

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Hoàng Việt Phương

**TỐI ƯU BAO PHỦ ĐỐI TƯỢNG KÉO DÀI THỜI GIAN
SỐNG CỦA MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI – 2025

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Hoàng Việt Phương

**TỐI ƯU BAO PHỦ ĐỐI TƯỢNG KÉO DÀI THỜI GIAN
SÓNG CỦA MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY**

CHUYÊN NGÀNH: HỆ THỐNG THÔNG TIN

MÃ SỐ: 8.48.01.04

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN: PGS. TS. LÊ NHẬT THẮNG

TS. NGUYỄN XUÂN THẮNG

HÀ NỘI – 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong đề án tốt nghiệp là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất cứ công trình nào. Tất cả sự giúp đỡ cho việc thực hiện đề án đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn đều có nguồn gốc rõ ràng.

TÁC GIẢ ĐỀ ÁN

(Ký ghi rõ họ tên)

HOÀNG VIỆT PHƯƠNG

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, em xin cảm ơn Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Khoa Đào tạo Sau đại học, các thầy, cô giáo của Học viện đã tạo điều kiện và trực tiếp giảng dạy, giúp đỡ em hoàn thành chương trình đào tạo Thạc sĩ kỹ thuật.

Em xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới Tiến sĩ Nguyễn Xuân Thắng và Phó Giáo sư, Tiến sĩ Lê Nhật Thăng đã dành nhiều thời gian, tâm huyết hướng dẫn tận tình và đóng góp các ý kiến để em hoàn thiện đề án này.

Cuối cùng, em muốn bày tỏ sự biết ơn đối với gia đình, người thân, bạn bè đã luôn bên cạnh khích lệ, động viên, giúp đỡ em trong suốt thời gian học tập và hoàn thiện luận văn.

Em xin trân trọng cảm ơn.

Hà Nội, ngày tháng năm 2025

Người viết

Hoàng Việt Phương

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

DANH MỤC BẢNG

DANH MỤC HÌNH ẢNH

I. MỞ ĐẦU	1
1. Lý do chọn đề tài.....	1
2. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu	2
3. Mục đích nghiên cứu.....	4
4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	5
5. Phương pháp nghiên cứu.....	5
II. NỘI DUNG.....	6
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY	6
1.1. Tổng quan về mạng cảm biến không dây.....	6
1.2. Vấn đề bao phủ và thời gian sống của mạng cảm biến không dây	19
1.3. Bài toán tối ưu và giải thuật trong nghiên cứu mạng cảm biến không dây.....	23
1.4. Các nghiên cứu liên quan	25
CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ GIẢI THUẬT	31
2.1. Mô hình bao phủ và kết nối của cảm biến	31
2.2. Mô hình bài toán tối đa hóa thời gian sống của mạng	36
2.3. Áp dụng giải thuật heuristic xử lý bài toán	41
2.4. Ứng dụng của bài toán	49
2.5. Độ phức tạp tính toán.....	50
CHƯƠNG 3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ.....	52
3.1. Kịch bản và dữ liệu thử nghiệm.....	52
3.2. Kết quả thử nghiệm.....	56
3.3. Đánh giá giải thuật	61
III. KẾT LUẬN.....	67
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Giải nghĩa	Từ tiếng Anh
WSN	Mạng cảm biến không dây	Wireless sensor network
MWSN	Mạng cảm biến không dây di động	Mobile wireless sensor network
IoT	Internet vạn vật	Internet of thing
MSPRL	Đặt cảm biến tối thiểu với ràng buộc về thời gian sống	Minimum sensor placement with lifetime constraints
MOWOA	Giải thuật tối ưu nhiều mục tiêu dựa trên hành vi săn mồi của cá voi lưng gù	Multi-objective whale optimization algorithm
LSWSN	Mạng cảm biến không dây quy mô lớn	Large-scale wireless sensor networks
LMTCP	Tối đa thời gian sống cho vùng đối tượng	Lifetime maximization for target coverage problem
LEMA	Giải thuật tối ưu vị trí cảm biến để kéo dài thời gian sống của mạng	Lifetime effective movement algorithm
TCAT	Giải thuật kiểm soát cấu trúc mạng trong mạng cảm biến không dây,	
MIP	Mô hình tuyến tính nguyên hỗn hợp	Mixed integer programming
SCIP	Công cụ tối ưu hóa mã nguồn mở	Solving constraint integer programs
IMRL	Tăng thời gian sống nhỏ nhất của các miền	Increasing minimum region lifetime
MSD	Triển khai cảm biến di động	Mobile sensor deployment

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Tóm tắt các nghiên cứu liên quan vấn đề tối ưu thời gian sống của mạng cảm biến trong lĩnh vực bao phủ đối tượng	28
Bảng 2.1. Trình bày tóm tắt các kí hiệu sẽ được sử dụng trong khi mô tả và giải quyết bài toán	37
Bảng 2.2. Ma trận c	46
Bảng 3.1. Kịch bản 1 (Ảnh hưởng của số lượng đối tượng)	53
Bảng 3.2. Kịch bản 2 (Ảnh hưởng của số lượng cảm biến di động)	54
Bảng 3.3. Kịch bản 3 (Ảnh hưởng của số lượng đối tượng)	54
Bảng 3.4. Kịch bản 4 (Ảnh hưởng của số lượng cảm biến di động)	55
Bảng 3.5. Kịch bản 5 (Ảnh hưởng của bán kính cảm biến di động)	55
Bảng 3.6. Môi trường thực nghiệm	55
Bảng 3.7. Trình bày kết quả thực nghiệm của 5 kịch bản trên các bộ dữ liệu	57
Bảng 3.8. So sánh thời gian sống chung mạng nhận được từ LEMA và SCIP	63

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Cấu trúc cơ bản của một mạng cảm biến không dây.....	16
Hình 1.2. Cấu trúc cơ bản của một nút cảm biến không dây	17
Hình 1.3. Ví dụ về yêu cầu K-bao phủ đối tượng (K=2).....	20
Hình 2.1. Các mô hình cảm biến.....	33
Hình 2.2. Mô hình kết nối nhị phân	34
Hình 2.3. Ví dụ tập các vùng giao tối ưu nhỏ nhất.....	42
Hình 2.4. Ví dụ minh họa việc tính khoảng cách ngắn nhất. Vùng giới hạn bởi đường màu xanh là vùng giao tối ưu. Điểm gần nhất với s trên cung $P1P3$ là P4, trên cung $P1P2$ là P1 hoặc P2, trên cung $P2P3$ là P2 hoặc P3	44
Hình 3.1. Biểu đồ thời gian sống của mạng với thử nghiệm LEMA	60
Hình 3.2. Biểu đồ thể hiện tỷ lệ chất lượng lời giải giữa LEMA và SCIP trên 200 lần chạy	62
Hình 3.3. Ảnh hưởng của số lượng đối tượng đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy	64
Hình 3.4. Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy	65
Hình 3.5. Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy	66

I. MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Network - WSN) có kiến trúc gồm hai thành phần chính là một tập các nút cảm biến và một hoặc một số trạm cơ sở. Khi được triển khai tại một vị trí cụ thể, các nút mạng liên tục thu thập dữ liệu trong phạm vi cảm biến, xử lý và truyền thông tin với các nút khác hoặc gửi dữ liệu về trạm cơ sở qua kết nối không dây. Các nút cảm biến có thể di chuyển và tương tác với môi trường vật lý, tạo ra mạng cảm biến không dây di động (Mobile Wireless Sensor Network - MWSN). MWSNs có tính linh hoạt cao hơn so với WSNs tĩnh vì các nút cảm biến có thể được triển khai trong nhiều tình huống khác nhau và dễ dàng thích ứng với sự thay đổi trong cấu trúc liên kết.

Sự phát triển nhanh chóng của các hệ thống nhúng đã cho phép tạo ra các thiết bị nhỏ gọn, có khả năng xử lý độc lập và truyền thông không dây. Nhờ đó, WSN có thể được triển khai ở nhiều loại địa hình và ứng dụng trong các lĩnh vực đa dạng như môi trường, quân sự, y tế, giao thông thông minh, quản lý thị trường bán lẻ, quản lý chuỗi sản xuất, và cảnh báo thiên tai, cháy rừng ... Hiện nay WSN đã trở thành hệ thống xương sống của các ứng dụng IoT.

Tuy nhiên, việc phát triển WSNs cũng gặp không ít những khó khăn do các nút cảm biến có một nguồn năng lượng hạn chế, khả năng hoạt động trong các điều kiện khắc nghiệt của môi trường vẫn còn thấp, hơn nữa một mạng cảm biến có thể lên đến hàng nghìn nút mạng. Yêu cầu đặt ra là phải thiết kế và triển khai WSNs sao cho đảm bảo tiết kiệm chi phí, truyền thông ổn định, khả năng bảo mật, kéo dài thời gian sống của mạng, ... đây chính là những thách thức mà WSNs đang phải đối mặt [1][2].

Kéo dài thời gian sống của mạng từ lâu đã là một trong những thách thức quan trọng nhất trong việc thiết kế WSNs nói chung và MWSNs nói riêng. Về tuổi thọ của mạng, một trong những yếu tố ảnh hưởng đến nó nhiều nhất là hiệu quả sử dụng năng lượng. So với WSN, quản lý năng lượng trong MWSN thậm chí còn có tác động lớn hơn đến thời gian tồn tại của mạng do chuyển động của cảm biến thường tiêu tốn rất

hiệu năng lượng. Bên cạnh đó, khi sử dụng MWSN để giám sát đối tượng, bắt buộc phải đảm bảo vừa giám sát mục tiêu cùng với việc tối ưu hóa vòng đời. Do vậy việc nghiên cứu kéo dài thời gian tồn tại của mạng mà vẫn đảm bảo phạm vi phủ sóng của tất cả các mục tiêu trong khu vực giám sát là một trong những vấn đề quan trọng đối với MWSNs.

Đề án tập trung giải quyết bài toán tối đa thời gian tồn tại của mạng trong khi vẫn đảm bảo bao phủ mục tiêu trong mạng MWSN bằng cách sử dụng các giải thuật heuristic để tối ưu hóa việc triển khai triển khai các nút cảm biến di động của mạng giúp tăng hiệu quả của hoạt động theo dõi thu thập và truyền dữ liệu về trạm cơ sở. Từ đó giúp cải thiện chất lượng dịch vụ của mạng MWSN nói riêng và các ứng dụng IoT nói chung.

2. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Trong các ứng dụng theo dõi giám sát đối tượng sử dụng MWSN, một tập các đối tượng đã biết trước vị trí cần được giám sát (bao phủ) bởi các cảm biến. Thời gian sống của MWSN có thể được coi là tổng thời gian mà tất cả các đối tượng cần giám sát được bao phủ bởi ít nhất một cảm biến. Nếu xuất hiện một đối tượng mà không được nút cảm biến nào giám sát thì coi như MWSN đã chết [3][4]. Trong quá trình hoạt động của MWSN, các nút mạng có thể di động để kéo dài thời gian sống của toàn mạng, ví dụ một nút cảm biến có thể di chuyển để giám sát mục tiêu thay cho nút cảm biến khác đã cạn kiệt năng lượng. Vấn đề bao phủ đối tượng trong MWSN được đặt ra là phải sử dụng bao nhiêu cảm biến và triển khai mạng như thế nào để tất cả các đối tượng đều được giám sát đồng thời tối đa hóa thời gian sống của mạng.

Các tác giả của [5–7] đã chứng minh bài toán bao phủ đối tượng là bài toán NP-Khó và đề xuất các giải thuật khác nhau để giải quyết vấn đề. Trong [5], các tác giả đã đề xuất giải thuật heuristics để tìm số lượng nút cảm biến tối thiểu được triển khai trong một khu vực nhất định, đồng thời đáp ứng các hạn chế về phạm vi phủ sóng và kết nối. Các tác giả của [6][7] đã xem xét vị trí nút để đảm bảo bao phủ các đối tượng và đảm bảo tính chịu lỗi trong WSN có nhiều trạm.

Tương tự như bài toán bao phủ đối tượng, vấn đề tối đa thời gian sống của WSN cũng là bài toán NP-Khó và được nhiều nghiên cứu quan tâm giải quyết. Các tác giả của [8][9] tìm phương án sắp xếp một số lượng cảm biến cho trước để đáp ứng yêu cầu về thời gian sống của WSN. Họ đã chứng minh được tính chất NP-Khó của vấn đề cũng như giới hạn dưới của số lượng cảm biến cần thiết để đáp ứng các yêu cầu về tuổi thọ nhất định. Trong nghiên cứu [10][11], các tác giả nhận thấy các nút cảm biến gần trạm cơ sở có xu hướng ngừng hoạt động nhanh hơn do mức tiêu thụ năng lượng cao hơn, điều này làm giảm thời gian sống của mạng. Các tác giả đã đề xuất một giải thuật lập lịch cho phép mỗi nút cảm biến chọn trạng thái thích hợp (hoạt động hoặc ngủ) để tiết kiệm năng lượng từ đó kéo dài thời gian sống của mạng. Trong nghiên cứu [12], các tác giả xem xét WSNs bao gồm các cảm biến cố định được triển khai ngẫu nhiên trên một khu vực. Các cảm biến đồng nhất về khả năng cảm nhận và giao tiếp. Các tác giả đã tối đa hóa thời gian sống của mạng bằng cách lên lịch thời gian hoạt động của cảm biến trong khi vẫn đảm bảo các yêu cầu về bao phủ cho một tập hợp các mục tiêu.

Có thể thấy vấn đề tối đa thời gian sống và đảm bảo bao phủ đối tượng đã được quan tâm giải quyết. Nhưng các nghiên cứu liên quan thường quan tâm giải quyết từng bài toán riêng lẻ. Bên cạnh đó, yếu tố di động của nút cảm biến trong MWSN chưa được tính tới khi nghiên cứu các bài toán liên quan đến vấn đề này.

Đề án nghiên cứu bài toán triển khai nút cảm biến trong MWSN để đảm bảo các ràng buộc về bao phủ toàn bộ đối tượng (tại mỗi thời điểm tất cả các đối tượng phải được bao phủ bởi ít nhất một nút cảm biến) và tối đa hóa thời gian sống của mạng. Trong đó có xem xét đến khả năng di động của nút mạng trong quá trình hoạt động. Trong bài toán này, một số lượng S cảm biến được triển khai trên miền phẳng để giám sát T đối tượng. Mỗi cảm biến có mức năng lượng ban đầu, bán kính cảm biến, bán kính giao tiếp, bán kính di chuyển, mức năng lượng tiêu thụ giống nhau. Yêu cầu là xác định một tập hợp D gồm các vị trí để mỗi cảm biến di chuyển đến và đặt thời hạn α biểu thị thời gian mỗi cảm biến phải có mặt tại các vị trí được chỉ định

của chúng. Các ràng buộc cần thỏa mãn là bao phủ toàn bộ các đối tượng và tối đa hóa thời gian sống của mạng.

Để giải quyết bài toán NP-Khó đặt ra trong đề án, có hai nhóm phương pháp chính là giải đúng và giải gần đúng. Các phương pháp giải đúng như quay lui, quy hoạch động, nói lỏng ràng buộc Lagrange... đảm bảo tìm ra được lời giải chính xác và chứng minh được sự tối ưu của lời giải với các bộ dữ liệu có kích thước nhất định (thường là nhỏ), với thời gian chạy giới hạn hoặc là chứng minh không tồn tại lời giải. Các phương pháp giải gần đúng heuristic gồm mô phỏng luyện kim, tìm kiếm tabu, giải thuật di truyền ... không đảm bảo tìm được lời giải chính xác mà thường chỉ tìm được lời giải gần đúng (xấp xỉ). Tuy nhiên, thời gian chạy của các giải thuật này thường chấp nhận được với mọi bộ dữ liệu. Do đặc điểm của WSN, các giải thuật heuristic thường được sử dụng để giải quyết các bài toán tối ưu của mạng [13][14].

Từ tổng quan nghiên cứu được trình bày ở trên cho thấy vấn đề triển khai mạng cảm biến đảm bảo yêu cầu về bao phủ và tối đa hóa thời gian sống đã được các nhà nghiên cứu quan tâm và có những đóng góp nhất định về mặt khoa học cũng như ứng dụng trong thực tiễn. Tuy nhiên nếu muốn cùng một lúc giải quyết hai vấn đề này thì vẫn còn nhiều biến thể của các bài toán chưa được quan tâm và giải quyết thỏa đáng. Đề án nghiên cứu ứng dụng giải thuật heuristic để giải quyết bài toán tối đa hóa thời gian sống của mạng MWSN đồng thời đảm bảo yêu cầu về bao phủ đối tượng và có tính đến khả năng di động của nút cảm biến. Các phân tích ở trên cho thấy vấn đề nghiên cứu của đề án là có tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và ứng dụng thực tiễn.

3. Mục đích nghiên cứu

Đề án nghiên cứu, áp dụng các giải thuật heuristic để giải bài toán triển khai MWSN đảm bảo bao phủ đối tượng và tối đa hóa thời gian sống của mạng. Các mục tiêu cụ thể của đề án bao gồm:

- Nghiên cứu bài toán tối ưu bao phủ đối tượng và thời gian sống của MWSN.
- Đề xuất và phát triển mô hình bài toán để giải quyết vấn đề về tối đa thời gian sống và đảm bảo bao phủ đối tượng dựa trên các yêu cầu thực tiễn; ứng dụng trong triển khai MWSN.

- Đề xuất các giải thuật heuristic giải bài toán tối đa thời gian sống và đảm bảo bao phủ đối tượng trong MWSN.
- Triển khai mạng mô phỏng, thử nghiệm và đánh giá hiệu quả của giải thuật đề xuất.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của đề án là bài toán triển khai MWSN với số lượng nút cảm biến cho trước; các nút cảm biến đồng nhất và có thể di động được; đảm bảo các ràng buộc về bao phủ đối tượng và tối đa hóa thời gian sống của mạng.

Đề án nghiên cứu, sử dụng các phương pháp giải gần đúng như các giải thuật heuristic và metaheuristic để giải quyết bài toán nêu trên. Các giải thuật được lập trình và triển khai thử nghiệm trên phần mềm mô phỏng cho phép cấu hình và mô phỏng hoạt động của mạng MWSN. Các giải pháp được đánh giá dựa trên số liệu thu thập được từ quá trình mô phỏng hoạt động của mạng.

5. Phương pháp nghiên cứu

Đề án sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau đây:

- a. Phương pháp tổng quan tài liệu: Thu thập, chọn lọc, phân tích và tổng hợp các tài liệu, công trình nghiên cứu về tối ưu bao phủ đối tượng, tối đa hóa thời gian sống của mạng cảm biến, các phương pháp heuristic để giải bài toán tối ưu tổ hợp ...
- b. Phương pháp thực nghiệm mô phỏng: Thực hiện mô phỏng mạng cảm biến với các kịch bản khác nhau để đánh giá kết quả của các giải thuật đề xuất trong đề án.

II. NỘI DUNG

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY

1.1. Tổng quan về mạng cảm biến không dây

1.1.1. Khái niệm về mạng cảm biến không dây

Mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Network – WSN) là một mạng lưới các nút cảm biến không dây được phân bố trên một khu vực rộng lớn để thu thập và truyền tải dữ liệu từ các cảm biến đến một trung tâm thu thập, phân tích và xử lý dữ liệu. Mỗi nút cảm biến trong WSN có thể được tích hợp nhiều chức năng khác nhau để phù hợp với nhiều yêu cầu bài toán chẳng hạn như cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng, âm thanh, vị trí, chuyển động, áp suất, hướng gió, ... WSN có thể được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau, chẳng hạn như giám sát môi trường, giám sát giao thông, giám sát địa chấn, giám sát sức khỏe, giám sát năng lượng, nhà thông minh, an ninh và quân sự. Tuy nhiên, do hạn chế về năng lượng, băng thông và tài nguyên tính toán, việc thiết kế và triển khai WSN vẫn là một thách thức lớn đối với các nhà khoa học. Tùy thuộc vào yêu cầu của ứng dụng cụ thể, WSN có thể được thiết kế với các kiến trúc khác nhau.

