon\}$ là một bán kính lân cận của x^* . Bài toán P_1 có thể tương đương với bài toán tối ưu khác P_2 khi chuyển sang tìm cực đại của $-f(x)$ với $x \in D$. Khi đó, tập nghiệm tối ưu của hai bài toán này sẽ trùng nhau, và giá trị tối ưu của chúng sẽ có dấu ngược lại:

$$\min\{f(x) \mid x \in D\} = -\max\{-f(x) \mid x \in D\}.$$

Do đó, để đơn giản hóa, ta có thể chỉ xét một trong hai dạng bài toán, P_1 hoặc P_2 . Nếu $D = \mathbb{R}^n$, bài toán P_1 là bài toán tối ưu không ràng buộc. Ngược lại, nếu D bị ràng buộc, bài toán P_1 là bài toán tối ưu có ràng buộc. Trong các bài toán tối ưu có ràng buộc, tập D thường được xác định bởi:

$$D = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, p\}.$$

Các bài toán tối ưu thường được giải quyết bằng hai phương pháp giải chính xác và phương pháp giải gần đúng. Phương pháp giải chính xác tìm kiếm nghiệm tối ưu bằng cách xét toàn bộ không gian giải pháp, nhưng thường trở nên bất khả thi với các bài toán lớn như định tuyến mạng. Ngược lại, phương pháp giải gần đúng (bao gồm thuật toán cận xấp xỉ, heuristics và metaheuristics) chỉ khảo sát một phần không gian giải pháp để nhanh chóng tìm ra nghiệm chấp nhận được, tiết kiệm thời gian và tài nguyên [69]. Do đó, phương pháp gần đúng thường được ưu tiên cho các bài toán tối ưu hóa phức tạp với không gian giải pháp rộng lớn.



Hình 1.5: Tổng quan về các phương pháp giải bài toán tối ưu

Với các thuật toán heuristic thuần túy, mục tiêu không nhất thiết phải là tìm nghiệm tối ưu, và cũng không cần chứng minh tính tối ưu của giải pháp. Đây là cách tiếp cận linh hoạt để giải quyết các bài toán phức tạp trong thực tế, sử dụng kinh nghiệm, trực giác và phương pháp thử và sai. Tuy nhiên, khi áp dụng vào bài toán tối ưu trong mạng WSN, các giải pháp cần tuân theo các điều kiện như độ phủ sóng và năng lượng của nút, đòi hỏi phải thêm các ràng buộc để đảm bảo tính chính xác. Trong lĩnh vực thuật toán heuristic, có một nhánh heuristic có kiểm soát, cho phép xây dựng và chứng minh giới hạn xấp xỉ so với nghiệm tối ưu.

Việc áp dụng các thuật toán theo phương pháp cận xấp xỉ cho mạng WSN trong một không gian giải pháp lớn với nhiều ràng buộc phức tạp thường gặp nhiều khó khăn. Để giải quyết thách thức này và giảm độ phức tạp của bài toán, luận án đã tiếp cận bằng cách sử dụng phương pháp nhân tử Lagrange kết hợp với khai triển Taylor trong việc xác định cận dưới cho bài toán tối ưu. Cụ thể, phương pháp nhân tử Lagrange được áp dụng để tối ưu hóa các điều kiện ràng buộc trong quá trình tìm kiếm nghiệm của phương trình tối ưu. Theo [70], đối với bài toán

tối ưu P_1 nhằm tìm cực tiểu với các ràng buộc $g_i(x) \leq 0$, $i = 1, \dots, p$, phương pháp nhân tử Lagrange chuyển đổi bài toán có ràng buộc này thành một bài toán không ràng buộc thông qua việc giới thiệu các nhân tử Lagrange λ_i tương ứng với mỗi ràng buộc $g_i(x)$. Nhờ đó, hàm Lagrange có thể được viết lại như sau:

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^p \lambda_i g_i(x) \quad (1.14)$$

trong đó λ_i là các nhân tử Lagrange, và giải bài toán thì phải giải hệ phương trình $\nabla_x \mathcal{L}(x, \lambda) = 0$ với các điều kiện Karush-Kuhn-Tucker (KKT) bao gồm như sau:

$$g_i(x) \leq 0, \quad \lambda_i \geq 0, \quad \lambda_i g_i(x) = 0 \quad \forall i \quad (1.15)$$

Khai triển Taylor [71] hỗ trợ trong việc xấp xỉ hàm mục tiêu để đơn giản hóa các bước gần nghiệm. Điều này có nghĩa là mở rộng hàm $f(x)$ tại điểm x_0 gần tối ưu, để có thể xấp xỉ giá trị hàm mục tiêu trong một vùng quanh x_0 .

$$f(x) \approx f(x_0) + \nabla f(x_0)^T (x - x_0) + \frac{1}{2} (x - x_0)^T \nabla^2 f(x_0) (x - x_0) \quad (1.16)$$

1.6 Môi trường mô phỏng và các tiêu chí đánh giá

1.6.1 Môi trường mô phỏng

MATLAB là một lựa chọn tuyệt vời cho các thực nghiệm mô phỏng so với NS-3 và OMNeT++ nhờ vào môi trường lập trình dễ sử dụng, khả năng tính toán mạnh mẽ và khả năng trực quan hóa đồ họa mạnh mẽ. MATLAB hỗ trợ các phép toán ma trận nhanh, cung cấp nhiều hộp công cụ cho mạng, xử lý tín hiệu và học máy, giúp nó linh hoạt trong việc mô phỏng các kịch bản phức tạp. Cụ thể, MATLAB rất phù hợp để thiết kế và kiểm tra các thuật toán định tuyến trong mạng trong một khung lý thuyết, cho phép mô phỏng và tối ưu hóa các mô hình mà không phụ thuộc vào các giao thức mạng cụ thể. Ngược lại, NS-3 và OMNeT++ yêu cầu kiến thức lập trình sâu và không cung cấp mức độ hỗ trợ đồ họa tương tự như MATLAB. Luận án sử dụng MATLAB làm công cụ mô phỏng lại các thuật toán từ nghiệm phương trình giải tích đưa ra.

1.6.2 Tiêu chí đánh giá

Thuật toán định tuyến được thiết kế phải đảm bảo sự thích ứng với thiết kế của một mạng cảm biến cụ thể. Các tiêu chí sau đây đã được áp dụng trong việc đánh giá thuật toán:

- **Thời gian sống mạng:** Mục tiêu chính của các giao thức định tuyến trong mạng cảm biến không dây là kéo dài tuổi thọ mạng. Tuổi thọ này được đo bằng số lượng truy vấn được xử lý thành công tối đa trước khi mạng không còn hoạt động. Điều này xảy ra khi mạng bị phân mảnh như hết năng lượng tại các nút có vị trí quan trọng điều này tạo ra lỗ hổng trong việc truyền dữ liệu hoặc số lượng cảm biến hỏng vượt quá ngưỡng cho phép.

$$LFT(LifetimeNetworkCalculation) = \min i; \quad (1.17)$$

$$i = \begin{cases} \mathcal{L}(i-1) > \mathcal{L}(i) \ \& \ \mathcal{L}(i+1) = \mathcal{L}(i) & \text{Số lượng kết nối} \\ \text{COV}(i-1) > \theta \ \& \ \text{COV}(i) \leq \theta & \text{Vùng bao phủ} \end{cases} \quad (1.18)$$

Phương trình trên từ nghiên cứu [72] mô tả về LSN như là thời điểm mà mạng cảm biến mất kết nối hoặc mất vùng phủ sóng đến một ngưỡng nhất định được biểu thị ở trường hợp số 2. LFT là giá trị thời gian sống mạng dựa trên các điều kiện nhất định liên quan đến độ kết nối và vùng bao phủ. $L(i)$ là mức độ kết nối tại nút i . Nếu $L(i-1) > L(i)$ và $L(i+1) > L(i)$ là mức độ kết nối ở phần tử thứ i thấp hơn cả mức độ kết nối các nút liền kề có nghĩa là một nút yếu trong mạng. Bên cạnh đó $COV(i)$ là giá trị vùng bao phủ tại chỉ số i . Nếu các nút không còn bao phủ đủ khu vực, mạng sẽ mất đi khả năng hoạt động trong một khu vực quan trọng trong đó.

- **Năng lượng tiêu thụ:** Năng lượng tiêu thụ của một giao thức định tuyến thể hiện mức độ tiết kiệm năng lượng của giao thức đó, trong khi việc tiêu thụ năng lượng của các cảm biến riêng biệt thể hiện đặc tính cân bằng tải. Tối ưu hóa việc tiêu thụ năng lượng để bù đắp cho sự mất mát năng lượng bởi các thiết bị bảo vệ điện làm tăng tiêu thụ năng lượng (sử dụng điện trở bổ sung để giảm dòng điện gây ra sự tiêu tán năng lượng pin dưới dạng nhiệt); tối thiểu hóa việc tiêu thụ năng lượng cũng ảnh hưởng đến việc sử dụng các

pin có kích thước nhỏ hơn, điều này lại làm giảm kích thước của vỏ, giảm diện tích nơi có thể tích tụ điện tích tĩnh [73].

$$EC = \frac{E_C}{E_0} \quad (1.19)$$

EC là tỷ lệ năng lượng tiêu thụ, đây là chỉ số hiệu quả năng lượng của cảm biến trong hoạt động. E_C là năng lượng tiêu thụ của hệ thống trong thời gian cụ thể, và E_0 là năng lượng tham chiếu trong một điều kiện chuẩn có thể đặt giá trị của $E_0 = 100(J)$.

- **Thời gian đến gói tin đích:** Chọn tuyến đường cho gói dữ liệu sao cho là đường đi ngắn nhất đến điểm truy cập. Bằng cách tối ưu hóa theo tiêu chí này, có thể tăng thời gian lấy mẫu của mạng mà không cần phải lưu trữ dữ liệu. Giả định rằng các bộ vi điều khiển đơn giản (với dung lượng bộ nhớ trong nhỏ) được cài đặt trong các nút, do yêu cầu tiêu thụ năng lượng thấp. Tuy nhiên, cần phải tăng tần suất lấy mẫu có thể sử dụng dự đoán và đối phó sau này [74].

$$LIF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_j - E_{avg})^2 \quad (1.20)$$

LIF độ lệch chuẩn của các gói tin đến đích trong đó n là tổng số lượng các gói tin được đo trong hệ thống. E_j là độ trễ của gói tin thứ j và E_{avg} là giá trị trung bình của độ trễ các gói tin.

- **Tỷ lệ chuyển giao gói tin:** Độ tin cậy của hoạt động đòi hỏi dữ liệu đo lường phải được chuyển giao thành công đến người nhận. Tuy nhiên, việc thiếu bộ đệm dữ liệu do bộ nhớ trong hạn chế đã buộc các thuật toán phải dựa vào độ tin cậy cao trong quá trình chuyển giao. Đặc biệt, các giao thức không tích hợp cơ chế xác nhận việc truyền tải sẽ đối mặt với rủi ro cao hơn về mất mát dữ liệu, ảnh hưởng trực tiếp đến tính toàn vẹn của thông tin [73].

Việc đánh giá và so sánh các giao thức định tuyến trong mạng WSN cơ hội là một thách thức đa diện, đòi hỏi phân tích chuyên sâu. Các nhà nghiên cứu thường định lượng hiệu suất thông qua các chỉ số quan trọng như tỷ lệ phân phối gói tin, độ trễ truyền dẫn đầu cuối, và số lần truyền tải trung bình. Một đánh giá

toàn diện phải phân tích đồng thời nhiều yếu tố, bởi các đặc tính hiệu suất này thường có tương quan hoặc thậm chí mâu thuẫn, và những đánh đổi giữa chúng không rõ ràng, đặc biệt trong các mạng gián đoạn. Chẳng hạn, việc tối ưu hóa hiệu quả năng lượng thường dẫn đến khả năng phân phối gói tin bị hạn chế. Luận án sẽ tập trung sử dụng thời gian sống mạng và năng lượng tiêu thụ làm các tiêu chí chính để đánh giá các thuật toán đề xuất, nhằm tìm ra sự cân bằng tối ưu giữa các mục tiêu.

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

2.1 Giới thiệu

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 khung 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

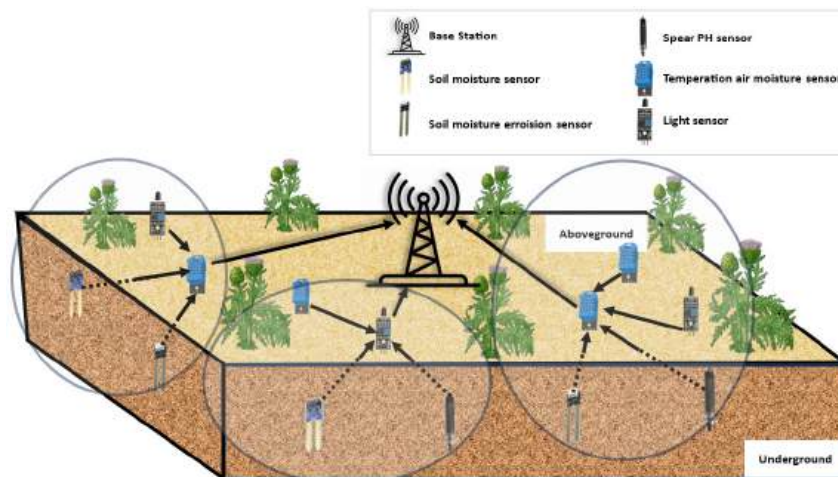
Đóng góp chính

- 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.

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

2.2.1 Ý tưởng

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:

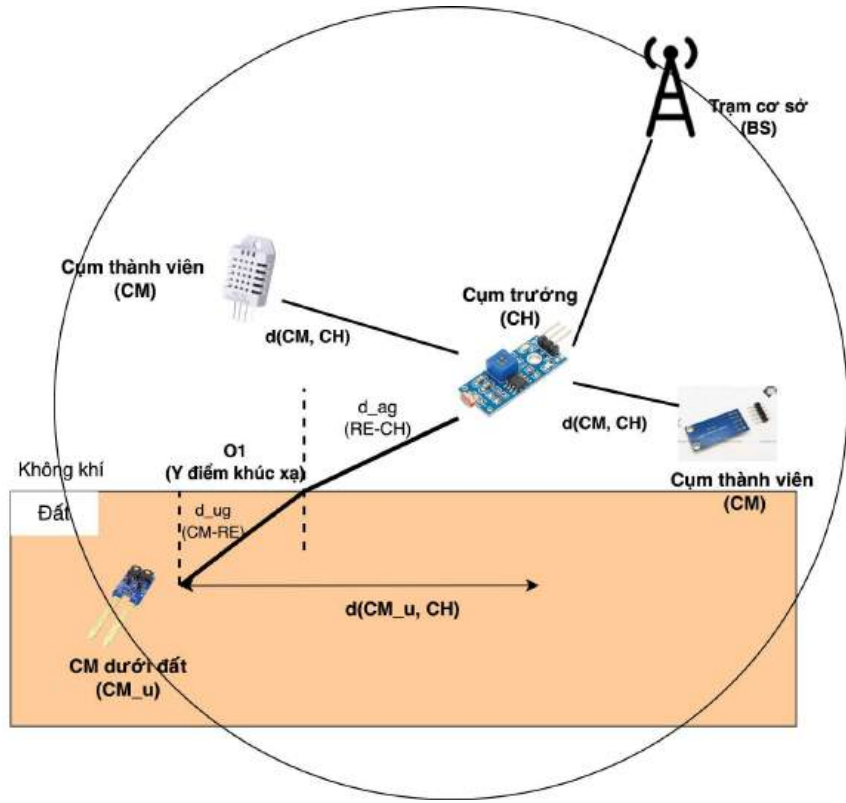


Hình 2.1: Tổng quát về các giả thuyết mô hình mạng đề xuất

- 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.

2.2.2 Mô hình toán học

Trong phần này, luận án mô hình hóa giải pháp định tuyến mới cho mạng WUSN dựa trên phân cụm mờ. Các thuật toán phân cụm được chia thành phân cụm rõ và phân cụm mờ, dựa trên cách gán đối tượng dữ liệu vào các cụm. Trong phân cụm rõ, mỗi đối tượng chỉ thuộc về một cụm, trong khi với phân cụm mờ, đối tượng có thể thuộc nhiều cụm với các độ thuộc khác nhau. Phân cụm mờ phản ánh tốt hơn sự không chắc chắn và trừu tượng của dữ liệu thực tế, và đặc biệt hiệu quả trong việc xử lý dữ liệu đa nguồn và có nhiều đặc trưng, như trong các hệ thống cảm biến không dây ngầm. Các nghiên cứu trước đây, như của J. Bezdek



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

và cộng sự [45] với thuật toán FCM, đã chỉ ra rằng phân cụm mờ mang lại kết quả chất lượng hơn so với phân cụm rõ, đặc biệt trong các tình huống chồng lấn giữa các cụm.

Trong bối cảnh mạng cảm biến không dây ngầm, các nghiên cứu trước đây chỉ tập trung vào mô hình năng lượng bề mặt, không tính đến suy hao đường truyền dưới lòng đất. Do đó, luận án này mở rộng mô hình để tính toán suy hao đường truyền trong môi trường ngầm vào hàm mục tiêu định tuyến. Mô hình điều chỉnh Friis [75] được sử dụng để tính suy hao khi truyền dữ liệu từ các cảm biến ngầm lên cụm trưởng CH, với sự điều chỉnh phù hợp với điều kiện sóng điện từ trong trầm tích. Suy hao đường truyền này giúp định lượng sự suy hao tín hiệu theo khoảng cách truyền, và có thể được đơn giản hóa theo công thức (2.1). Giải pháp định tuyến trong luận án kết hợp phân cụm mờ và mô hình suy hao đường truyền, tối ưu hóa hiệu quả cho mạng cảm biến không dây ngầm trong môi trường 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 [76] : Mô hình năng lượng tiêu hao toàn mạng đối với mạng như giả thuyết mạng ban đầu.

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

Trong đó E_{CH-BS} là năng lượng của các nút cụm trưởng truyền đến trạm cơ sở. Vì các nút CH theo giả định mô hình mạng ban đầu chọn những nút ở trên mặt đất làm cụm trưởng nên năng lượng tiêu hao khi truyền thông tin từ nút này lên trạm cơ sở được tính theo mô hình năng lượng đa đường truyền ($E_{CH-BS} = lE_{elec} + l\epsilon_{mp} \sum_{j=1}^C \|V_j - X_{BS}\|^4$). Bên cạnh đó, trong mỗi cụm E_{CM-CH} cũng sẽ có năng lượng của các nút thành viên thu thập thông tin và truyền đến cụm trưởng. Đối với những nút ở trên mặt đất thì việc tính sẽ dựa vào mô hình năng lượng không vật cản ($E_{CM-CH} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|X_i - V_j\|^2$). Đối với những nút thành viên của cụm mà nằm ở dưới lòng đất thì việc truyền tín hiệu qua hai môi trường khác nhau (đất và không khí) sẽ làm tăng thêm năng lượng tiêu hao. Các nút thành viên được đặt dưới mặt đất trong công thức (2.2) được ký hiệu là E_{CM_u-CH} và được tính theo công thức tính suy hao từ mô hình điều chỉnh Friis.