1.1.2. Phân loại mạng cảm biến không dây

Mạng cảm biến không dây (WSN) có thể được tiếp cận từ nhiều góc độ khác nhau, mỗi góc độ làm nổi bật khía cạnh khác nhau về chức năng, kiến trúc và phạm vi ứng dụng của mạng. Việc phân loại WSN giúp hiểu rõ hơn về các đặc điểm, ứng dụng, cấu trúc của mạng, từ đó thiết kế và triển khai hiệu quả hơn.

a. Phân loại dựa trên ứng dụng

Mạng cảm biến không dây được triển khai rộng rãi trong nhiều lĩnh vực ứng dụng khác nhau, với mỗi lĩnh vực đặt ra những yêu cầu và đặc điểm riêng biệt. Trong quân sự, mạng cảm biến không dây chú trọng tính bí mật, khả năng hoạt động mạnh mẽ, truyền dữ liệu thời gian thực và bảo mật an toàn, tiêu biểu như giám sát chiến

trường hay theo dõi mục tiêu. Trong giám sát môi trường, mạng cần có tính ổn định, hoạt động dài hạn và tiêu thụ năng lượng hiệu quả, điển hình là phát hiện cháy rừng, theo dõi chất lượng nước hoặc dự báo thời tiết. Trong chăm sóc sức khỏe và y tế, yêu cầu đặt ra là độ tin cậy cao, độ trễ thấp và khả năng bảo mật thông tin riêng tư, ứng dụng phổ biến bao gồm giám sát bệnh nhân và thiết bị theo dõi sức khỏe. Trong công nghiệp, yếu tố quan trọng là độ chính xác, khả năng xử lý dữ liệu thời gian thực, tích hợp với hệ thống điều khiển công nghiệp, minh họa qua giám sát tình trạng máy móc và kiểm soát quy trình. Ở môi trường nhà thông minh, mạng cảm biến không dây phải thân thiện với người dùng, dễ tương tác và sử dụng năng lượng hiệu quả, như chiếu sáng tự động hoặc điều khiển hệ thống HVAC. Đối với giám sát nông nghiệp, các mạng này cần độ bền cao, chi phí hiệu quả, phù hợp với môi trường ngoài trời, có thể kể đến theo dõi độ ẩm đất, giám sát cây trồng và vật nuôi. Cuối cùng, trong hệ thống giao thông, mạng cảm biến không dây yêu cầu khả năng xử lý dữ liệu theo thời gian thực, tính di động và khả năng mở rộng, điển hình như giám sát giao thông và theo dõi phương tiện nhằm nâng cao hiệu quả vận hành và an toàn.

b. Phân loại dựa trên cấu trúc mạng (Network Topology)

Việc lựa chọn và sắp xếp cấu trúc liên kết (topology) trong mạng cảm biến không dây (WSN) có tác động sâu sắc đến hiệu suất, khả năng mở rộng và độ tin cậy của hệ thống. Một số dạng topo phổ biến có thể được đề cập đến như sau: Topo hình sao, trong đó tất cả các nút cảm biến kết nối trực tiếp về một hub trung tâm hoặc trạm cơ sở, nổi bật với tính đơn giản trong triển khai và quản lý, nhưng hạn chế ở chỗ node trung tâm dễ trở thành điểm lỗi duy nhất và khó mở rộng quy mô. Topo dạng lưới cho phép mỗi node chuyển tiếp dữ liệu, hình thành nhiều đường dẫn dự phòng, từ đó nâng cao độ tin cậy và khả năng chịu lỗi, tuy nhiên điều này làm tăng mức tiêu thụ năng lượng do sự lặp lại truyền tải dữ liệu qua nhiều hop. Topo cây, theo cấu trúc phân cấp cha - con, hỗ trợ hiệu quả trong tổng hợp dữ liệu và mở rộng hệ thống, song lại có nguy cơ gây ra lỗi hoặc nghẽn mạng tại các node cấp cao. Topo cụm, phân chia mạng thành các cụm nhỏ hơn do một đầu cụm quản lý, giúp tiết kiệm năng lượng thông qua giao tiếp cục bộ và mở rộng dễ dàng, nhưng đầu cụm có thể trở thành nút thắt cổ chai

nếu không được lựa chọn và phân bổ hợp lý. Cuối cùng, topo lai (hybrid) kết hợp ưu điểm của nhiều kiểu topo khác nhau, tăng cường hiệu suất và tính linh hoạt, đồng thời cũng gia tăng độ phức tạp trong thiết kế và quản lý. Tùy thuộc vào yêu cầu cụ thể của ứng dụng, việc cân nhắc và lựa chọn loại topo phù hợp sẽ góp phần xây dựng một WSN ổn định, tin cậy và tối ưu về mặt năng lượng.

c. Phân loại dựa trên cách thức triển khai

Phương thức triển khai các nút cảm biến trong mạng cảm biến không dây tác động trực tiếp đến khả năng thích ứng, phạm vi phủ sóng, cũng như hiệu suất hoạt động tổng thể của hệ thống. Có thể kể đến ba phương thức triển khai phổ biến: Thứ nhất, triển khai tĩnh, nơi các nút cảm biến được xác định và đặt cố định ngay từ đầu, cho phép dự đoán chính xác phạm vi phủ sóng và hiệu suất mạng, nhưng hạn chế khả năng thích ứng khi môi trường thay đổi. Thứ hai, triển khai di động, trong đó các nút cảm biến có thể di chuyển để mở rộng phạm vi bao phủ, thích ứng tốt với điều kiện môi trường động, song lại làm tăng độ phức tạp trong quá trình định tuyến và quản lý. Cuối cùng, triển khai sử dụng bồn di động (Mobile Sink) cho phép tích hợp một bộ thu thập dữ liệu di động để thu thập thông tin từ các nút tĩnh, giúp giảm mức tiêu thụ năng lượng và cải thiện khả năng mở rộng, nhưng đòi hỏi phải có chiến lược lập lịch và hoạch định tuyến đường một cách hiệu quả. Tùy theo mục tiêu ứng dụng và điều kiện thực tế, việc lựa chọn phương thức triển khai phù hợp sẽ góp phần quan trọng vào việc nâng cao hiệu quả và độ tin cậy của mạng cảm biến không dây.

d. Phân loại dựa trên mức tiêu thụ năng lượng

Hiệu quả sử dụng năng lượng là một yếu tố đặc biệt quan trọng trong mạng cảm biến không dây do các nút cảm biến thường hoạt động dựa trên nguồn năng lượng hữu hạn như pin. Để giải quyết vấn đề này, nhiều giao thức tiết kiệm năng lượng đã được nghiên cứu và phát triển, chẳng hạn như sử dụng chu kỳ nhiệm vụ (duty-cycling) để giảm thời gian hoạt động không cần thiết, tổng hợp dữ liệu nhằm hạn chế truyền thông thừa, hoặc định tuyến có nhận thức năng lượng để tối ưu hóa đường đi của gói tin. Các giao thức điển hình như LEACH (Low Energy Adaptive

Clustering Hierarchy) và PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) đã chứng tỏ hiệu quả trong việc giảm tiêu thụ năng lượng và kéo dài thời gian hoạt động của mạng. Bên cạnh đó, một hướng tiếp cận khác là sử dụng các node có khả năng thu năng lượng từ môi trường xung quanh (chẳng hạn năng lượng mặt trời, nhiệt độ), góp phần giảm sự phụ thuộc vào pin và kéo dài tuổi thọ mạng. Tuy nhiên, giải pháp này đòi hỏi trang bị phần cứng bổ sung và đối mặt với sự biến thiên về nguồn năng lượng sẵn có, từ đó đặt ra yêu cầu thiết kế linh hoạt trong quản lý năng lượng và vận hành mạng.

e. Phân loại dựa trên cách thức giao tiếp

Cách thức giao tiếp giữa các nút trong mạng cảm biến không dây có ý nghĩa quan trọng đối với hiệu quả vận hành và độ tin cậy của hệ thống. Về cơ bản, có hai phương thức giao tiếp phổ biến: giao tiếp đồng bộ và giao tiếp không đồng bộ. Trong giao tiếp đồng bộ, các nút cảm biến được điều khiển theo một lịch trình chung hoặc chia sẻ một mốc thời gian chuẩn, nhờ đó giảm được độ trễ và cho phép phối hợp truyền dữ liệu một cách nhịp nhàng. Tuy nhiên, việc duy trì sự đồng bộ đòi hỏi cơ chế phức tạp, làm tăng chi phí năng lượng và yêu cầu quản lý thời gian chính xác. Ngược lại, giao tiếp không đồng bộ cho phép các nút hoạt động độc lập mà không phải duy trì cùng một lịch trình, mang lại tính linh hoạt cao hơn và giảm nhu cầu đồng bộ hóa. Dù vậy, cách tiếp cận này có thể đối mặt với hiện tượng va chạm gói tin trong truyền thông, tạo ra sự biến thiên về độ trễ và làm giảm khả năng dự đoán hành vi của hệ thống. Việc lựa chọn phương thức giao tiếp thích hợp phụ thuộc vào mục tiêu ứng dụng, nguồn lực sẵn có và yêu cầu về chất lượng dịch vụ, nhằm tối ưu hóa hiệu suất và nâng cao độ tin cậy của mạng cảm biến không dây.

f. Phân loại dựa trên kỹ thuật định tuyến

Phương thức định tuyến đóng vai trò quan trọng trong việc xác định cách thức dữ liệu được truyền từ các nút cảm biến đến trạm gốc hoặc đích đến trong mạng cảm biến không dây. Có nhiều nhóm giao thức định tuyến khác nhau, mỗi nhóm có ưu điểm và hạn chế riêng. Giao thức định tuyến phải xem tất cả các nút cảm biến như

những thực thể tương đương, không phân cấp, từ đó đơn giản hóa quá trình triển khai nhưng gặp khó khăn về khả năng mở rộng và tiêu hao năng lượng lớn do truyền dữ liệu dự phòng. Giao thức định tuyến phân cấp (dựa trên cụm) chia mạng thành các cụm, mỗi cụm do một đầu cụm chịu trách nhiệm tổng hợp và chuyển tiếp dữ liệu, qua đó cải thiện khả năng mở rộng và hiệu quả năng lượng, tuy nhiên làm tăng độ phức tạp trong việc hình thành cụm và nguy cơ tiêu hao năng lượng cao trên đầu cụm. Giao thức định tuyến dựa trên vị trí sử dụng thông tin định vị (GPS) để xác định đường dẫn truyền dữ liệu một cách hiệu quả, song lại đòi hỏi chi phí phần cứng cao và phụ thuộc vào độ chính xác của thông tin vị trí. Trong khi đó, giao thức định tuyến lấy dữ liệu làm trung tâm tập trung vào loại dữ liệu cần truy xuất thay vì danh tính nút, giúp giảm chi phí truyền thông nhưng có thể phức tạp trong quản lý dữ liệu và hạn chế về khả năng mở rộng. Cuối cùng, giao thức định tuyến trạng thái phân cấp kết hợp giữa phân cấp và duy trì trạng thái mạng, mang lại độ tin cậy cao và khả năng xác định đường dẫn hiệu quả, nhưng đồng thời làm tăng chi phí duy trì thông tin trạng thái và tính phức tạp trong vận hành. Tùy thuộc vào mục tiêu ứng dụng, nguồn lực sẵn có và yêu cầu về hiệu suất, mỗi chiến lược định tuyến có thể được lựa chọn để tối ưu hóa hoạt động của mạng cảm biến không dây.

g. Phân loại dựa trên truyền dữ liệu

Trong phân loại mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Networks - WSN), một tiêu chí quan trọng là phương thức truyền dữ liệu từ các nút cảm biến đến điểm đích (hay trạm cơ sở) và giữa các nút với nhau. Dựa trên tiêu chí này, WSN có thể được chia thành hai loại chính: mạng Single-Hop và mạng Multi-Hop.

Mạng Single-Hop là cấu trúc trong đó mỗi nút cảm biến gửi dữ liệu trực tiếp đến nút trung tâm mà không thông qua bất kỳ nút trung gian nào. Ưu điểm nổi bật của kiến trúc này là độ trễ truyền dữ liệu thấp, quá trình triển khai đơn giản, và hiệu suất cao trong phạm vi hoạt động nhỏ. Tuy nhiên, hạn chế của mạng Single-Hop nằm ở khoảng cách truyền tín hiệu bị giới hạn, dẫn đến việc các nút cảm biến nằm xa trung tâm tiêu tốn nhiều năng lượng hơn. Loại mạng này thường được ứng dụng trong các kịch bản giám sát nội bộ như trong nhà, văn phòng, hoặc các khu vực có quy mô nhỏ.

Ngược lại, **mạng Multi-Hop** lại cho phép dữ liệu truyền qua một chuỗi các nút trung gian trước khi đến đích. Các nút trung gian đóng vai trò như các trạm chuyển tiếp (relay), góp phần giảm bớt lượng tiêu thụ năng lượng của từng nút đơn lẻ, mở rộng phạm vi phủ sóng và nâng cao tính chịu lỗi của hệ thống. Dù vậy, tính phức tạp trong quá trình định tuyến, độ trễ truyền dữ liệu cao hơn, và chi phí tăng thêm là những khó khăn đi kèm. Kiến trúc Multi-Hop thường được áp dụng trong các kịch bản mở rộng như thành phố thông minh, giám sát công nghiệp, hay trong môi trường ngoài trời như theo dõi tình trạng rừng, biển, nơi yêu cầu phạm vi hoạt động rộng và khả năng thích ứng linh hoạt.

h. Phân loại dựa trên bảo mật

Trong lĩnh vực mạng cảm biến không dây, yếu tố bảo mật giữ vai trò then chốt, đặc biệt trong bối cảnh dữ liệu được truyền qua môi trường mở và thường xuyên phải đối diện với nhiều nguy cơ an ninh khác nhau. Việc đảm bảo tính toàn vẹn, bí mật và tính sẵn sàng của dữ liệu đòi hỏi các kỹ thuật, cơ chế và giải pháp bảo mật phù hợp. Dựa trên mức độ và phương thức bảo mật được áp dụng, WSN có thể được phân loại thành các nhóm sau:

WSN an toàn là các mạng cảm biến không dây được thiết kế và triển khai cùng với nhiều biện pháp an ninh, bao gồm mã hóa, xác thực, ngăn chặn nghe lén, phòng chống giả mạo, tấn công từ chối dịch vụ (DDoS) hay xâm nhập trái phép. Ưu điểm chính của mô hình này là tính bảo mật dữ liệu cao, ngăn ngừa truy cập trái phép và tăng cường độ tin cậy. Tuy nhiên, do tính phức tạp và số lượng lớn các cơ chế bảo mật, mô hình này thường tiêu tốn nhiều năng lượng và đòi hỏi chi phí, công sức thiết kế lẫn triển khai.

WSN không an toàn là các mạng cảm biến không áp dụng hoặc áp dụng rất hạn chế các cơ chế bảo mật. Đặc trưng của loại mạng này là thiết kế đơn giản, tiêu tốn ít năng lượng và chi phí thấp. Song, nhược điểm rõ rệt là rủi ro an ninh cao và không đáp ứng được yêu cầu bảo mật về dữ liệu trong các ứng dụng cần mức độ an toàn cao hơn.

WSN với giao thức bảo mật nhẹ được thiết kế nhằm giảm thiểu chi phí năng lượng, độ phức tạp và tài nguyên xử lý, phù hợp với những nút cảm biến hạn chế về năng lượng, dung lượng bộ nhớ và khả năng tính toán. Mặc dù vậy, mô hình này chỉ cung cấp mức độ bảo mật ở mức tương đối thấp, không phù hợp với những ứng dụng đòi hỏi khả năng an ninh nghiêm ngặt.

WSN bảo mật bằng phần cứng hướng tới tích hợp các thành phần bảo mật vật lý như mạch mã hóa chuyên dụng, bộ xử lý bảo mật hay thiết bị xác thực trực tiếp trên node cảm biến. Cách tiếp cận này mang lại mức độ bảo mật cao và đáng tin cậy, nhưng đồng thời làm tăng chi phí, phức tạp trong thiết kế và tiêu thụ năng lượng nhiều hơn.

WSN với bảo vệ dữ liệu phân tán nhấn mạnh việc áp dụng các kỹ thuật bảo mật phân tán, nơi dữ liệu được bảo vệ ngay tại từng nút cảm biến. Giải pháp này giúp giảm sự phụ thuộc vào các điểm tập trung, tăng cường tính mở rộng và linh hoạt. Tuy nhiên, chi phí năng lượng và độ phức tạp trong quản lý, phân phối khóa bảo mật sẽ tăng theo quy mô và yêu cầu ứng dụng.

Cuối cùng, **WSN với hệ thống phát hiện xâm nhập (Intrusion Detection System - IDS)** trang bị khả năng giám sát, nhận diện hành vi bất thường hoặc các cuộc tấn công trên mạng. Nhờ đó, hệ thống có thể kịp thời đưa ra biện pháp phòng vệ, nâng cao độ bảo mật và tự động hóa quá trình bảo vệ mạng. Điểm hạn chế của mô hình này là sự phức tạp trong thiết kế, tiêu hao năng lượng cho quá trình theo dõi liên tục, và hiệu quả phát hiện phụ thuộc nhiều vào giải thuật nhận dạng.

Nhìn chung, phân loại WSN theo khía cạnh bảo mật giúp hình dung rõ nét hơn về các phương pháp, kỹ thuật, cũng như mức độ bảo vệ dữ liệu và mạng, từ đó hỗ trợ việc lựa chọn giải pháp phù hợp với từng yêu cầu, ứng dụng cụ thể và điều kiện triển khai trong thực tế.

i. Phân loại dựa trên môi trường triển khai

Trong quá trình triển khai mạng cảm biến không dây, môi trường hoạt động của hệ thống đóng vai trò quan trọng trong việc định hình cấu trúc mạng, lựa chọn phần cứng, giao thức truyền thông, và chiến lược bảo mật. Tùy thuộc vào vị trí và đặc

thù môi trường, WSN có thể được phân loại theo năm nhóm chính: WSN trong nhà, WSN ngoài trời, WSN dưới nước, WSN trong môi trường khắc nghiệt, và WSN trong không gian.

Thứ nhất, WSN trong nhà là loại mạng được lắp đặt bên trong các công trình xây dựng như nhà ở, văn phòng, trường học, hay cơ sở công nghiệp nhẹ. Chúng thường được sử dụng để giám sát các điều kiện môi trường trong nhà với phạm vi phủ sóng tốt, khả năng quản lý năng lượng hiệu quả và thiết kế linh hoạt. Tuy nhiên, những hạn chế có thể nảy sinh do phạm vi truyền hạn chế, sự phụ thuộc vào các vật cản như tường, đồ đạc, cũng như việc phải hiệu chỉnh và thay đổi cấu hình khi môi trường nội thất thay đổi.

Thứ hai, WSN ngoài trời được triển khai trên diện rộng, ví dụ trong rừng, đồng bằng, vùng biển hay các khu vực hạ tầng công cộng. Ưu điểm nổi bật là khả năng phục vụ nhiều ứng dụng khác nhau, phạm vi hoạt động rộng và tính linh hoạt cao. Dù vậy, khó khăn trong việc bảo trì, ảnh hưởng của thời tiết, cũng như tài nguyên năng lượng hạn chế là những thách thức đáng kể, đòi hỏi giải pháp thiết kế và quản lý phù hợp.

Thứ ba, WSN dưới nước hướng đến các ứng dụng chuyên biệt như giám sát nhiệt độ, áp suất, độ mặn dưới biển hay quản lý cơ sở hạ tầng ngầm dưới nước (đường ống dầu khí, cáp ngầm). Ưu điểm của mô hình này nằm ở khả năng giám sát chính xác, ổn định trong môi trường đặc thù. Tuy nhiên, vấn đề lớn là giao tiếp dưới nước gặp nhiều trở ngại, tài nguyên năng lượng hạn chế, và việc bảo trì, thay thế node cảm biến gặp rất nhiều khó khăn.

Thứ tư, WSN trong môi trường khắc nghiệt là hệ thống được triển khai ở những nơi có điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ cực cao hoặc cực thấp, mức độ bức xạ cao, hoặc môi trường hóa học độc hại. Những mạng này được thiết kế với khả năng chịu đựng cao, mang lại tuổi thọ, độ bền và tính ổn định tốt hơn. Song, nhược điểm đáng kể là chi phí tăng, kích thước và trọng lượng node cảm biến lớn hơn, dẫn đến sự phức tạp trong quá trình thiết kế và triển khai.

Cuối cùng, WSN trong không gian phục vụ các sứ mệnh vũ trụ, được lắp đặt trên vệ tinh, trạm không gian, hoặc thực hiện các nhiệm vụ thám hiểm hành tinh. Đặc trưng của loại mạng này là khả năng thu thập thông tin vượt trội, tự động hóa cao, và chịu đựng được các điều kiện khắc nghiệt trong không gian. Tuy không nêu rõ các nhược điểm trong nhóm này, các thách thức về chi phí, tài nguyên, và độ tin cậy cao đương nhiên luôn cần được xem xét.

Nhìn chung, việc phân loại WSN theo môi trường triển khai không chỉ giúp định hình chiến lược thiết kế, cấu trúc mạng, mà còn hỗ trợ việc lựa chọn phần cứng, giao thức, cùng các biện pháp bảo mật tương ứng. Qua đó, hiệu quả hoạt động, độ bền và tính sẵn sàng của mạng cảm biến không dây được nâng cao, đáp ứng tốt hơn các yêu cầu cụ thể của từng ứng dụng thực tế.

j. Phân loại dựa trên phương thức thu thập dữ liệu

Việc phân loại mạng cảm biến không dây theo phương pháp thu thập dữ liệu là một cách tiếp cận quan trọng, giúp hiểu rõ hơn về quy trình thu thập, xử lý và truyền tải thông tin trong mạng. Dựa trên phương thức và tần suất thu thập dữ liệu, WSN có thể được phân thành nhiều loại hình khác nhau, mỗi loại sở hữu những đặc trưng, ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với các kịch bản ứng dụng cụ thể.

Thứ nhất, thu thập dữ liệu liên tục là phương thức trong đó cảm biến liên tục thu và gửi dữ liệu theo các khoảng thời gian cố định với tần suất cao. Lợi ích quan trọng của phương thức này là đảm bảo tính cập nhật, độ chính xác và khả năng phát hiện những biến thiên nhỏ trong môi trường. Tuy vậy, việc truyền dữ liệu liên tục gây tiêu hao năng lượng lớn, và khi số lượng cảm biến tăng, khả năng tắc nghẽn mạng cũng cao hơn.

Thứ hai, thu thập dữ liệu theo sự kiện chỉ được kích hoạt khi một sự kiện cụ thể xảy ra hoặc khi dữ liệu vượt quá một ngưỡng định sẵn. Cách tiếp cận này cho phép tiết kiệm năng lượng và giảm tải cho mạng, đặc biệt hiệu quả trong các mạng lớn. Mặt khác, hạn chế của phương pháp này nằm ở nguy cơ bỏ sót các sự kiện ngắn hạn và độ tin cậy phụ thuộc vào khả năng phát hiện chính xác sự kiện.

Thứ ba, thu thập dữ liệu theo yêu cầu được tiến hành khi có sự yêu cầu từ người dùng hoặc từ hệ thống trung tâm. Phương thức này đảm bảo tính linh hoạt, cho phép tiết kiệm năng lượng do chỉ thu thập dữ liệu khi cần thiết. Tuy nhiên, thời gian phản hồi có thể bị kéo dài, gây ra độ trễ trong việc thu nhận thông tin, và việc quản lý nhiều yêu cầu cùng lúc có thể làm tăng độ phức tạp của hệ thống.

Thứ tư, thu thập dữ liệu theo mẫu (sampling) là phương thức thu thập dữ liệu không liên tục, định kỳ hoặc ngẫu nhiên. Nhờ đó, lượng dữ liệu truyền và lưu trữ được giảm thiểu, giúp tiết kiệm năng lượng so với thu thập liên tục. Tuy vậy, nhược điểm của phương pháp này là khả năng bỏ lỡ các biến động môi trường diễn ra nhanh chóng, và độ chính xác phụ thuộc vào tần suất cùng phương pháp lấy mẫu.

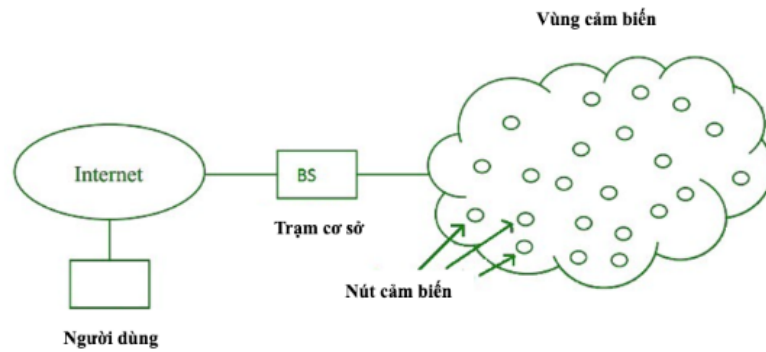
Thứ năm, thu thập dữ liệu kết hợp tổng hợp nhiều phương thức khác nhau, như liên tục, theo sự kiện, theo yêu cầu, nhằm tối ưu hóa hiệu suất và năng lượng. Tuy mô hình này giúp đáp ứng tốt đa dạng yêu cầu ứng dụng, song quá trình thiết kế và quản lý phức tạp hơn, đòi hỏi các giải thuật quản lý dữ liệu thông minh để điều phối các phương thức thu thập.

Cuối cùng, thu thập dữ liệu theo chu trình triển khai các giai đoạn thu thập, xử lý và truyền dữ liệu trong những chu kỳ lặp lại. Phương thức này mang lại một cấu trúc rõ ràng, dễ quản lý và triển khai. Dầu vậy, hạn chế là tính kém linh hoạt khi yêu cầu thay đổi bất ngờ và nguy cơ tiêu thụ năng lượng lớn nếu chu kỳ quá ngắn.

Nhìn chung, phân loại WSN dựa trên phương pháp thu thập dữ liệu không chỉ giúp lựa chọn mô hình phù hợp với từng tình huống ứng dụng, mà còn hỗ trợ định hướng thiết kế, tối ưu hóa năng lượng, và nâng cao hiệu năng của hệ thống mạng cảm biến không dây.

1.1.3. Cấu trúc của mạng cảm biến không dây

Cấu trúc của mạng cảm biến không dây bao gồm nhiều thành phần và lớp khác nhau, mỗi lớp đảm nhiệm các chức năng cụ thể nhằm đảm bảo hoạt động hiệu quả và bền vững của mạng. Hình 1.1 mô tả cấu trúc cơ bản của một WSN.



Hình 1.1. Cấu trúc cơ bản của một mạng cảm biến không dây

1.1.3.1. Cảm biến

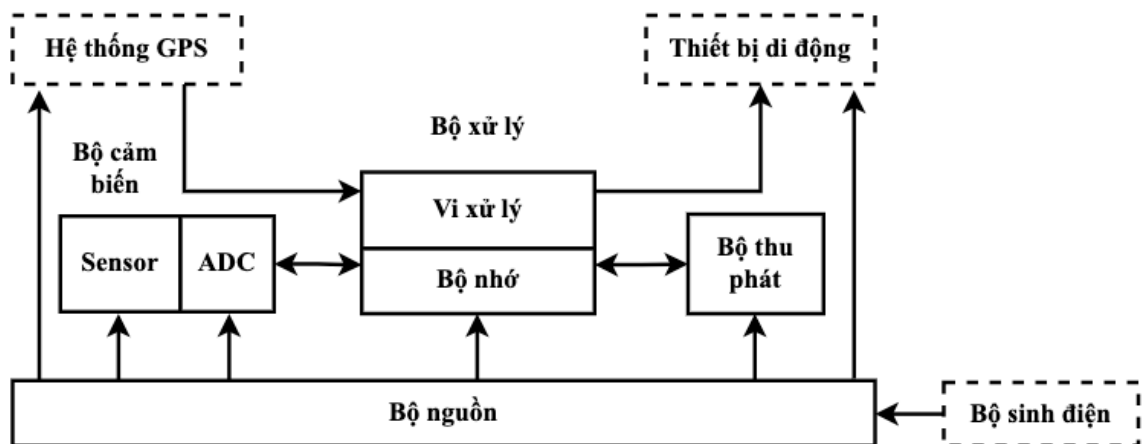
Cảm biến là một phần tử cảm ứng với các hiện tượng vật lý (như nhiệt độ, ánh sáng, âm thanh, áp suất, v.v.) và chuyển đổi chúng thành các tín hiệu thông tin (tín hiệu điện, tín hiệu cơ học, v.v.) có thể xử lý được. Các tín hiệu này thường được số hóa. Cảm biến đóng vai trò như giao diện kết nối giữa thế giới vật chất và hệ thống thiết bị điện, giúp con người giám sát, điều khiển máy móc cũng như môi trường.

Có rất nhiều loại cảm biến. Tùy theo các tiêu chí đánh giá, các nhà nghiên cứu phân chia thành nhiều nhóm khác nhau. Thông thường, cảm biến được phân loại dựa trên dạng tín hiệu vật lý mà chúng thu nhận, chẳng hạn như cảm biến cơ học, cảm biến nhiệt, cảm biến ánh sáng, v.v.

1.1.3.2. Nút cảm biến

Nút cảm biến là thành phần cơ bản trong một mạng cảm biến. Mỗi nút không chỉ sở hữu thành phần cảm biến để thu nhận thông tin từ môi trường vật lý, mà còn tích hợp các bộ phận khác nhằm xử lý và phân phối dữ liệu thu thập được. Trong một số trường hợp đặc biệt, nút cảm biến có thể được bổ sung các thành phần mở rộng, tùy thuộc vào mục tiêu và yêu cầu cụ thể. Chẳng hạn, thành phần di chuyển cho phép nút cảm biến thay đổi vị trí trong không gian, hoặc thành phần thu năng lượng giúp nút nạp năng lượng trực tiếp từ thế giới vật lý, v.v. Hình 1.2 mô tả cấu trúc cơ bản của nút cảm biến không dây

- **Bộ xử lý:** Bộ điều khiển là thành phần cốt lõi của cảm biến, có chức năng xử lý dữ liệu cảm nhận từ thiết bị cảm biến, quyết định vị trí và thời gian gửi dữ liệu, nhận dữ liệu từ các nút cảm biến khác.
- **Bộ nhớ:** Bộ nhớ bao gồm cả ROM và RAM, được bộ vi điều khiển sử dụng để lưu trữ chương trình và dữ liệu cảm nhận.
- **Bộ cảm biến:** Bộ cảm biến có chức năng cảm nhận môi trường vật lý và chuyển thành tín hiệu thông tin. Đây là thành phần chính của một cảm biến.
- **Bộ truyền thông:** Bộ truyền thông được dùng để trao đổi dữ liệu giữa các nút cảm biến với nhau và với trạm cơ sở.
- **Bộ phận năng lượng:** Bộ phận năng lượng bao gồm một hoặc nhiều pin không thể sạc lại. Do đó thời gian sống của một nút cảm biến là hữu hạn và phụ thuộc vào tổng dung lượng của pin. Đây là một thách thức lớn đối với việc triển khai mạng cảm biến không dây.



Hình 1.2. Cấu trúc cơ bản của một nút cảm biến không dây

1.1.4. Ứng dụng của mạng cảm biến không dây

Do hầu hết các hiện tượng vật lý có thể được cảm nhận bởi nhiều loại cảm biến khác nhau, mạng cảm biến không dây được triển khai rộng rãi trong hầu hết mọi lĩnh vực của đời sống. Một số ứng dụng tiêu biểu bao gồm lĩnh vực quân sự, môi trường, công nghiệp và y tế, v.v.

Ứng dụng trong quân sự: mạng cảm biến không dây có thể tích hợp vào các hệ thống điều khiển, truyền thông hoặc tính toán trong quân đội. Chúng dễ dàng được triển khai trên các địa hình hiểm trở, những tuyến đường chiến lược hoặc vùng rừng núi quan trọng. Ứng dụng nổi bật là khả năng phát hiện xâm nhập và theo dõi mục tiêu.

Ứng dụng trong môi trường: mạng cảm biến được sử dụng để giám sát môi trường sống của một quần thể sinh vật, quan sát sự đa dạng sinh học, kiểm tra mức độ ô nhiễm không khí, kiểm soát cháy rừng, phát hiện ô nhiễm, v.v.

Ứng dụng trong công nghiệp: trong lĩnh vực công nghiệp, mạng cảm biến không dây phục vụ nhiều mục đích khác nhau, như trong hệ thống tự động hóa sản xuất, quản lý kho, giám sát nồng độ khí gas trong nhà máy, điều khiển ánh sáng, nhiệt độ, v.v. Tại Việt Nam, một ví dụ điển hình là hệ thống mạng cảm biến lắp đặt tại đập thủy điện Hòa Bình, giúp theo dõi tình trạng thân đập và đưa ra cảnh báo kịp thời khi có sự cố.

Ứng dụng trong y tế: cảm biến vật lý và sinh học có thể theo dõi nhiệt độ cơ thể, nhịp tim, nồng độ oxy và glucose trong máu, v.v. Các cảm biến này có thể gắn trên quần áo hoặc cấy vào cơ thể người, hỗ trợ việc chăm sóc bệnh nhân mắc bệnh mãn tính, bệnh nhân trong bệnh viện cũng như người cao tuổi, giúp việc theo dõi sức khỏe trở nên thuận tiện và hiệu quả hơn.

1.1.5. Vấn đề của mạng cảm biến không dây

Mạng cảm biến hứa hẹn đem lại nhiều lợi ích trong hầu hết các lĩnh vực. Tuy nhiên, chúng vẫn tồn tại nhiều thách thức cần vượt qua. Trong phần tiếp theo, tác giả sẽ đề cập đến một số khó khăn trong mạng cảm biến không dây (WSN) và lý do vì sao các nghiên cứu trong đề tài này được tiến hành.

Mạng quy mô lớn: Trong thực tế, một mạng cảm biến có thể bao gồm hàng ngàn, hàng chục ngàn, thậm chí hàng triệu nút cảm biến. Với những mạng quy mô lớn, khả năng mở rộng là một yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu suất của mạng không bị suy giảm khi số lượng nút tăng lên. Nhiều giải thuật và thiết kế phù hợp với mạng nhỏ không còn hoạt động hiệu quả trong các mạng lớn. Để giải quyết vấn đề này, vô

số giải thuật đã được đề xuất, tuy nhiên, tính mở rộng của mạng vẫn là một thách thức lớn đối với WSNs.

Khả năng chịu lỗi: Do chịu ảnh hưởng đáng kể từ môi trường triển khai, các nút cảm biến rất dễ hư hỏng và khó sửa chữa khi chúng được lắp đặt ở những khu vực con người khó tiếp cận. Tỷ lệ lỗi có thể cao, đặc biệt trong môi trường khắc nghiệt. Để đảm bảo thông tin truyền về không bị gián đoạn hoặc mất mát, các nhà nghiên cứu đã tập trung xây dựng các mô hình chịu lỗi cho WSNs.

Độ chính xác và lưu lượng dữ liệu: Thu thập thông tin là nhiệm vụ chính của mạng cảm biến. Độ chính xác của dữ liệu có thể được cải thiện thông qua quá trình xử lý, nhưng độ phức tạp của việc xử lý lại tỷ lệ nghịch với tuổi thọ mạng (vì năng lượng cảm biến có giới hạn). Do đó, cần cân bằng giữa độ chính xác dữ liệu và nguồn năng lượng sẵn có. Vấn đề lưu lượng dữ liệu cũng được quan tâm: nếu cảm biến liên tục thu thập thông tin, chúng sẽ nhanh chóng tiêu hao năng lượng và có nguy cơ tràn bộ nhớ nếu không xử lý kịp thời. Nhiều phương pháp lập lịch chế độ ngủ cho cảm biến đã được đề xuất để giải quyết vấn đề này, tuy nhiên, đây vẫn là một trở ngại lớn trong việc triển khai mạng.

Vấn đề năng lượng: Như đã đề cập ở trên, mỗi nút cảm biến có nguồn năng lượng giới hạn. Vì vậy, việc sử dụng năng lượng sao cho hiệu quả và hợp lý là rất quan trọng. Nhiều cơ chế đã được tích hợp vào phần cứng để giảm thiểu tiêu thụ năng lượng và tối ưu các mô-đun cơ bản. Tuy nhiên, việc lập lịch hoạt động cho toàn mạng lại đóng vai trò quyết định tuổi thọ của nó. Hiện nay, vấn đề này vẫn đang thu hút sự quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học.

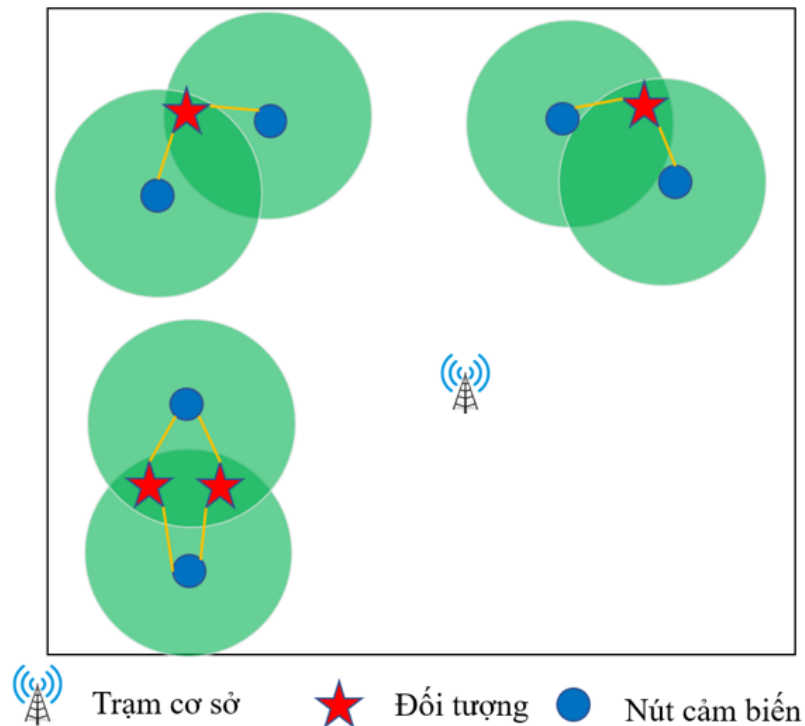
Ngoài ra, vấn đề bao phủ cũng là một trong những thách thức đáng kể trong WSNs và sẽ được trình bày riêng trong phần tiếp theo.

1.2. Vấn đề bao phủ và thời gian sống của mạng cảm biến không dây

1.2.1. Vấn đề bao phủ của mạng cảm biến không dây

Vấn đề bao phủ trong WSN liên quan đến việc xác định số lượng cảm biến và vị trí cần đặt trong một mạng để đảm bảo mọi vùng quan tâm trong mạng đều có thể được giám sát. Vấn đề bao phủ trong WSN được chia thành 3 bài toán: Bao phủ diện

tích, bao phủ đối tượng và bao phủ rào chắn. Trong đề án này tác giả quan tâm giải quyết bài toán tối ưu bao phủ đối tượng. Bao phủ đối tượng được chia thành nhiều cấp độ yêu cầu về bao phủ [28]: 01-bao phủ là mỗi đối tượng được bao phủ bởi ít nhất một cảm biến (mức độ bao phủ đơn giản) [29]; mức độ K-bao phủ yêu cầu phải có ít nhất K cảm biến bao phủ từng đối tượng. Tuy nhiên, một số ứng dụng yêu cầu các mục tiêu khác nhau có mức độ ưu tiên khác nhau của vùng phủ sóng, đặc biệt số lượng nút tối thiểu cần thiết để giám sát từng đối tượng là không giống nhau (như trong K-bao phủ). Yêu cầu này được gọi là mức độ Q-bao phủ [30, 31]. Hình 1.3 là một ví dụ đơn giản về vấn đề K-bao phủ đối tượng trong mạng cảm biến không dây với $K=2$.



Hình 1.3. Ví dụ về yêu cầu K-bao phủ đối tượng ($K=2$)

1.2.2. Thời gian sống của mạng cảm biến không dây

Thuật ngữ “thời gian sống” thường đề cập đến khoảng thời gian mà mạng có thể duy trì hoạt động bình thường và đáp ứng các yêu cầu đặt ra (ví dụ: bao phủ,

truyền dữ liệu, giám sát) trước khi năng lượng của các nút cảm biến cạn kiệt hoặc mạng không còn đáp ứng được tiêu chí nhiệm vụ.

Tầm quan trọng của thời gian sống

Hạn chế năng lượng: mỗi nút cảm biến thường được trang bị một nguồn năng lượng giới hạn (pin, acquy hoặc nguồn năng lượng tái tạo nhỏ). Khi năng lượng cạn, nút sẽ ngừng hoạt động, ảnh hưởng đến khả năng giám sát và truyền dữ liệu.

Độ tin cậy và tính liên tục của nhiệm vụ giám sát: trong nhiều ứng dụng (giám sát môi trường, quốc phòng, nông nghiệp thông minh, y tế), việc duy trì mạng hoạt động lâu dài, ổn định là rất quan trọng. Nếu mạng sớm “chết” hoặc giảm sút chất lượng do thiếu năng lượng, nhiệm vụ sẽ không hoàn thành trọn vẹn.

Yếu tố ảnh hưởng đến thời gian sống

Thời gian sống của một mạng cảm biến không dây chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, trong đó tiêu hao năng lượng đóng vai trò quan trọng. Năng lượng tiêu thụ đến từ quá trình cảm nhận (chuyển đổi tín hiệu vật lý thành dữ liệu), xử lý dữ liệu (nén, lọc, tổng hợp thông tin), và đặc biệt là truyền thông không dây (gửi, nhận, chuyển tiếp dữ liệu). Khoảng cách truyền, tần suất truyền và số lượng nút tham gia chuyển tiếp đều có tác động đáng kể đến mức độ tiêu hao năng lượng. Bên cạnh đó, vị trí triển khai và môi trường hoạt động, nhất là trong điều kiện khắc nghiệt về nhiệt độ, độ ẩm, hay địa hình, có thể làm giảm hiệu suất của cảm biến, pin, cũng như hệ thống giao tiếp. Mật độ nút và bố cục mạng cũng quyết định đáng kể đến thời gian sống: mạng quá thưa có thể gây ra các khu vực không được giám sát, trong khi mật độ quá dày lại làm lãng phí năng lượng do truyền thông và vùng cảm nhận chồng lấn. Một bố cục hợp lý giúp cân bằng giữa độ bao phủ và tiêu hao năng lượng, từ đó tối ưu hóa thời gian sống của mạng cảm biến không dây.

Tiêu chí đánh giá thời gian sống

Thời gian đến khi nút đầu tiên “chết” (First Node Dies): tiêu chí cơ bản nhất, đánh giá khi nào mạng bắt đầu suy giảm tính năng.

Thời gian đến khi một tỷ lệ phần trăm nút “chết” (e.g. 50% nodes die): đánh giá tính chất suy tàn dần của mạng.

Thời gian duy trì được một mức độ bao phủ hoặc kết nối yêu cầu: thay vì đếm số nút chết, ta quan tâm đến việc mạng còn đáp ứng được yêu cầu nhiệm vụ bao lâu.

Các phương pháp và kỹ thuật kéo dài thời gian sống

Việc kéo dài thời gian sống của mạng cảm biến không dây có thể đạt được thông qua nhiều phương pháp và kỹ thuật khác nhau, từ các giải pháp cấp vật lý đến cải tiến ở tầng giao thức, cũng như những chiến lược cân bằng tải và xử lý dữ liệu. Trên phương diện phần cứng và năng lượng, quản lý năng lượng ở lớp vật lý tập trung vào thiết kế các thành phần phần cứng tiết kiệm năng lượng, sử dụng mạch công suất thấp, và thậm chí tích hợp cơ chế thu hồi năng lượng từ môi trường (như năng lượng mặt trời, rung động, nhiệt độ) để bù đắp cho nguồn năng lượng hạn chế của nút cảm biến. Ở góc độ giao thức, các giải pháp định tuyến và truyền thông tiết kiệm năng lượng như các giao thức phân cụm (LEACH, PEGASIS, TEEN...) hoặc định tuyến theo yêu cầu (on-demand) và đa đường không chỉ giúp giảm tải cho một số nút, mà còn hạn chế lượng dữ liệu phải truyền đi xa, từ đó tiết kiệm năng lượng đáng kể.

Song song với đó, lập lịch hoạt động (Duty Cycling) được coi là phương án quan trọng khi chia nhỏ thời gian hoạt động của các nút cảm biến thành những phiên thức-ngủ hợp lý. Điều này cho phép nút chuyển sang chế độ nghỉ khi không cần giám sát liên tục, nhưng vẫn duy trì chất lượng dịch vụ nhờ vào tính toán hài hòa giữa thời gian ngủ và thức. Kết hợp với kỹ thuật xử lý dữ liệu tại chỗ (In-network Processing), các hoạt động lọc, nén, tổng hợp dữ liệu ngay tại nút hoặc nút trung gian làm giảm đáng kể lượng dữ liệu phải truyền, giảm chi phí năng lượng cho quá trình truyền thông. Ngoài ra, cân bằng tải năng lượng (Load Balancing) thông qua việc điều chỉnh vai trò, vị trí hoạt động của các nút, hoặc thay đổi nút đầu cụm theo chu kỳ, giúp phân bổ đều năng lượng tiêu hao, tránh tình trạng một số nút cạn kiệt năng lượng quá sớm.

Tuy nhiên, trong quá trình áp dụng các biện pháp kéo dài thời gian sống, luôn tồn tại những đánh đổi (Trade-offs). Chẳng hạn, tăng thời gian ngủ của nút sẽ tiết kiệm năng lượng nhưng đồng thời làm tăng độ trễ trong việc thu thập dữ liệu. Mặt khác, xử lý dữ liệu nhiều hơn nhằm cải thiện độ chính xác thông tin sẽ tiêu tốn năng

lượng lớn, rút ngắn thời gian sống, trong khi xử lý ít hơn giúp kéo dài tuổi thọ mạng nhưng có thể giảm chất lượng dữ liệu. Việc xác định chiến lược cân bằng giữa các yếu tố này phụ thuộc vào mục tiêu ứng dụng, yêu cầu về chất lượng dịch vụ, cùng điều kiện triển khai thực tế.

1.3. Bài toán tối ưu và giải thuật trong nghiên cứu mạng cảm biến không dây

Do mạng cảm biến không dây (WSN) thường phải đối mặt với nhiều ràng buộc về tài nguyên (năng lượng, băng thông, bộ nhớ), điều kiện môi trường, và yêu cầu chất lượng dịch vụ, việc tìm ra các phương án tối ưu giúp cải thiện hiệu năng, giảm chi phí, kéo dài tuổi thọ mạng và nâng cao chất lượng giám sát.

1.3.1. Bài toán tối ưu

Tối ưu thời gian sống của mạng (Network Lifetime Maximization): đây là bài toán cốt lõi, yêu cầu tìm giải pháp sử dụng năng lượng hiệu quả, cân bằng tải, và lập lịch hoạt động cảm biến một cách hợp lý nhằm kéo dài thời gian sống của mạng.

Tối ưu định tuyến và truyền thông (Routing Optimization): bài toán này tập trung vào tìm đường truyền dữ liệu từ các nút cảm biến đến trạm gốc sao cho tiêu hao ít năng lượng, giảm độ trễ, và tăng độ tin cậy. Nó liên quan chặt chẽ đến việc cân bằng giữa chi phí năng lượng và chất lượng truyền thông.