Trong công thức (2.1) khoảng cách giữa cảm biến phát tín hiệu dưới lòng đất và cảm biến nhận tín hiệu được đặt trên bề mặt đất. Khoảng cách có thể được tính toán qua khoảng cách. Các cảm biến được triển khai trong không gian ba chiều, nên bộ dữ liệu là vị trí các cảm biến sẽ ba giá trị x, y, z . Theo đó, z sẽ là độ sâu của nút $X_{i_{ug}}$ và z_v là chiều cao của nút CH so với mặt đất. Các biến thể cho dưới lòng đất như α và β lần lượt là hằng số của sự dịch pha và sự suy giảm. Khi thông tin được thu thập từ các cảm biến ở dưới mặt đất và truyền lên cho các cụm trưởng là cảm biến ở trên mặt đất thì tín hiệu sẽ bị nhiễu nhiều điều này dẫn đến tiêu hao năng lượng nhiều hơn trong lúc truyền. 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 đã phát triển và mở rộng phương pháp tính toán tổng năng lượng toàn mạng có cân nhắc năng lượng cho các nút ngầm dưới mặt đất, với mục tiêu tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng tiêu hao trong mạng. Cụ thể, phần mở rộng này được áp dụng từ yếu tố k trở về sau trong công thức (2.3) như đã được làm nổi bật ở trên. Việc tính toán này xem xét các yếu tố đặc biệt của việc truyền tín hiệu giữa các môi trường khác nhau (đất và không khí), giúp xác định chính xác suy hao năng lượng cho các nút ngầm, từ đó cải thiện hiệu quả hoạt động của mạng trong các môi trường có sự phân chia giữa các lớp đất và không khí.

$$\log x = \frac{1}{\ln 10}(x - 1) - \frac{1}{2\ln 10}(x - 1)^2 + \frac{1}{3\ln 10}(x - 1)^3 + \dots \tag{2.4}$$

Áp dụng khai triển Taylor bậc 1^{st} để xử lý hàm \log trong công thức (2.4). Ta có thể thấy được hàm logarit có tính chất thay đổi rất nhanh đối với các giá trị x gần với 0, nhưng lại thay đổi chậm hơn khi x tăng lên. Trong phần mô hình năng lượng mạng, hàm logarit xuất hiện trong các thành phần suy hao, đặc biệt là khi mô phỏng sự suy hao tín hiệu qua các môi trường khác nhau. Việc sử dụng khai triển Taylor giúp xấp xỉ các tham số như β hoặc α nơi mà hàm logarit thay đổi không đáng kể, làm giảm độ phức tạp của tính toán nhưng vẫn đảm bảo tính chính xác và khả năng áp dụng trong mô hình. Khai triển Taylor được sử dụng đến khai triển cấp 1 dùng giá trị hàm tại một điểm và đạo hàm của nó tại điểm đó để xấp xỉ hàm trong một khoảng nhỏ xung quanh điểm mở rộng. Việc luận án sử dụng khai triển Taylor cấp 1 không chỉ làm giảm độ phức tạp trong tính toán mà còn là một cách kiểm tra tính khả thi trong môi trường mạng cảm biến không dây nơi có các tài nguyên về năng lượng các cảm biến bị hạn chế. Từ đó công thức (2.1) sau khi áp dụng khai triển Taylor cấp 1 có thể được viết thành như sau:

$$E_{CM_u-CH} = 6 - \frac{20}{\ln 10} + 20\log\beta + (8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10})\|X_{i_{ug}} - V_j\| \tag{2.5}$$

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:

$$\begin{aligned}
J = & C \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|V_j - X_{BS}\|^4 \right) \\
& + (M - C) \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|X_i - V_j\|^2 \right) \quad (2.6) \\
& + k \left(6 - \frac{20}{\ln 10} + 20 \log \beta + (8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|X_{i_{ug}} - V_j\| \right) \rightarrow Min
\end{aligned}$$

Mờ hóa hàm tính tổng năng lượng (2.6) được một hàm mục tiêu mới.

$$\begin{aligned}
J_{(u_{ij}, V)} = & C \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|V_j - X_{BS}\|^4 \right) \\
& + (M - C) \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|X_i - V_j\|^2 \right) \quad (2.7) \\
& + k \left(6 - \frac{20}{\ln 10} + 20 \log \beta + (8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10}) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|X_{i_{ug}} - V_j\| \right) \rightarrow Min
\end{aligned}$$

Hàm mục tiêu của bài toán định tuyến được biểu diễn bởi (2.7), 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:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m = 1 \quad u_{ij} \in [0, 1]; \quad \forall i = 1, \bar{M} \quad (2.8)$$

$$\|X_i - V_j\| \leq 2Tr \quad (2.9)$$

$$\|V_j - X_{BS}\| \leq 9Tr \quad (2.10)$$

Các ràng buộc trong bài toán được thiết lập để đảm bảo rằng các cảm biến có thể giao tiếp với nhau trong mạng. Hàm mục tiêu trong công thức (2.7) là một bài toán tối ưu phi tuyến, trong đó các ràng buộc (2.9) và (2.10) mô phỏng khoảng cách giao tiếp giữa hai cảm biến, cũng như khoảng cách từ các cảm biến đến BS. Trong đó, giả sử bán kính truyền thông của BS gấp 8 lần bán kính truyền thông của các cảm biến. Do đó, một cảm biến có thể kết nối đến CH nếu khoảng cách của nó nhỏ hơn hoặc bằng $2Tr$, và CH có thể kết nối đến BS nếu khoảng cách giữa chúng nhỏ hơn hoặc bằng $9Tr$. Ràng buộc (2.8) thể hiện sự tham gia của mỗi nút cảm biến vào một cụm cụ thể, được mô tả bằng một hàm thành viên.

Định lý 1: Nghiệm tối ưu của mô hình (2.7) với các ràng buộc (2.8- 2.10), như sau:

Tâm cụm V :

$$V_j = \frac{\frac{B}{A}}{\sqrt[3]{\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{2A}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{A} \right)^2 + \frac{B^3}{27A^3}}} - \sqrt[3]{\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{2A}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B(X_{BS}-X_i)+C}{A} \right)^2 + \frac{B^3}{27A^3}} + X_{BS} \quad (2.11)$$

Độ thuộc U :

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^C \left(\frac{\epsilon_{mp}\|V_j - X_{BS}\|^4 + (M-C)\epsilon_{fs}\|X_i - V_j\|^2 + k\left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha\right)\|X_{iug} - V_j\|}{\epsilon_{mp}\|V_j - X_{BS}\|^4 + (M-C)\epsilon_{fs}\|X_i - V_j\|^2 + k\left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha\right)\|X_{iug} - V_j\|} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (2.12)$$

Chứng minh:

$$\partial J_m^* = (\partial_{V_j} J_m^*, \partial_{\mu_j} J_m^*) = \left(\frac{\partial J}{\partial V_i}, \frac{\partial J}{\partial u_{i,j}} \right) \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned}
L(u, V_j) = & C \left(l\epsilon_{mp} u_{ij}^m \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C \|V_j - X_{BS}\|^4 \right) + (M - C) \left(l\epsilon_{fs} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^c u_{ij}^m \|X_i - V_j\|^2 \right) \\
& + k \left(6 - \frac{20}{\ln 10} + 20 \log \beta + \left(\frac{1}{\ln 10} + 8.69\alpha \right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^c u_{ij}^m \|X_{i_{ug}} - V_j\| \right) \\
& - \lambda_i \left(\sum_{i=1}^C u_{ij} - 1 \right)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Lấy đạo hàm J_m^* theo V_j để tìm được tâm cụm thì được hàm như sau:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J}{\partial V_i} = & C4l\epsilon_{mp} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|V_j - X_{BS}\|^3 + (M - C)(2l\epsilon_{fs} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|X_i - V_j\|) \\
& - k \left(8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10} \right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Bởi vì $\frac{\partial J}{\partial V_i} = 0$ từ đó ta có được

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C (V_j - X_{BS})^3 (C4l\epsilon_{mp} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m) + (M - C)(2l\epsilon_{fs} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m (X_i - V_j)) \\
- k \left(8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10} \right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m = 0 \quad (i = 1 \dots M, j = 1 \dots C)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Từ các điều kiện ràng buộc, chuyển các ràng buộc dạng thức tương ứng $g_{ij} = \|X_i - V_j\| - 2Tr$ và $h_j = \|V_j - X_{BS}\| - 9Tr$. Đặt các biểu thức sau (2.16):

$$A = C4l\epsilon_{mp} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \tag{2.17}$$

$$B = 2l\epsilon_{fs}(M - C) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \tag{2.18}$$

$$C = k \left(8.69\alpha + \frac{20}{\ln 10} \right) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \tag{2.19}$$

$$y = V - X_{BS} \tag{2.20}$$

Rút gọn (2.16) dựa trên (2.17), (2.18) và (2.19) ta có.

$$Ay^3 + By + B(X_{BS} - X_i) + C = 0 \quad (i = 1 \dots M) \tag{2.21}$$

Vì $A \neq 0$ và $B \neq 0$, phương pháp Cardano được áp dụng cho hàm (2.21) để giải phương trình bậc 3 trong bài toán tối ưu hóa năng lượng.

$$y^3 + \frac{B}{A}y + \frac{B(X_{BS} - X_i) + C}{A} = 0 \quad (i = 1 \dots M) \quad (2.22)$$

$$y = \frac{\frac{B}{A}}{\sqrt[3]{\frac{B(X_{BS} - X_i) + C}{2A}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B(X_{BS} - X_i) + C}{A} \right)^2 + \frac{B^3}{27A^3}}} - \sqrt[3]{\frac{B(X_{BS} - X_i) + C}{2A}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{B(X_{BS} - X_i) + C}{A} \right)^2 + \frac{B^3}{27A^3}} = 0 \quad (2.23)$$

Thay thế (2.23) vào (2.20) thì tâm cụm được ra kết quả với kết quả (2.11)

Sau V_j , để tìm độ thuộc của các cảm biến vào cụm v hàm Lagrange được xây dựng, trong đó các biến quyết định là độ thuộc u_{ij} của cảm biến i đối với cụm j . Bằng cách đạo hàm hàm Lagrange theo u_{ij} , theo đó được hàm như sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(u)}{\partial u} &= m l u_{ij}^{m-1} \\ &\left(C \epsilon_{mp} \|V_j - X_{BS}\|^4 + (M - C) \epsilon_{fs} \|X_i - V_j\|^2 + k \left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha \right) \|X_{i_{ug}} - V_j\| \right) \\ &- \lambda_i = 0 \quad (i = 1 \dots M, j = 1 \dots C) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{ml} \left(\frac{\lambda_i}{\epsilon_{mp} \|V_j - X_{BS}\|^4 + (M - C) \epsilon_{\epsilon_s} \|X_i - V_j\|^2 + k \left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha \right) \|X_{i_{ug}} - V_j\|} \right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^C \frac{1}{ml} \left(\frac{\lambda_i}{\epsilon_{mp} \|V_j - X_{BS}\|^4 + (M - C) \epsilon_{\epsilon_s} \|X_i - V_j\|^2 + k \left(\frac{20}{\ln 10} + 8.69\alpha \right) \|X_{i_{ug}} - V_j\|} \right)^{\frac{1}{m-1}} \\ = 1 \quad (i = 1 \dots M, j = 1 \dots C) \end{aligned} \quad (2.26)$$

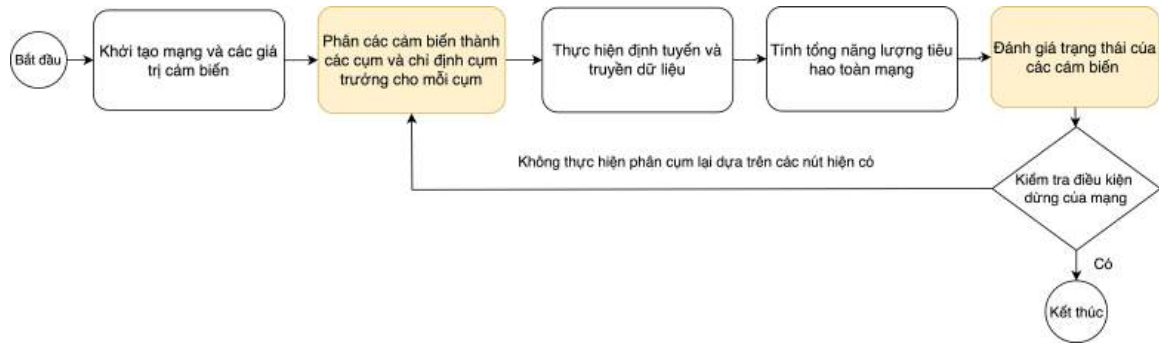
$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^C \frac{1}{m_l} \left(\frac{\lambda_i}{\epsilon_{mp} \|V_j - X_{BS}\|^4 + (M-C)\epsilon_{fs} \|X_i - V_j\|^2 + k \left(\frac{1}{\ln 10} + 8.69\alpha \right) \|X_{i_{ug}} - V_j\|} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \right)^{m-1}$$

(2.27)

($j = 1 \dots C, i = 1 \dots M$)

Cập nhật λ_i (2.27) vào (2.25) từ đó có được công thức tính độ thuộc là nghiệm của công thức (2.7). Kết quả độ thuộc từ mô hình là (2.12). □

2.2.3 Thuật toán FCM-WUSN



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

Thuật toán khởi tạo mạng và các giá trị cảm biến trong mạng, bắt đầu bằng việc xác định các yếu tố cơ bản như vị trí các cảm biến trong mạng, vùng phủ sóng và các đặc tính môi trường. Cài đặt giá trị cảm biến: Đảm bảo các cảm biến có các giá trị ban đầu cần thiết (ví dụ: năng lượng, mức độ tín hiệu, vị trí, tần suất thu thập dữ liệu). Tiếp đến phân cụm đưa các cảm biến vào cụm và xác định cụm trưởng. Như vậy trong mô hình đề xuất, mỗi lần mạng được cập nhật thì sẽ được phân cụm lại theo thuật toán đề xuất sau dựa vào kết quả từ các nghiệm đưa ra.

Thuật toán FCM-WUSN được đề xuất trong WUSN là phiên bản cải tiến của thuật toán phân cụm mờ FCM, nhằm tối ưu hóa việc phân nhóm các nút cảm biến bằng cách tính toán độ thuộc mờ của mỗi nút vào cụm, Hình 2.4 thể hiện lưu đồ thuật toán FCM-WUSN. không chỉ dựa trên khoảng cách không gian mà còn tính đến yếu tố suy hao năng lượng trong quá trình truyền nhận năng lượng. Trong một mạng cảm biến không dây, mỗi cảm biến có thể không có tín hiệu rõ

Thuật toán 2.1 FCM-WUSN Thuật toán phân cụm FCM-WUSN

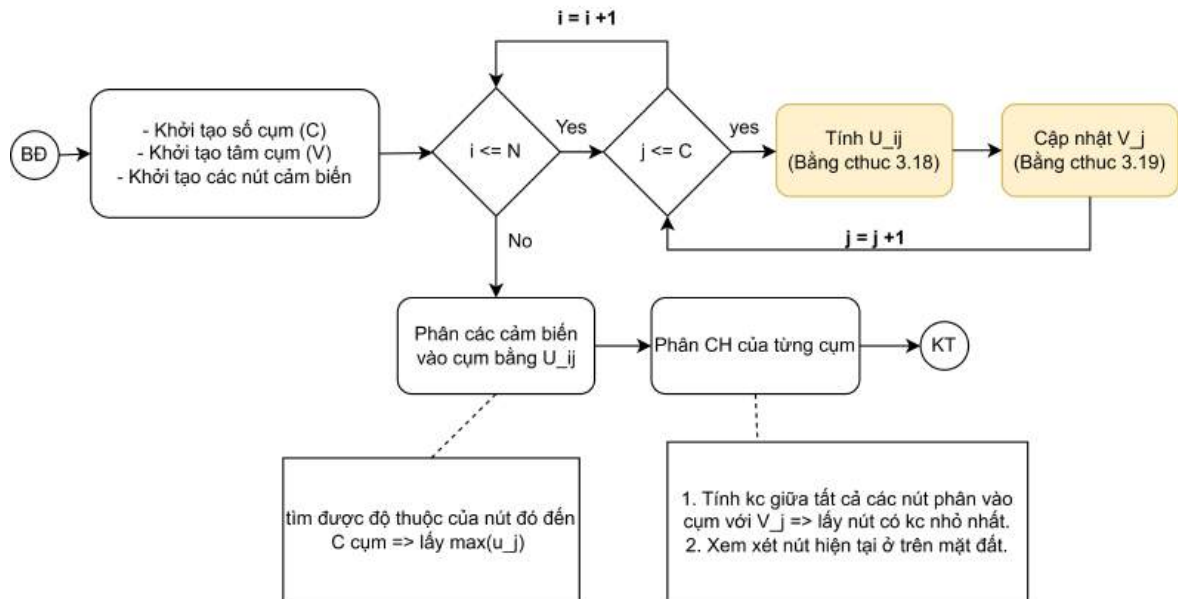
Đầu vào : Số lượng cảm biến M ; Số cụm C ; tham số mờ m ; tập các cảm biến $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$

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 (2.8)
4: while  $\|u^t - u^{t-1}\| > \epsilon$  do
5:    $t \leftarrow t + 1$ 
6:   Tính vector tâm cụm  $V$  theo công thức (2.11)
7:   Cập nhật lại ma trận độ thuộc  $u$  theo công thức (2.12)
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 trường cho mạng:
15: while  $j < C$  do
16:   if  $(d(X_i, V_j) = \min(\forall X_i \in C_j) \vee X_j \text{ trn mt } t)$  then
17:     if  $d(X_i, BS) < 9Tr$  then
18:        $X_i(CH) \leftarrow true$  - Phân làm cụm trường 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

```



Hình 2.4: Lưu đồ thuật toán FCM-WUSN

ràng để phân loại hoàn toàn vào một cụm duy nhất, vì các cảm biến có đặc điểm khác nhau về khả năng truyền dữ liệu và khoảng cách đến các cụm trung tâm. Thuật toán FCM-WUSN sử dụng ma trận U được lấy từ nghiệm trong mô hình đề xuất (2.12) trong đó mỗi giá trị thể hiện mức độ mà một cảm biến thuộc về một cụm cụ thể và tham số m sử dụng để điều chỉnh độ mờ, và có thể ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ chia rẽ giữa các cụm. Việc xác định tâm cụm và lựa chọn các nút làm cụm trưởng dựa trên các đặc điểm của WSN, chẳng hạn như việc các nút có nằm trong vùng phủ sóng của BS hay không, và theo giả thuyết mạng, các cụm trưởng sẽ là những nút cảm biến nằm trên mặt đất. Nhờ vậy, thuật toán không chỉ giúp phân nhóm các nút cảm biến thành các cụm đồng nhất mà còn tối ưu hóa phân bổ tài nguyên mạng, giảm thiểu việc tiêu tốn năng lượng không cần thiết và đảm bảo sự ổn định của hệ thống mạng cảm biến không dây.

Thuật toán 2.2 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:  end for
16:  Tính toán  $totalEc$  dựa trên công thức (2.3)
17:  if
18:    ( $totalEC \leq thresTotalEC$  or  $deadNodes \geq thresDeadNode$ ) and  $repeatRounds = thresStopRounds$ 
19:  then
20:     $flagStopNetwork \leftarrow true$ 
21:  else
22:    if  $totalEC \leq thresTotalEC$  or  $deadNodes \geq thresDeadNode$  then
23:       $repeatRound \leftarrow repeatRound + 1$ 
24:    end if
25:    Cập nhật năng lượng và trạng thái của  $X_i$  dựa trên Thuật toán 2.3
26:  end if
27: end while

```

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 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. Các bước của thuật toán định tuyến được đề xuất được hiển thị trong Thuật toán 2.2. Các bước của phần giao thức định tuyến trong mạng:

- **Bước 1:** Đánh giá các nút được phân vào cụm bằng thuật toán FCM-WUSN, tuy nhiên có nằm trong vùng phủ sóng của nút được chỉ định làm cụm trưởng không.
- **Bước 2:** Đánh dấu kết nối
 - Nếu không nằm trong vùng phủ sóng: Tìm kiếm các nút lân cận trong cụm để truyền đến.
 - Nếu nằm trong vùng phủ sóng: Đánh dấu có thể kết nối đến cụm trưởng đó
- **Bước 3:** Tính tổng năng lượng tiêu hao trong toàn mạng, dựa vào các kết nối đã thiết lập tại bước 2.
- **Bước 4:** Đánh giá lại trạng thái của các cảm biến. - Thuật toán 2.3 - xem xét các node trong mạng.
- **Bước 4:** Đánh giá lại điều kiện dừng của toàn mạng.

Sau mỗi vòng, năng lượng của các nút sẽ được tính toán lại để kiểm tra xem các nút này có còn khả dụng cho vòng tiếp theo hay không. Việc kiểm tra cho mỗi nút có thể được thực hiện như trong Thuật toán 2.3.

Thuật toán 2.3 thực hiện việc đánh giá lại trạng thái của các cảm biến sau mỗi chu kỳ định tuyến, từ đó đưa ra quyết định về việc tái sử dụng cảm biến. Nếu một cảm biến đã hết năng lượng, nó sẽ không còn khả năng tham gia vào mạng và sẽ bị loại bỏ hoàn toàn. Điều này giúp tối ưu việc xử lý và tính toán sau này. Bên cạnh đó, điều kiện dừng của mạng sẽ được xác định dựa trên hai tiêu chí: tổng năng lượng còn lại trong mạng có đủ để duy trì hoạt động hay không, và số lượng nút còn lại có đủ để tiếp tục mạng lưới. Nếu không, một chiến lược dự phòng sẽ được triển khai để thay thế.

Thuật toán 2.3 Cập nhật lại trạng thái của các nút trong mạng

Đầu vào: Số lượng nút M ; danh sách các cảm biến $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$; ngưỡng năng lượng dừng $thresdEnStop$; ma trận năng lượng còn lại của các nút $reEnergyX[]$; mảng trạng thái của các cảm biến $StatusX[]$

Đầu ra: Danh sách các nút cảm biến mới $X_{nextRounds}$; số lượng cảm biến vòng sau $M_{nextRounds}$

```

1:  $X_{nextRounds} \leftarrow []$ 
2:  $index_{next} \leftarrow 0$ 
3:  $M_{nextRounds} \leftarrow 0$ 
4: for  $i \leftarrow 1$  to  $M$  do
5:   if  $reEnergy_{X_i} \leq thresdEnStop$  then
6:     if  $status_{X_i} = \text{active}$  then
7:        $X_{nextRounds}[index_{next}] \leftarrow X_i$ 
8:        $index_{next} \leftarrow index_{next} + 1$ 
9:        $M_{nextRounds} \leftarrow M_{nextRounds} + 1$ 
10:    else
11:       $status_{X_i} \leftarrow \text{inactive}$ 
12:    end if
13:  end if
14: end for

```

2.2.4 Độ phức tạp thuật toán

Thuật toán 2.1: 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 2.3 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 2.2: Định tuyến trong mạng Thuật toán 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:

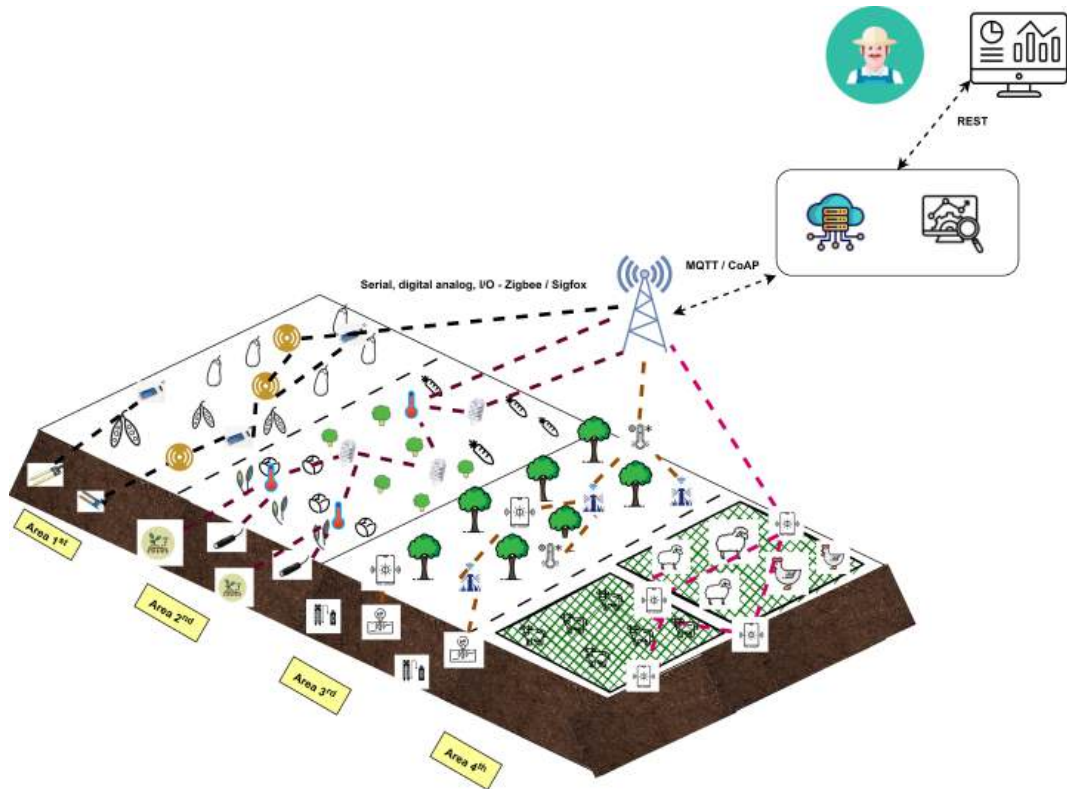
$$O(thresStopRounds \times M \times C) \quad (2.28)$$

Thuật toán 2.3: Cập nhật trạng thái trong mạng Vì vòng lặp chạy qua tất cả các phần tử từ 1 đến M để kiểm tra điều kiện. Với mỗi lệnh kiểm tra điều kiện như $reEnergy_{X_i} \leq thresdEnStop$ thì mất $O(1)$ thời gian, tổng độ phức tạp của thuật toán sẽ là $O(M)$ trong đó M là số lượng nút cảm biến.

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

2.3.1 Ý tưởng

Cơ chế định tuyến phân cụm mở rộng từ thuật toán FCM được đánh giá cao về hiệu quả năng lượng trong một miền quan sát duy nhất, nó vẫn bộc lộ nhiều hạn chế đáng kể. Điển hình là tình trạng tắc nghẽn tại các nút cụm trưởng CH, khiến những nút này nhanh chóng cạn kiệt năng lượng. Hơn nữa, với sự phát triển của mạng WUSN, một vấn đề lớn xuất hiện là nếu các nút được đặt ngầm và nằm ngoài vùng phủ sóng của CH, dữ liệu từ chúng sẽ không thể được truyền tới, dẫn đến suy hao năng lượng nhiều hơn do môi trường truyền sóng khắc nghiệt dưới lòng đất. Để khắc phục những hạn chế của định tuyến đơn miền, đặc biệt trong các mạng WSN và WUSN có quy mô lớn, việc triển khai một cơ chế định tuyến đa miền là điều cần thiết. Việc tối ưu hóa quá trình phân chia và quản lý các miền này hiện đang là chính của nhiều nghiên cứu. Luận án đề xuất một độ đo mới



Hình 2.5: Ý tưởng tổng quát về mô hình truyền đa miền

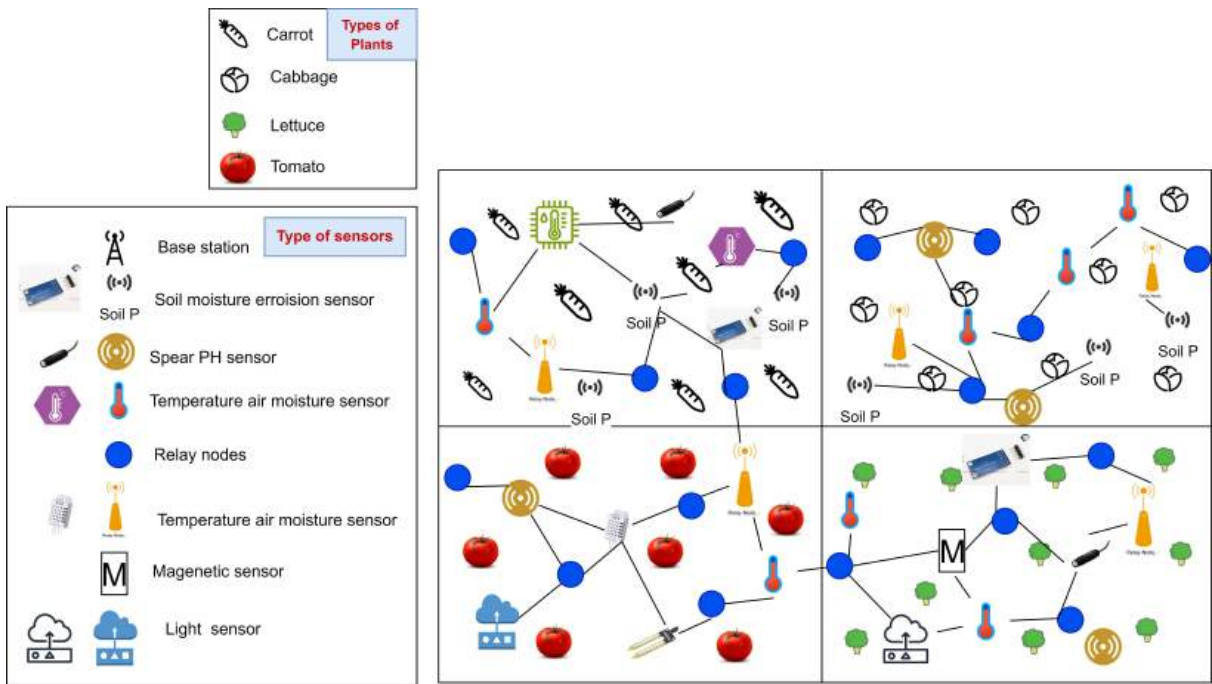
nhằm đánh giá và xây dựng một cấu trúc đa miền động. Độ đo này giúp hệ thống nhanh chóng duyệt qua tất cả các miền quan sát, từ đó nâng cao hiệu quả hoạt động. Giải pháp này hứa hẹn kéo dài tuổi thọ của mạng cảm biến WUSN trong môi trường nhiều miền quan sát, với sự tích hợp của tính chất truyền dẫn đặc thù dưới lòng đất và dựa trên các giả thuyết mạng cụ thể đã được đề ra trong luận án như sau.

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 2.5.

1. Một WUSN bao gồm k vùng, mỗi vùng có M nút cảm biến như trong Hình 2.6. 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



Hình 2.6: Mô phỏng giả thuyết cho nhiều miền quan sát

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 khởi tạo và bán kính truyền thông. Tuy nhiên đối với mỗi vùng khác nhau thì cấu hình của các nút cảm biến là khác nhau.
4. Giao tiếp đa bước được sử dụng làm bước truyền trong mô hình này.

2.3.2 Xây dựng độ đo cảm biến mới

Đối với mạng WUSN đa miền, luận án đề xuất một chỉ số mới để đánh giá đường đi ngắn nhất trong mạng cảm biến không dây, gọi là EDTNR, với năm tiêu chí cấu thành chỉ số này. Chỉ số mới này được thiết kế nhằm đánh giá toàn diện hiệu quả của các tuyến giao tiếp, kết hợp nhiều yếu tố quan trọng và xem xét khả năng truyền tín hiệu của các nút cảm biến được cắm dưới mặt đất trong không gian rộng lớn với nhiều loại cảm biến khác nhau. Thông thường, mỗi nút cảm biến có thể được đánh giá dựa trên hai yếu tố chính: khoảng cách và năng lượng dư thừa. Trong mô hình này, mỗi nút cảm biến trong mạng được coi là một vectơ với

các giá trị sau, trong đó k là chỉ số của khu vực quan sát:

$$[k]v_j^{(i)} = \{[k]v_j^{(1)}, [k]v_j^{(2)}, [k]v_j^{(3)}, [k]v_j^{(4)}, [k]v_j^{(5)}\} \quad (2.29)$$

1. **Năng lượng còn lại (E)** $[k]v_j^{(1)}$ đại diện cho năng lượng dư thừa của cảm biến v_j tại khu vực k , đánh giá công suất của các nút cảm biến dọc theo 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.

Năng lượng còn lại của cảm biến (E)

Năng lượng tiêu hao của các nút cảm biến trong mạng được tính theo hai cách. Nếu các cảm biến trên mặt đất truyền thông tin với nhau, năng lượng tiêu hao sẽ được tính bằng công thức không vật cản và đa đường định tuyến. Tuy nhiên, khi truyền thông tin từ một nút dưới đất lên trên mặt đất, công thức từ điều chỉnh Friis [23] sẽ được áp dụng, vì sự xuất hiện của độ nhiễu và suy hao với công thức $L_{tot} = 6 + 20\log(d) + 20\log(\beta) + 6.69\alpha d$. Mô hình này dựa trên sự khác biệt giữa kênh truyền thông không dây dưới mặt đất và kênh truyền thông không dây trong không gian mở, nơi sóng tương tác với môi trường đất, ảnh hưởng bởi

các đặc tính vật lý như kết cấu, tỷ lệ độ ẩm và mật độ khối của đất, dẫn đến sự suy giảm cường độ tín hiệu [77].

Vị trí của các cảm biến (D)

Vị trí của cảm biến có thể giúp tính toán khoảng cách giữa hai cảm biến. Chỉ số khoảng cách có lợi trong việc tối thiểu hóa số bước nhảy cần thiết giữa nguồn và đích, cũng như giúp xác định kết nối giữa chúng. Nút phát (node A) và nút nhận ứng cử (node B) tại thời điểm $d \leq t_s$ được tính toán bằng công thức Euclide trong môi trường giả định 3D.

$$d_{[k]v_j^{(1)}, [k']v_l^{(1)}} = \sqrt{(x_{[k]v_j^{(1)}} - x_{[k']v_l^{(1)}})^2 + (y_{[k]v_j^{(1)}} - y_{[k']v_l^{(1)}})^2 + (z_{[k]v_j^{(1)}} - z_{[k']v_l^{(1)}})^2} \quad (2.30)$$

Độ ảnh hưởng của tập hàng xóm (N)

Việc định lượng tác động của giao tiếp giữa các nút láng giềng là rất quan trọng để xác định các nút có kết nối mạnh mẽ và bền bỉ, từ đó hỗ trợ việc lựa chọn đường truyền hiệu quả. Trong các chỉ số được đề xuất, điều này có thể được xác định. $e^{\|N_{[k]v_j^{(i)}} \wedge N_{[k']v_l^{(i)}}\|}$ với ràng buộc $Min([k]v_j^{(1)}, [k']v_l^{(1)}) \geq E_{\text{transmit}([k]v_j^{(i)}, [k']v_l^{(i)})}$. Đánh giá số lượng cảm biến liên kết với mỗi nút, cơ bản là đánh giá mức độ kết nối của nút, giúp các nhà thiết kế mạng xác định các nút đóng vai trò là trung tâm giao tiếp vững chắc. Những nút này thường phổ biến và đáng tin cậy hơn, vì chúng cung cấp nhiều con đường thay thế cho việc truyền tải dữ liệu, từ đó giảm thiểu rủi ro sự cố mạng và cải thiện tính bền vững tổng thể.

Loại cảm biến (T)

Trong các mạng cảm biến đa miền, các cảm biến được phân loại theo đặc tính hoạt động và lĩnh vực ứng dụng để tạo điều kiện cho việc xử lý dữ liệu hiệu quả. Khi các cảm biến cùng loại với $k = k'$ thể hiện sự hiệu chuẩn, độ nhạy và giao thức truyền thông tương tự, một cờ chuyển được thiết lập là 1 để tạo điều kiện cho việc truyền dữ liệu trực tiếp và vận hành mạng liền mạch. Nếu các cảm biến khác loại với $k \neq k'$, hệ thống sẽ thiết lập lại cờ này thành 0, ngăn chặn việc trộn dữ liệu cảm biến không tương thích và duy trì tính toàn vẹn của dòng thông tin trong mạng.

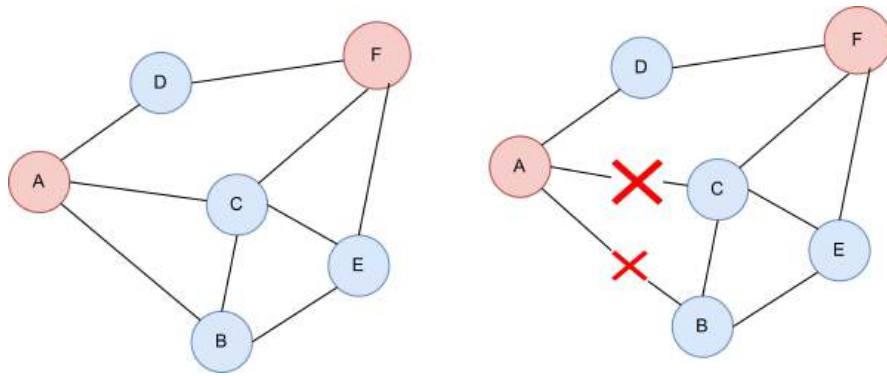
Bán kính của cảm biến (R)

Bán kính truyền tải của mỗi cảm biến đặt ra một hạn chế rõ ràng đối với khả năng truyền dữ liệu của nó, đặc biệt là giữa các loại cảm biến tương tự. Các cảm biến có phạm vi truyền tải giống nhau chỉ có thể giao tiếp với các nút trong phạm vi đó, đảm bảo việc truyền tải dữ liệu chỉ xảy ra khi các cảm biến ở gần nhau. Ràng buộc dựa trên bán kính truyền thông này là yếu tố thiết yếu để bảo đảm tính toàn vẹn của mạng, giúp bảo đảm việc truyền tải dữ liệu đáng tin cậy và hỗ trợ trong việc lập kế hoạch bố trí mạng bằng cách xác định các khoảng trống phủ sóng và các khu vực cần nút chuyển tiếp cho khoảng cách xa hơn. Hơn nữa, khi hai cảm biến có thể kết nối với nhau, khoảng cách của chúng phải nằm trong phạm vi truyền tải. Điều này tuân theo ràng buộc cho mô hình WSN như $\|[k]v_j^{(1)} - [k']v_l^{(1)}\| \leq 2R$.

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. Mỗi quan hệ giữa hai nút dựa trên loại khu vực. Nếu cùng một khu vực, giá trị mỗi 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



Hình 2.7: Ví dụ về lựa chọn đường đi theo tiêu chí độ ảnh hưởng

hiều 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.

Để chọn đường đi từ A đến F, ta cần xem xét các lý do dưới đây giải thích tại sao không chọn các đường đi qua C và B mà phải chọn D:

- **Xét C:**

- Các phần tử thuộc $N_C = \{A, B, E\}$ và $N_A = \{C, B, D\}$.
- Lý do không chọn C là vì "Loại A ra không xét trong N_C " và "C, B, D giao $\{B, E\} = \{B\}$ " không đảm bảo điều kiện tốt cho đường đi, có thể gây chồng chéo hoặc không tối ưu trong việc chọn các nút kế tiếp.

- **Xét B:**

- Các phần tử thuộc $N_B = \{A, C, E\}$ và $N_A = \{C, B, D\}$.
- Lý do không chọn B là vì "Loại A ra không xét trong N_B " và giao $\{C, B, D\}$ với $\{C, E\}$ cho ra $\{C\}$ không cho ra kết quả phù hợp.
- Sự chồng chéo này khiến việc chọn đường đi qua B không tối ưu.

- **Xét D:**

- Các phần tử thuộc $N_D = \{A, F\}$ và $N_A = \{C, B, D\}$.
- Trong trường hợp này, không có sự chồng chéo và "Loại A ra không xét trong N_D " và giao $\{C, B, D\}$ với $\{F\}$ cho ra kết quả trống, điều này chỉ ra rằng con đường đi qua D là tối ưu và không có sự cản trở hay chồng chéo nào.

Do đó, lựa chọn D là hợp lý vì không có sự chồng chéo và cung cấp một con đường rõ ràng từ A đến F mà không gặp phải các vấn đề của C và B.

Chỉ số EDTNR đã được giới thiệu, cung cấp một tham chiếu và danh sách các đánh giá để đánh giá nhanh chóng các quyết định định tuyến, thay vì đưa ra một điểm số trực tiếp. Chỉ số này giúp nhanh chóng đánh giá cường độ tín hiệu (chỉ dựa vào khoảng cách xa hay gần), mức tiêu thụ năng lượng và khả năng kết nối của các nút mà không cần đến hệ thống điểm số phức tạp, cho phép tạo ra bảng định tuyến nhanh chóng dưới dạng bảng băm, với mỗi mục đại diện cho các đường đi khả thi giữa các nút. Việc xác định các chuỗi truyền hiệu quả nhất, cân bằng giữa khoảng cách, mức tiêu thụ năng lượng, tác động môi trường, nhiễu và từ đó chi phí bảo trì cũng như kế hoạch thay thế cảm biến trở nên dễ dàng. Bảng này giúp nhanh chóng xác định các tuyến đường tối ưu, nâng cao hiệu quả truyền tải dữ liệu và hỗ trợ định tuyến thích ứng dựa trên các điều kiện thực tế.

2.3.3 Đánh giá về độ đo mới

Luận án giới thiệu **Flexmetric (F)** đánh giá mối tương quan giữa hai nút của mạng. Khoảng cách Euclid giữa hai điểm trong không gian (x_1, y_1, z_1) (x_2, y_2, z_2) được tính bằng công thức trong (2.30). Hàm này thỏa mãn cả bốn tính chất của một độ đo. Những yếu tố quan trọng như năng lượng tiêu thụ, khoảng cách truyền dẫn, hay bán kính vùng phủ sóng đều phụ thuộc trực tiếp vào việc tính toán khoảng cách. Tuy nhiên, để một phép đo khoảng cách có thể được chấp nhận hoàn toàn trong nghiên cứu về mạng cảm biến, chúng ta cần phải chứng minh thêm một tính chất nữa: mối tương quan giữa các nút lân cận. Việc này sẽ đảm bảo rằng phép đo không chỉ xác định khoảng cách giữa hai điểm đơn lẻ mà còn phản ánh chính xác cách các nút cảm biến trong cùng một khu vực lân cận và các khu vực khác tương tác và liên kết với nhau.

$$e^{-\|N_{[k]}v_j^{(4)} \wedge N_{[k]}v_l\|} + e^{-\|N_{[k]}v_j^{(4)} \wedge N_{[k]}v_t^{(4)}\|} > e^{-\|N_{[k]}v_t^{(4)} \wedge N_{[k]}v_l^{(4)}\|} \quad (2.31)$$

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

buộc này.

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

Thiết lập ràng buộc theo (2.31) dựa trên giao của lý thuyết tập hợp,

$$e^{-y} + e^{-z} > e^{-z} \Leftrightarrow e^{-y} > 0 \quad (2.32)$$

Bất đẳng thức (2.31) với tất cả các ràng buộc ở trên là đúng vì $e^{-y} > 0$ với bất kỳ giá trị y nào. Chứng minh đã hoàn tất.

Giải thích về cách chứng minh bất đẳng thức mô hình Đ để tìm ra chỉ số mới, nó sẽ liên quan đến công thức này.

$$e^{-\|N_{[k]}v_j^{(4)} \wedge N_{[k]}v_l\|} + e^{-\|N_{[k]}v_j^{(4)} \wedge N_{[k]}v_t^{(4)}\|} > e^{-\|N_{[k]}v_t^{(4)} \wedge N_{[k]}v_l^{(4)}\|} \quad (2.33)$$

Đặt các ký hiệu ta có $N_{[k]}v_j^{(4)} = x$, $N_{[k]}v_l^{(4)} = y$, $N_{[k]}v_t^{(4)} = z$. Dựa trên các công thức (2.31) và (2.33), ta có thể viết lại công thức mới như sau:

$$e^{-|x \wedge y|} + e^{|y \wedge z|} > e^{|x \wedge z|} \quad (2.34)$$

Áp dụng ràng buộc phép giao của lý thuyết tập hợp để xác định giới hạn trên và dưới của số lượng phần tử trong ba tập hợp. Xét riêng hai tập hợp, ta có phần giao của hai tập hợp x, y phải nhỏ hơn số lượng phần tử trong hiệu của hai tập x, y . Điều này có nghĩa là tập hợp phần tử chung giữa x , và y phải ít hơn số phần tử trong x mà không nằm trong y .

$$\begin{cases} \text{s.t. 1 : } |x \wedge y| < |x \setminus y| \\ \text{s.t. 2 : } |y \wedge z| < |y \setminus z| \\ \text{s.t. 3 : } |z \wedge x| < |z \setminus x| \\ \text{s.t. 4 : } x > 2 \\ \text{s.t. 5 : } y > 2 \end{cases}$$

Ý nghĩa của các ràng buộc này có thể thấy được, nếu số phần tử trong hai tập hợp con như $|x \wedge y|$ quá lớn, điều này sẽ đồng nghĩa với việc có rất nhiều phần tử chung giữa x và y và số phần tử trong phần còn lại của x (điều này trong $x \setminus y$ sẽ giảm đi. Ví dụ cụ thể cho phần dưới để có thể rõ được phần giữa các Giả sử $x = \{1, 2, 3, 4\}$ và $y = \{3, 4, 5, 6\}$:

- $x \cap y = \{3, 4\}$, nên $|x \cap y| = 2$.
- $x \setminus y = \{1, 2\}$, nên $|x \setminus y| = 2$.