Tối ưu bao phủ và kết nối (Coverage and Connectivity Optimization): đảm bảo toàn bộ khu vực cần giám sát được cảm biến bao phủ đầy đủ trong khi vẫn duy trì kết nối giữa các nút, nhằm truyền dữ liệu về trạm gốc một cách ổn định.

Lập lịch hoạt động và điều khiển năng lượng (Duty Cycling, Sleep/Wake Scheduling): tìm ra lịch hoạt động (thức/ngủ) cho các nút cảm biến nhằm giảm tiêu hao năng lượng nhưng vẫn duy trì chất lượng dịch vụ (QoS).

Xử lý và tổng hợp dữ liệu (Data Aggregation, Compression): tối ưu các giải thuật nén, lọc, tổng hợp dữ liệu tại chỗ để giảm tải giao tiếp, tiết kiệm năng lượng và băng thông mà không làm mất mát quá nhiều thông tin quan trọng.

Định vị và định danh trong mạng (Localization, Identification): tối ưu vị trí đặt nút, hoặc tối ưu các giải thuật định vị để tăng độ chính xác vị trí nút, giúp cải thiện chất lượng giám sát và chiến lược định tuyến.

1.3.2. Giải thuật heuristic

Trong lĩnh vực nghiên cứu và phát triển mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Networks - WSN), bài toán tối ưu hóa hiệu năng hoạt động, thời gian sống, cũng như khả năng mở rộng và đáp ứng linh hoạt với các điều kiện thay đổi luôn là những yêu cầu then chốt. Tuy nhiên, nhiều vấn đề đặt ra trong WSN có tính chất NP-khó (NP-hard), đòi hỏi thời gian tính toán rất lớn nếu sử dụng các phương pháp giải chính xác (exact methods). Chính vì vậy, các giải thuật heuristic, với khả năng tìm kiếm lời giải gần tối ưu trong khoảng thời gian hợp lý, đã thu hút sự quan tâm đáng kể của cộng đồng nghiên cứu.

Giải thuật heuristic được hiểu là những phương pháp tìm kiếm lời giải dựa trên kinh nghiệm, quy tắc thực nghiệm hoặc các chiến lược sàng lọc không gian nghiệm thông minh, mà không đòi hỏi phải tìm kiếm toàn bộ không gian giải. Mục tiêu chính của chúng không phải là đảm bảo tìm ra nghiệm tối ưu tuyệt đối, mà là đạt được một nghiệm “đủ tốt” với chi phí tính toán chấp nhận được. Trong WSN, heuristic thường được áp dụng vào các bài toán như chọn vị trí đặt nút cảm biến, định tuyến và truyền thông tối ưu, cân bằng tải năng lượng, lịch hoạt động (duty cycling), và phân cụm mạng. Thông qua việc đơn giản hóa cấu trúc vấn đề, giới hạn phạm vi tìm kiếm, hoặc sử dụng thông tin trạng thái cục bộ để đưa ra quyết định, heuristic giúp giảm đáng kể độ phức tạp tính toán, từ đó rút ngắn thời gian đưa ra giải pháp.

Ngoài ra, giải thuật heuristic thường dễ dàng kết hợp với các kỹ thuật tối ưu khác như meta-heuristic (ví dụ: Giải thuật di truyền - Genetic Algorithms, Giải thuật bầy đàn - Particle Swarm Optimization, Giải thuật leo đồi - Hill Climbing) để tiếp tục cải tiến chất lượng nghiệm. Trong nhiều nghiên cứu, việc áp dụng heuristic hay meta-heuristic đã mang lại những kết quả khả quan, cho phép nâng cao hiệu năng mạng, kéo dài thời gian sống của nút cảm biến, cải thiện hiệu quả truyền thông, cũng như tăng khả năng thích ứng với những thay đổi bất ngờ trong môi trường hoạt động.

Tuy nhiên, việc sử dụng heuristic cũng đặt ra một số thách thức. Thứ nhất, chất lượng nghiệm phụ thuộc nhiều vào thiết kế heuristic, cách chọn tham số, và đặc trưng bài toán. Thứ hai, do không đảm bảo tính tối ưu tuyệt đối, các giải thuật này cần được đánh giá, so sánh trên nhiều kịch bản khác nhau, cũng như hiệu chỉnh để phù hợp với từng ứng dụng cụ thể. Dù vậy, trong bối cảnh các bài toán tối ưu trong WSN ngày càng phức tạp và đa dạng, heuristic vẫn được xem là một công cụ hữu ích, linh hoạt, giúp các nhà nghiên cứu và nhà thiết kế hệ thống tiến gần hơn đến việc đáp ứng yêu cầu về hiệu năng, tuổi thọ, và khả năng mở rộng cho các mạng cảm biến không dây hiện đại.

1.4. Các nghiên cứu liên quan

Một số nghiên cứu xem xét phương pháp tối đa hóa thời gian tồn tại của mạng trong các bài toán bao phủ mục tiêu trong MWSN. Các tác giả trong [5–7] đã đưa ra những giải thuật khác nhau để giải quyết bài toán bao phủ mục tiêu. Cụ thể, trong [5], nhóm tác giả đề xuất các giải thuật heuristic nhằm tìm số lượng nút cảm biến tối thiểu cần triển khai trong một khu vực xác định, đồng thời đáp ứng các yêu cầu về phạm vi phủ sóng và kết nối. Bên cạnh đó, mạng vẫn duy trì khả năng chịu lỗi, nghĩa là duy trì kết nối ngay cả khi một nút cảm biến bị hỏng. Trong [6, 7], các tác giả xem xét vị trí đặt nút để đảm bảo vùng phủ sóng mục tiêu và kết nối mạng trong WSN với nhiều trạm, chứng minh bài toán là NP-khó và đề xuất các giải thuật heuristic nhằm đưa ra lời giải xấp xỉ.

Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào vấn đề thời gian sống của mạng trong mạng cảm biến không dây. Trong [8], các tác giả đề cập đến vấn đề đặt cảm biến tối thiểu với giới hạn tuổi thọ (MSPRL), đồng thời chứng minh tính NP-hard của vấn đề cũng như giới hạn dưới của số lượng cảm biến cần thiết để đáp ứng các yêu cầu tuổi thọ nhất định. Liu cùng các cộng sự trong [16] giải quyết bài toán tối thiểu số lượng cảm biến cần triển khai với các hạn chế về thời gian tồn tại của mạng (minimum sensor placement with lifetime constraints - MSPRL). Các tác giả chứng minh bài toán MSPRL là một bài toán NP-khó và tìm ra cận dưới cho số lượng cảm biến để đáp ứng các yêu cầu về tuổi thọ mạng. Các tác giả trong [17] đã đề xuất một giải thuật đàn cá

voi để tối ưu đa mục tiêu (multi-objective whale optimization algorithm - MOWOA) giúp xác định số trạm thu phát tối thiểu để bao phủ toàn mạng. MOWOA xác định vị trí của các trạm thu phát với mục đích chính là giảm tiêu thụ năng lượng, từ đó kéo dài thời gian sống cho các mạng cảm biến không dây quy mô lớn (large-scale wireless sensor networks - LSWSNs). Zhang và cộng sự trong [18] đã phát triển một mô hình toán học cho MWSNs với mục tiêu giảm thiểu năng lượng tiêu thụ của các nút để tăng thời gian hoạt động của mạng. Sau đó, các tác giả áp dụng năm giải thuật tiến hóa để tối đa thời gian sống của mạng.

Trong [9], các tác giả tập trung vào mạng cảm biến không dây và thách thức trong việc đảm bảo vùng phủ sóng mục tiêu trong khi vẫn duy trì hiệu quả năng lượng. Bài báo này đưa ra một phương pháp tính toán phạm vi phủ sóng mục tiêu tối đa trong suốt thời gian sống của mạng thông qua xác định số lượng nút cảm biến tối thiểu cần thiết để bao phủ mục tiêu. Đồng thời, bài báo cũng đề xuất một giải thuật nhằm kéo dài thời gian tồn tại của mạng bằng cách hình thành các tập con nút cảm biến để giám sát toàn bộ các mục tiêu.

Trong [10], Asadollahi và cộng sự giải quyết vấn đề lỗi trống về năng lượng trong mạng cảm biến không dây. Trong mô hình nhiều-một, các nút gần trạm gốc/sink chứa có xu hướng ngừng hoạt động nhanh hơn do mức tiêu thụ năng lượng cao hơn, điều này làm giảm thời gian tồn tại của mạng. Tuy nhiên, các công trình trước đây chưa giải quyết được các vấn đề quan trọng như nhận dạng vùng quan trọng đối với các chiến lược triển khai nút không đồng nhất hoặc cân bằng năng lượng hoàn chỉnh. Bài báo đã đề xuất một phương trình tìm vùng tới hạn trong các mạng nhiều-một và các phương trình để thu được năng lượng ban đầu cần thiết để thời gian tồn tại của mạng được tối đa hóa và vấn đề lỗi năng lượng được giải quyết mà không cần thêm các nút.

Trong [11], Akram và cộng sự đã trình bày giải pháp cho các vấn đề giám sát mục tiêu và năng lượng trong mạng cảm biến không dây thông qua việc sử dụng giải thuật adaptive learning automata algorithm. Giải thuật cho phép mỗi nút cảm biến

chọn trạng thái thích hợp (hoạt động hoặc ngủ) để tiết kiệm năng lượng trong khi bao phủ tất cả các mục tiêu.

Mikitiuk và cộng sự ở [12] đã trình bày một cách tiếp cận khác đối với vấn đề tối đa hóa thời gian sống của mạng cảm biến. Họ xem xét các mạng bao gồm các cảm biến cố định được triển khai ngẫu nhiên trên một khu vực. Các cảm biến đồng nhất về khả năng cảm nhận và giao tiếp. Các tác giả đã tối đa hóa thời gian sử dụng mạng bằng cách lên lịch thời gian hoạt động của cảm biến trong khi vẫn đảm bảo các yêu cầu về phạm vi phủ sóng tối thiểu cho một tập hợp các điểm ưa thích.

Trong MWSNs, quá trình di chuyển của các nút cảm biến di động thường tiêu hao nhiều năng lượng và là nguyên nhân chính khiến các nút cạn kiệt năng lượng nhanh hơn. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về việc vận dụng khả năng di chuyển của các cảm biến để cải thiện phạm vi bao phủ và kết nối trong WSNs, tuy nhiên các nhà nghiên cứu vẫn chưa dành nhiều sự chú ý cho vấn đề tối ưu sự di chuyển của các cảm biến. Do đó, Liao trong [15] đã giải quyết bài toán tối ưu chuyển động của các cảm biến để kéo dài thời gian sống của mạng. Các tác giả đề xuất bài toán triển khai cảm biến di động (mobile sensor deployment-MSD), bài toán tối ưu tổng khoảng cách di chuyển của các cảm biến động khi triển khai sensor trên một miền quan tâm để đảm bảo các ràng buộc về bao phủ và kết nối. MSD được chia thành hai bài toán con: Bao phủ đối tượng (target coverage - TCOV) và đảm bảo kết nối (network connectivity - NCON), trong đó TCOV đã được chứng minh là NP-khó. Để giải quyết bài toán TCOV, các tác giả đề xuất hai giải thuật heuristic, bao gồm: giải thuật cơ bản dựa trên phân vùng và giải thuật TV-Greedy, tạo ra các phân vùng Voronoi của miền quan tâm. Đối với NCON, các tác giả đề xuất giải thuật dựa trên việc tạo Cây Steiner nhỏ nhất với độ dài cạnh bị giới hạn. Các phương pháp metaheuristic khác cũng đã được sử dụng để giải quyết vấn đề tối đa hóa thời gian tồn tại của mạng. Ví dụ, bài toán tối ưu lịch hoạt động dựa trên các giải thuật tiến hóa đã được nghiên cứu trong [19]. Các tác giả trong [20] cũng cố gắng giảm thiểu sự di chuyển của cảm biến khi giải quyết bài toán bao phủ đối tượng. Nghiên cứu xem xét các cảm biến xuất phát từ trạm cơ sở

và có khả năng di chuyển trên miền với mục tiêu tối thiểu tổng khoảng cách di chuyển của các cảm biến đồng thời bao phủ tất cả đối tượng trong miền quan tâm.

Bảng 1.1 trình bày tóm tắt, so sánh và đánh giá điểm mạnh và điểm yếu của các nghiên cứu liên quan được đề cập. Bảng tóm tắt cho thấy các nghiên cứu này vẫn còn một số vấn đề chưa được giải quyết, cụ thể:

- Một số nghiên cứu quan tâm đến việc giải quyết vấn đề bao phủ đối tượng, nhưng chưa giải quyết vấn đề thời gian sống của mạng [5, 7, 22, 23, 25].
- Một số nghiên cứu quan tâm đến việc giải quyết vấn đề bao phủ và kéo dài thời gian sống của mạng, nhưng không hoàn toàn xem xét hết các yếu tố ảnh hưởng đến mức tiêu thụ năng lượng của mạng. Các tác giả chỉ quan tâm đến việc tiêu hao năng lượng trong quá trình di chuyển chứ chưa xét đến năng lượng tiêu hao trong quá trình cảm biến và truyền tin [15, 20, 24]. Trong [18], các tác giả có xem xét đến vấn đề tiêu hao năng lượng trong quá trình truyền tin nhưng không xét đến năng lượng tiêu hao khi di chuyển.

Do đó, đề án này tập trung vào việc nghiên cứu vấn đề kéo dài thời gian sống của mạng cảm biến không dây di động khi xem xét quá trình di chuyển, cảm biến và truyền tin của các cảm biến di động. Cụ thể, đề án giải quyết bài toán tối đa thời gian sống đảm bảo bao phủ đối tượng trong mạng cảm biến không dây di động (lifetime maximization for target coverage problem - LMTCP).

Bảng 1.1. Tóm tắt các nghiên cứu liên quan vấn đề tối ưu thời gian sống của mạng cảm biến trong lĩnh vực bao phủ đối tượng

Nghiên cứu liên quan	Bài toán	Phương pháp	Ưu điểm và nhược điểm
Hạnh trong [22,25] (2016, 2018)	Bao phủ đối tượng trong WSNs	Giải thuật heuristic	Các tác giả giảm thiểu số lượng nút triển khai mạng nhưng không xem xét đến vấn đề thời gian sống của mạng.
Hạnh trong [5]	Bao phủ đối tượng	Giải thuật	Các tác giả tối thiểu số

(2019), Le trong [7] (2019)	tượng trong WSNs với các trạm thu phát di động	heuristic	lượng nút cần triển khai với trạm thu phát di động nhưng chưa xem xét đến thời gian sống của mạng
Wang trong [16] (2019)	Tối đa thời gian sống của mạng	Giải thuật heuristic	Các tác giả giảm thiểu độ trễ khi truyền dữ liệu và cải thiện thời gian sống của mạng
EL Alamitrong [26] (2019)	Tối đa thời gian sống của mạng	Giải thuật lập lịch	Các tác giả giảm thiểu sự dư thừa dữ liệu để cải thiện thời gian sống của mạng
Xiu Zhangtrong [18] (2020)	Tối đa thời gian sống của mạng	Năm giải thuật tiên hóa	Các tác giả đề xuất mô hình toán học để kéo dài thời gian sống của mạng, tuy nhiên năng lượng tiêu hao khi di chuyển chưa được xem xét.
M.M. Ahmed trong [17] (2019)	Tối đa thời gian sống của LSWSNs	Giải thuật tối ưu cá voi đa mục tiêu	Các tác giả giảm thiểu năng lượng tiêu thụ của các nút để kéo dài thời gian sống của mạng
Zhong trong [27] (2019)	Tối đa thời gian sống của WSNs với các trạm thu phát di động	Giải thuật di truyền và giải thuật heuristic	Các tác giả lập lịch di chuyển cho trạm thu phát di động để kéo dài thời gian sống của mạng
Liao trong [15] (2014)	Tối ưu di chuyển của các cảm biến trong bài toán bao phủ và kết	Hai giải thuật heuristic và giải thuật	Các tác giả tối thiểu tổng khoảng cách di chuyển để kéo dài thời gian sống của mạng, nhưng chưa xem xét

	nổi	tìm cây steiner nhỏ nhất	năng lượng tiêu hao khi truyền tin.
Gao trong [20](2017)	Tối ưu di chuyển của các cảm biến trong bài toán bao phủ	Giải thuật xấp xỉ áp dụng giải thuật Shifting	Các tác giả đề xuất phương án tối ưu di chuyển của các cảm biến xuất phát từ các trạm cơ sở để kéo dài thời gian sống của mạng, nhưng chưa xem xét năng lượng tiêu hao khi truyền tin.

CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ GIẢI THUẬT

2.1. Mô hình bao phủ và kết nối của cảm biến

2.1.1. Mô hình bao phủ của cảm biến

Cảm biến chuyển đổi dữ liệu vật lý thành tín hiệu điện, sau đó các tín hiệu này được xử lý để tạo ra thông tin dễ hiểu và có thể sử dụng. Vậy, cảm biến có thể thu nhận tín hiệu từ những vị trí nào? Các nhà nghiên cứu đã định nghĩa vùng mà cảm biến có khả năng thu thập thông tin là vùng bao phủ. Trong [31], Bang Wang đề cập đến 4 mô hình cảm biến thông dụng bao gồm:

- Mô hình quạt nhị phân
- Mô hình đĩa nhị phân
- Mô hình suy giảm
- Mô hình suy giảm rút gọn

Mô hình quạt nhị phân

Đối với mô hình quạt nhị phân, khả năng bao phủ của các cảm biến được giới hạn trong một miền hình quạt theo một hướng cụ thể, với tâm là vị trí đặt cảm biến. Như được minh họa trong Hình 2.1a, mô hình cảm biến này được xác định thông qua ba tham số: ϕ_s (góc quay), ω (góc cảm biến) và R_s (bán kính cảm biến). Biểu diễn toán học của mô hình quạt nhị phân được thể hiện như sau:

$$f(z, \theta_z) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } d(s, z) \leq R_s \text{ và } \theta_s \leq \theta_z \leq \theta_s + \omega \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.1)$$

Trong đó, $d(s, z)$ biểu thị khoảng cách Euclid từ cảm biến s đến điểm z , và ϕ_z đại diện cho tọa độ góc của điểm z . Theo mô hình quạt nhị phân, một điểm được xem là được bao phủ (hàm bao phủ có giá trị 1) khi thỏa mãn hai điều kiện: khoảng cách từ điểm đó đến cảm biến không vượt quá R_s và tọa độ góc của điểm nằm trong phạm vi giới hạn bởi miền hình quạt.

Mô hình đĩa nhị phân

Mô hình này hiện đang được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu. Khi sử dụng mô hình đĩa nhị phân, vùng bao phủ của mỗi cảm biến được thể hiện bằng một hình tròn với trung tâm là vị trí đặt cảm biến s và bán kính tương ứng với bán kính của cảm biến. Khi $d(s, z)$ biểu thị khoảng cách Euclid giữa cảm biến s và điểm z , biểu diễn toán học của mô hình đĩa nhị phân của s tại điểm z được xác định như sau:

$$f(z, \theta_z) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } d(s, z) \leq R_s \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.2)$$

Mô hình suy giảm

Một số nhà nghiên cứu cho rằng, độ cảm biến của một điểm tỉ lệ nghịch với khoảng cách từ nó đến tâm cảm biến. Do đó, họ đã đề xuất mô hình cảm biến suy giảm để phù hợp với thực tế hơn. Với một điểm z bất kì trong không gian 2 chiều, hàm cảm biến f được xác định bởi công thức (2.3):

$$f(z) = \frac{C}{d^\alpha(s, z)} \quad (2.3)$$

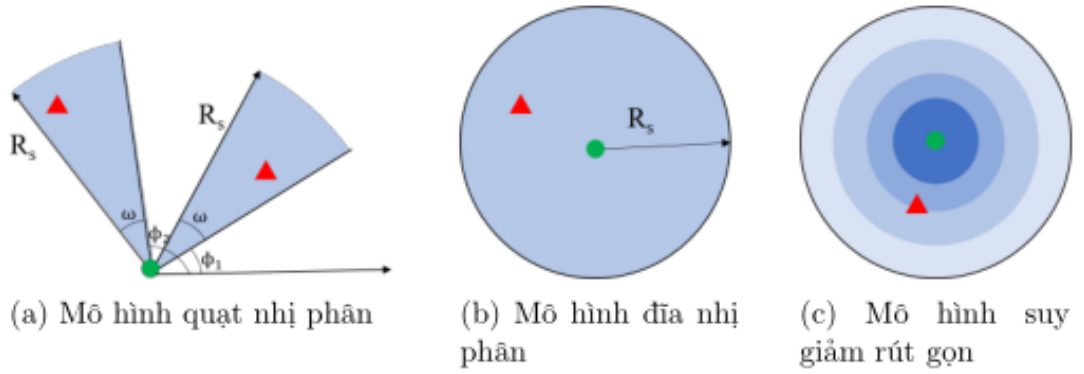
trong đó α là hằng số suy giảm, C là hằng số cho trước. Theo công thức (2.3), tất cả các điểm trong không gian đều có thể được cảm nhận bởi cảm biến. Những điểm càng gần vị trí C cho giá trị hàm f càng cao, nghĩa là càng dễ bị phát hiện bởi cảm biến. Trong trường hợp có nhiều cảm biến cùng hoạt động, độ bao phủ tại một điểm z được xác định bằng tổng độ bao phủ của tất cả cảm biến.

Mô hình suy giảm rút gọn

Đối với mô hình suy giảm, độ bao phủ có mối quan hệ tỷ lệ nghịch với khoảng cách - nghĩa là khi khoảng cách từ cảm biến đến điểm tăng lên, độ bao phủ sẽ giảm đi. Điều này dẫn đến việc chúng ta có thể xem như độ cảm biến bằng không khi khoảng cách giữa cảm biến và đối tượng trở nên quá lớn. Dạng rút gọn của mô hình suy giảm được thể hiện qua công thức sau:

$$f(z) = \begin{cases} Cd^{-\alpha}(s, z) & \text{nếu } d(s, z) \leq R_s \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.4)$$

trong đó α là hằng số suy giảm, C là hằng số cho trước, R_s là bán kính cảm biến. Hình 2.1c thể hiện một mô hình cảm biến suy giảm rút gọn.