Trong trường hợp này, $|x \cap y| = |x \setminus y|$, tức là ràng buộc $|x \cap y| < |x \setminus y|$ không thỏa mãn. Để ràng buộc này thỏa mãn, cần điều chỉnh các tập sao cho số phần tử chung giữa x và y ít hơn số phần tử trong x mà không thuộc y . Ví dụ, nếu $x = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ và $y = \{3, 4\}$, ta có. Khi đó, ràng buộc $|x \cap y| < |x \setminus y|$ sẽ thỏa mãn, vì $2 < 3$:

- $x \cap y = \{3, 4\}$, nên $|x \cap y| = 2$.
- $x \setminus y = \{1, 2, 5\}$, nên $|x \setminus y| = 3$.

Đây là các ràng buộc chung dựa trên lý thuyết tập hợp: $|x \cap y| = \min(|x|, |y|)$ and $|x \setminus y| = |x| + |y| - 2\min(|x|, |y|)$. ta có thể viết lại các ràng buộc.

$$\begin{cases} \min(|x|, |y|) < |x| + |y| - 2\min(|x|, |y|) \\ \min(|y|, |z|) < |y| + |z| - 2\min(|y|, |z|) \\ \min(|z|, |x|) < |z| + |x| - 2\min(|z|, |x|) \end{cases}$$

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

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

Với các ràng buộc, luận án thiết lập công thức (2.31) dựa trên giao điểm của lý thuyết tập hợp và từ điều kiện trên có được $e^{-\min(x,y)} + e^{-\min(y,z)} > e^{-\min(x,z)}$

$$e^{-y} + e^{-z} > e^{-z} \Leftrightarrow e^{-y} > 0 \quad (2.35)$$

Tổng quát hóa ta có:

$$e^{-x} + e^{-y} > e^{-z} \quad (2.36)$$

Tương tự ta có thể áp dụng vào công thức tổng quát:

$$\frac{1}{e^x} + \frac{1}{e^y} = \frac{1}{e^z} \Leftrightarrow e^x + e^y > \frac{e^x e^y}{e^z} \quad (2.37)$$

Để chứng minh bất đẳng thức trên, luận án chứng minh $(e^{z-x} + e^{z-y} - 1) > 0$. Áp dụng khai triển chuỗi Taylor đa biến.

$$\begin{aligned} e^{|z|-|x|} &= 1 + (z-x) + \frac{(z-x)^2}{2!} + \frac{(z-x)^3}{3!} \\ e^{|z|-|y|} &= 1 + (z-y) + \frac{(z-y)^2}{2!} + \frac{(z-y)^3}{3!} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Viết lại công thức $1 + 2z - x - y > 0$. Sử dụng các ràng buộc $2x < z, 2x < y, x > 2, y > 2$, công thức $y - x - 2 > 0$ luôn đúng. Một giải pháp với sự mở rộng đến cấp độ 2, ta viết lại công thức.

$$z(8 - x - y) + 4 - x^2 > 0 \quad (2.39)$$

Sử dụng bất đẳng thức Cauchy (2.39) cho 2 vector $(z, -1), (8 - x - y, 1)$.

$$(z, -1) \cdot (8 - x - y, 1) \leq \sqrt{z^2 + 1} \cdot \sqrt{(8 - x - y)^2 + 1} \quad (2.40)$$

$$\Leftrightarrow -2z(8 - x - y) \leq (8 - x - y)^2 + z^2 + z^2(8 - x - y)^2 \quad (2.41)$$

Với điều kiện $z > 0, x > 2, y > 2, 2x < y$. Để phân tích từng thành phần bên trái kiểm tra < 0 với các điều kiện trên:

$$-2z(8 - x - y) < 0 \Leftrightarrow -16z + 2z(x + y) < 0 \quad (2.42)$$

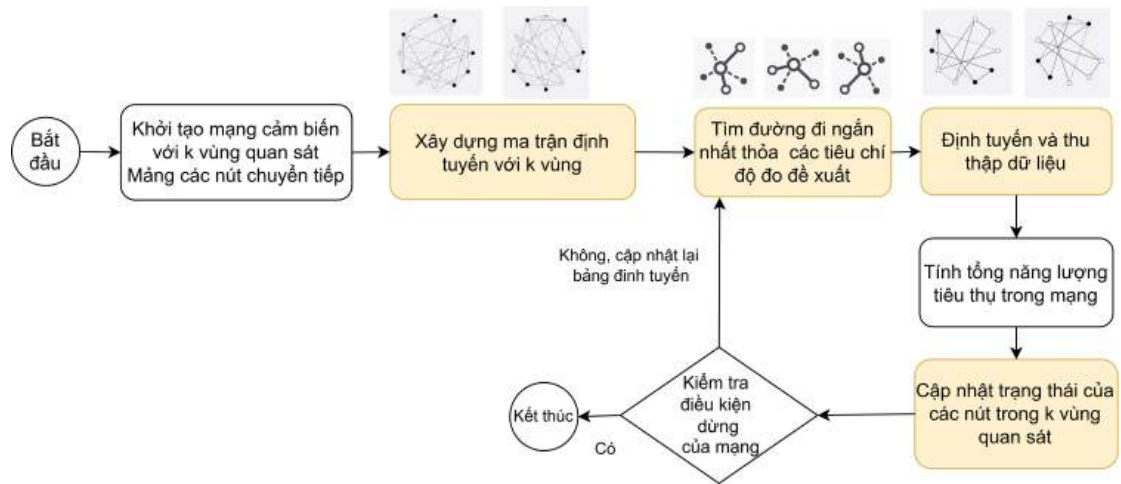
Sử dụng $x > 2, y > 2, x + y > 4$ và ràng buộc $y > 2x$ và $z > 2y, 2z > 4y$. Công thức sẽ được viết lại như sau:

$$-16z + 2z(x + y) = -16z + 8z = -8z < 0 \text{ with } z > 0 \quad (2.43)$$

Vì vậy, bất đẳng thức đó nên luôn đúng.

2.3.4 Thuật toán Multi Graphs WUSN

Đoạn lưu đồ khối Hình 2.8 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. Quá trình bắt đầu từ việc khởi tạo mạng cảm biến với các miền quan sát và các nút chuyển tiếp, tiếp theo là xây dựng ma trận định tuyến và xác



Hình 2.8: Lưu đồ chung của mô hình định tuyến WUSN cho đa miền quan sát

định đường đi ngắn nhất giữa các nút cảm biến, đảm bảo tiêu chí tối ưu cho việc thu thập dữ liệu. Lưu đồ tiếp tục với việc kiểm tra điều kiện hoạt động của các nút trong mạng. Nếu các nút không thỏa mãn điều kiện, mạng sẽ được cập nhật với các cấu hình định tuyến phù hợp. Quá trình cũng bao gồm tính toán năng lượng tiêu thụ trong mạng và cập nhật trạng thái của các nút trong các miền quan sát, đảm bảo duy trì hoạt động của mạng ở mức tối ưu.

Trong mạng cảm biến không dây đa vùng, định tuyến nội vùng liên quan đến việc thu thập và tổng hợp dữ liệu tại chỗ trong mỗi vùng, nơi các cảm biến truyền dữ liệu đến một nút chuyển tiếp được chỉ định. Nút này sẽ xử lý hoặc nén thông tin trước khi chuyển tiếp. Định tuyến liên vùng xử lý việc chuyển giao dữ liệu giữa các vùng, với các nút chuyển tiếp từ các khu vực khác nhau giao tiếp qua các đường truyền đa bước cho đến khi dữ liệu đến trạm cơ sở. Cách tiếp cận hai phần này giúp tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng và cải thiện khả năng mở rộng của mạng bằng cách giảm phạm vi truyền thông cần thiết cho hầu hết các truyền tải.

Việc xây dựng ma trận kết nối giữa các nút cảm biến trong mạng là một bước quan trọng trong việc tối ưu hóa việc truyền tải dữ liệu. Ma trận này giúp xác định mối quan hệ kết nối giữa các nút cảm biến và các nút chuyển tiếp, đồng thời chỉ rõ các nút có thể kết nối với nhau trong một khu vực nhất định. Bên cạnh đó, các nút có khả năng kết nối với trạm cơ sở sẽ được đánh dấu rõ ràng, tạo điều kiện thuận lợi cho việc truy vết và giám sát hệ thống sau này. Ma trận định tuyến

Thuật toán 2.4 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 là 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 $X_1 = [X_1^1, X_2^1, \dots, X_M^1]$.

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 giữa  $X_i^t$  và  $X_j^t \leq 2 \cdot radius(X_i^t)$  then
7:         Thiết lập  $X_j^t$  vào trong routingMatrix của  $X_i^t$ 
8:       end if
9:     end while
10:    if Khoảng cách giữa  $X_i^t$  và BS  $\leq 3 \cdot radius(X_i^t)$  then
11:      Đánh dấu  $X_i^t$  có thể kết nối với BS
12:    end if
13:  end while
14: end while

```

này được xây dựng chỉ một lần, bởi vì các nút cảm biến trong mạng thường được gắn cố định tại các vị trí xác định từ ban đầu. Chính vì vậy, các kết nối không thể thiết lập khi bắt đầu sẽ không thay đổi theo thời gian. Điều này có nghĩa là sau khi thiết lập ma trận kết nối, mô hình đề xuất không cần phải cập nhật lại mà chỉ cần tham chiếu vào ma trận đã thiết lập.

Việc xác định những nút có thể kết nối với trạm cơ sở là rất quan trọng, vì nó giúp đảm bảo quá trình truyền dữ liệu diễn ra hiệu quả và nhanh chóng. Bằng cách này, các thông tin về mạng và khả năng kết nối được lưu trữ một cách có hệ thống và dễ dàng truy xuất khi cần thiết. Ma trận định tuyến này giúp quản lý mạng cảm biến trở nên dễ dàng hơn, đồng thời giảm thiểu sự phức tạp trong việc duy trì kết nối lâu dài. Khi cần thực hiện các thao tác kiểm tra hoặc tối ưu hóa, chỉ cần tham khảo ma trận định tuyến đã được tạo ra từ ban đầu.

Nghiên cứu này tập trung vào việc tối ưu hóa định tuyến trong Mạng cảm biến không dây ngàm đa đồ thị bằng cách chọn từng nút trong ma trận định 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 (2.5). 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. Dưới đây là các bước thực

Thuật toán 2.5 Tìm đường đi ngắn nhất từ một nút

Đầu vào: chỉ số nút đang xét, ma trận định tuyến, mảng các nút chuyển tiếp kết nối với BS.

Đầu ra: đường đi ngắn nhất từ nút đầu vào.

```

1:  $touchBS \leftarrow false$ 
2: Khởi tạo  $shortestPath(1, 1) \leftarrow index-node$ 
3: Lấy ra 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 nút tiếp theo có kết nối thuận lợi để truyền tiếp năng lượng
9:   for mỗi nút  $i$  trong  $connectedNodes$  do
10:    if  $i$  không có trong  $shortestPath$  then
11:       $intersectSet1 \leftarrow getConnectTableNodes(i)$ 
12:       $intersectSet2 \leftarrow getConnectableNodes(lastNodeInShortestPath)$ 
13:       $intersect \leftarrow intersectSet1 \cap intersectSet2$ 
14:      if  $|intersect| \leq numConIntersect$  then
15:         $numConIntersect \leftarrow |intersect|$ 
16:         $numberIndex \leftarrow X_t^i$ 
17:      else
18:        if  $numberIndex \neq maxIndex \wedge C = numConIntersect$  then
19:           $Nti \leftarrow size(X_t^i)$ 
20:           $Nte \leftarrow size(X_t^{numberIndex})$ 
21:          if  $Nte > Nti$  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 đường đi hiện tại có đến được BS
30:   $shortestPath(1, index) \leftarrow numberIndex$ 
31:  if  $X_t^{numberIndex}$  kết nối đến 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

```

hiện thuật toán input và output tìm đường đi ngắn nhất theo lưu đồ khối:

- Bước 1: Khởi tạo các biến: `shortestPath`, `numberNodeIndex`, và `touchBS = false`.
- Bước 2: Khởi tạo các giá trị ban đầu. Theo đó các giá trị như `shortestPath` (để lưu trữ các nút đã đi qua trong đường đi ngắn nhất), `numberNodeIndex` (biến lưu trữ chỉ số của nút đang được xét), `touchBS = false` (biến kiểm tra xem thuật toán có kết thúc khi tìm thấy đường đến BS).
- Bước 3: Kiểm tra điều kiện vòng lặp (`touchBS = false`): Nếu đúng, tiếp tục tìm đường đi; nếu không, kết thúc.
- Bước 4: Duyệt qua tất cả các kết nối với nút hiện tại đang tìm đường đi.
- Bước 5: Khởi tạo `numberIntersect` và `tempNode`, trong đó `tempNode` là nút tạm thời để di chuyển đến, đối với vòng đầu tiên thì giá trị của nút đầu tiên trong mảng các nút kết nối được chỉ định đến.
- Bước 6: Kiểm tra nếu nút `i` đã có trong `shortestPath`, nếu có rồi thì sẽ không xét đến nữa, và thuật toán di chuyển đến nút tiếp theo trong tập nút kết nối, và quay về lại bước 4. Nếu chưa có thì tiếp tục xử lý.
- Bước 7: Lấy phần giao giữa hai tập nút: một tập là các nút có thể kết nối với nút `i`, và một tập là các nút có thể kết nối với nút cuối cùng trong `shortestPath`.
- Bước 8: So sánh số lượng phần giao (`intersect`) với `numberIntersect`: Nếu số phần giao (`intersect`) nhỏ hơn `numberIntersect`, cập nhật giá trị `numberIntersect` và chọn nút `i` làm nút tiếp theo.
- Bước 9: Kiểm tra số lượng kết nối giữa nút đang xét và `tempNode`: Di chuyển đến nút có nhiều kết nối hơn và cập nhật đường đi ngắn nhất (`shortestPath`)
- Bước 10: Kiểm tra nếu nút có thể kết nối đến BS: nút hiện tại có thể kết nối đến BS không. Nếu có, đặt `touchBS = true` để kết thúc thuật toán.

- Bước 11: Kết thúc: Khi `touchBS = true`, thuật toán kết thúc và `shortestPath` chứa đường đi ngắn nhất đến BS.

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.

Thuật toán 2.6 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 là 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 $X_1 = [X_1^1, X_2^1, \dots, X_M^1]$; năng lượng khởi tạo toàn mạng; $\alpha = 0.03$, $\beta = 0.1$: các hệ số giả định trong đất.

Đầu ra: `flagStopNetwork`.

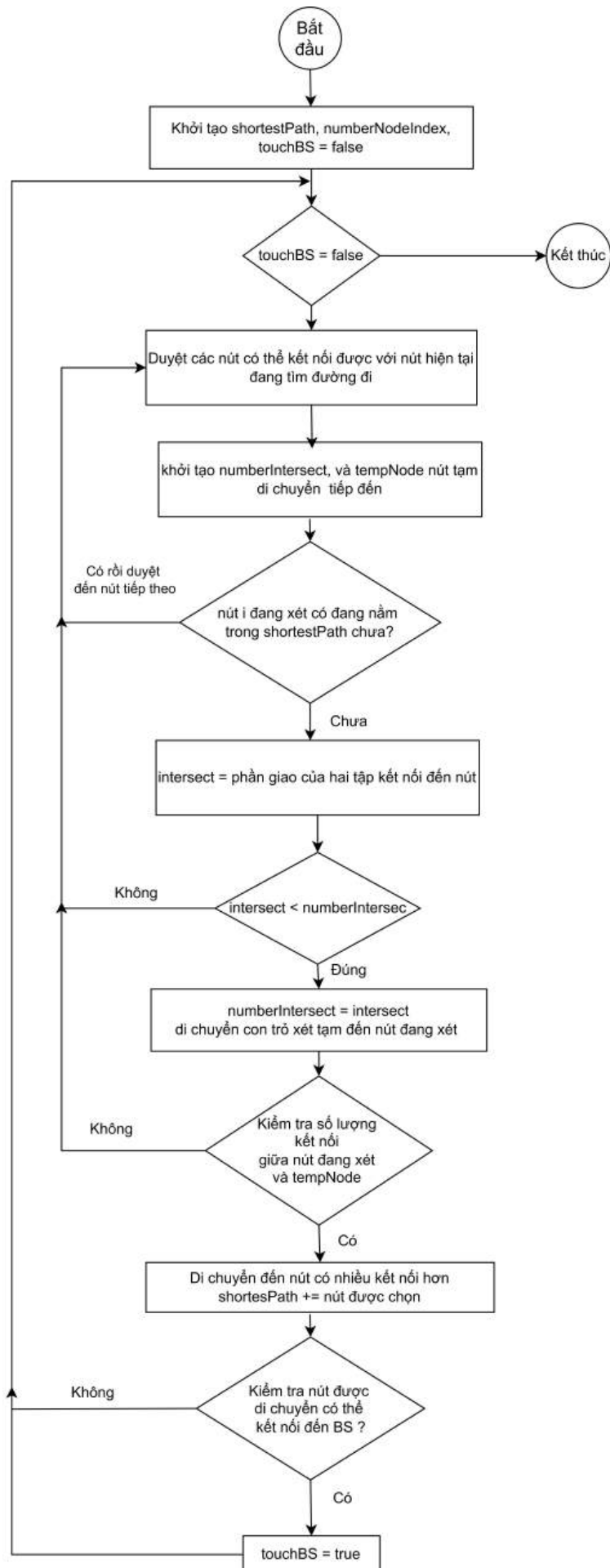
```

1: routingMatrix ← containers.Map()
2: while flagStopNetwork = false do
3:   while  $t < regions$  do
4:     while  $i < X_t$  do
5:       shortestPath $i$  $t$  ← Algorithm 2
6:       if Nút đang xét đã kết nối đến BS then
7:         while  $j \leq shortestPath_i^t.size() - 1$  do
8:           next ←  $j + 1$ 
9:           Tính năng lượng cho việc truyền - dựa vào cách tính năng lượng theo độ đo đã được định nghĩa
10:          if next = shortestPath $i$  $t$ .size() then
11:            Đánh dấu nút  $X_j^t$  kết nối được với nút  $X_i^t$  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  $totalEC \leq (\alpha \cdot initEnergy \cdot X_t.size())$  or  $(X_t.size() - connectedNodes) \leq (\beta \cdot X_t.size())$  then
18:      flagStopNetwork ← true
19:    else
20:      Cập nhật lại trạng thái dựa trên thuật toán 2.7
21:    end if
22:  end while
23: end while

```

Định tuyến toàn mạng còn bao gồm việc xem xét các yếu tố khác như khả năng kết nối của những nút tiếp theo trong nhiều vùng, và thậm chí là mức năng lượng còn lại của các nút. Cụ thể, sau khi tìm được đường đi ngắn nhất, 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.

Khi các nút trong mạng thực hiện việc truyền dữ liệu, mỗi nút sẽ tiêu tốn một lượng năng lượng nhất định để duy trì kết nối và chuyển tiếp thông tin. Việc



Hình 2.9: Lưu đồ các bước về chọn đường đi ngắn nhất của một nút

theo dõi và cập nhật năng lượng của mỗi nút trong quá trình định tuyến là rất quan trọng để duy trì sự ổn định của mạng và tránh tình trạng "hết năng lượng" tại các nút, điều này có thể làm gián đoạn quá trình truyền tải. Sau mỗi vòng, năng lượng của các nút sẽ được tính toán lại để xác định khả dụng của chúng cho vòng tiếp theo. Ma trận định tuyến có thể được sửa đổi để xác định xem các nút này có thể được liên kết với các nút khác trong đó cho vòng tiếp theo hay không. Việc đánh giá cho mỗi nút có thể được thực hiện như đã nêu trong Thuật toán 2.6.

Thuật toán 2.7 Cập nhật phần tử trong ma trận định tuyến

Đầu vào: k vùng; ma trận định tuyến;

Đầu ra: Ma trận định tuyến mới