Hình 2.1. Các mô hình cảm biến

2.1.2. Mô hình kết nối của cảm biến

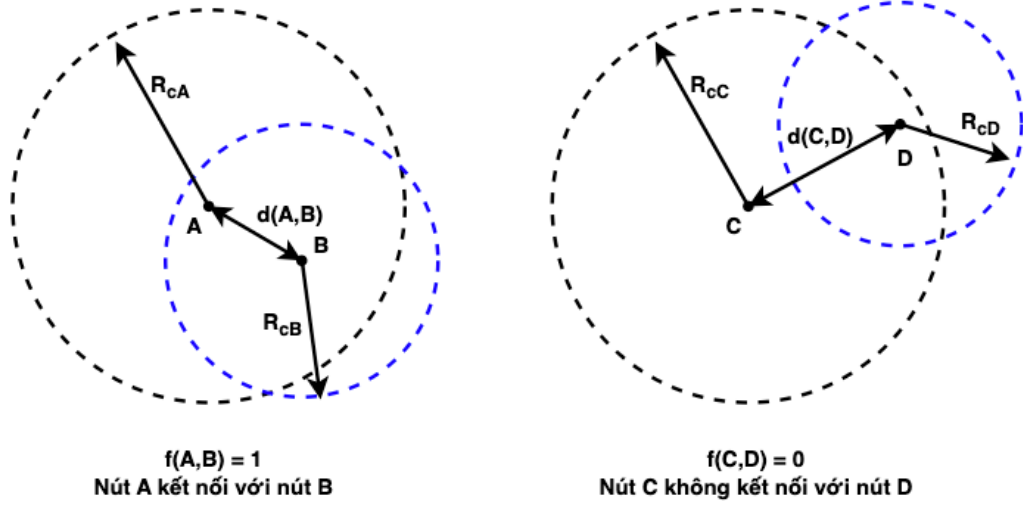
Có nhiều mô hình được sử dụng để phân tích, mô phỏng sự truyền tín hiệu và khả năng kết nối giữa hai nút cảm biến trong WSN. Các mô hình này có thể được phân loại dựa trên mức độ đơn giản, tính chính xác, và khả năng mô phỏng các yếu tố thực tế của môi trường. Một số mô hình thông dụng trong [19] bao gồm:

- Mô hình đĩa nhị phân
- Mô hình suy hao đường truyền
- Mô hình đĩa xác suất

Mô hình đĩa nhị phân

Mỗi nút cảm biến i có một bán kính giao tiếp không dây R_{ci} , bán kính này có thể có giá trị cố định hoặc thay đổi phụ thuộc vào sự thay đổi công suất thu, phát tín hiệu của nút cảm biến. Hai nút cảm biến i và j được coi là có kết nối với nhau nếu khoảng cách giữa hai nút không vượt quá giá trị $\min\{R_{ci}, R_{cj}\}$. Hình 2.2 mô tả mô hình kết nối đĩa nhị phân. Hàm kết nối f của mô hình đĩa nhị phân được xác định bởi công thức (2.5):

$$f(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } d(i, j) \leq \min(R_{ci}, R_{cj}) \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.5)$$



Hình 2.2. Mô hình kết nối nhị phân

Mặc dù mô hình kết nối đĩa nhị phân có ưu điểm về tính đơn giản và dễ dàng trong tính toán, nó lại không thể phản ánh chính xác các đặc tính thực tế của quá trình truyền dẫn không dây như hiện tượng suy hao tín hiệu hoặc tác động từ môi trường truyền dẫn. Vì những hạn chế này, mô hình thường chỉ được áp dụng trong các nghiên cứu thuộc lĩnh vực lý thuyết.

Mô hình suy hao đường truyền

So với mô hình đĩa nhị phân, mô hình suy hao đường truyền (Log-Distance Path Loss) thể hiện tính thực tiễn cao hơn nhờ khả năng mô phỏng hiện tượng suy hao tín hiệu trong quá trình truyền dẫn không dây. Trong mô hình này, hai nút cảm biến i và j được xác định là có kết nối khi mức suy hao tín hiệu PL ở khoảng cách $d(i,j)$ không lớn hơn một ngưỡng PL^* định trước. Công thức (2.6) xác định hàm kết nối f trong mô hình đĩa nhị phân như sau:

$$f(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } PL(d(i, j)) \leq PL^* \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.6)$$

trong đó giá trị suy hao $PL(d)$ tại khoảng cách d được xác định bởi công thức (2.7):

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_{\sigma} \quad (2.7)$$

Với:

- $PL(d)$: Mức suy hao tín hiệu tại khoảng cách d (đơn vị dB)

- $PL(d_0)$: Mức suy hao tín hiệu tại khoảng cách tham chiếu d_0 , thường chọn $d_0=1m$
- n : Hệ số suy hao đường truyền, có giá trị trong khoảng từ 2 đến 6, phụ thuộc vào môi trường.
- d : Khoảng cách giữa hai nút cảm biến
- X_σ : Nhiễu Gaussian có trung bình 0 và độ lệch chuẩn σ , dùng để mô phỏng sự thay đổi ngẫu nhiên của tín hiệu do các yếu tố môi trường.

Mô hình đĩa xác suất

Trong mô hình này, xác suất thiết lập kết nối thành công giữa hai nút cảm biến được biểu diễn thông qua một hàm xác suất, với giá trị của hàm này tỷ lệ nghịch với khoảng cách giữa hai nút cảm biến. Công thức xác định hàm xác suất này được thể hiện như sau:

$$P(d) = \frac{1}{1 + \exp(\alpha(d-b))} \quad (2.8)$$

Với:

- $P(d)$: Xác suất giao tiếp thành công tại khoảng cách d
- α : Tham số điều chỉnh độ dốc của hàm (tốc độ suy giảm xác suất theo khoảng cách)
- b : Khoảng cách tại đó xác suất giao tiếp bằng 0,5

Mô hình đĩa xác suất phức tạp và đòi hỏi tính toán nhiều thông số hơn nhưng mô hình này phản ánh chính xác hơn quá trình giao tiếp không dây giữa hai nút cảm biến diễn ra trong thực tế.

2.1.3. Định nghĩa thời gian sống của cảm biến

Thời gian sống của cảm biến là một khái niệm quan trọng trong triển khai mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Networks - WSN). Đây là khoảng thời gian một cảm biến có thể hoạt động hiệu quả, thực hiện các chức năng thu thập dữ liệu, xử lý và truyền thông tin trước khi cạn kiệt năng lượng hoặc gặp phải các sự cố khiến nó ngừng hoạt động. Thời gian sống không chỉ ảnh hưởng đến hiệu suất của từng cảm biến riêng lẻ mà còn tác động đến toàn bộ mạng cảm biến, đặc biệt trong

các ứng dụng yêu cầu giám sát liên tục và độ tin cậy cao như an ninh, môi trường và y tế.

Trong nghiên cứu, thời gian sống thường được định nghĩa thông qua một số tiêu chí cụ thể. Thứ nhất, thời gian sống của cảm biến có thể được xem xét từ thời điểm triển khai đến khi cảm biến đầu tiên ngừng hoạt động, được gọi là thời gian sống tối thiểu. Thứ hai, thời gian sống trung bình là khoảng thời gian trung bình mà các cảm biến trong mạng duy trì hoạt động trước khi chúng hoàn toàn ngừng chức năng. Thứ ba, thời gian sống toàn mạng được định nghĩa là khoảng thời gian mà mạng vẫn đảm bảo được các yêu cầu hoạt động như bao phủ, kết nối hoặc giám sát mục tiêu.

Khái niệm thời gian sống của cảm biến phản ánh sự quan trọng của việc tối ưu hóa năng lượng trong mạng cảm biến không dây. Các yếu tố như tiêu hao năng lượng trong quá trình cảm nhận, xử lý, và truyền thông tin, cùng với môi trường triển khai và thiết kế phần cứng, đều ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian sống. Do đó, việc nghiên cứu và cải thiện thời gian sống của cảm biến không chỉ giúp nâng cao hiệu suất mạng mà còn giảm thiểu chi phí vận hành và bảo trì.

2.2. Mô hình bài toán tối đa hóa thời gian sống của mạng

2.2.1. Phát biểu bài toán

Bài toán được đặt ra nhằm tối ưu hóa thời gian tồn tại của mạng cảm biến không dây thông qua việc đặt và sắp xếp các vị trí của các cảm biến, đảm bảo vùng phủ sóng mục tiêu đồng thời kéo dài tuổi thọ của mạng. Đây là bài toán tối đa hóa thời gian tồn tại cho vấn đề phủ sóng mục tiêu, thường được gọi là Lifetime Maximization for Target Coverage Problem (LMTCP). Điểm khác biệt so với các nghiên cứu trước đây là bài toán này cho phép các cảm biến di động có thể di chuyển một cách thích ứng để bù đắp cho các cảm biến đã cạn kiệt năng lượng, thay vì chỉ tìm kiếm một sơ đồ vị trí cố định.

Bảng 2.1. Trình bày tóm tắt các kí hiệu sẽ được sử dụng trong khi mô tả và giải quyết bài toán

Ký hiệu	Định nghĩa
$A=(W \times H)$	Miền quan tâm
$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$	Tập các đối tượng
$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$	Tập các cảm biến động
R_s	Bán kính cảm nhận của cảm biến
$I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$	Vị trí ban đầu của các cảm biến
$D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$	Vị trí ban đầu của các cảm biến
$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$	Thời điểm các cảm biến tới vị trí cuối
$A(T, s_j)$	Hàm biểu diễn sự hoạt động của s_j tại thời điểm T
$C(T, t_i, s_j)$	Hàm biểu diễn sự bao phủ của s_j đối với t_i tại thời điểm T
$C(T, t_i)$	Hàm biểu diễn sự bao phủ của t_i tại thời điểm T
$d(a, b)$	Khoảng cách Euclid giữa hai vị trí a và b
$E_m(a, b)$	Hàm tiêu hao năng lượng để di chuyển từ a đến b
ε	Hằng số di chuyển
e	Năng lượng tiêu hao theo thời gian của cảm biến
E	Năng lượng ban đầu của cảm biến
δ_j	Thời gian hoạt động của s_j
F_i	Thời gian sống của t_i
W	Thời gian sống của mạng
$TC(r)$	Tập các cảm biến bao phủ bởi cảm biến đặt trong miền r
$SC(r_k)$	Tập các cảm biến sẽ di chuyển tới miền r_k
$SC^T(s)$	Miền mà cảm biến s sẽ di chuyển tới
$R^* = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$	Tập các miền giao tối ưu nhỏ nhất
H_k	Thời gian sống của miền r_k
ck_j	Thời gian hoạt động của s_j nếu di chuyển tới r_k
$\pi=(v_{\pi 1}, v_{\pi 2}, \dots, v_{\pi q})$	Đường thay thế
X_{kj}	Biến nhị phân quyết định s_j có di chuyển tới r_k hay không

Xét một mạng cảm biến không dây di động đồng nhất $G = (T, S, R_s)$ được triển khai trên một miền hình chữ nhật A có kích thước $W \times H$. Trong đó $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ là tập các đối tượng cần bao phủ và $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ là tập các cảm biến di động. Các cảm biến có cùng bán kính cảm biến R_s , có khả năng di chuyển theo đường thẳng và dừng lại bất kì vị trí nào trên miền.

Một cách triển khai các cảm biến động được định nghĩa bởi ba tập $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ và $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$, với I_j và D_j lần lượt là vị trí ban đầu và vị trí cuối của cảm biến s_j và α_j là thời điểm s_j tới D_j . Nếu cảm biến s_j di chuyển tới D_j tại thời điểm α_j và có thể tiếp tục hoạt động trong khoảng thời gian δ_j , ta nói cảm biến này hoạt động trong khoảng thời gian từ α_j đến $\alpha_j + \delta_j$.

Hàm biểu diễn sự hoạt động của cảm biến s_j tại thời điểm T là:

$$A(T, s_j) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } T \in [\alpha_j, \alpha_j + \delta_j] \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.9)$$

2.2.2. Mô hình bao phủ và mô hình năng lượng

Mô hình bao phủ

Các cảm biến trong mạng sử dụng mô hình đĩa nhị phân để bao phủ các đối tượng. Gọi $d(t_i, s_j)$ là khoảng cách Euclid giữa đối tượng t_i và cảm biến s_j . Mô hình bao phủ của t_i và s_j tại thời điểm T được biểu diễn như sau:

$$C(T, t_i, s_j) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } A(T, s_j) = 1, \quad d(t_i, s_j) \leq R_s \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (2.10)$$

Trong mô hình này, mỗi đối tượng có thể được bao phủ bởi một hoặc nhiều cảm biến và một cảm biến có thể bao phủ nhiều đối tượng tại cùng một thời điểm.

Đối tượng t_i , gọi là được bao phủ trong mạng khi tồn tại ít nhất một cảm biến bao phủ đối tượng này. Hàm biểu diễn mô hình bao phủ của đối tượng t_i tại thời điểm T có dạng:

$$C(T, t_i) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - C(T, t_i, s_j)] \quad (2.11)$$

Định nghĩa thời gian sống của một đối tượng là thời gian tính từ lúc mạng bắt đầu hoạt động đến khi đối tượng này không còn được bao phủ. Thời gian sống F_i của đối tượng t_i được tính bởi hàm:

$$F_i = \max_{C(T, t_i)=1, \forall T \in \{0, x\}}(x) \quad (2.12)$$

Mạng được cho là bao phủ khi tất cả các đối tượng đều được bao phủ. Thời gian sống của mạng, kí hiệu là W, được định nghĩa là thời gian tính từ lúc mạng bắt đầu hoạt động đến khi tồn tại một đối tượng không còn được bao phủ. W có thể được định nghĩa bằng công thức như sau:

$$W = \min_{i=1,2,\dots,m}(F_i) \quad (2.13)$$

Mô hình năng lượng

Các cảm biến trong mạng có thể di chuyển đến các vị trí khác nhau trên miền quan tâm. Năng lượng tiêu hao khi di chuyển là một hàm tỉ lệ thuận với khoảng cách di chuyển. Hàm tính năng lượng tiêu Em để di chuyển một cảm biến từ vị trí a đến vị trí b là:

$$E_m(a, b) = \varepsilon \cdot d(a, b), \quad (2.14)$$

với ε là hằng số di chuyển, phụ thuộc vào hiệu quả tiêu thụ năng lượng của từng loại cảm biến, $d(a, b)$ là khoảng cách Euclid giữa hai vị trí a và vị trí b.

Mô hình giả sử rằng tất cả cảm biến trong mạng có cùng năng lượng khởi tạo ban đầu E và tiêu thụ một lượng năng lượng như nhau là e năng lượng trên một đơn vị thời gian ở trạng thái hoạt động. Khoảng thời gian hoạt động dự kiến của cảm biến sẽ được tính bởi công thức:

$$\delta_j = \frac{E - E_m(I_j, D_j)}{e} \quad (2.15)$$

2.2.3. Bài toán tối đa thời gian sống đảm bảo bao phủ đối tượng trong mạng cảm biến không dây di động (LMTCP)

Mô hình bài toán

Đầu vào:

- Tập m đối tượng T được triển khai trên miền quan tâm (W x H);
- Tập n cảm biến di động S: các cảm biến có cùng năng lượng khởi tạo E, bán kính cảm biến R_s và mức độ tiêu hao năng lượng e.

Ràng buộc:

- Mạng hoạt động khi tất cả các đối tượng trong miền được bao phủ bởi ít nhất một cảm biến;
- Các cảm biến không thể tiêu hao năng lượng nhiều hơn năng lượng khởi tạo ban đầu.

Đầu ra: tập D là vị trí di chuyển của các cảm biến và tập α là thời điểm mỗi cảm biến cần tới vị trí mới. Với các ràng buộc của bài toán được trình bày ở trên thì mô hình hóa toán học được phát biểu như sau:

$$\text{Tìm cực đại} \quad W \quad (2.16)$$

$$\text{Với điều kiện} \quad D_j \in A \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

$$E_m(I_j, D_j) \leq E \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.18)$$

$$C(T, t_i) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - C(T, t_i, s_j)] \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2.19)$$

$$F_i = \max_{C(T, t_i)=1, \forall T \in \{0, x\}}(x) \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2.20)$$

$$W \leq F_i \quad = 1, 2, \dots, m \quad (2.21)$$

Trong đó:

- Hàm mục tiêu (2.16) mô tả mục tiêu của bài toán là tối đa thời gian sống của mạng.
- Ràng buộc (2.17) mô tả tất cả các vị trí di chuyển D_j phải nằm trong miền quan tâm A
- Ràng buộc (2.18) đảm bảo năng lượng di chuyển của từng cảm biến không thể vượt quá năng lượng khởi tạo ban đầu.
- Các phương trình (2.19) và (2.20) đảm bảo các đối tượng trong mạng đều được bao phủ.
- Ràng buộc (2.21) thể hiện thời gian sống của mạng W được xác định bằng thời gian sống nhỏ nhất của các đối tượng.

Trường hợp được xem xét trong bài toán là khi mỗi cảm biến chỉ thực hiện

một lần di chuyển đến vị trí được chỉ định, sau đó được kích hoạt tại một thời điểm cụ thể và tiếp tục hoạt động cho đến khi năng lượng hoàn toàn cạn kiệt. Để kéo dài thời gian hoạt động của mạng, các cảm biến được kích hoạt vào thời điểm sau có khả năng thay thế những cảm biến đã kích hoạt trước đó khi chúng đã hết năng lượng.

2.3. Áp dụng giải thuật heuristic xử lý bài toán

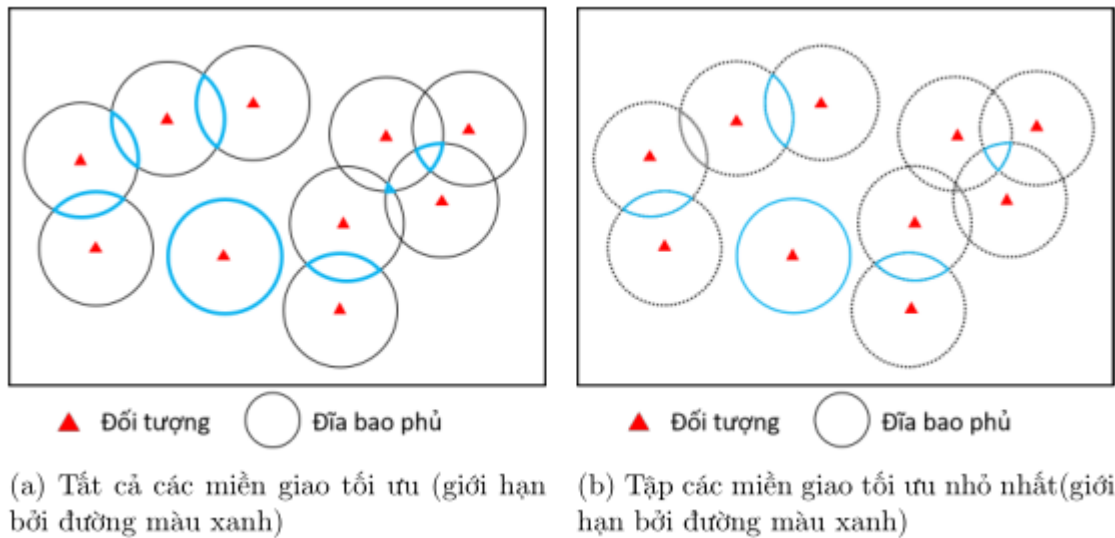
Trong đề án này, tác giả đề xuất một giải thuật heuristics, gọi là Lifetime Effective Movement Algorithm (LEMA), nhằm tối ưu hóa thời gian tồn tại của mạng cảm biến không dây di động. Động cơ chính thúc đẩy sự ra đời của LEMA là giảm thiểu số lượng cảm biến cần hoạt động tại bất kỳ thời điểm nào, từ đó hạn chế việc tiêu hao năng lượng không cần thiết và kéo dài tuổi thọ tổng thể của mạng.

Ý tưởng cốt lõi của giải thuật LEMA là sử dụng các vùng phủ chồng lấp tối ưu của các cảm biến để bao quát toàn bộ tập mục tiêu. Việc bố trí các cảm biến trong những vùng phủ chồng lấp được lựa chọn cẩn thận nhằm hai mục tiêu: (1) giảm thiểu số lượng vùng được sử dụng, và (2) đảm bảo mỗi vùng có thể duy trì khả năng bao phủ các mục tiêu trong thời gian dài nhất có thể. Bằng cách duy trì một số lượng cảm biến đang hoạt động ở mức tối thiểu cần thiết, nguồn năng lượng được phân bổ hiệu quả hơn, từ đó kéo dài tuổi thọ của toàn bộ hệ thống.

LEMA được triển khai thông qua hai pha liên tiếp. Trong pha đầu (giai đoạn chọn vùng phủ), tìm ra tập hợp nhỏ nhất các vùng phủ chồng chéo tối ưu, trong đó tất cả các mục tiêu trong miền quan sát được đảm bảo được bao phủ. Sau khi hoàn tất quá trình lựa chọn vùng phủ tối ưu, pha thứ hai (giai đoạn lập lịch di chuyển) tập trung vào việc lên kế hoạch di chuyển các cảm biến đến các vị trí cụ thể trong các vùng đã xác lập. Tại đây, giải thuật xem xét chi phí năng lượng di chuyển của từng cảm biến, khả năng duy trì liên lạc giữa các nút, cũng như tiềm năng gia tăng tuổi thọ mạng thông qua việc sắp xếp cảm biến một cách hợp lý. Kết quả mong đợi là có được một trạng thái ổn định, nơi mỗi vùng bao phủ được duy trì một cách tối ưu, và tổng thể mạng đạt được tuổi thọ lâu nhất có thể.

2.3.1. Giải thuật tìm vùng bao phủ chồng chéo tối ưu

Trong quá trình tối ưu hóa thời gian tồn tại của mạng cảm biến không dây di động, pha một của giải thuật LEMA là tìm tập các vùng bao phủ tối ưu nhỏ nhất thỏa mãn các cảm biến đặt trong các miền giao thuộc tập này có thể bao phủ tất cả đối tượng trong mạng. Kí hiệu $R^* = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$ là tập các vùng giao thu được pha này. Tập các vùng giao tối ưu nhỏ nhất được minh họa trong Hình 2.3.



Hình 2.3. Ví dụ tập các vùng giao tối ưu nhỏ nhất

Pha này áp dụng thuật TCAT [7] để chọn các vùng giao tối ưu. Giải thuật sử dụng chiến lược chia lưới và dịch ô để chia mạng thành các vùng con, sau đó kết hợp các lời giải trên vùng con để được lời giải của cả bài toán.