```

1: Khởi tạo  $X_1 = [X_1^1, X_2^1, \dots, X_M^1]$ 
2: while  $t < \text{regions}$  do
3:   while  $i < X_t$  do
4:      $tRout_t^i \leftarrow \text{routing-matrix}_t$ 
5:     while  $j < tRout_t^i$  do
6:        $C \leftarrow \text{energyTransmission2Nodes}(R_{out}, R'_{out})$ 
7:        $flagRemove \leftarrow \text{false}$ 
8:       if  $(tRout_t^i.E \leq \text{energyTran})$  or  $(tRout_t^i.E \leq \text{thresEn})$  then
9:         Xóa các nút liên kết của cả 2 bên trong ma trận định tuyến
10:        Xóa  $tRout_t^j$  khỏi  $tRout_t^i$ 
11:        Xóa  $tRout_t^i$  khỏi  $tRout_t^j$ 
12:         $flagRemove \leftarrow \text{true}$ 
13:      end if
14:      if  $\neg flagRemove$  then
15:         $j \leftarrow j + 1$ 
16:      end if
17:    end while
18:    Xét trường hợp nút  $X_t^i$  còn liên kết được với BS
19:     $energyTranBS \leftarrow \text{energyTrans2Nodes}(X_t^i, BS)$ 
20:    if  $X_t^i.E \leq energyTranBS$  then
21:      Đánh dấu  $X_t^i$  không kết nối được với BS
22:    end if
23:  end while
24: end while

```

Trong mạng giả định, một nút chuyển tiếp có thể truyền qua nhiều miền khác nhau, tuy nhiên, việc tối ưu hóa năng lượng được xem xét dựa trên các yếu tố như vị trí và ưu tiên truyền qua các nút có năng lượng cao. Khi xây dựng bảng định tuyến, các yếu tố đo lường mới được đưa vào như một phần tham chiếu nhanh để lựa chọn các nút có thể kết nối đến nhau. Thêm vào đó, nếu nút chuyển tiếp là một nút then chốt với vị trí thuận lợi trong việc trung chuyển, nhưng sau một thời gian, nó hết năng lượng, cơ chế định tuyến động (theo thuật toán 2.4) sẽ giúp cân bằng quá trình truyền tải trong mạng. Thuật toán 2.7 thực hiện việc cập nhật các phần tử trong ma trận định tuyến, đồng thời kiểm tra và loại bỏ các liên kết không khả thi, nhằm duy trì sự ổn định của ma trận định tuyến trong mô hình

đề xuất. Bên cạnh việc xem xét các yếu tố như thông tin truyền tải và các chỉ số đo lường mới, thuật toán này cũng là điểm nhấn trong các thuật toán được đề xuất. Các nút trong mạng có thể thay đổi tuyến đường trong quá trình truyền tải, tùy vào sự thay đổi năng lượng hoặc trạng thái của các nút. Điều này giúp thuật toán định tuyến, cũng như thuật toán tìm đường đi ngắn nhất, có thể đưa ra các quyết định chính xác hơn khi lựa chọn các nút trung gian phù hợp trong quá trình truyền dữ liệu.

Mục tiêu của thuật toán

Thuật toán này giúp duy trì ma trận định tuyến tối ưu bằng cách loại bỏ các liên kết không khả thi, đồng thời đảm bảo chỉ những nút đủ năng lượng để kết nối mới được giữ lại trong mạng. Điều này hỗ trợ việc duyệt nhanh qua tất cả các vùng trong thuật toán định tuyến, cũng như tối ưu hóa thuật toán tìm đường đi ngắn nhất từ mọi nút đến BS.

Đầu vào: Thuật toán nhận vào k vùng và ma trận định tuyến hiện tại, trong đó các vùng đại diện cho các tập hợp nút trong mạng.

Đầu ra: Ma trận định tuyến mới, được cập nhật sau khi kiểm tra và loại bỏ các liên kết không còn hiệu quả.

Các bước thực hiện quá trình thuật toán:

- **Khởi tạo:** Bước đầu tiên là khởi tạo danh sách các nút $X_1 = [X_1^1, X_2^1, \dots, X_M^1]$ thuộc các vùng trong mạng.
- **Vòng lặp qua các vùng:** Thuật toán thực hiện qua từng vùng t và các nút i thuộc vùng đó. Đối với mỗi nút, thuật toán kiểm tra các liên kết giữa các nút trong ma trận định tuyến.
- **Kiểm tra liên kết:** Nếu năng lượng của một liên kết không đủ để duy trì truyền tải thông tin (năng lượng thấp hơn ngưỡng cho phép), thuật toán sẽ xóa liên kết giữa các nút trong ma trận định tuyến.
- **Kiểm tra kết nối với BS:** Sau khi kiểm tra các liên kết giữa các nút, thuật toán tiếp tục kiểm tra khả năng kết nối của mỗi nút với BS. Nếu năng lượng của nút không đủ để kết nối với BS, nút đó sẽ bị đánh dấu là không thể kết

nói.

- **Cập nhật ma trận định tuyến:** Sau mỗi vòng lặp, ma trận định tuyến được cập nhật để loại bỏ các nút không còn khả năng kết nối, giúp đảm bảo tính hiệu quả trong việc truyền tải dữ liệu trong mạng.

2.3.5 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 $O(\text{regions} \times X_t^2)$

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 lặp 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 tìm đường đi ngắn nhất tới BS, độ phức tạp này phụ thuộc vào thuật toán 2.5. Dòng số 8 thuật toán có *shortestPath_t.size()* và thực hiện tính toán năng lượng truyền tải từ đó có độ phức tạp $O(k')$ trong đó có $k' = \text{shortestPath_t.size()}$ là số lượng bước trong đường đi. Cập nhật lại trạng thái ma trận từ thuật toán cập nhật từ 2.7. 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.

2.4 Kết luận chương

Chương 2 của luận án trình bày hai mô hình định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm, được xây dựng và phân tích một cách có hệ thống bằng các phương pháp toán học. Những đóng góp mới của luận án được phát triển từ các mô hình định tuyến trong chương này và đã được công bố.

Cả hai mô hình đều nhắm đến mục tiêu tối ưu hóa hiệu quả định tuyến dữ liệu và tiết kiệm năng lượng trong mạng cảm biến. Luận án đã áp dụng khai triển Taylor để phân tích và ước lượng các hàm trong các mô hình, từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho việc xác minh độ ổn định và hội tụ của các thuật toán định tuyến. Bất đẳng thức Cauchy được sử dụng để kiểm chứng độ chính xác của các kết quả thu được từ mô hình toán học, củng cố độ tin cậy của các mô hình định tuyến đa vùng.

Mô hình định tuyến đa vùng thu thập và tổng hợp dữ liệu tại chỗ thông qua các bước nhảy ngắn, kết nối trực tiếp với nút chuyển tiếp hoặc cụm trưởng, nhằm tối ưu hóa việc tiết kiệm năng lượng. Trong khi đó, mô hình định tuyến liên vùng gửi dữ liệu giữa các nút chuyển tiếp trong các vùng khác nhau và kết nối đến trạm cơ sở. Cấu trúc đa bước này hỗ trợ khả năng mở rộng và tối ưu hóa hiệu quả năng lượng của mạng cảm biến. Một ma trận định tuyến được sử dụng để lưu trữ khoảng cách hoặc chi phí đường đi trong khu vực và giữa các khu vực.

Chiến lược định tuyến đa vùng này cải thiện hiệu suất năng lượng và giảm chi phí định tuyến cho WSN. Để tối ưu hóa cho một miền quan sát, thuật toán phân cụm mờ được áp dụng, giúp tối ưu hóa việc định tuyến trong phạm vi các miền quan sát cụ thể. Đối với mô hình định tuyến đa miền quan sát, một độ đo mới đã được đưa ra, nhằm giúp việc xây dựng bảng định tuyến trở nên nhanh chóng và hiệu quả hơn. Chứng minh này không chỉ xác thực các lý thuyết đã đề xuất mà còn thiết lập nền tảng vững chắc cho việc triển khai và ứng dụng các thuật toán trong các mô phỏng thí nghiệm ở các chương tiếp theo.

- 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 trình bày chi tiết về quá trình thực nghiệm và đánh giá các mô hình định tuyến sử dụng bộ dữ liệu tọa độ nút cảm biến đã xây dựng. Mục tiêu chính của chương này là kiểm chứng hiệu quả và độ tin cậy của các thuật toán định tuyến trong mô phỏng trong mạng WUSN. Chương này nhằm đánh giá các tập dữ liệu và môi trường thực nghiệm được sử dụng trong các nghiên cứu trước đây, nhấn mạnh những điểm mạnh và điểm yếu vốn có của từng loại. Sự làm rõ sẽ đề cập đến các yếu tố bao gồm độ chính xác của dữ liệu, khả năng mô phỏng môi trường ngầm, và các hạn chế liên quan đến việc tiến hành các thực nghiệm thực tế. Trong thực nghiệm của luận án, các tham số tính toán năng lượng truyền của các nút dưới lòng đất được xác định thông qua Bảng 1.1, bao gồm các thông số như cường độ tín hiệu, mật độ đất, thể tích đất, hệ số giảm trong không khí, v.v. Các tham số này được giữ cố định trong suốt quá trình nghiên cứu, không xét đến sự biến thiên hay thay đổi của các đặc tính đất. Mục tiêu của luận án là xác định các tuyến đường định tuyến cho các nút tại một thời điểm, dựa trên các thông số cố định này, để tối ưu hóa năng lượng trong việc truyền dữ liệu trong mạng.

3.1.1 Giới thiệu về môi trường mô phỏng

Mạng cảm biến ngầm đa miền gồm nhiều cụm nút chôn ở các khu vực khác nhau được gọi là miền, mỗi miền tự định tuyến nội bộ và kết nối ra ngoài qua những nút cảm biến khác ở phía trên hoặc trạm cơ sở ở trên mặt đất. Đường liên lạc phải ghép chuỗi từ các cảm biến ở các miền lại: trong miền chọn lộ trình đi cho

một nút làm sao tiết kiệm năng lượng nhất, giữa các miền các gateway sẽ thương lượng để tìm tuyến đường với tổng năng lượng thấp nhất nhưng vẫn đảm bảo đủ nút và các nút ở dưới mặt đất vẫn ổn định. Nói cách khác là bài toán định tuyến ngầm đa miền là bài toán tối ưu cả nội và liên miền chứ không chỉ chọn đường đi ngắn nhất. Mục tiêu của phần thực nghiệm được xem xét như các điểm dưới đây:

- So sánh chất lượng phân cụm của thuật toán đề xuất với FCM.
- Đánh giá hiệu suất theo các tiêu chí: tổng năng lượng tiêu thụ, số vòng như thời gian sống mạng, số nút chết và số nút ngầm chết.
- So sánh trong *đơn vùng*: đối chiếu FCM và FCM-WUSN theo các tiêu chí trên.
- Đánh giá *đa vùng*: (i) các phân phối vị trí cảm biến khác nhau (Gamma, Poisson, Gaussian, ...); (ii) khả năng liên vùng với nhiều nút chuyển tiếp; (iii) ảnh hưởng của vị trí BS (Bắc/Tây/Đông/Nam).

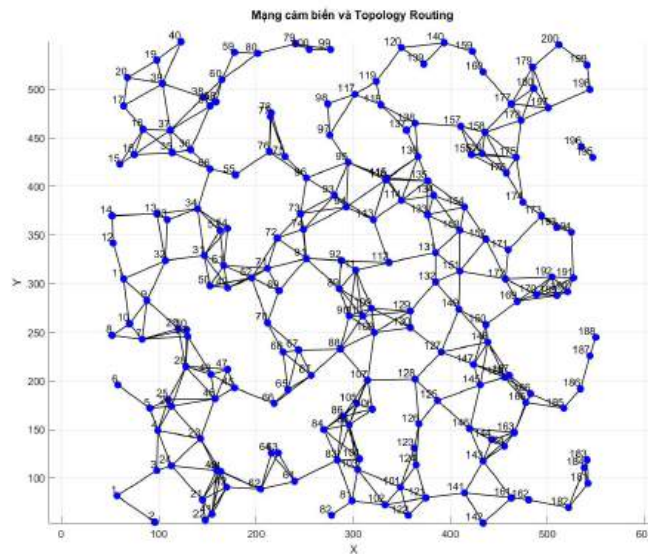
Môi trường thực nghiệm Trong phần thực nghiệm, luận án cài đặt hai thuật toán FCM và thuật toán đề xuất FCM-WUSN trong phần mềm MATLAB 2018a và thực hiện chúng trên máy tính với cấu hình CPU Intel core i7-7700HQ, 16GB RAM để tiến hành thực nghiệm cho một khu vực. Tuy nhiên, với nhiều khu vực, nó tốn nhiều thời gian và dung lượng hơn. Vì vậy, để đưa ra được kết quả thực nghiệm luận án đã nâng cấp RAM lên 32GB và nâng cấp phiên bản MATLAB lên MATLAB 2023a.

Các tiêu chí đánh giá cho thực nghiệm: Dựa vào mục tiêu của thực nghiệm, từ đó luận án đưa ra được những tiêu chí chính để có thể đánh giá tính tin cậy của các mô hình và thuật toán đề xuất:

- Tổng năng lượng tiêu hao toàn mạng
- Thời gian sống của mạng
- Số lượng nút ngầm còn sống
- Tổng số lượng nút còn sống

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.



Hình 3.1: Mô phỏng mạng cảm biến không dây và topology trong mạng.

Mô phỏng định tuyến là phần cốt lõi trong các mạng WSN để xem xét các giao thức truyền có hiệu quả hay không. Từ đó có khả năng mở rộng, hoặc đảm bảo chất lượng dịch vụ trong mạng WSN và các ứng dụng IoT nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu và triển khai trong các ứng dụng. Các nghiên cứu [78–80] đã công bố trong IEEE Dataport hoặc Kaggle cung cấp về vị trí các cảm biến và hỗ trợ cho các bài toán về ứng dụng tối ưu hóa định tuyến. Tuy nhiên về nội dung của dữ liệu giúp hỗ trợ phân tích các hành vi các phân tích các bất thường theo thời gian.

Nghiên cứu cung cấp bộ dữ liệu cho các cảm biến triển khai dưới lòng đất [81] mô hình hóa LoRa ngầm, thiết kế WUSN canh tác chính xác và nghiên cứu tương quan giữa đất không khí cũng như định tuyến trong đó. BonnMotion sample trace trong NS3 [82], và CMU-dataset trong NS2 [83] đưa ra tọa độ 3 đỉnh x,y,z của các nút theo thời gian và các loại distribution khác nhau và di chuyển hay không. NS-3 không cung cấp các tập dữ liệu sẵn có cho các giao thức định tuyến hoặc tiêu thụ năng lượng theo cách mà một số công cụ mô phỏng hoặc tập dữ liệu khác có thể. Tuy nhiên, NS-3 cung cấp các khung mô phỏng, mô hình và công cụ để tạo ra bộ dữ liệu tổng hợp của riêng luận án dựa trên các kịch bản được thiết lập trong mô phỏng.

Mạng cảm biến đa miền được áp dụng trong nhiều ứng dụng hiện nay, từ đây cũng có nhiều tập dữ liệu từ ứng dụng được công bố. Một số tập dữ liệu cung cấp thông tin liên quan đến vị trí cảm biến và các yếu tố môi trường có thể được sử dụng để đánh giá và thử nghiệm các giao thức định tuyến, hệ thống giám sát và các kỹ thuật phân tích dữ liệu trong ứng dụng trong nông nghiệp. Những tập dữ liệu này thường chứa thông tin về vị trí đặt cảm biến trong các cánh đồng, điều này rất quan trọng cho việc định tuyến và thu thập dữ liệu trong các ứng dụng như vậy. Tập dữ liệu được công bố có bao gồm dữ liệu từ một triển khai cảm biến theo hình tròn, thường được sử dụng trong nghiên cứu mạng WSN để nghiên cứu các giao thức như định tuyến, định vị và bao phủ. Các nút được đặt theo hình tròn với mật độ nút khác nhau, và nó được sử dụng để đánh giá hiệu suất định tuyến trong các triển khai như vậy [84].

Mặc dù có nhiều nghiên cứu về bộ dữ liệu mạng cảm biến không dây, vẫn thiếu bộ dữ liệu về tọa độ cảm biến có khả năng xác định nút ngầm hay nút trên mặt đất, phục vụ cho các thuật toán định tuyến. Bộ dữ liệu này cũng cần thông tin về số lượng miền và các tuyến định tuyến trong mỗi miền, nhằm hỗ trợ nghiên cứu và tối ưu hóa định tuyến trong mạng cảm biến không dây ngầm đa miền.

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 các yếu tố cần trong WUSN: Bộ dữ liệu là tập hợp các tọa độ mô tả theo (x, y, z) theo đó x, y giá trị này mô tả vị trí của cảm biến trong không gian, và z là vị trí của cảm biến so với mặt đất tùy thuộc vào việc phân cảm biến này trên hoặc ở dưới mặt đất.
- Bước 2 - tạo dữ liệu bằng cách sử dụng các phương pháp ngẫu nhiên là Linear Congruential Generator (LCG) và Middle Square Method (MSM).
 1. Sử dụng LCG để sinh dãy các vị trí cảm biến ban đầu theo công thức là $X_{n+1} = (aX_n + c) \bmod m$ trong đó với a, c, m là các tham số được cho và tại tọa độ bắt đầu là X_0 là giá trị khởi tạo ngẫu nhiên.
 2. Áp dụng MSM để tinh chỉnh các giá trị từ LCG. Thuật toán sinh dữ liệu sẽ sử dụng giá trị của LCG làm đầu vào cho MSM để từ đó tinh chỉnh lại bộ dữ liệu. Việc chỉnh sửa với công thức như sau bắt đầu với giá trị khởi tạo là X_0 sau đó tính bình phương của X_0 và lấy chữ số giữa của kết quả bình phương làm giá trị tiếp theo. LCG cung cấp ra kết quả là một tập các giá trị đồng đều và hội tụ lại một điểm quanh một khu vực khởi tạo cho trước vì tính chất của nó là việc lặp lại nhất định. Như vậy trong luận án đã kết hợp với MSM để giảm sự lặp lại của dãy số và tạo ra một bộ dữ liệu ngẫu nhiên trong giá trị.
- Bước 3 - kiểm tra lại dữ liệu được sinh với các phương pháp ngẫu nhiên nhưng theo các tiêu chuẩn của một bài toán định tuyến trên mạng với các tiêu chuẩn về độ phủ sóng dựa trên bán kính truyền thông, mật độ các nút cảm biến, và phân bố của mỗi mạng. Đối với mỗi mô hình được đề xuất trong chương 2. Các tiêu chuẩn loại trừ, sẽ được loại đi như vị trí của các cảm biến bị sai lệch hẳn với vị trí trung tâm hoặc vùng quan sát, các giá trị tọa độ bị âm, hoặc dữ liệu tại một địa điểm bị trùng lặp quá nhiều.

Năng lượng tại mỗi vòng của các nút cảm biến sẽ được xét ở trên và dưới

Bảng 3.1: Giá trị tham số cho thực nghiệm [2]

Tham số	Giá trị
Phân bố	Phân bố rải rác đều
Vị trí BS	Trung tâm của Địa hình
Số lượng cụm	10% số lượng cảm biến
Năng lượng nút khởi tạo	10 J
T_r	25 m
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{DA}	5 nJ/bit
ϵ_{mp}	0.0013 pJ/bit/ m^4
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/ m^2

mặt đất nên các thông tin sử dụng để tính toán về suy hao cũng được đưa vào.

3.1.3 Kích bản đánh giá

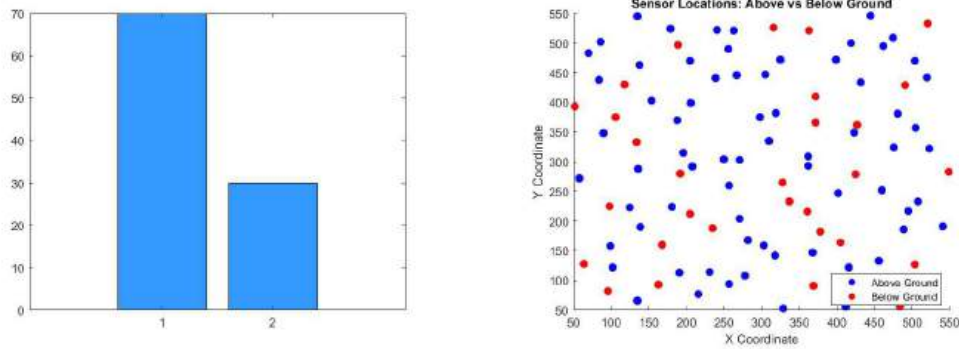
Kích bản cho một khu vực quan sát

Các tập dữ liệu khác nhau như tăng số lượng nút cảm biến hoặc tăng tỷ lệ nút ngầm trong các mạng được sản xuất cho các thực nghiệm. Dựa trên Bảng 3.2, sáu tập dữ liệu được tạo ra dựa trên vị trí của các cảm biến trong WUSN. Kích thước và các đặc tính ngầm của sáu tập dữ liệu tương ứng với tích Descartes của số lượng cảm biến và số lượng cảm biến trong lòng đất. Luận án kiểm tra tác động của các cảm biến tổng hợp khác nhau trong mạng cũng như mạng với sự khác biệt từ phạm vi các nút ngầm như 10%, 20%, và 30%. Trong Thuật toán 2.1 của mô hình cho một khu vực quan sát được sử dụng với giá trị $m = 2$ để tính giá trị nghiệm của u, V . Tham số m ảnh hưởng đến mức độ phân tán và tính chất của các cụm trong thuật toán phân cụm mở rộng từ FCM. Tuy nhiên nếu m có giá trị quá thấp, các cảm biến có thể bị phân chia cứng nhắc vào các cụm mà không phản ánh được các mối quan hệ giữa chúng, còn nếu m có giá trị quá lớn thì các cụm trở nên mờ và các cảm biến không thuộc rõ ràng một nhóm cụ thể điều này có thể làm cho các cảm biến tốn nhiều năng lượng để duy trì kết nối ở nhiều cụm khác nhau. Với lý do đó trong luận án đã chọn $m = 2$ để có thể có sự phân chia rõ ràng và mềm mại giữa các cụm với nhau. Ngoài ra tất cả các giá trị tham số như số lượng cụm và vị trí của BS có thể được theo dõi trong Bảng 3.1.

Thống kê các mẫu về phân bố cho bộ dữ liệu của một vùng quan sát với dữ liệu có 100 nút cảm biến trong đó có 30% nút dưới mặt đất được mô tả như sau.

Quy mô dữ liệu theo z :

- Số lượng nút dưới mặt đất $z = 20$: 29
- Số lượng nút trên mặt đất $z = 25$: 71



Hình 3.2: Phân bố của các cảm biến cho bộ dữ liệu 100 nút 30% nút dưới mặt đất và 1 vùng quan sát

Tập dữ liệu cho nhiều khu vực Bốn kịch bản đã được đề xuất để đánh giá các tiêu chí đã đề cập trước đó. Các thông số liên quan đến số lượng nút và phạm vi khu vực triển khai sẽ được trình bày chi tiết sau đây. Ngoài ra, các tham số tổng quát liên quan đến năng lượng ban đầu của các nút và các tham số liên quan đến mật độ truyền dẫn trong đất sẽ được trình bày sau Bảng 3.1:

- *Kịch bản 2.1: Phân tích đặc điểm ngầm* - Phân phối 100 nút và 200 nút với tỷ lệ nút ngầm là 10%, 20%, và 30%. Đánh giá tổng mức tiêu thụ năng lượng và số lượng nút kết nối ngầm giữa thuật toán đề xuất và thuật toán hiện tại, chẳng hạn như FCM-WUSN và FCM, tại một vị trí cụ thể để đánh giá hiệu suất liên quan đến các đặc điểm ngầm.
- *Kịch bản 2.2: Đánh giá hiệu suất định tuyến* - Các nút cảm biến nên được phân bố trên hai hoặc bốn khu vực, với mỗi khu vực chứa 100 hoặc 200 nút. Tỷ lệ cảm biến dưới lòng đất sẽ nằm trong khoảng từ 10% đến 30%, giống như trong kịch bản 1. Để đánh giá mức độ hiệu quả của việc định tuyến dữ liệu trong việc kéo dài tuổi thọ của mạng, hãy so sánh nó với thuật toán PEGASIS ở mỗi vị trí.
- *Kịch bản 2.3: Khả năng liên kết các nút chuyển tiếp và đồ thị đa miền* - Để đánh giá tác động của các nút lặp và các điều kiện đặt trạm gốc (BS). Các nút cảm biến được phân bố giữa 2 hoặc 4 khu vực, với 100 nút trong mỗi khu vực, trong đó 10% là ngầm. Trong kịch bản này, BS sẽ được đặt ở phía

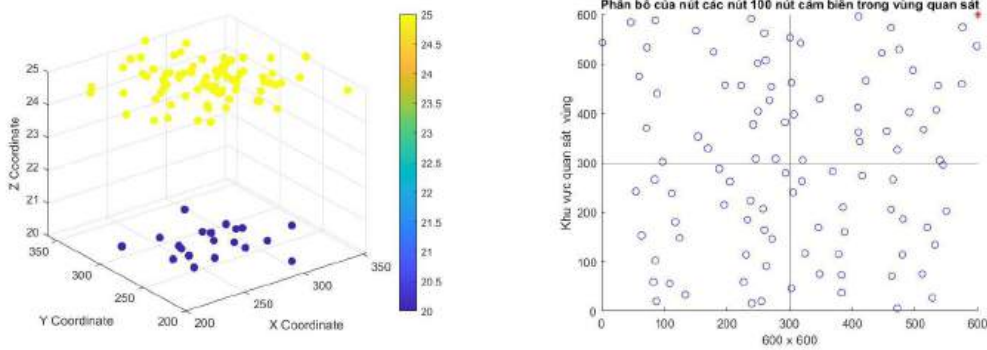
Bảng 3.2: Tham số cho các kịch bản

Số lượng cảm biến	100, 200 sensors
Số lượng cảm biến ngầm	10%, 20%, 30% số lượng cảm biến

tây, đông, bắc và nam, thay vì ở trung tâm như trong các kịch bản 1 và 2, để đánh giá chức năng của các nút chuyển tiếp trong việc hỗ trợ chuyển dữ liệu đến BS qua các khu vực khác nhau.

- **Kịch bản 2.4: Kiểm tra các biến thiên của thuật toán bằng các phân phối khác nhau** - Chứng minh tính bền vững của phương pháp đề xuất qua các phân phối khác nhau. Để xác định độ ổn định của thuật toán đề xuất trên các phân phối khác nhau ngoài phân phối đồng nhất, luận án thực hiện thuật toán sử dụng các phân phối khác nhau, bao gồm Gamma, Poisson và Gaussian, trên các tập dữ liệu gồm 2 hoặc 4 vùng, mỗi vùng chứa 100 nút với 20% số nút nằm dưới lòng đất.

Thống kê các mẫu về phân bố cho bộ dữ liệu của 4 vùng quan sát với dữ liệu có 100 nút cảm biến trong đó có 30% nút dưới mặt đất được mô tả như sau.



Hình 3.3: Phân bố của các cảm biến cho bộ dữ liệu 100 nút 30% nút dưới mặt đất và 1 vùng quan sát

Bảng tóm tắt về mô tả bộ dữ liệu này với đa khu vực như sau

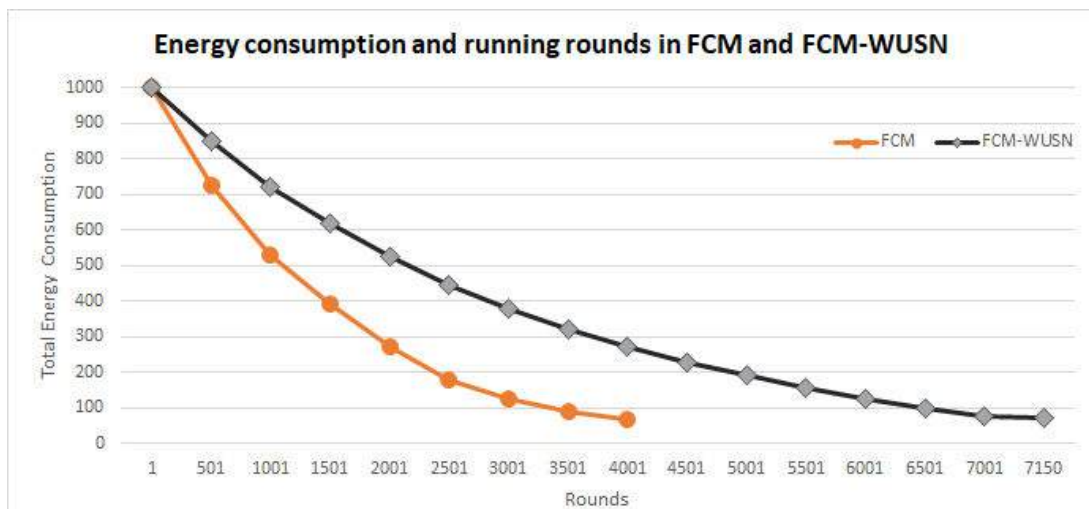
Bảng 3.3: Thống kê tóm tắt cho dữ liệu x và y cho một bộ dữ liệu

Thống kê	Dữ liệu x	Dữ liệu y
Số lượng giá trị (n)	100	100
Khoảng giá trị (Range)	52–549	53–546
Giá trị nhỏ nhất (Min)	52	53
Giá trị lớn nhất (Max)	549	546
Giá trị trung bình (Mean)	298.51	301.37
Trung vị (Median)	300.5	298
Độ lệch chuẩn mẫu (Std. dev)	142.2	146.3

3.2 Kết quả thực nghiệm

3.2.1 Kịch bản đánh giá đơn vùng

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 3.4 giữa tổng mức tiêu thụ năng lượng và số vòng sau khi chạy FCM và FCM-WUSN. Luận án 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. Thời gian sống của mạng, mức tiêu thụ năng lượng và số lượng nút còn sống trong toàn bộ mạng hoặc mạng ngầm có thể được coi là tiêu chí để đánh giá kết quả thực nghiệm. Phương pháp FCM-WUSN sử dụng một lượng năng lượng lớn hơn trong mạng so với phương pháp FCM, nhưng phương pháp FCM-WUSN có tuổi thọ mạng dài hơn đáng kể.



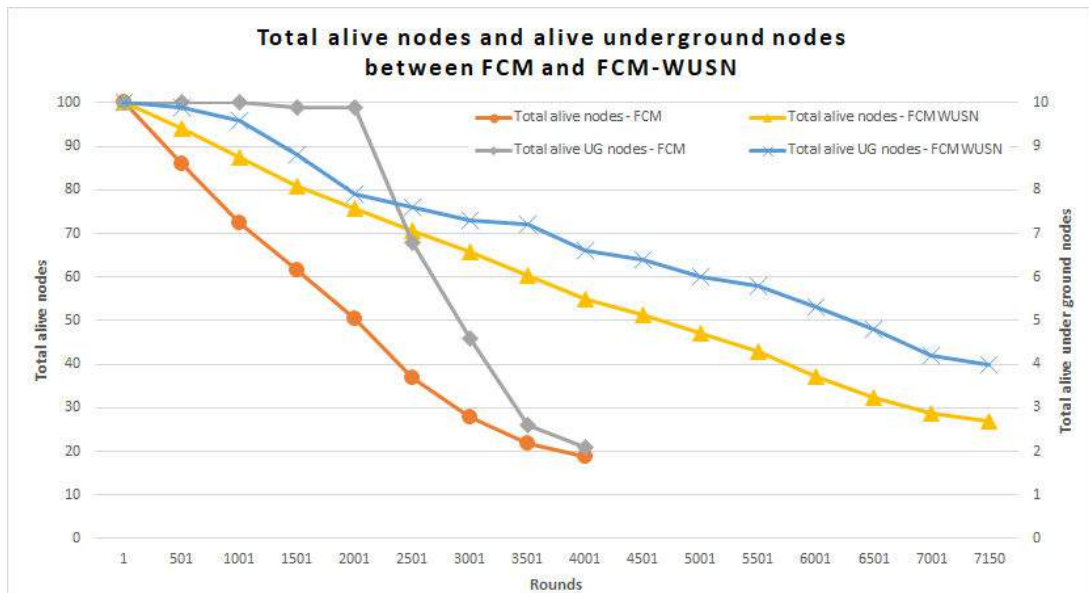
Hình 3.4: Tổng năng lượng tiêu thụ cho thuật toán FCM và FCM-WUSN

Bảng 3.4 cho thấy kết quả tuổi thọ mạng và lượng năng lượng sử dụng khi các thuật toán FCM và FCM-WUSN được áp dụng cho sáu bộ dữ liệu khác nhau. Kết quả luận án lấy trung bình của 10 lần mà mỗi phương pháp được chạy cho mỗi loại tập dữ liệu. Nói chung, phương pháp được đề xuất cho kết quả tốt hơn so với FCM khi áp dụng cho sáu tập dữ liệu. Nói cách khác, việc chạy FCM-WUSN sẽ kéo dài tuổi thọ của mạng. Thời gian sống của mạng lưới dài hơn khoảng 2,1 lần đối với một tập dữ liệu gồm 100 nút với 20% số nút nằm dưới lòng đất. Tuy nhiên, mức tiêu thụ năng lượng của FCM-WUSN cao hơn 1.0002 lần so với FCM. Thời

Bảng 3.4: Thời gian sống của mạng sau chạy FCM và FCM-WUSN cho 6 bộ dữ liệu

	100 nút & 10% UN	100 nút & 20% UN	100 nút & 30% UN	200 nút & 10% UN	200 nút & 20% UN	200 nút & 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	950.7	950.018	950.01	1900.022	1900.019	1900.01
FCM-WUSN	953.214	958.41	958.41	1905.6	1912.022	1886.1

gian sống là hơn 4969 vòng với một tập dữ liệu gồm 200 nút và 30% số nút nằm dưới lòng đất. So với thuật toán FCM, phương pháp FCM-WUSN tiêu tốn nhiều năng lượng hơn trong mạng, nhưng thuật toán FCM-WUSN có tuổi thọ mạng lâu hơn rất nhiều.



Hình 3.5: Tổng số nút còn sống và số nút còn sống dưới lòng đất giữa FCM và FCM-WUSN.

Hình 3.5 cho thấy tổng số nút sống và nút sống dưới lòng đất giữa hai thuật toán FCM và thuật toán được đề xuất. Ngoài ra, luận án cũng thu được 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 khác nhau. Dựa trên Hình 3.5 được cung cấp, 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 việc giảm 1 nút bắt đầu từ vòng đầu tiên đến vòng thứ 1337th. Cuối cùng, số lượng nút ngầm chết của thuật toán đề xuất vẫn ít hơn so với FCM.

Bảng 3.5: Tổng số nút còn sống và số nút còn sống dưới lòng đất 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
Total alive nodes						
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
Alive underground nodes						
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

Giải thích cho sự hình thành của cụm dựa trên Thuật toán FCM-WUSN dẫn đến sự hòa hợp của các nút trên và dưới mặt đất. Các nút ngầm không cần phải truyền dữ liệu đến CH xa, dẫn đến việc tiêu tốn năng lượng nhanh chóng.

Bảng 3.5 hiển thị giá trị trung bình của mười lần chạy cho mỗi loại dữ liệu và phương pháp đối với các nút sống của mạng. Dựa trên kết quả, có thể kết luận rằng thuật toán đề xuất vượt trội hơn thuật toán FCM về tổng số nút sống và số nút sống dưới lòng đất. Thuật toán được đề xuất hiệu quả hơn 1,19 lần so với thuật toán FCM khi phân tích một tập dữ liệu gồm 100 nút với 10% số nút nằm dưới mặt đất. Ngoài ra, khi xem xét một tập dữ liệu gồm 200 nút với 30 phần trăm các nút nằm dưới mặt đất, thuật toán được đề xuất cao hơn gần 14 nút so với thuật toán FCM.

Dựa trên phân phối dữ liệu của sáu tập dữ liệu, kết quả về chu kỳ hoạt động và các nút sống trong mạng có thể bị ảnh hưởng. Thuật toán FCM-WUSN sẽ hiệu quả hơn 1.2 lần với 100 nút và 1.4 lần với 200 nút so với thuật toán FCM khi xử lý dữ liệu có phân phối lớn cho các cảm biến ngầm. Với cùng số lượng nút cảm biến nhưng số lượng nút ngầm khác nhau, sự chênh lệch tổng số nút sống giữa các thuật toán FCM-WUSN và FCM tăng lên 4 nút, từ 9.9 nút với dữ liệu và 200 nút và 10% nút ngầm lên 13.9 nút với dữ liệu và 30% nút ngầm.

Kết quả từ kịch bản đơn vùng quan sát: Ba phát hiện chính được trình bày sau khi tiến hành các thực nghiệm:

- Sử dụng FCM-WUSN, kết quả hiệu suất trong thời gian sống của mạng và số lượng nút sống cho các nút trên mặt đất và dưới mặt đất đã cải thiện đáng kể kết quả. Thời gian sống của mạng lưới của phương pháp đề xuất dài gấp

2,1 lần so với phương pháp FCM, phương pháp điển hình cho việc phân cụm. Thuật toán FCM-WUSN có số nút sống (tổng số nút sống và số nút sống dưới lòng đất) khoảng 1,4 lần nhiều hơn so với kết quả từ thuật toán 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 khi thực hiện các thực nghiệm, việc triển khai một số lượng lớn cảm biến ngầm là rất quan trọng, điều này tốt hơn về tổng số cảm biến sống và số lượng nút ngầm sống với thuật toán điển hình như FCM. Kết quả là, vùng quan sát ngầm của thuật toán FCM-WUSN rộng hơn và kéo dài hơn so với thuật toán FCM.
- Tuy nhiên, thuật toán được đề xuất vẫn có một số hạn chế nhất định. Mức tiêu thụ điện vẫn chưa hiệu quả. Đặc biệt, năng lượng tiêu thụ nhiều hơn 1.0002 lần so với FCM. Sự suy giảm đường truyền dữ liệu giữa đất và không khí là nguyên nhân của vấn đề này.

Nghiên cứu này đã giới thiệu một mô hình định tuyến mới trong WUSN kết hợp hai đóng góp chính: tính toán suy hao đường truyền trong mô hình và định tuyến để ước lượng độ bền của mạng. Sự độc đáo của mô hình được đề xuất so với các nỗ lực gần đây nhất có thể được giải thích một cách sâu sắc. Đầu tiên, trong mô hình FCM-WUSN, các phương trình để phân tích năng lượng trong toàn bộ mạng lưới nên bao gồm suy hao đường truyền cho các đặc tính ngầm. Để giải quyết mô hình đề xuất với một mạng ngầm cụ thể, luận án áp dụng chuỗi Taylor ở cấp độ 1. Thứ hai, luận án đề xuất thuật toán FCM-WUSN để thực hiện cụm dựa trên kết quả phương sai từ mô hình.

Để xác thực mô hình đề xuất, luận án thiết lập các thuật toán đề xuất này trên MATLAB 2018a và so sánh chúng với thuật toán điển hình như FCM theo bốn tiêu chí: tuổi thọ mạng, tiêu thụ năng lượng, tổng số nút sống và số nút sống dưới lòng đất. Phương pháp được đề xuất cho thấy tuổi thọ mạng lưới dài gấp 2,1 lần so với phương pháp FCM, phương pháp truyền thống để phân cụm. Phương pháp FCM-WUSN cho thấy số lượng nút sống (cả tổng thể và ngầm) cao hơn khoảng

1.4 lần so với thuật toán FCM. Ngoài ra, mặc dù có một mạng lưới lớn hơn nhiều và nhiều cảm biến được triển khai dưới lòng đất hơn, các nút sống dưới lòng đất của FCM nhỏ hơn hơn 1,6 lần so với của FCM-WUSN.

FCM-WUSN vượt trội hơn FCM về kết quả số lượng nút cảm biến sống cho cả nút trên và dưới. Số lượng nút ngầm sống đã được tính toán bằng các phương pháp như FCM hoặc FCM-WUSN, cũng như các tập dữ liệu như các tình huống khác nhau. Số lượng nút sống từ thuật toán WUSN vẫn nhiều hơn thuật toán FCM với sáu tình huống dữ liệu được cung cấp trong Phần 5. Sự phát triển của cụm trong kỹ thuật mà luận án đề xuất là do sự đồng bộ hóa của các nút cả trên mặt đất và dưới lòng đất. Ngoài ra, luận án thực hiện phân tích phương sai hai chiều (two-way ANOVA) bao gồm các tập dữ liệu và thuật toán, để đánh giá độ biến thiên của kết quả thực nghiệm bằng cách xem xét các nút sống dưới lòng đất. ANOVA cho thấy rằng các phương sai trong những trường hợp này không giống nhau. Thông qua kết quả thực nghiệm trên sáu loại tập dữ liệu, FCM-WUSN được khuyến nghị cho các tập dữ liệu có số lượng cảm biến ngầm cao.

Khái niệm mới về phân cụm và định tuyến được trình bày trong bài báo này có ý nghĩa quan trọng trong lý do gần đúng và các ứng dụng cho nông nghiệp quý giá. Ngoài ra, các nhà nghiên cứu và cộng đồng WSN được khuyến nghị tiếp tục thực hiện một số dự án trong tương lai. Đầu tiên, áp dụng multi-hop giữa các cụm trong mạng, nghiên cứu triển khai FCM-WUSN vào các ứng dụng nông nghiệp thông minh để đáp ứng các yêu cầu giải quyết các vấn đề trong thế giới thực, và nghiên cứu tích hợp các thuật toán meta-heuristic để tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng trong WUSN có thể được coi là những cải tiến và phát triển từ nghiên cứu này.

3.2.2 Kịch bản đa vùng - tiêu chí về thời gian sống mạng

Phần này nêu bật kết quả của các kịch bản. Đánh giá dựa trên các tham số về độ bền của mạng được đo bằng số vòng hoạt động, tổng năng lượng tiêu thụ của mạng trong quá trình truyền dữ liệu từ các nút đến trạm gốc, và số lượng các nút vẫn hoạt động trong mạng. Để phân tích các đặc điểm của thuật toán, hãy xem xét các yếu tố như số lượng khu vực được quan sát, số lượng cảm biến trong

mỗi khu vực, vị trí của trạm gốc, và sự phân bố của các cảm biến trên các khu vực khác nhau.

Thời gian sống mạng: Thời gian sống của mạng có thể được xác định theo nhiều cách khác nhau, bao gồm 'Nút đầu tiên chết' và 'Tổng số nút chết'. Trong nghiên cứu này, một mạng được coi là không hoạt động khi nó ngừng hoạt động với 10% số nút còn hoạt động hoặc với 5% năng lượng còn lại trong mạng. Rõ ràng rằng việc cân bằng tải trong mạng là rất quan trọng. Phân phối tải là bằng chứng cho thấy thời gian kéo dài cho tất cả các nút thành phần.

	100 nodes			200 nodes		
	10%UN	20%UN	30%UN	10%UN	20%UN	30%UN
FCM	4556.5	4210.5	4689.3	4556.5	4210.5	4689.3
FCM-WUSN	8086.1	8584.4	8460.2	8086.1	8584.4	8460.2
Multi-Graphs WUSN	13223	12411	11533	13223	12411	11533

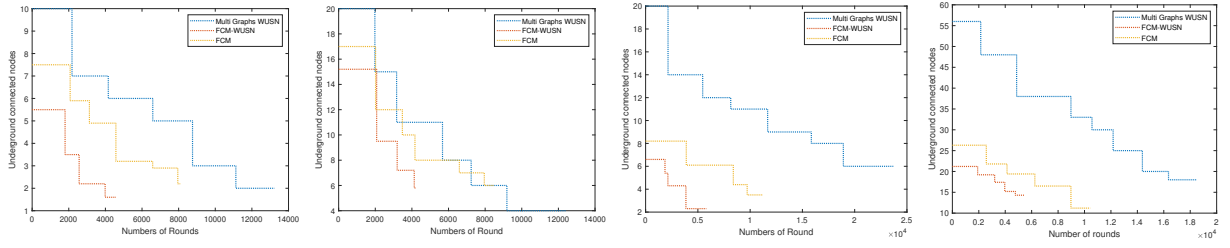
Bảng 3.6: Kết quả của độ bền mạng theo số vòng chạy với 1 khu vực giữa FCM, FCM-WUSN và Multi-Graphs WUSN.

So sánh một khu vực trong kịch bản 1 với FCM, FCM-WUSN và Multi-Graphs WUSN. Kết quả tuổi thọ của thuật toán được đề xuất cao hơn 1.4 lần so với FCM-WUSN khi tính đến kết nối ngầm và cao hơn 3 lần so với thuật toán FCM truyền thống. Chi tiết kết quả có thể được hiển thị trong Bảng 3.6 như là kết quả của các vòng chạy tương ứng với tuổi thọ mạng.

		100 nút			200 nút		
		10%UN	20%UN	30%UN	10%UN	20%UN	30%UN
2 vùng	Multi-Graphs WUSN	52449	49822	41065	87507	82811	76931
	PEGASIS	41655	38832	36756	83571	79274	73725
4 vùng	Multi-Graphs WUSN	92871	83531	76192	84725	87908	79285
	PEGASIS	82349	78897	75525	81245	84995	76374

Bảng 3.7: Kết quả của tuổi thọ mạng theo số vòng chạy với 6 bộ dữ liệu giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.

Trong trường hợp phân phối đồng đều với trạm gốc được đặt ở trung tâm như trong kịch bản 2, tuổi thọ của mạng thường vượt quá tuổi thọ của thuật toán PEGASIS, là phương pháp đa bước truyền thống, như được thể hiện trong Bảng 3.7. Mạng lưới hoạt động bằng cách sử dụng thuật toán được đề xuất cho 10.794 vòng bổ sung so với PEGASIS, với hai phần, mỗi phần bao gồm 100 nút, và 10



(a) 100-10 % Dưới lòng đất (b) 100-30 % Dưới lòng đất (c) 200-10 % Dưới lòng đất (d) 200-30 % Dưới lòng đất

Hình 3.6: Biểu đồ đường của số nút dưới lòng đất kết nối so với số vòng truyền thông cho 100 và 200 nút trong 1 khu vực.

% các nút nằm dưới lòng đất. Nếu số lượng nút ngầm cần giám sát tăng lên 30% tổng số nút trong khu vực, tuổi thọ của mạng sẽ giảm thêm, dẫn đến chỉ còn hơn 4309 vòng so với PEGASIS. Tăng số lượng nút trong một khu vực lên 200, với 10% nút ngầm, sẽ dẫn đến tuổi thọ vượt quá 3936 vòng, trong khi với 30% nút ngầm, tuổi thọ sẽ vượt quá 3206 vòng. Trong bốn khu vực quan sát, mỗi khu vực gồm 100 nút, kỹ thuật đề xuất kéo dài tuổi thọ của mạng lên 10.522 vòng với 10% nút ngầm và 667 vòng với 30% nút ngầm. Tăng số lượng cảm biến trong mỗi khu vực lên 200 nút, với 10% các nút ngầm, dẫn đến việc kéo dài tuổi thọ mạng lưới thêm 3480 vòng khi sử dụng thuật toán đề xuất. Ngược lại, với 30% các nút ngầm, tuổi thọ của mạng được kéo dài thêm 2911 vòng. Với kích bản 3 của một phân phối

	2 vùng				4 vùng			
	Bắc	Tây	Đông	Nam	Bắc	Tây	Đông	Nam
Multi-Graphs WUSN	13589	3634	16586	3910	9968	8534	16626	9560
PEGASIS	9638	8753	11235	6871	7568	8125	10236	6589

Bảng 3.8: Kết quả của tuổi thọ mạng khi đặt các bộ dữ liệu vị trí BS khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.