Khi phân vùng, TCAT chia mạng bằng một lưới bao gồm các đường ngang và dọc cách nhau một khoảng bằng $2LR_s$, với L là số nguyên có giá trị thỏa mãn $1 \leq L \leq \frac{\max(W,H)}{2R_s}$. Giải thuật chính xác để tìm ra lời giải cho mỗi vùng con bao gồm năm bước:

- Bước 1: Xác định tất cả các vùng giao tối ưu
- Bước 2: Một đối tượng được định nghĩa là cô lập khi nó chỉ được bao phủ bởi một và chỉ một miền giao tối ưu. Khi một miền giao tối ưu bao phủ một đối tượng cô lập, miền giao tối ưu đó được gọi là miền cô lập.
- Bước 3: Thêm các vùng cô lập vào tập R^* và cập nhật tập các đối tượng chưa được bao phủ

- Bước 4: Lặp lại các bước 1-3 cho đến khi không còn tìm được vùng cô lập.
- Bước 5: Thêm các miền giao để bao phủ các đối tượng chưa được bao phủ bởi vùng thuộc. Các vùng này được xác định bằng giải thuật chính xác của bài toán bao phủ đối tượng.

Chiến lược dịch ô được sử dụng trong TCAT để dịch lưới chia vùng sang bên phải và lên trên, tạo ra L2 cách chia miền khác nhau. Lời giải của chiến lược dịch ô là lời giải tốt nhất nhận được trong các cách chia vùng khác nhau. TCAT cho lời giải có độ chính xác không vượt quá $(\frac{L+1}{L})^2$.

2.3.2. Giải thuật lập lịch di chuyển

Sau khi tìm được các vùng giao tối ưu nhỏ nhất $R^* = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$, LEMA di chuyển các cảm biến tới các vùng này để bao phủ các cảm biến. Mạng được bao phủ khi và chỉ khi tất cả các miền trong R^* có ít nhất một sensor đang hoạt động. Tức là, tập R^* cần thỏa mãn các ràng buộc:

$$\bigcup_{r \in R^*} TC(r) = T \quad (2.22)$$

$$\bigcup_{r \in R^* \setminus r_k} TC(r) \neq T \quad \forall k = 1, 2, \dots, p \quad (2.23)$$

Định nghĩa thời gian sống của vùng r_k ($k=1, 2, \dots, p$) là thời gian sống nhỏ nhất của các đối tượng được bao phủ bởi vùng này, kí hiệu là H_k . Thời gian sống của mạng W khi đó có thể được tính bởi công thức:

$$W = \min_{k=1, 2, \dots, p} (H_k) \quad (2.24)$$

Kí hiệu $SC(r_k)$ là tập các cảm biến di chuyển đến miền r_k và $SC^T(s)$ là miền mà cảm biến s di chuyển tới. Dễ thấy, $SC^T(s) = r$ khi và chỉ khi $s \in SC(r)$. Bởi vì các cảm biến chỉ di chuyển một lần từ vị trí khởi tạo ban đầu, $SC(r_k) \cap SC(r_h) = \emptyset \quad \forall h \neq k$.

Định lý: với mọi vùng $r_k \in R^*$, thời gian sống H_k của vùng chỉ bị ảnh hưởng bởi cảm biến $s \in SC(r_k)$

Dựa vào định lý 2, để tính thời gian sống của các vùng, ta cần xác định tập $SC(r)$ tương ứng với vùng $r \in R^*$. Nhằm giảm thiểu năng lượng tiêu hao cho quá trình di chuyển, khi một cảm biến s cần di chuyển đến miền r , vị trí đích nên là điểm thuộc miền r có khoảng cách gần nhất với s . Ngoài ra, để tối đa hóa thời gian hoạt động của

miền r , các cảm biến trong tập $SC(r)$ nên được di chuyển theo trình tự liên tiếp - cảm biến di chuyển sau đóng vai trò thay thế cảm biến di chuyển trước đó khi cảm biến này cạn kiệt năng lượng. Phương pháp này cho phép xác định dễ dàng thời điểm mà mỗi cảm biến cần đến vị trí mới, từ đó đơn giản hóa bài toán lập lịch di chuyển. Khi áp dụng chiến lược di chuyển này, thời gian sống của miền được xác định theo công thức:

$$H_k = \sum_{j|s_j \in SC(r_k)} C_{kj} \quad \forall k = 1, 2, \dots, p \quad (2.25)$$

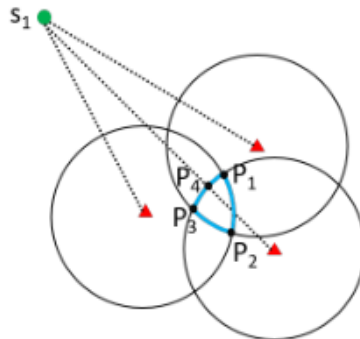
với $c_{kj} (1 \leq k \leq p; 1 \leq j \leq n)$ là thời gian hoạt động dự kiến nếu s_j di chuyển tới r_k và được xác định nhờ công thức (2.15) và phần 2.3.2.1

Bài toán LMTCP trở thành bài toán xác định tập $SC(r)$ cho các vùng giao $r \in R^*$ để tối đa thời gian sống của mạng.

2.3.2.1. Tối thiểu khoảng cách di chuyển

Để tối ưu hóa quãng đường di chuyển, khi một cảm biến tiến về một miền giao, vị trí dừng lý tưởng nên được xác định tại điểm biên của miền đó. Vì vậy, việc tính toán khoảng cách tối thiểu từ cảm biến đến các cung giao (những thành phần cấu tạo nên biên của miền) trở nên cần thiết.

Xét một cung giao $\widehat{P_x P_y}$ thuộc đường tròn bao phủ t_i , nếu $\widehat{P_x P_y}$ giao với đoạn thẳng t_{is_j} , điểm giao của cung và đoạn thẳng này là điểm thuộc $\widehat{P_x P_y}$ gần s_j nhất. Trong trường hợp còn lại, điểm gần s_j nhất sẽ là một trong hai điểm P_x và P_y . Hình 2.4 minh họa việc tính khoảng cách gần nhất từ một cảm biến tới một vùng tối ưu có biên gồm ba cung giao



Hình 2.4. Ví dụ minh họa việc tính khoảng cách ngắn nhất. Vùng giới hạn bởi đường màu xanh là vùng giao tối ưu. Điểm gần nhất với s trên cung $\widehat{P_1 P_3}$ là P_4 , trên cung $\widehat{P_1 P_2}$ là P_1 hoặc P_2 , trên cung $\widehat{P_2 P_3}$ là P_2 hoặc P_3

2.3.2.2. Mô hình tuyến tính nguyên hỗn hợp cho bài toán lập kế hoạch di chuyển các cảm biến

Phần này trình bày mô hình tuyến tính nguyên hỗn hợp (mixed integer program-ming – MIP) cho vấn đề lập kế hoạch di chuyển cho các cảm biến. Bài toán trong pha hai cần xác định vùng di chuyển cho mỗi cảm biến để tối đa thời gian sống của mạng. Kí hiệu X_{kj} là biến nhị phân quyết định cảm biến s_j có di chuyển tới vùng r_k hay không. $X_{kj} = 1$ tương đương $s_j \in SC(r_k)$. Thời gian sống H_k của vùng r_k có thể được tính bởi hàm:

$$H_k = \sum_{j=1}^n X_{kj} c_{kj} \quad \forall k = 1, 2, \dots, p \quad (2.26)$$

Bài toán lập lịch di chuyển trong pha hai được mô hình về dạng như sau:

$$\text{Tìm cực đại} \quad W \quad (2.27)$$

$$\text{Với điều kiện} \quad X_{kj} \in \{0,1\} \quad \forall k = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, n \quad (2.28)$$

$$\sum_{k=1}^p X_{kj} = 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.29)$$

$$H_k = \sum_{j=1}^n X_{kj} c_{kj} \quad \forall k = 1, 2, \dots, p \quad (2.30)$$

$$W \leq H_k \quad \forall k = 1, 2, \dots, p \quad (2.31)$$

Trong mô hình toán học, ràng buộc (2.29) được thiết lập nhằm đảm bảo nguyên tắc mỗi cảm biến chỉ được phép di chuyển đến duy nhất một vị trí. Trong khi đó, ràng buộc (2.31) xác định rằng thời gian sống của toàn bộ mạng W chính là thời gian sống ngắn nhất trong số các miền giao tối ưu. Mô hình bài toán này thuộc dạng mô hình tuyến tính nguyên hỗn hợp, có thể tìm ra lời giải chính xác thông qua các phương pháp và công cụ giải quyết các bài toán MIP thông thường, ví dụ như SCIP [21].

2.3.3. Giải thuật heuristic lập kế hoạch di chuyển cho các cảm biến

Tuy mô hình MIP được trình bày trong mục 2.3.2.2 có khả năng cung cấp lời giải tối ưu, việc giải quyết bài toán thông qua mô hình này thường đòi hỏi chi phí tính toán cao và thời gian xử lý kéo dài, đặc biệt khi hệ thống có số lượng biến lớn (xuất hiện trong trường hợp số lượng cảm biến hoặc số lượng miền giao tăng cao). Nhận thấy hạn chế này, đề tài đã phát triển giải thuật heuristic mang tên "tăng thời gian

sống nhỏ nhất của các miền" (increasing minimum region lifetime - IMRL) để xây dựng kế hoạch di chuyển hiệu quả cho các cảm biến. Phương pháp này nâng cao thời gian hoạt động của mạng bằng cách điều phối nhiều cảm biến hơn đến các khu vực có thời gian sống ngắn nhất để tăng cường độ bao phủ.

Một cảm biến được định nghĩa là tự do khi nó chưa được phân công để bao phủ bất kỳ vùng nào. Đối với vùng r_x (vùng đang có thời gian sống ngắn nhất), một cảm biến s_j được xem là phù hợp khi nó vừa ở trạng thái tự do và đồng thời có $c_{xj} > 0$. Trong trường hợp không tìm được cảm biến phù hợp nào, vẫn có thể sử dụng một cảm biến tự do để thay thế các cảm biến đang hoạt động tại các vùng khác, từ đó giải phóng những cảm biến này mà không làm suy giảm thời gian sống tổng thể của mạng. Để minh họa, hãy xem xét một mạng bao gồm sáu cảm biến $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$ và tập các vùng giao tối ưu nhỏ nhất $R^* = \{r_1, r_2, r_3\}$, với ma trận c được trình bày chi tiết trong bảng 2.2.

Bảng 2.2. Ma trận c

	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	1	0	0
2	1	1	0	0	1	0
3	0	1	1	0	0	1

Dưới đây là chi tiết về tập hợp các cảm biến được phân bố trong các miền tối ưu cùng với thông tin về thời gian hoạt động của từng cảm biến dựa trên phương án di chuyển ban đầu:

$$SC(r_1) = \{s_4\};$$

$$H1 = c_{14} = 1;$$

$$SC(r_2) = \{s_1, s_5\};$$

$$H2 = c_{21} + c_{25} = 2;$$

$$SC(r_3) = \{s_2, s_6\};$$

$$H3 = c_{32} + c_{36} = 2.$$

r_1 được xác định là vùng có thời gian sống ngắn nhất, với thời gian sống của toàn mạng theo chiến lược di chuyển cảm biến ban đầu (W_0) có giá trị là 1. Qua phân tích, chúng ta thấy cảm biến s_3 hiện đang ở trạng thái tự do có khả năng thay thế cảm biến s_2 trong tập $SC(r_3)$. Sau khi được giải phóng, cảm biến s_2 có thể tiếp tục thay thế

s_1 trong tập $SC(r_2)$. Khi s_1 trở thành cảm biến tự do và thỏa mãn điều kiện $c_{11} > 0$, nó trở thành ứng viên phù hợp để được di chuyển đến vùng r_1 . Đáng chú ý là trong suốt quá trình thay thế này, các giá trị H_3 và H_2 đều duy trì lớn hơn 1, đảm bảo thời gian sống của mạng không bị suy giảm. Dựa trên những phân tích trên, chúng tôi đề xuất phương án mới cho việc di chuyển các cảm biến di động như sau:

$$\begin{aligned} SC(r_1) &= \{s_1, s_4\}; & H_1 &= c_{14} c_{11} = 2; \\ SC(r_2) &= \{s_2, s_5\}; & H_2 &= c_{22} + c_{25} = 2; \\ SC(r_3) &= \{s_3, s_6\}; & H_3 &= c_{33} + c_{36} = 2. \end{aligned}$$

Thời gian sống của mạng theo phương án di chuyển mới là $W = 2 > W_0$.

Giải thuật IMRL nâng cao hiệu quả di chuyển cảm biến thông qua cơ chế thay thế có hệ thống các cảm biến trong các tập SC , qua đó giải phóng những cảm biến có tính năng phù hợp để triển khai tại các miền cần được bao phủ. Các cảm biến được bố trí thay thế nhau theo một trình tự liên tiếp, tạo thành một dãy được gọi là "đường thay thế". Việc thiết kế đường thay thế này được thực hiện thông qua một đơn đồ thị có hướng $G = (V, E)$, trong đó mỗi cảm biến trong hệ thống được biểu diễn bởi một đỉnh tương ứng trong tập V . Trong đồ thị này, một cung nối từ v_{j1} đến v_{j2} chỉ được hình thành khi việc thay thế cảm biến s_{j1} bằng cảm biến s_{j2} không ảnh hưởng tiêu cực đến thời gian sống của mạng. Điều này được xác định bởi điều kiện: $s_{j1} \in SC(r_k)$ và $H_k - c_{kj1} + c_{kj2} > W_{old}$. Một đường thay thế hợp lệ $\pi = (v_{\pi 1}, v_{\pi 2}, \dots, v_{\pi q})$ phải thỏa mãn ba điều kiện quan trọng sau:

- $s_{\pi 1}$ là một cảm biến tự do;
- $s_{\pi q}$ chưa được dùng để bao phủ vùng có thời gian sống ngắn nhất;
- Không tồn tại hai cảm biến trên đường thay thế mà cùng bao phủ một vùng.

Khi áp dụng đường thay thế, thời gian hoạt động của mạng được nâng cao thông qua cơ chế dịch chuyển tuần tự - mỗi cảm biến trên đường được thay thế bởi cảm biến liền trước nó, và cảm biến ở vị trí cuối cùng sẽ được điều phối đến khu vực có thời gian sống thấp nhất. Để đảm bảo tính hiệu quả, phương pháp này tuân thủ ba ràng buộc cơ bản. Ràng buộc thứ nhất yêu cầu quá trình thay thế phải khởi nguồn từ một cảm biến đang ở trạng thái tự do. Ràng buộc thứ hai đòi hỏi việc triển khai đường

thay thế phải có khả năng cải thiện thời gian sống tối thiểu của các vùng. Ràng buộc cuối cùng quy định mỗi vùng chỉ được phép có tối đa một sự thay đổi trong tập SC của nó, nhằm ngăn chặn khả năng xuất hiện thời gian sống tối thiểu mới trong quá trình thực hiện thay thế.

Giải thuật IMRL bao gồm năm bước sau:

- Bước 1: Tìm miền có thời gian sống ngắn nhất r_x ;
- Bước 2: Xây dựng đồ thị $G = (V, \epsilon)$;
- Bước 3: Xác định các tập đỉnh tiềm năng $potentialSet$ bao gồm các đỉnh thỏa mãn ràng buộc thứ hai của đường thay thế;

$$potentialSet = \{v_j | s_j \in S \setminus SC(r_x), c_{xj} > 0, \}$$

- Bước 4: Tìm đường thay thế $\pi = (v_{\pi 1}, v_{\pi 2}, \dots, v_{\pi q})$ bằng cách cố gắng tìm đường sẽ kết thúc bởi một đỉnh $v_i \in potentialSet$;
- Bước 5: Thay thế các cảm biến trong đường π bởi cảm biến ngay phía trước và di chuyển cảm biến cuối đến bao phủ r_x :

$$r = SC^T(s_{\pi_{i+1}}), SC(r) = SC(r) \setminus s_{\pi_{i+1}} \cup s_{\pi_i} \forall i = 1, 2, \dots, (q - 1)$$

$$SC(r_x) = SC(r_x) \cup \{s_{\pi_q}\}$$

- Bước 6: Lặp lại các bước 1-5 cho đến khi không tìm được đường thay thế

Input: Một đồ thị kết nối giữa các node cảm biến, biểu diễn bởi $G = (V, \epsilon)$

Tập cảm biến S , tập các vùng che phủ SC , ma trận c_{xj}

Output: Cập nhật lại vùng bao phủ SC với thời gian tồn tại tối thiểu được cải thiện do

$r_x \leftarrow$ vùng có thời gian sống ngắn nhất

$G \leftarrow (V, \epsilon) \setminus$ Cập nhật đồ thị kết nối

$potentialSet = \{v_j | s_j \in S \setminus SC(r_x), c_{xj} > 0, \}$

$\pi \leftarrow \emptyset$

for $v_i \in potentialSet$ **do** $\setminus$ duyệt từng cảm biến tiềm năng

$\pi = (v_{\pi 1}, v_{\pi 2}, \dots, v_{\pi q}) \leftarrow FINDPATH(G, v_j) \setminus$ tìm đường đi từ vị trí cảm biến

hiện tại tới v_j

if $\pi \neq \emptyset$ **then** $\setminus$ Nếu tìm được đường đi khả thi dừng tìm và sử dụng

break

$SC(r_x).add(S_{\pi_q})$ \\\ Thêm cảm biến cuối đường đi vào vùng r_x
for $i \leftarrow 1$ **to** $q - 1$ **do** \\\ Dịch chuyển cảm biến theo đường đi
 $r = RC(s_{\pi_{i+1}})$ \\\ Xác định vùng đang sử dụng cảm biến ở bước tiếp theo
 $SC(r).remove(s_{\pi_{i+1}})$ \\\ Loại cảm biến khỏi vùng cũ
 $SC(r).add(s_{\pi_i})$ \\\ Thêm cảm biến từ bước trước vào vùng này
while $\pi \neq \emptyset$
 Đường thay thế được xây dựng bằng đệ quy, bắt đầu từ đỉnh cuối cùng (sẽ di chuyển đến r_x), và kết thúc khi tìm thấy đỉnh tự do. Để đảm bảo mỗi vùng không có quá một sự thay thế trong SC, tập R được sử dụng để theo dõi các vùng trong quá trình chạy. Mỗi đỉnh được xét nhiều nhất trong suốt quá trình tìm kiếm. Quy trình được mô tả trong giải thuật FINDPATH().

Giải thuật FINDPATH (Tìm đường thay thế)

Input: $G = (V, \varepsilon)$: đồ thị biểu diễn mạng kết nối giữa các cảm biến

vi: đỉnh bắt đầu tìm kiếm

R: tập các vùng hạn chế không được truy cập

Output: Đường thay thế kết thúc bởi vi, hoặc null nếu không có đường thỏa mãn

$visited[v_i] \leftarrow true$ \\\ Đánh dấu đỉnh hiện tại đã được duyệt

$\bar{R} \leftarrow \bar{R} \cup SC^T(v_i)$ \\\ Cập nhật tập hạn chế R gồm cả vùng bao phủ hiện tại của v_i

if s_i là cảm biến tự do **then** \\\ Nếu tại đỉnh này có cảm biến tự do

return (vi) \\\ Trả về đường đi chỉ gồm đỉnh này

for $v_j \in V$ **do** \\\ Duyệt tất các đỉnh trong đồ thị

if $(v_i, v_j) \in \varepsilon$ và $visited[v_j] = false$ và $SC^T(v_j) \notin \bar{R}$ **then** \\\ Nếu v_i kết nối với v_j , v_i chưa được duyệt và vùng của v_j không thuộc tập hạn chế R

$path \leftarrow FINDPATH(G, v_j, \bar{R})$ \\\ Đệ quy tìm đường từ v_j

if $path \neq null$ **then** \\\ Nếu tìm được đường đi hợp lệ

$path \leftarrow path \cup v_i$ \\\ Nối đỉnh hiện tại vào đầu đường đi

return path \\\ Trả về đường đi

return null

2.4. Ứng dụng của bài toán

Trong thực tế, giải thuật LEMA có ý nghĩa quan trọng trong nhiều ứng dụng liên quan đến duy trì thời gian sống mạng cảm biến không dây.

Giám sát môi trường: trong các ứng dụng theo dõi môi trường, như quan trắc rừng, giám sát sạt lở đất, chất lượng không khí, nguồn nước, việc tối ưu hóa thời gian

tồn tại mạng là vô cùng quan trọng. Với nguồn năng lượng có hạn (pin, năng lượng mặt trời), việc giảm số cảm biến hoạt động đồng thời mà vẫn duy trì đầy đủ chức năng giám sát sẽ kéo dài đáng kể thời gian hoạt động của hệ thống.

An ninh và quốc phòng: trong các ứng dụng giám sát biên giới, kho bãi, hoặc hạ tầng quan trọng, thời gian hoạt động liên tục của mạng cảm biến có thể quyết định mức độ an toàn. Áp dụng các giải thuật heuristics có thể giảm chi phí, tăng tính ổn định và giảm tần suất bảo trì hoặc thay thế cảm biến.

Quản lý tài nguyên đô thị: trong các thành phố thông minh, cảm biến được triển khai rộng rãi để thu thập thông tin về giao thông, chất lượng không khí, tiếng ồn, độ rung... Giải pháp tối ưu thời gian tồn tại mạng sẽ giảm chi phí vận hành, bảo trì và nâng cao chất lượng thông tin thu thập được.

2.5. Độ phức tạp tính toán

Trong giải thuật này, ta có thể xác định rằng số vùng tối ưu sẽ không vượt quá tổng số đối tượng trong hệ thống. Dựa trên đặc điểm này, với n số lượng cảm biến di động trong mạng và m đối tượng cần được bao phủ, việc xác định vùng có thời gian sống ngắn nhất trong bước 1 chỉ đòi hỏi độ phức tạp tính toán là $O(m)$. Bước 2 cần $O(n^2)$ phép tính để xây dựng đồ thị G . Đối với bước 3, độ phức tạp được xác định là $O(n)$. Khi chuyển sang bước 4, mỗi đỉnh trong đồ thị chỉ được xét tối đa một lần và số đỉnh kề không vượt quá n , vì vậy bước này có độ phức tạp là $O(n^2)$. Độ dài của một đường thay thế không quá n , do đó bước 5 chỉ yêu cầu $O(n)$ phép toán. Tổng hợp lại, độ phức tạp tính toán của toàn bộ các bước từ 1 đến 5 được xác định là $O(\max(m, n^2))$.

Thời gian sống của mạng W có cận trên là $\lceil \frac{n+E}{e} \rceil$, giá trị này có thể đạt được trong trường hợp chỉ cần một cảm biến để bao phủ đối tượng và không cần tiêu hao năng lượng để di chuyển. Trong trường hợp hệ nhất khi $p = m$ và tất cả các vùng có thời gian sống như nhau, tăng thời gian sống của m vùng có thể làm tăng thời gian sống của mạng W lên ít nhất 1 đơn vị thời gian. Trong trường hợp này, cần tìm đường

thay thế nhiều nhất $m[\frac{n+E}{e}]$ lần. Do đó, độ phức tạp của IMRL là $O(\max(m, n^2)m[\frac{n+E}{e}])$.

CHƯƠNG 3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.1. Kịch bản và dữ liệu thử nghiệm

❖ Môi trường mô phỏng

Môi trường mô phỏng được thiết kế nhằm kiểm tra hiệu quả của giải thuật LEMA (Lifetime Effective Movement Algorithm) trong các điều kiện khác nhau của mạng cảm biến không dây di động (MWSN). Vùng giám sát (A) có kích thước 1000m x 1000m, đảm bảo đủ không gian để triển khai các cảm biến và mục tiêu. Vị trí mục tiêu và vị trí ban đầu của các cảm biến được tạo ngẫu nhiên theo phân bố đồng đều trên vùng giám sát A.

❖ Kịch bản thử nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên tập hợp 32 bộ dữ liệu, áp dụng 5 kịch bản khác nhau nhằm đánh giá tác động của các tham số đầu vào đối với hiệu suất của giải thuật đề xuất. Trong thiết kế thí nghiệm, các đối tượng và cảm biến di động được phân bố ngẫu nhiên theo phân phối đều trong phạm vi miền quan tâm A có kích thước $1000\text{m} \times 1000\text{m}$. Cụ thể, kịch bản 1 và 2 tập trung vào việc đối chiếu hiệu quả của giải thuật LEMA với giải thuật chính xác giải mô hình MIP. Trong khi đó, các kịch bản 3, 4 và 5 được thiết kế để phân tích mức độ ảnh hưởng của từng tham số đầu vào đến chất lượng lời giải của ba giải thuật: LEMA, TCAT và TV-Greedy [15].

Đối với tính di động của các cảm biến, thực nghiệm xem xét các nút cảm biến có khả năng di chuyển trên mặt đất. Loại cảm biến này thường có hai bánh xe được điều khiển bởi các động cơ độc lập. Trong đề án, các thực nghiệm lấy hằng số di chuyển $\varepsilon = 2\text{Jm}^{-1}$, giá trị này được tham khảo trong các nghiên cứu trước đây [32,33], và được chứng minh là gần với giá trị thực tế. Bên cạnh đó, các cảm biến được giả định là có cùng mức năng lượng khởi tạo ban đầu là $E = 400\text{J}$, do đó khoảng cách di chuyển tối đa của mỗi cảm biến là 200m. Trong trạng thái hoạt động, mỗi cảm biến truyền dữ liệu đến trạm thu phát thông qua giao thức CSMA/CA. Khi mỗi gói tin được truyền đi, cảm biến tiêu hao năng lượng để chạy thuật toán CSMA/CA và thực

hiện truyền tin. Thực nghiệm giả sử rằng mỗi cảm biến truyền 10 gói tin mỗi giây (mỗi gói có độ dài 22 byte) và kênh luôn sẵn sàng để truyền tin.

Kịch bản 1: Để đánh giá tác động của việc thay đổi số lượng đối tượng được triển khai trong miền quan tâm, kịch bản này sử dụng 7 bộ dữ liệu khác nhau, với thông tin chi tiết được trình bày trong Bảng 3.1. Tất cả các bộ dữ liệu này đều được thực hiện trong cùng một miền quan tâm A có kích thước $1000\text{m} \times 1000\text{m}$, với số lượng cảm biến và bán kính cảm biến được giữ nguyên không đổi. Yếu tố biến thiên duy nhất trong kịch bản này là số lượng đối tượng, dao động trong phạm vi từ 30 đến 60 đối tượng.

Kịch bản 2: Để nghiên cứu tác động của việc thay đổi số lượng cảm biến di động trong môi trường quan sát, kịch bản này được thiết kế với 7 bộ dữ liệu khác nhau, với các thông số chi tiết được trình bày trong Bảng 3.2. Tất cả các thí nghiệm đều được thực hiện trong cùng một miền quan tâm có kích thước $1000\text{m} \times 1000\text{m}$, trong đó số lượng đối tượng cần quan sát và bán kính hoạt động của cảm biến được duy trì không đổi. Yếu tố duy nhất biến thiên trong các thí nghiệm là số lượng cảm biến di động, với phạm vi dao động từ 60 đến 90 cảm biến.

Kịch bản 3: Kịch bản này bao gồm 6 bộ dữ liệu để đánh giá ảnh hưởng của số lượng đối tượng được triển khai trên miền quan tâm. Chi tiết của mỗi bộ dữ liệu được thể hiện trong Bảng 3.3. Các bộ dữ liệu được triển khai trên miền quan tâm A ($1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$) với số lượng cảm biến và bán kính cảm biến không thay đổi trong khi số lượng đối tượng thay đổi từ 100 đến 350.

Bảng 3.1. Kịch bản 1 (Ảnh hưởng của số lượng đối tượng)

Bộ dữ liệu	Số lượng đối tượng	Số lượng cảm biến	Bán kính cảm biến (m)
S1-1	30	75	20
S1-2	35		
S1-3	40		
S1-4	45		
S1-5	50		
S1-6	55		
S1-7	60		

Bảng 3.2. Kịch bản 2 (Ảnh hưởng của số lượng cảm biến di động)

Bộ dữ liệu	Số lượng đối tượng	Số lượng cảm biến	Bán kính cảm biến (m)
S2-1	50	60	20
S2-2		65	
S2-3		70	
S2-4		75	
S2-5		80	
S2-6		85	
S2-7		90	

Bảng 3.3. Kịch bản 3 (Ảnh hưởng của số lượng đối tượng)

Bộ dữ liệu	Số lượng đối tượng	Số lượng cảm biến	Bán kính cảm biến (m)
S3-1	100	600	20
S3-2	150		
S3-3	200		
S3-4	250		
S3-5	300		
S3-6	350		

Kịch bản 4: Kịch bản này bao gồm 6 bộ dữ liệu để đánh giá ảnh hưởng của số lượng các cảm biến di động được triển khai trên miền quan tâm. Chi tiết của mỗi bộ dữ liệu được thể hiện trong Bảng 3.4. Các bộ dữ liệu được triển khai trên miền quan tâm A ($1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$) với số lượng đối tượng và bán kính cảm biến không thay đổi trong khi lượng cảm biến di động thay đổi từ 200 đến 700.

Kịch bản 5: Kịch bản này được thiết kế với 6 bộ dữ liệu nhằm phân tích mức độ ảnh hưởng của bán kính cảm biến đến hiệu suất hệ thống. Thông tin chi tiết về từng bộ dữ liệu được trình bày cụ thể trong Bảng 3.5. Tất cả các thí nghiệm đều được thực hiện trong một miền quan tâm A có kích thước đồng nhất $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$, với cả số lượng đối tượng cần giám sát và số lượng cảm biến di động được duy trì không đổi. Trong kịch bản này, tham số duy nhất được điều chỉnh là bán kính của các cảm biến, với giá trị dao động trong khoảng từ 10m đến 60m.

Bảng 3.4. Kịch bản 4 (Ảnh hưởng của số lượng cảm biến di động)

Bộ dữ liệu	Số lượng đối tượng	Số lượng cảm biến	Bán kính cảm biến (m)
S4-1	200	200	20
S4-2		300	
S4-3		400	
S4-4		500	
S4-5		600	
S4-6		700	

Bảng 3.5. Kịch bản 5 (Ảnh hưởng của bán kính cảm biến di động)

Bộ dữ liệu	Số lượng đối tượng	Số lượng cảm biến	Bán kính cảm biến (m)
S5-1	200	600	10
S5-2			20
S5-3			30
S5-4			40
S5-5			50
S5-6			60

Chi tiết môi trường thử nghiệm được mô tả trong Bảng 3.6. Mã nguồn của các giải thuật được viết bằng ngôn ngữ lập trình Python. Các thử nghiệm được tiến hành theo hình thức mô phỏng trên máy tính có cấu hình mô tả trong Bảng Intel Core i5, RAM 12GB, SSD 256GB.

Bảng 3.6. Môi trường thực nghiệm

Loại	Thông số
CPU	Intel Core i5 2.9 GHz
RAM	12GB
Disk	SSD 256GB
VGA	GTX 1650

3.2. Kết quả thử nghiệm

Để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của kết quả nghiên cứu, mỗi bộ dữ liệu trong tất cả 5 kịch bản thực nghiệm đều được thực hiện lặp lại 30 lần. Từ các lần chạy này, các giá trị trung bình được tính toán cho chỉ số quan trọng: thời gian sống của mạng. Bảng 3.7 trình bày các kết quả thực nghiệm của 5 kịch bản trên các bộ dữ liệu.

Bảng 3.7. Trình bày kết quả thực nghiệm của 5 kịch bản trên các bộ dữ liệu

Kịch bản	Bộ dữ liệu	Số đối tượng	Số cảm biến	Bán kính cảm biến	Thời gian sống (h)
Kịch bản 1 - Ảnh hưởng của số lượng đối tượng	S1-1	30	75	20	38.25
	S1-2	35	75	20	33.45
	S1-3	40	75	20	29.13
	S1-4	45	75	20	26.21
	S1-5	50	75	20	23.23
	S1-6	55	75	20	20.4
	S1-7	60	75	20	18.76
Kịch bản 2 - Ảnh hưởng của số lượng cảm biến	S2-1	50	60	20	12.41
	S2-2	50	65	20	16.27
	S2-3	50	70	20	19.59
	S2-4	50	75	20	23.23
	S2-5	50	80	20	26.79
	S2-6	50	85	20	29.37
	S2-7	50	90	20	32.21
Kịch bản 3 - Ảnh hưởng của số lượng đối tượng (mạng lớn)	S3-1	100	600	20	63
	S3-2	150	600	20	58
	S3-3	200	600	20	52
	S3-4	250	600	20	47
	S3-5	300	600	20	43
	S3-6	350	600	20	39-40
Kịch bản 4 - Ảnh hưởng của số lượng cảm biến (mạng lớn)	S4-1	200	200	20	15
	S4-2	200	300	20	28
	S4-3	200	400	20	42
	S4-4	200	500	20	55

	S4-5	200	600	20	68
	S4-6	200	700	20	75
Kịch bản 5 - Ảnh hưởng của bán kính cảm biến	S5-1	200	600	10	38
	S5-2	200	600	20	50
	S5-3	200	600	30	60
	S5-4	200	600	40	68
	S5-5	200	600	50	74
	S5-6	200	600	60	80

Giải thuật LEMA được đánh giá hiệu năng thông qua năm kịch bản thực nghiệm với các yếu tố thay đổi khác nhau nhằm kiểm tra khả năng tối ưu hóa thời gian sống của mạng cảm biến không dây di động. Kết quả thu được cho thấy giải thuật phản ứng một cách nhất quán và hiệu quả trước các điều kiện đầu vào.

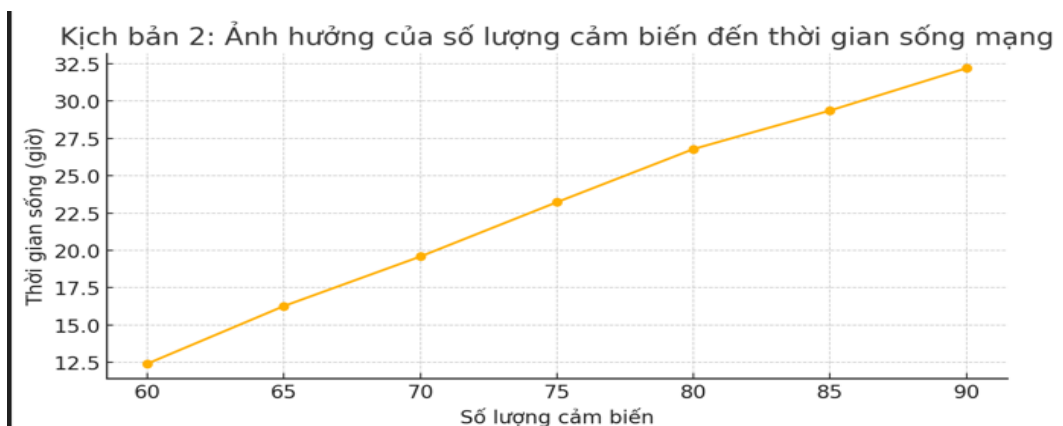
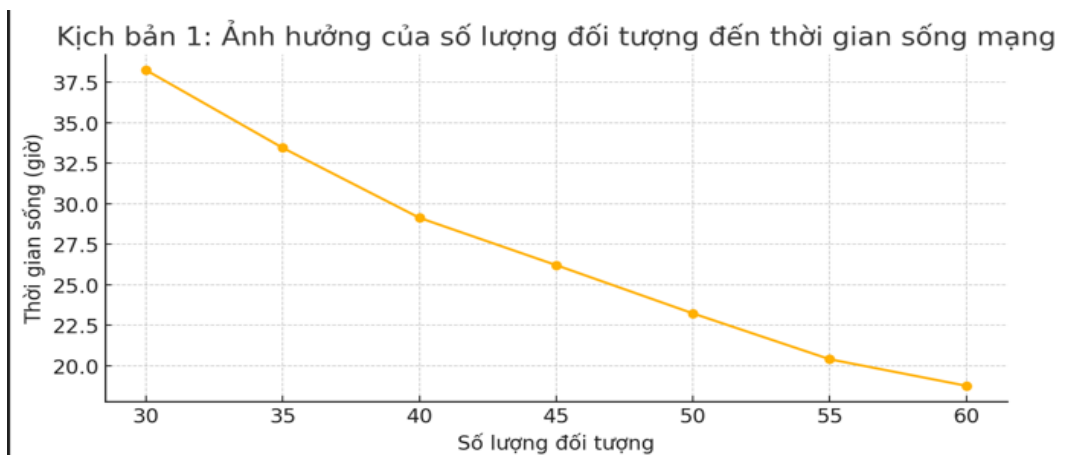
Khi số lượng đối tượng cần giám sát tăng (kịch bản 1 và 3), thời gian sống của mạng có xu hướng giảm. Cụ thể, trong kịch bản quy mô nhỏ, khi số đối tượng tăng từ 30 lên 60, thời gian sống giảm từ 38.25 giờ xuống còn 18.76 giờ. Tương tự, ở quy mô lớn, thời gian sống giảm từ khoảng 63 giờ xuống còn 40 giờ khi số đối tượng tăng từ 100 lên 350. Nguyên nhân là do yêu cầu bao phủ nhiều đối tượng hơn buộc nhiều cảm biến phải hoạt động đồng thời, dẫn đến tiêu hao năng lượng nhanh hơn và rút ngắn vòng đời mạng.

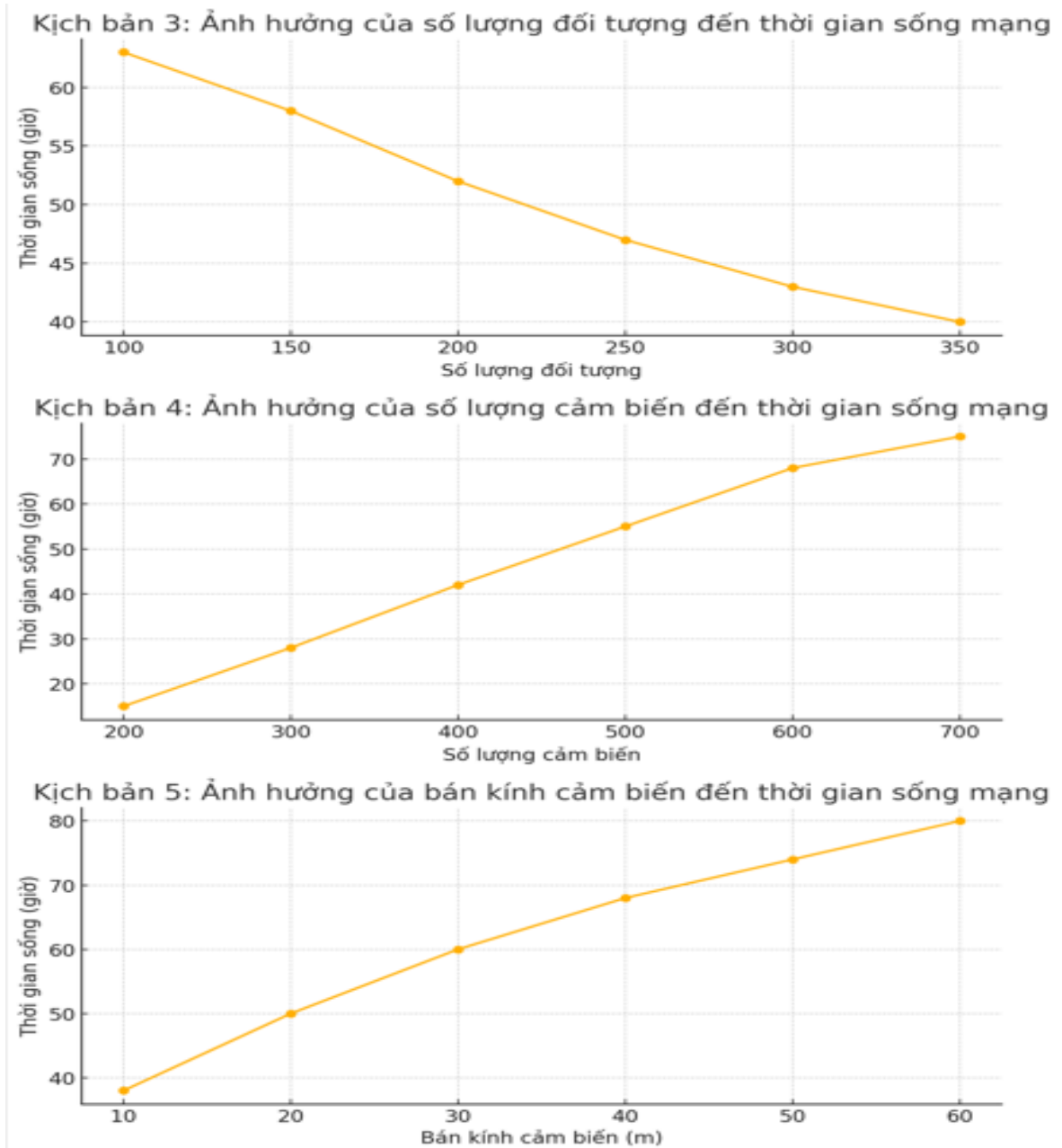
Ở kịch bản 2 và 4, việc tăng số lượng cảm biến trong mạng giúp cải thiện rõ rệt thời gian sống. Ở quy mô nhỏ, số cảm biến tăng từ 60 lên 90 giúp kéo dài thời gian sống từ 12.41 giờ lên 32.21 giờ. Trong khi đó, ở quy mô lớn, số cảm biến tăng từ 200 lên 700 giúp thời gian sống tăng từ khoảng 15 giờ lên tới 75 giờ. Điều này cho thấy khi có nhiều cảm biến hơn, giải thuật có thể phân phối gánh nặng bao phủ tốt hơn, đồng thời tối ưu lịch hoạt động để hạn chế tiêu hao năng lượng không cần thiết.

Khi tăng bán kính cảm biến (kịch bản 5), thời gian sống mạng cũng được cải thiện đáng kể. Với bán kính mở rộng từ 10m đến 60m, thời gian sống tăng từ 38 giờ

lên 80 giờ. Phạm vi cảm biến lớn hơn giúp mỗi cảm biến bao phủ được nhiều mục tiêu hơn, giảm số lượng cảm biến cần kích hoạt đồng thời và do đó tiết kiệm năng lượng hệ thống.

Tổng hợp các kết quả trên cho thấy giải thuật LEMA hoạt động ổn định, hiệu quả và thích ứng tốt với các thay đổi về cấu hình mạng. Trong tất cả các kịch bản, LEMA đều đạt thời gian sống mạng cao hơn đáng kể so với các giải thuật tham chiếu khác, đồng thời duy trì tính khả thi về mặt thời gian tính toán trong hầu hết các điều kiện thực nghiệm.





Hình 3.1. Biểu đồ thời gian sống của mạng với thử nghiệm LEMA

3.3. Đánh giá giải thuật

3.3.1. So sánh với giải thuật chính xác

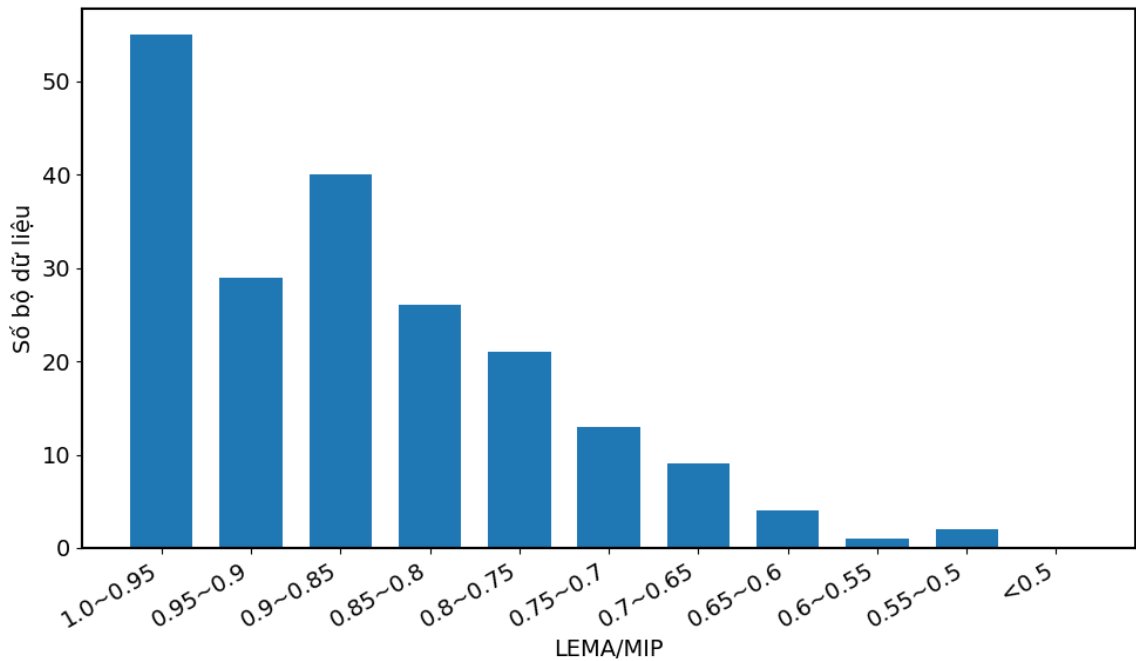
Để đánh giá tính khả thi và hiệu quả của giải thuật LEMA, chúng tôi đã tiến hành so sánh định lượng với giải pháp tối ưu thu được từ phương pháp chính xác. Mặc dù giai đoạn thứ hai của bài toán LMTCP có thể được giải quyết bằng các phương pháp quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MIP), song những phương pháp này thường có độ phức tạp theo hàm mũ, dẫn đến những hạn chế đáng kể khi ứng dụng vào các kịch bản có quy mô lớn.