đồng đều với BS được đặt ở các vị trí khác nhau, như Tây, Đông, Bắc và Nam, luận án tiếp tục kiểm tra nó bằng phương pháp PEGASIS, và kết quả được hiển thị trong bảng 3.8. Các vị trí khác nhau của BS ảnh hưởng mạnh mẽ đến độ bền của mạng và chất lượng truyền dữ liệu trong mạng. Trong các hướng có lợi như Bắc và Đông, khi thực hiện các thử nghiệm với 2 hoặc 4 vùng, độ bền của mạng vượt qua PEGASIS tới 3951 vòng cho 2 vùng với BS đặt ở Bắc và 5351 vòng với BS đặt ở Nam. Trong cả bốn khu vực, phương pháp được đề xuất luôn vượt trội hơn các phương pháp khác về thời gian thực thi, bất kể vị trí của trạm gốc. Khi

được đặt ở phía Bắc, nó hiệu quả hơn 1.3 lần; tuy nhiên, nó cần thời gian lâu hơn 1.6 lần nếu trạm gốc (BS) nằm ở phía Đông. Trong hai khu vực, số lần lặp với BS được đặt ở phía Tây kém hiệu quả hơn 2.4 lần; tuy nhiên, khi mở rộng ra nhiều khu vực hơn, thời gian thực thi tăng lên khoảng 1.1 lần.

Trong kịch bản 4 liên quan đến các loại phân phối khác nhau, BS được đặt ở trung tâm; kết quả được hiển thị trong Bảng 3.9. Một so sánh sẽ được thực hiện bằng cách sử dụng các thuật toán tích hợp của PEGASIS và HLEACH. Chạy một khu vực với PEGASIS và một khu vực với HLEACH cho hai khu vực; điều này tương đương với việc chạy bốn khu vực. Tuổi thọ của thuật toán đề xuất và PEGASIS+HLEACH cho thấy sự biến đổi đáng kể khi được phân tích qua các phân phối khác nhau, bao gồm Gamma, Gaussian và Poisson. Các đặc điểm riêng biệt của những phân phối này dẫn đến một tuổi thọ không hoạt động tốt bằng so với các kịch bản mà dữ liệu được phân phối đồng đều trên cả 2 và 4 vùng.

	2 vùng				4 vùng			
	Gamma	Gaussian	Poisson	Center	Gamma	Gaussian	Poisson	Center
Multi-Graphs WUSN	16522	13713	475	49822	5145	14100	9976	83531
PEGASIS	14193	9568	5876	39768	5987	8574	3978	76875

Bảng 3.9: Kết quả của các vòng chạy với các bộ dữ liệu phân phối khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS+HLEACH.

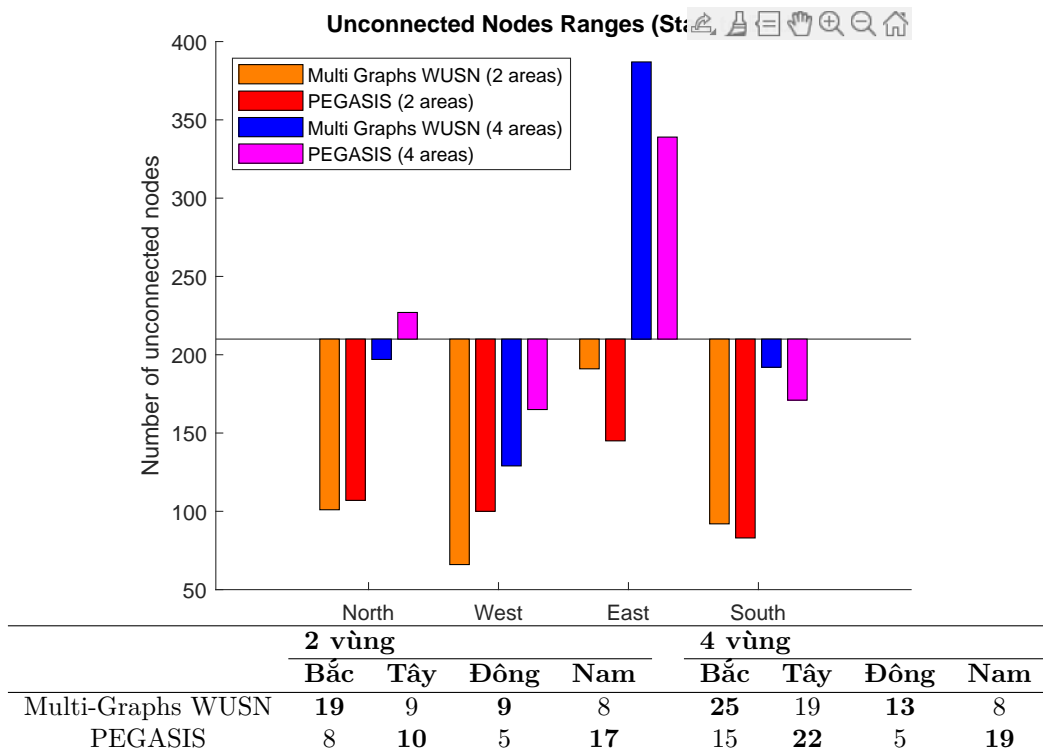
Trong phân tích hai khu vực, thuật toán đề xuất cho thấy hiệu suất vượt trội so với Pegasis khi áp dụng cho dữ liệu phân phối gamma và Gaussian, đạt được sự cải thiện 1,16 lần cho phân phối gamma và 1,4 lần cho phân phối Gaussian. Tuy nhiên, khi sử dụng phương pháp Poisson, tuổi thọ của thuật toán đề xuất kém hơn so với PEGASIS, cho thấy sự giảm sút 5401 vòng lặp. Trong phân tích bốn khu vực, việc triển khai thuật toán gamma dẫn đến tuổi thọ mạng ngắn hơn 842 vòng so với PEGASIS. Thuật toán đề xuất cho thấy hiệu quả tăng 1,6 lần so với thuật toán Gaussian và tăng 2,3 lần so với thuật toán Poisson.

3.2.3 Kịch bản đa vùng - tiêu chí số nút còn sống

Trong kịch bản 1, Hình 3.6 minh họa số lượng các nút kết nối cho cả 100 và 200 nút trong khu vực được chỉ định, bao gồm các tỷ lệ khác nhau của các nút ngầm. Trong trường hợp của FCM và FCM-WUSN, thuật toán phân cụm và xác

suất ngẫu nhiên yêu cầu thực hiện quá trình này 10 lần. Kết quả cuối cùng được tính bằng cách lấy trung bình các kết quả từ 10 lần lặp này, tạo ra một giá trị thập phân đại diện cho số lượng nút. Thuật toán Multi-Graphs WUSN hoạt động trên một khung đa bước, với bảng định tuyến được xây dựng một phần dựa trên khoảng cách. Vì phân phối dữ liệu ban đầu là tĩnh, số lần chạy trong bối cảnh này được đặt thành một.

Làm rõ về số lượng nút ngầm hiển thị trong Hình 3.6 cho thuật toán đề xuất cho phép WUSN tham gia vào việc truyền tải tin nhắn trong các vòng đầu tiên thông qua việc triển khai giao tiếp đa bước, trái ngược với FCM-WUSN, sử dụng thuật toán phân cụm ngẫu nhiên. Do đó, các nút không gần với đầu cụm sẽ mất kết nối ngay từ đầu. Ngược lại, giao tiếp nhiều bước cho phép xác định các nút lân cận để chuyển tiếp tin nhắn.



Hình 3.7: Tổng số nút không kết nối dưới dạng đồ thị và tổng số nút còn sống trên bảng với các vị trí BS khác nhau trong 2 và 4 khu vực.

Phân tích các số liệu cho thấy thuật toán đề xuất cho thấy sự cải thiện về độ phủ cho số lượng nút kết nối khi tính đến yếu tố ngầm. Trong một kịch bản với 100 nút hoạt động ở mức 10%, các vòng đầu tiên cho thấy tất cả 10 nút đều thiết lập kết nối với trạm gốc. Điều này dẫn đến độ chính xác cao hơn của dữ liệu

thu thập được và số vòng hoạt động tăng lên. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng số lượng nút còn lại giảm đi 2 nút so với tình huống mà 30% các nút nằm dưới mặt đất. Tăng số lượng nút trong kịch bản, với tỷ lệ nút ngầm từ 10% đến 30%, cho thấy rằng thuật toán đề xuất thể hiện hiệu suất cải thiện liên quan đến các nút ngầm còn lại. Sự cải thiện này được cho là do sự phân phối đồng đều của việc truyền dữ liệu đến trạm BS, điều này giảm thiểu nguy cơ tập trung quá mức vào nút CH, như đã quan sát thấy trong vấn đề FCM-WUSN. Do đó, điều này dẫn đến sự gia tăng số lượng các nút ngầm còn lại.

		100 nodes			200 nodes		
		10%UN	20%UN	30%UN	10%UN	20%UN	30%UN
2 vùng	Multi-Graphs WUSN	15	17	23	19	25	16
	PEGASIS	9	12	19	15	21	13
4 vùng	Multi-Graphs WUSN	19	16	25	32	22	19
	PEGASIS	12	21	22	23	19	15

Bảng 3.10: Kết quả của tổng số nút còn sống sau khi chạy 6 bộ dữ liệu giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.

Với các đồ thị đa vùng WUSN được phân phối đều với BS ở trung tâm, thuật toán đề xuất vượt trội hơn thuật toán PEGASIS về số lượng nút sống sót tổng thể và nút ngầm dưới tất cả các điều kiện tích cực. 100 nút ở 2 vị trí tốt hơn 1.6 lần; tuy nhiên, 30% dưới lòng đất làm giảm tỷ lệ này xuống còn 1.2. Ngay cả với 4 khu vực và 200 nút mỗi khu vực, số lượng nút sống sót vẫn nhiều hơn 1.4 lần so với PEGASIS. Kết quả được trình bày chi tiết trong Bảng 3.10.

Trong một tập dữ liệu phân phối đồng đều, việc thay đổi vị trí của BS sẽ dẫn đến sự thay đổi trong số lượng nút sống sót. Đặt BS ở vị trí phía bắc hoặc phía đông dẫn đến sự gia tăng số lượng nút cảm biến sống sót lần lượt là 2.4 và 1.8 lần, khi sử dụng thuật toán đề xuất so với thuật toán PEGASIS trong hai khu vực quan sát. Khi số lượng khu vực quan sát được tăng lên bốn, tỷ lệ cao hơn sẽ lần lượt là 1.7 và 2.6 lần so với số lượng nút còn lại sau khi thực hiện thuật toán PEGASIS. Khi đặt BS ở phía tây hoặc phía nam, số lượng nút sống sót giảm so với thuật toán PEGASIS. Trong khu vực phía Tây, trên hai khu vực quan sát, có ít hơn một nút sống. Trong khu vực phía nam, có sự thiếu hụt chín nút khi so sánh với các kết quả do thuật toán PEGASIS tạo ra. Các kết quả vẫn nhất quán

với sự gia tăng số lượng khu vực quan sát, và kết quả chi tiết có sẵn trong Hình 3.7.

Hình 3.8: Tổng số nút còn sống và số nút còn sống dưới lòng đất cho 2 và 4 khu vực với các phân phối khác nhau.

Khi tập dữ liệu trải qua sự thay đổi trong phân phối, chuyển sang phân phối Gamma, Gaussian hoặc Poisson, số lượng nút sống sót sau khi thực hiện hai thuật toán sẽ thay đổi. Các kết quả so sánh chi tiết được mô tả trong Hình 3.8. Dữ liệu có hai khu vực, và các phân phối Gamma và Gaussian cho thấy số lượng nút hoạt động nhiều hơn so với PEGASIS + HLEACH, cụ thể là bốn nút cho phân phối Gaussian. Tuy nhiên, dưới phân phối Poisson, PEGASIS + HLEACH sở hữu hai nút bổ sung với năng lượng so với Multi-Graphs WUSN. Tuy nhiên, khi số lượng vùng tăng lên, trong bối cảnh Poisson, số lượng nút còn lại sau khi sử dụng đa đồ thị WUSN vượt quá số lượng nút của PEGASIS + HLEACH hơn năm lần. Gamma sẽ vượt quá 2,1 lần so với PEGASIS + HLEACH.

3.2.4 Kích bản đa vùng - tiêu chí năng lượng tiêu thụ

	100 nút			200 nút		
	10%UN	20%UN	30%UN	10%UN	20%UN	30%UN
FCM	950.017(J)	950.018(J)	950.01(J)	1900.022(J)	1900.019(J)	1900.01(J)
FCM-WUSN	953.214(J)	958.41(J)	958.41(J)	1905.6(J)	1912.022(J)	1886.1(J)
Multi-Graphs WUSN	1353(J)	1278.06(J)	934.05(J)	2573.49(J)	2542.05(J)	2491.3(J)

Bảng 3.11: Kết quả tiêu thụ năng lượng trong 1 khu vực giữa FCM, FCM-WUSN và Multi-Graphs WUSN.

Trong kịch bản 1, tổng mức tiêu thụ năng lượng mạng cho thuật toán Multi-Graphs WUSN cao hơn so với thuật toán FCM và FCM-WUSN, như được trình bày trong Bảng 3.11. Mức tiêu thụ năng lượng của thuật toán đề xuất cao hơn 399.786 J so với thuật toán FCM-WUSN khi hoạt động với 100 nút và 10% nút ngầm. Tuy nhiên, khi số lượng các nút ngầm cần giám sát tăng lên, mức tiêu thụ năng lượng giảm đi 24,36 Joules so với FCM-WUSN. Khi tập dữ liệu mở rộng để bao gồm 200 quan sát trên tất cả các nút, mức tiêu thụ năng lượng liên quan đến Multi-Graphs WUSN có xu hướng vượt quá mức tiêu thụ của FCM-WUSN. Kết quả phân tích cho thấy rằng mức tiêu thụ năng lượng có mối quan hệ nghịch với

số lượng nút kết nối trong mạng, trong khi lại có mối quan hệ trực tiếp với tuổi thọ của mạng cảm biến. Kết quả của thuật toán đề xuất, kết hợp với các thuật toán FCM và FCM-WUSN, minh họa rõ ràng điều này trong kịch bản 1.

	2 vùng				4 vùng			
	Bắc	Tây	Đông	Nam	Bắc	Tây	Đông	Nam
Multi-Graphs WUSN	1498.1(J)	594.8 (J)	1944.2(J)	642.2(J)	4646.2 (J)	1620.43(J)	5400.4(J)	2701.5(J)
PEGASIS	1296.4(J)	1198.7 (J)	1441.8(J)	983.5(J)	3016.7 (J)	3257.02 (J)	38467.3 (J)	2598.232 (J)

Bảng 3.12: Kết quả tiêu thụ năng lượng khi đặt các bộ dữ liệu vị trí BS khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS.

Các kịch bản trong đó phân phối dữ liệu và vị trí của trạm BS và năng lượng bị thay đổi. Bảng 3.12 minh họa mức tiêu thụ năng lượng liên quan đến việc thay đổi vị trí của trạm gốc và tăng số lượng khu vực. Phương pháp đa đồ thị WUSN cho thấy hiệu quả năng lượng cao hơn so với PEGASIS, đặc biệt trong các kịch bản liên quan đến hai khu vực quan sát. Khi số lượng khu vực tăng lên, cả hai thuật toán đều cho thấy mức tiêu thụ năng lượng cao hơn; tuy nhiên, thuật toán được đề xuất cho thấy mức tăng ít hơn, cho thấy khả năng mở rộng vượt trội. Ví dụ, Multi-Graphs WUSN ở BS phía bắc đã tăng từ 1488,1 J lên 4664,2 J, trong khi ở khu vực phía tây, nó tăng từ 594,8 J lên 1620,4 J. Tổng mức tiêu thụ năng lượng trong mạng PEGASIS đã tăng từ 1296,4 J lên 3016,7 J ở phía bắc và từ 1187,4 J lên 3257,02 J ở phía tây.

	2 vùng				4 vùng			
	Gamma	Gaussian	Poisson	Center	Gamma	Gaussian	Poisson	Center
Multi-Graphs WUSN	1870.4(J)	1563.37(J)	547.43(J)	2556.12(J)	2060.3(J)	4865.4(J)	1983.69(J)	5878.2(J)
PEGASIS+HLEACH	1896.27(J)	1698.125(J)	1435.63(J)	2748.43(J)	2956.236(J)	3897.16(J)	2012.6(J)	5610.8(J)

Bảng 3.13: Kết quả tiêu thụ năng lượng với phân phối khác nhau giữa Multi-Graphs WUSN và PEGASIS+HLEACH.

Trong các kịch bản mà phân phối dữ liệu chuyển sang Gamma, Gaussian và Poisson, phương pháp WUSN đa đồ thị cho thấy hiệu quả năng lượng cao hơn khi sử dụng PEGASIS và HLEACH, đặc biệt là trong các phân phối không đồng đều nhất (Gamma, Poisson) và với khu vực quan sát mở rộng. Phân phối Gamma cho thấy sự khác biệt 30,32% với bốn khu vực quan sát và 1,36% với hai khu vực quan sát. Thuật toán PEGASIS + HLEACH cho thấy sự gia tăng hiệu quả 24,81% đặc biệt trong phân phối Gaussian với bốn khu vực quan sát. Lợi thế của Multi Graph WUSN với hai khu vực là nó luôn thể hiện mức tiêu thụ năng lượng thấp hơn trên

Bảng 3.14: Phân tích ANOVA cho các nút ngầm còn sống

ANOVA Nguồn của các biến	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Thuật toán	326.61	5	65.322	34.1	0.0007214	5.05
Dữ liệu	30.083	1	30.083	15.706	0.0107091	6.608
Lỗi	9.576	5	1.915			
Tổng cộng	366.27	11				

tất cả các phân phối. Phân phối Poisson cho thấy sự khác biệt lên đến 61,87%, cho thấy hiệu quả được cải thiện. Nhược điểm của Multi-Graphs WUSN là mức tiêu thụ năng lượng cao hơn so với PEGASIS + HLEACH trong hai kịch bản phân phối Gaussian (4 khu vực), cho thấy sự giảm hiệu suất 24.81%. Điều này cho thấy rằng Multi Graph-WUSN gặp phải các ràng buộc về hiệu suất khi mạng cảm biến mở rộng và các cảm biến được đặt gần với phân phối chuẩn.

3.2.5 Kiểm định thống kê kết quả

Luận án cũng đã thực hiện phân tích phương sai hai chiều (ANOVA) (bao gồm các tập dữ liệu và thuật toán) để xác định xem có bất kỳ sự tương tác nào giữa các nút sống ngầm của mạng FCM-WUSN và tuổi thọ mạng hay không bằng cách xem xét mạng. Hơn nữa, các kết quả số của các thuật toán được phân tích bằng phương pháp ANOVA hai chiều với sự lặp lại. Mục tiêu của việc đánh giá với mô hình mà luận án đề xuất là để chứng minh điểm chính: Mục tiêu của việc đánh giá với mô hình đề xuất của luận án là 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." *"Số lượng 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":*.

- H_0 : Số lượng các nút cảm biến sống dưới mặt đất phụ thuộc vào bất kỳ sự thay đổi nào của giá trị đầu vào, chẳng hạn như tăng số lượng cảm biến và thay đổi tỷ lệ giữa các nút trên mặt đất và các nút dưới mặt đất.
- H_1 : Số lượng các nút cảm biến sống dưới mặt đất không phụ thuộc vào bất kỳ sự thay đổi nào của giá trị đầu vào, chẳng hạn như tăng số lượng cảm biến và thay đổi tỷ lệ giữa các nút trên mặt đất và các nút dưới mặt đất

Kết quả phân tích về số lượng các nút cảm biến sống dưới mặt đất được

Bảng 3.15: Phân tích ANOVA cho tuổi thọ mạng

ANOVA Nguồn của các biến	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Thuật toán	10857197.4	5	2171439.5	8.2906	0.0018	5.05
Bộ dữ liệu	60412968.7	1	60412968.7	230.65	2.2E-05	6.608
Lỗi	1309576.75	5	261915.35			
Tổng cộng	72579742.9	11				

trình bày trong Bảng 3.14. Kết quả của các giá trị P trong cả hai thuật toán và bộ dữ liệu lần lượt là 0.01071 và 0.0007. Các giá trị P của các hàng và cột cũng đều nhỏ hơn 0.05. Do đó, giả thuyết H_1 của hai giả thuyết liên quan đến số lượng các nút cảm biến sống dưới mặt đất bị bác bỏ. Điều này có nghĩa là số lượng các nút cảm biến sống dưới mặt đất hoàn toàn phụ thuộc vào phương pháp và bộ dữ liệu sử dụng. Các tiêu chí khác của ANOVA được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của thời gian sống của mạng giữa FCM và FCM-WUSN. Kết quả được thể hiện trong Bảng 3.15. Giá trị P của các thuật toán và bộ dữ liệu cũng nhỏ hơn 0.05. Điều này có nghĩa là thời gian sống của mạng phụ thuộc vào thuật toán vận hành và có thể thay đổi kết quả dựa trên các bộ dữ liệu khác nhau.

Một phân tích phương sai hai chiều đã được thực hiện để điều tra sự biến thiên của thực nghiệm bằng cách xem xét số lượng nút ngầm sống và số chu kỳ hoạt động như là tuổi thọ của mạng. Các kết quả số của các phương pháp được phân tích bằng ANOVA hai chiều có 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 luận án công nhận các cột sau đây là các phương pháp:

- H_0 : Số lượng nút sống dưới lòng đất phụ thuộc vào bất kỳ phương pháp nào như FCM hoặc FCM-WUSN.
- H_1 : Số lượng nút sống dưới lòng đất 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 như các tập dữ liệu khác nhau:

- H_0 : Số lượng nút sống dưới lòng đất 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 dưới lòng đất.

- H_1 : Số lượng nút sống dưới lòng đất không thay đổi theo bất kỳ sự 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 dưới lòng đất.

3.3 Kết luận chương

Kết quả thực nghiệm cho thấy thuật toán đề xuất trong mô hình mạng cảm biến không dây ngầm vượt trội hơn hẳn so với các thuật toán cũ như FCM, LEACH, và PEGASIS về các yếu tố quan trọng như thời gian sống của mạng, số lượng nút còn sống tổng thể cũng như các nút ngầm và năng lượng tiêu thụ.

Độ chính xác: Thuật toán đề xuất cho thấy độ chính xác cao hơn đáng kể trong việc phân phối và nhận tín hiệu từ các cảm biến, nhờ vào cơ chế tối ưu hóa và cải thiện trong việc phân phối các nút cảm biến trong không gian mạng. Các thực nghiệm thực tế cho thấy hệ thống có khả năng xử lý và phân tích dữ liệu chính xác hơn, đặc biệt là trong các môi trường ngầm nơi tín hiệu có thể bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố ngoại cảnh.

Thời gian sống của mạng: So với FCM và LEACH, thuật toán đề xuất kéo dài thời gian sống của mạng cảm biến một cách rõ rệt. Nhờ vào việc tối ưu hóa việc phân phối các cảm biến và giảm thiểu sự giao tiếp giữa các nút cảm biến, thời gian sống của các cảm biến trong mạng được nâng cao, giảm thiểu tình trạng tiêu thụ năng lượng quá mức. Điều này đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng mạng cảm biến ngầm, nơi các cảm biến thường khó tiếp cận và thay thế.

Năng lượng tiêu thụ: Một trong những điểm mạnh của thuật toán đề xuất là việc giảm thiểu đáng kể năng lượng tiêu thụ so với các thuật toán cũ như FCM và LEACH. Các phép thử cho thấy thuật toán này giúp tối ưu hóa việc truyền tải dữ liệu và phân phối thông tin giữa các nút cảm biến, từ đó giảm bớt việc sử dụng năng lượng của mạng mà vẫn đảm bảo hiệu quả hoạt động của hệ thống. Điều này đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự ổn định của mạng cảm biến trong thời gian dài mà không cần phải thay đổi nguồn năng lượng liên tục.

Tóm lại, thuật toán đề xuất không chỉ cải thiện độ chính xác, thời gian sống và năng lượng tiêu thụ mà còn tạo ra một nền tảng vững chắc cho các ứng dụng mạng cảm biến không dây ngầm, khắc phục được các hạn chế của các thuật toán cũ như FCM và LEACH. Các kết quả thực nghiệm đã chỉ ra rằng mô hình này là một giải pháp tối ưu và có thể áp dụng rộng rãi trong các môi trường ngầm hoặc các mạng cảm biến yêu cầu sự hiệu quả cao trong việc sử dụng tài nguyên hạn chế.

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 WUSN, giải quyết cả cấu hình đơn và đa khu vực:

- **Thứ nhất**, mô hình định tuyến mới trong mạng WSN 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 đô 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 vòng quan sát lên gấp đôi từ 2 thành 4. Nếu 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).

- 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 thực nghiệm là dữ liệu tự sinh. Thực 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 bằng 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.
- Trong mô hình FCM-WUSN, luận án hiện tại sử dụng mô hình Friis điều chỉnh để tính toán độ suy hao tín hiệu dưới đất. Tuy nhiên, nếu các đặc tính của môi trường đất thay đổi liên tục (như độ ẩm, mật độ), thì tính chính xác của mô hình này có thể bị ảnh hưởng. Hướng phát triển trong tương lai của luận án sẽ mở rộng trong việc điều chỉnh mô hình suy hao để phản ánh sự biến động của các đặc tính đất, từ đó nâng cao độ chính xác trong việc tính toán năng lượng và tối ưu hóa định tuyến.
- 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.
- Nghiên cứu bài toán tối ưu đa mục tiêu, kết hợp năng lượng với độ trễ và độ tin cậy.
- Triển khai và tích hợp nghiên cứu đề xuất vào các hệ thống WUSN thực tế 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.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA LUẬN ÁN

1. Công trình đã công bố

- [CT1] “Computing Infrastructure Of IoT Application In Smart Agriculture: A Systematical Review”. *2021 6th International Conference on Innovative Technology in Intelligent System and Industrial Applications (CITISIA)*, DOI: 10.1109/CITISIA53721.2021.9719974. **SCOPUS**
- [CT2] ”An energy efficient routing algorithm in wireless underground sensor networks”. *Journal Wireless Networks - Springer*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11276-024-03666-9>. **SCIE Q2 IF=2.1**
- [CT3] Enhancing Energy and Coverage Efficiency of Underground Wireless Sensor Network Using Relay Node in Smart Agriculture. *Industrial Networks and Intelligent Systems INISCOM 2024 vol 595 Springer Cham*. **SCOPUS**
- [CT4] Giải pháp mới nhằm xác định số lượng và vị trí tối ưu nút chuyển tiếp trong mạng cảm biến không dây ngầm ứng dụng trong nông nghiệp thông minh ”Kỷ yếu Hội nghị Khoa học công nghệ Quốc gia lần thứ XVII về Nghiên cứu cơ bản và ứng dụng Công nghệ thông tin (FAIR)”, 289-296

2. Công trình đang review

- [CT5] “Optimizing Energy With Multi-Graphs Wireless Underground Sensor Network in Smart Agriculture”-*Computer Networks*.**SCIE Q1, IF= 8.2**

Tài liệu tham khảo

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] N. Zhang, M. Wang, and N. Wang, “Precision agriculture—a worldwide overview.,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 36, pp. 113–132, 2002.
- [4] C. Pham, “Pathloss modelling and evaluation for a wireless underground soil moisture sensor network,” in *Intelligent Systems and Networks* (T. D. L. Nguyen, E. Verdú, A. N. Le, and M. Ganzha, eds.), (Singapore), pp. 335–345, Springer Nature Singapore, 2023.
- [5] S. Wu, A. C. M. Austin, A. Ivoghlian, A. Bisht, and K. I.-K. Wang, “Long range wide area network for agricultural wireless underground sensor networks,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, p. 4903–4919, 2020.
- [6] L. Holtorf, I. Titov, F. Daschner, and M. Gerken, “Uav-based wireless data collection from underground sensor nodes for precision agriculture,” *AgriEngineering*, vol. 5, no. 1, pp. 338–354, 2023.
- [7] H. Panda, M. Das, and B. Sahu, “A generalized mixed path loss (mpl) model for wireless underground sensor networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 129, p. 4903–4919, March 2023.
- [8] K. Radhakrishnan, D. Ramakrishnan, O. I. Khalaf, M. Uddin, C.-L. Chen, and C.-M. Wu, “A novel deep learning-based cooperative communication channel

- model for wireless underground sensor networks,” *Sensors*, vol. 22, p. 4475, 2022.
- [9] S. Sheikhpour, A. Mahani, and H. F. Rashvand, *Agricultural Applications of Underground Wireless Sensor Systems: A Technical Review*, ch. 17, pp. 351–379. 2017.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [13] L. Selavo, A. Wood, Q. Cao, T. Sookoor, H. Liu, A. Srinivasan, Y. Wu, W. Kang, J. Stankovic, D. Young, and J. Porter, “Luster: wireless sensor network for environmental research,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '07*, (New York, NY, USA), p. 103–116, Association for Computing Machinery, 2007.
- [14] S. P. Mohanty, S. K. Sahu, S. K. Sahoo, and S. K. Sahoo, “Iot-based smart city monitoring system for water, fire & gas leakage,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2965, p. 030008, 2023.
- [15] X. Xia, Z. Chen, H. Liu, H. Wang, and F. Zeng, “A routing protocol for multisink wireless sensor networks in underground coalmine tunnels,” *Sensors*, vol. 16, no. 12, 2016.
- [16] C. Hartung, R. Han, C. Seielstad, and S. Holbrook, “Firewxnet: a multi-tiered portable wireless system for monitoring weather conditions in wildland fire environments,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, MobiSys '06*, (New York, NY, USA), p. 28–41, Association for Computing Machinery, 2006.
- [17] S. Nilnoree, A. Taparugssanagorn, K. Kaemarungsi, and T. Mizutani, “Enhancing wireless sensor network in structural health monitoring through tcp/ip socket programming-based mimic broadcasting: Experimental validation,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 8, 2024.

- [18] P. Kuila and P. K. Jana, *Clustering and Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks: Energy Efficient Approaches*. CRC Press, 2017.
- [19] A. Wichmann, B. Demirelli Okkalioglu, and T. Korkmaz, “The integration of mobile (tele) robotics and wireless sensor networks: A survey,” *Computer Communications*, vol. 53, pp. 1–12, 2014.
- [20] W. Dargie and C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. Wireless Communications and Mobile Computing, John Wiley & Sons, 2010.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] A. Salam and M. C. Vuran, “Wireless underground channel diversity reception with multiple antennas for internet of underground things,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [26] 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.
- [27] N. Saeed, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, “Towards the internet of underground things: A systematic survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2262–2287, 2019.
- [28] Z. Yang, Y. Cui, B. Li, Y. Liu, and Y. Xu, “Software-defined wide area network (sd-wan): Architecture, advances and opportunities,” in *2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pp. 1–9, 2019.

- [29] H. A. Imran, U. Latif, A. A. Ikram, M. Ehsan, A. J. Ikram, W. A. Khan, and S. Wazir, “Multi-cloud: A comprehensive review,” in *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, pp. 1–5, 2020.
- [30] E. Navarro, “A systematic review of iot solutions for smart farming,” *Sensors*, 2020. N.C.a.A.P.
- [31] G. Peng, S. Wang, Y. Huang, T. Huang, and Y. Liu, “Enabling deterministic tasks with multi-access edge computing in 5g networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 8, pp. 36–42, 2022.
- [32] M. Shamani, H. Gharaee, S. Sadri, and F. Rezaei, “Adaptive energy aware cooperation strategy in heterogeneous multi-domain sensor networks,” *Procedia Computer Science*, vol. 19, pp. 1047–1052, 2013. The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2013), the 3rd International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2013).
- [33] Y. Liu, X. Ma, L. Shu, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, “From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 6, pp. 4322–4334, 2021.
- [34] F. Tonolini and F. Adib, “Networking across boundaries: enabling wireless communication through the water-air interface,” in *Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication, SIGCOMM '18*, (New York, NY, USA), p. 117–131, Association for Computing Machinery, 2018.
- [35] A. Durrezi, M. Durrezi, and L. Barolli, “Heterogeneous multi domain network architecture for military communications,” in *2009 International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, pp. 382–387, 2009.
- [36] Dhanakamakshi and K. Rasadurai, “Iot based smart city monitoring system for water, fire & gas leakage,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2965, p. 030008, 07 2024.
- [37] N. A. Mohd Yussof and H. W. Ho, “Review of water leak detection methods in smart building applications,” *Buildings*, vol. 12, no. 10, 2022.
- [38] P. Pandya, “Chapter e73 - transmission control protocol/internet protocol packet analysis,” in *Computer and Information Security Handbook (Third Edi-*

- tion) (J. R. Vacca, ed.), pp. e205–e218, Boston: Morgan Kaufmann, third edition ed., 2013.
- [39] C. R. S. Lindsey, “Pegasis: Power-efficient gathering in sensor information systems,” in *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, 2002.
- [40] F. Tang, I. You, S. Guo, M. Guo, and Y. Ma, “A chain-cluster based routing algorithm for wireless sensor networks,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, pp. 1–9, 08 2012.
- [41] K.-H. Chen, J.-M. Huang, and C.-C. Hsiao, “Chiron: An energy-efficient chain-based hierarchical routing protocol in wireless sensor networks,” in *2009 Wireless Telecommunications Symposium*, pp. 1–5, 2009.
- [42] N. B. Sangolgi and S. K. A. Zakir, “Energy aware data aggregation technique in wsn,” 2013.
- [43] W. B. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Leach: A low-energy adaptive clustering hierarchy for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-33)*, pp. 1–10, IEEE, 2000.
- [44] A. Razaque, S. Mudigulam, K. Gavini, F. Amsaad, M. Abdulgader, and G. S. Krishna, “H-leach: Hybrid-low energy adaptive clustering hierarchy for wireless sensor networks,” in *2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, pp. 1–4, 2016.
- [45] J. C. Bezdek, “Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms,” *Plenum Press*, vol. 1, pp. 1–224, 1984. ISBN: 0-306-41835-X.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.

- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Z. Sun and I. F. Akyildiz, “Dynamic connectivity in wireless underground sensor networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 4, pp. 1125–1131, 2011.
- [52] P. Maignon, “World - autonomous system number statistics - sorted by number,” 2019. Truy cập ngày 3 tháng 9 năm 2024.
- [53] C. Ma, W. Liang, and M. Zheng, “Set covering-based approximation algorithm for delay constrained relay node placement in wireless sensor networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 59, pp. 1–9, 2015.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] C. Ma, W. Liang, and M. Zheng, “A connectivity-aware approximation algorithm for relay node placement in wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 16, no. 2, pp. 515–528, 2015.
- [57] 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.
- [58] J.-P. Vasseur and R. Zhang, “Mpls inter-autonomous system (as) traffic engineering (te) requirements.” RFC 4216, Nov. 2005.
- [59] 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.

- [60] 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.
- [61] N. R. Roy and P. Chandra, “Energy dissipation model for wireless sensor networks: a survey,” *International Journal of Information Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 1–11, 2019.
- [62] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks,” in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. 1, p. 10, 2000.
- [63] H. Friis, “A note on a simple transmission formula,” *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [64] N. Peplinski, F. Ulaby, and M. Dobson, “Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-ghz range,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, pp. 803–807, 1995.
- [65] International Electrotechnical Commission, “Iec 60027-3:2002 - letter symbols to be used in electrical technology - part 3: Symbols for physical quantities and units,” 2002.
- [66] W. Ward and B. Barrow, “Another view of dimensions and db,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 60, no. 6, pp. 743–743, 1972.
- [67] M. Lustgarten and B. Barrow, “Expressing watts per hertz in decibel units,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 59, no. 11, pp. 1640–1640, 1971.
- [68] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [69] D. P. Williamson and D. B. Shmoys, *The Design of Approximation Algorithms*. Cambridge University Press, 2011.
- [70] D. P. Bertsekas, *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Athena Scientific, 1996.
- [71] G. PHILLIPS and P. TAYLOR, “Chapter 3 - taylor’s polynomial and series,” in *Theory and Applications of Numerical Analysis (Second Edition)* (G. PHILLIPS and P. TAYLOR, eds.), pp. 39–51, London: Academic Press, second edition ed., 1996.

- [72] K. Sha and W. Shi, “Modeling the lifetime of wireless sensor networks,” *Sensor Letters*, vol. 3, pp. 126–135, 06 2005.
- [73] K. Sha, J. Du, and W. Shi, “Wear: a balanced, fault-tolerant, energy-aware routing protocol in wsns,” *Int. J. Sen. Netw.*, vol. 1, p. 156–168, Jan. 2006.
- [74] W. Khan, M. N. MOHAMAD SAAD, and M. Aalsalem, “An overview of evaluation metrics for routing protocols in wireless sensor networks,” vol. 2, pp. 588–593, 06 2012.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] D. Wohwe Sambo and A. Förster, “Wireless underground sensor networks: A comprehensive survey and tutorial,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 56, Oct. 2023.
- [78] A. R. K. Mathi Senthilkumar, “Iotsim-rpl v1.0,” 2025. Truy cập ngày: 17/06/2025.
- [79] F. B. G. F. Ivo Bizon, Zhongju Li, “Indoor received power measurements associated with reference transmitter location using,” 2015. Truy cập ngày: 17/06/2025.
- [80] H. Edogan, “Wireless sensor network project quick overview.” Notebook trên Kaggle, 2025. Truy cập ngày: 17/06/2025.
- [81] R. Cardell-Oliver, C. M. Leopold, and J. Beringer, “Dataset: Lora underground farm sensor network,” in *DATA’19: Proceedings of the 2nd Workshop on Data Acquisition To Analysis*, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2019.
- [82] E. Games, “Bonnmotion ns2 example.” Mã nguồn trong dự án ns-3, 2012. Truy cập: 17/06/2025.
- [83] C. R. Shalizi, “Advanced data analysis from an elementary point of view.” Tài liệu học thuật, Carnegie Mellon University, 2013. Truy cập ngày: 17/06/2025.
- [84] V. AI, “Radial: A deep learning-based framework for autonomous driving,” 2023. Accessed: February 10, 2025.