Nghiên cứu thực nghiệm được thiết kế trên một mạng tiêu biểu gồm 75 cảm biến di động và 50 đối tượng cần giám sát, được phân bố trên miền quan tâm A. Để đảm bảo tính khách quan, chúng tôi đã tiến hành 200 lần thử nghiệm với các cấu hình vị trí khác nhau. Công cụ SCIP (Solving Constraint Integer Programs) được sử dụng làm thước đo chuẩn cho lời giải tối ưu.

Hiệu suất của LEMA được định lượng thông qua tỷ số giữa thời gian sống mạng do giải thuật tạo ra và giá trị tối ưu thu được từ SCIP. Tỷ số bằng 1 thể hiện LEMA đạt hiệu suất tối ưu, trong khi các giá trị thấp hơn chỉ ra mức độ sai lệch so với lời giải tối ưu.

Kết quả phân tích từ 200 mẫu thử nghiệm cho thấy phân phối hiệu suất đáng khích lệ. Cụ thể, 60% trường hợp đạt tỷ số trong khoảng 0,85 đến 1,0, minh chứng cho khả năng giải thuật thường xuyên tiếp cận giải pháp tối ưu. Chỉ có dưới 8% trường hợp ghi nhận tỷ số thấp hơn 0,7, và đáng chú ý là không có cấu hình nào cho hiệu suất dưới 50% so với giải pháp tối ưu.

Phân phối này cho thấy LEMA duy trì được sự cân bằng hiệu quả giữa chất lượng lời giải và khả năng ứng dụng thực tế. Sự chênh lệch trung bình khoảng 15% so với lời giải tối ưu là chi phí hợp lý để đổi lấy khả năng mở rộng quy mô và thời gian tính toán hợp lý, đặc biệt trong các hệ thống có số lượng lớn cảm biến và đối tượng cần giám sát.



Hình 3.2. Biểu đồ thể hiện tỷ lệ chất lượng lời giải giữa LEMA và SCIP trên 200 lần chạy

Ngoài ra, các phép so sánh tương tự cũng được thực hiện với các trường hợp của kịch bản 1 và kịch bản 2, khi số lượng các cảm biến và đối tượng trong vùng đủ nhỏ để các bộ giải SCIP có thể giải quyết trong thời gian chấp nhận được. Trong kịch bản 1 (Bảng 3.8a), LEMA đạt được tỷ lệ rất cao là 87,88% với $m=30$. Khi số lượng đối tượng tăng lên, tỉ lệ có giảm nhẹ nhưng đây vẫn là tỉ lệ tốt. Trong kịch bản 2 (Bảng 3.8b), khi số lượng cảm biến tăng từ 60 lên 80, tỷ lệ nhận được khi so sánh hai lời giải tăng lên do các ràng buộc được nới lỏng. Khi số lượng cảm biến tiếp tục tăng (từ 80 lên 90 cảm biến), hiệu suất của LEMA sẽ chững lại ở mức 87%.

Bảng 3.8. So sánh thời gian sống chung mạng nhận được từ LEMA và SCIP

Bộ dữ liệu	Thời gian sống (LEMA)	Thời gian sống (SCIP)	Tỷ lệ LEMA/SCIP	Bộ dữ liệu	Thời gian sống (LEMA)	Thời gian sống (SCIP)	Tỷ lệ LEMA/SCIP
S1-1	38.25	43.52	87.88%	S2-1	12.41	15.11	82.14%
S1-2	33.45	38.11	87.79%	S2-2	16.27	19.34	84.13%
S1-3	29.13	32.95	88.41%	S2-3	19.59	23.21	84.41%
S1-4	26.21	29.93	87.58%	S2-4	23.23	26.75	86.84%
S1-5	23.23	26.75	86.84%	S2-5	26.79	30.51	87.80%
S1-6	20.4	24.42	83.55%	S2-6	29.37	33.52	87.59%
S1-7	18.76	22.48	83.46%	S2-7	32.21	36.89	87.31%

(a) Kịch bản 1

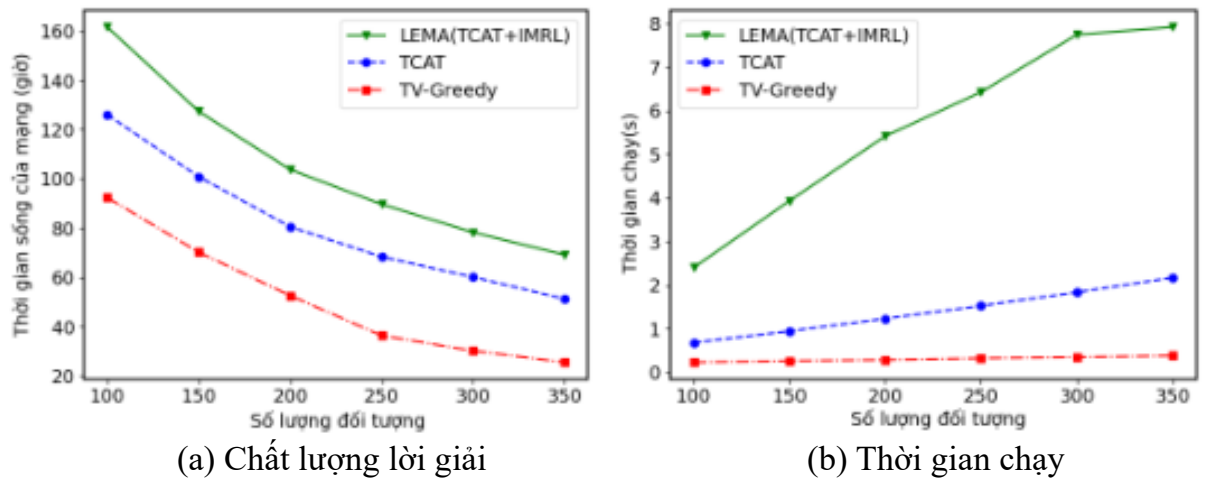
(b) Kịch bản 2

3.3.2. So sánh với giải thuật tham lam

Để đánh giá toàn diện hiệu suất của giải thuật LEMA, chúng tôi tiến hành nghiên cứu so sánh với hai phương pháp heuristic đã được công bố trước đây: TCAT và TV-Greedy. Quá trình thử nghiệm được thực hiện trên các tập dữ liệu thuộc kịch bản 3, 4 và 5, nhằm đánh giá tác động của các tham số khác nhau trong môi trường mạng. Cần lưu ý rằng TCAT và TV-Greedy nguyên bản được phát triển để giải quyết vấn đề triển khai tối ưu cảm biến trong mạng, mà không đề cập đến chiến lược thay thế khi cảm biến cạn kiệt năng lượng. Do đó, để đảm bảo tính công bằng trong so sánh, chúng tôi đã điều chỉnh phương pháp thực nghiệm như sau: kết quả đầu ra từ các giải thuật TCAT và TV-Greedy được sử dụng làm cấu hình triển khai ban đầu cho mạng cảm biến.

Để xử lý vấn đề thay thế cảm biến sau khi cạn kiệt năng lượng, một chiến lược phân phối lại thống nhất được áp dụng cho cả ba giải thuật. Cụ thể, khi một cảm biến hoạt động hết năng lượng, hệ thống sẽ tự động chọn cảm biến tự do (chưa được phân công) gần nhất để thay thế, đảm bảo duy trì độ bao phủ liên tục cho các đối tượng mục tiêu trong mạng. Cách tiếp cận này cho phép tập trung đánh giá hiệu quả của giai đoạn lập kế hoạch ban đầu - yếu tố chính phân biệt LEMA với các giải thuật khác - trong khi vẫn đảm bảo tất cả các giải thuật hoạt động trong cùng một khuôn khổ quản lý năng lượng mạng.

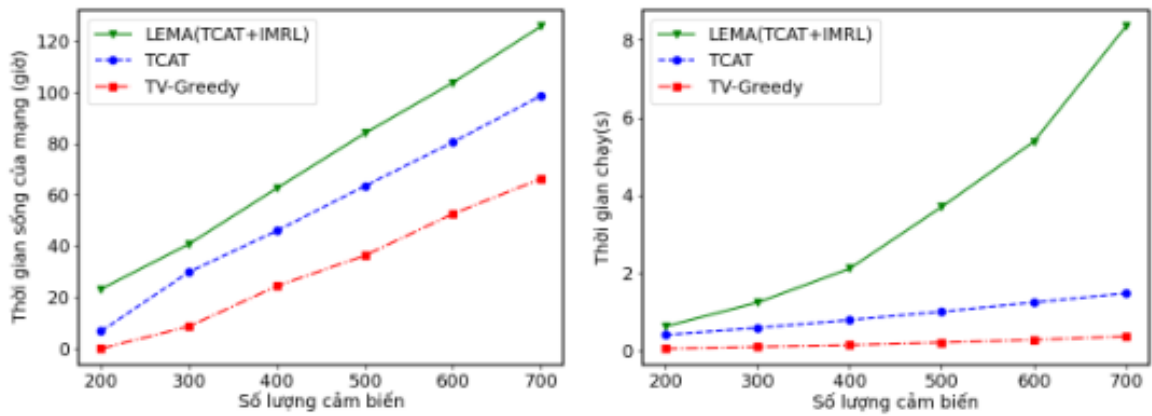
Hình 3.3a cho thấy tác động của số lượng đối tượng đối với mỗi giải thuật. Nói chung, tất cả các giải thuật đạt được thời gian sống mạng lâu hơn khi có ít đối tượng trong mạng, do cần ít cảm biến hơn để tất cả các đối tượng đều được bao phủ. LEMA cho thấy sự cải thiện đáng kể so với TV-Greedy về chất lượng lời giải trong các trường hợp (222% so với TV-Greedy). Về thời gian chạy, việc thêm đối tượng cần cảm biến sẽ tăng thời gian chạy cho LEMA, trong khi TV-Greedy vẫn ổn định. Trong tất cả các trường hợp, LEMA có thời gian chạy cao nhất, với độ dốc nhẹ. Sự khác biệt này dễ nhận thấy hơn trong các trường hợp có nhiều đối tượng. Ví dụ, với bộ dữ liệu 350 mục tiêu, LEMA có thời gian thực hiện lâu hơn TV-Greedy 7 giây.



Hình 3.3. Ảnh hưởng của số lượng đối tượng đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy

Hình 3.4 cho thấy kết quả về thời gian sống và thời gian chạy của mạng kết quả khi thay đổi số lượng nút cảm biến. Tuổi thọ mạng có xu hướng tăng theo số lượng cảm biến di động. LEMA một lần nữa cho thấy sự cải thiện so với TCAT (132%) và TV-Greedy (269%) trong cả sáu trường hợp. Lưu ý, trong kịch bản với số lượng cảm biến di động là 200, TV-Greedy không tìm thấy các triển khai các cảm biến để bao phủ toàn bộ đối tượng.

LEMA có thời gian chạy lâu nhất, cũng như độ dốc tương đối lớn, khi bổ sung nhiều cảm biến hơn, giải thuật mất nhiều thời gian hơn để lập kế hoạch di chuyển cho các cảm biến. Điều này có thể giải thích do độ phức tạp của IMRL bị ảnh hưởng rất nhiều bởi số lượng cảm biến.



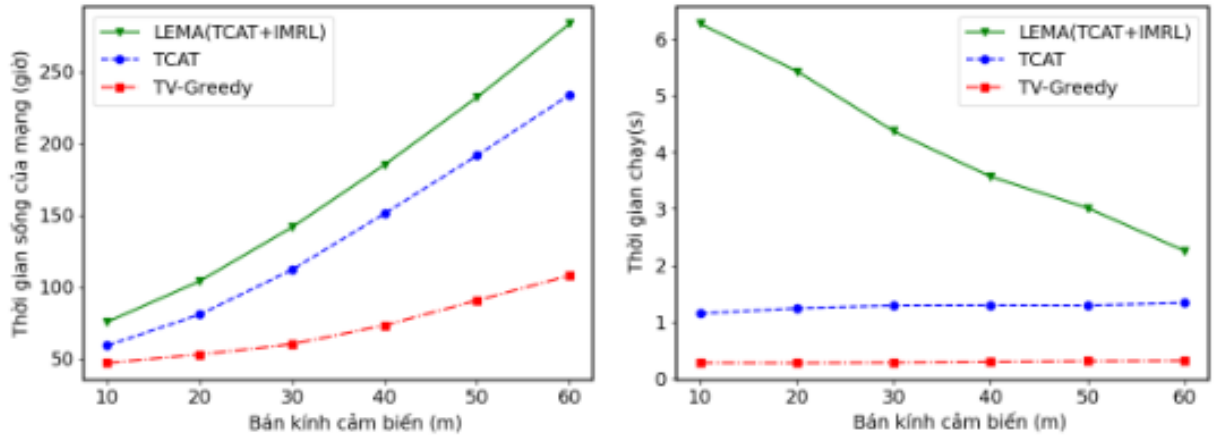
(a) Chất lượng lời giải

(b) Thời gian chạy

Hình 3.4. Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy

Đối với kịch bản 5, thực nghiệm thay đổi bán kính cảm nhận của các cảm biến di động trong mạng. Kết quả được hiển thị trong Hình 3.5. Nhìn chung, LEMA cho thấy sự cải thiện 125% và 228% về lời giải so với các giải thuật TCAT và TV-Greedy. TV-Greedy ít có khả năng khai thác việc mở rộng phạm vi cảm biến hơn vì giải thuật này chỉ sử dụng cảm biến gần nhất để bao phủ các đối tượng mà không tận dụng khả năng dùng một cảm biến để bao phủ nhiều đối tượng. LEMA và TCAT xác định vị trí cần di chuyển dựa trên miền giao, cho phép tận dụng lợi thế của việc chia sẻ cảm biến giữa các đối tượng có đĩa bao phủ giao nhau. Về thời gian chạy, TV-Greedy nhanh hơn đáng kể so với TCAT và LEMA. Trong trường cụ thể với bán kính cảm biến là 60m, TV-Greedy nhanh hơn 4,18 lần so với TCAT và 7,06 lần so với LEMA. Thời

gian chạy của LEMA được cải thiện nhiều nhất từ việc tăng phạm vi cảm biến khi số lượng miền giao nhau tối ưu được xác định trong pha đầu tiên giảm đi.



Hình 3.5. Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy

III. KẾT LUẬN

Vấn đề triển khai mạng cảm biến không dây di động (MWSN) nhằm đảm bảo bao phủ các mục tiêu giám sát đồng thời tối đa hóa thời gian sống của mạng có ý nghĩa vô cùng quan trọng trong lĩnh vực mạng cảm biến. Bài toán này thu hút nhiều sự quan tâm nghiên cứu do mỗi cảm biến đều có nguồn năng lượng giới hạn, đòi hỏi phải bố trí và quản lý cảm biến sao cho không những bao phủ đầy đủ các đối tượng cần giám sát mà còn kéo dài được tuổi thọ toàn mạng. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về bài toán bao phủ mục tiêu và tối ưu thời gian sống mạng, việc đồng thời đạt được cả hai mục tiêu trên vẫn đang đối mặt với những thách thức và còn nhiều khoảng trống cần tiếp tục khám phá.

Đề án đã tiếp cận bài toán nêu trên bằng cách ứng dụng giải thuật heuristic để tìm lời giải xấp xỉ cho bài toán NP-khó, có xét đến yếu tố di động của cảm biến. Cụ thể, tác giả đã xây dựng mô hình cho phép mô tả chính xác bài toán triển khai MWSN và dựa trên đó phát triển giải thuật heuristic phù hợp. Giải pháp đề xuất tận dụng khả năng di chuyển của các cảm biến nhằm điều chỉnh vị trí cảm biến động một cách hiệu quả, từ đó vừa đảm bảo bao phủ toàn bộ các mục tiêu tại mọi thời điểm, vừa phân bổ tải hoạt động giữa các cảm biến để tiết kiệm năng lượng và kéo dài thời gian hoạt động của mạng.

Trên cơ sở mô hình bài toán, tác giả đã đề xuất một giải thuật heuristic mới để xác định vị trí triển khai tối ưu và lịch di chuyển cho các cảm biến. Giải thuật được thiết kế gồm hai giai đoạn chính: (i) xác định tập hợp các vị trí cảm biến chiến lược sao cho ít cảm biến nhất có thể vẫn bao phủ được toàn bộ các mục tiêu; và (ii) lên lịch di chuyển luân phiên cho các cảm biến tới các vị trí này nhằm duy trì trạng thái bao phủ liên tục mà vẫn tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng. Giải pháp này là kết hợp tối ưu giữa việc tìm vị trí đặt cảm biến tối ưu và lập lịch di chuyển thông minh, với giải thuật IMRL sử dụng khái niệm “đường thay thế” để tối ưu quá trình thay thế cảm biến. Giải pháp cho phép mỗi thời điểm chỉ cần một số tối thiểu cảm biến hoạt

động, trong khi các cảm biến khác có thể tạm ngừng hoặc di chuyển hợp lý, nhờ đó giảm thiểu tiêu hao năng lượng dư thừa và kéo dài đáng kể thời gian sống của mạng.

Kết quả mô phỏng đã được thực hiện trên 32 bộ dữ liệu với 5 kịch bản thử nghiệm khác nhau nhằm đánh giá hiệu quả của giải thuật đề xuất. Các kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp đề xuất đạt hiệu suất vượt trội so với giải thuật tham lam trong các nghiên cứu trước. Cụ thể, giải thuật heuristic của đề án giúp kéo dài thời gian sống mạng đáng kể đồng thời giảm số lượng cảm biến cần sử dụng để bao phủ so với phương pháp tham chiếu. Nhờ tận dụng tối đa vùng phủ chồng lấp và lịch hoạt động tối ưu, mạng cảm biến có thể duy trì hoạt động lâu hơn mà vẫn đảm bảo mọi mục tiêu luôn được giám sát, qua đó khẳng định tính hiệu quả và ưu việt của giải pháp đề xuất.

Mặc dù đạt được những kết quả khả quan, đề án vẫn còn một số hạn chế do giới hạn thời gian và phạm vi nghiên cứu. Thứ nhất, mô hình và giải thuật hiện tại chưa xét đến các yếu tố địa hình hay chướng ngại vật trong khu vực triển khai, do đó chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của môi trường thực tế đến việc bao phủ và di chuyển cảm biến. Thứ hai, giải pháp chưa tích hợp các điều kiện môi trường thời gian thực (ví dụ: thời tiết, nhiễu sóng) và chưa xem xét các yêu cầu chất lượng dịch vụ (QoS) cụ thể của ứng dụng. Những yếu tố này có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng và tính ứng dụng thực tiễn của mạng cảm biến khi triển khai ngoài thực địa.

Hướng phát triển trong tương lai của nghiên cứu sẽ tập trung khắc phục các hạn chế nêu trên, đồng thời mở rộng phạm vi ứng dụng. Cụ thể, tác giả dự kiến mở rộng mô hình cho nhiều loại cảm biến khác nhau (đặc biệt về khả năng cảm nhận, năng lượng, di chuyển), giúp giải pháp linh hoạt với mạng cảm biến không đồng nhất. Bên cạnh đó, việc tích hợp các yếu tố môi trường thực tế và yêu cầu QoS vào giải thuật sẽ được nghiên cứu nhằm đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định trong nhiều điều kiện khác nhau. Những định hướng này không chỉ nâng cao tính thực tiễn cho giải pháp đề xuất mà còn góp phần tối ưu hóa hơn nữa thời gian sống mạng và đảm bảo chất lượng dịch vụ trong triển khai MWSN ở thực tế.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Muhammad Ali Jamshed, et al. “Challenges, applications and future of wireless sensors in Internet of Things: A review”. In: IEEE Sensors Journal (2022).
- [2] Gerald K Ijamaru, Kenneth Li-Minn Ang, and Jasmine KP Seng. “Wireless power transfer and energy harvesting in distributed sensor networks: Survey, opportunities, and challenges”. In: International journal of distributed sensor networks 18.3 (2022).
- [3] F. Agyei-Ntim and K. E. Newman, “Lifetime estimation of wireless body area sensor networks using probabilistic analysis,” Wireless Personal Communications, vol. 68, no. 4, pp. 1–15, 2013.
- [4] J. Levendovszky, L. Tran-Thanh, G. Treplan, and G. Kiss, “Fadingaware reliable and energy efficient routing in wireless sensor networks,” Computer Communications, vol. 33, pp. S102–S109, 2010.
- [5] Hanh, N.T., Binh, H.T.T., Van Son, N., Lan, P.N.: Minimal node placement for ensuring target coverage with network connectivity and fault tolerance constraints in wireless sensor networks. In: 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp. 2923–2930 (2019).
- [6] Hanh, N.T., Le Nguyen, P., Tuyen, P.T., Binh, H.T.T., Kurniawan, E., Ji, Y.: Node placement for target coverage and network connectivity in wsns with multiple sinks. In: 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp. 1–6 (2018)
- [7] Nguyen, P.L., Hanh, N.T., Khuong, N.T., Binh, H.T.T., Ji, Y.: Node placement for connected target coverage in wireless sensor networks with dynamic sinks. Pervasive and Mobile Computing 59, 101070 (2019).
- [8] Liu, H., Chu, X., Leung, Y.-W., Du, R.: Minimum-cost sensor placement for required lifetime in wireless sensor-target surveillance networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 24(9), 1783–1796 (2013).

- [9] Saadi, N., Bounceur, A., Euler, R., Lounis, M., Bezoui, M., Kerkar, M., Pottier, B.: Maximum lifetime target coverage in wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications* 111(3), 1525–1543 (2020).
- [10] Asadollahi, H., Zandi, S., Asharioun, H.: Maximizing network lifetime in many-to-one wireless sensor networks (wsns). *Wireless Personal Communications* 123(4), 2971–2983 (2022).
- [11] Akram, J., Munawar, H.S., Kouzani, A.Z., Mahmud, M.A.P.: Using adaptive sensors for optimised target coverage in wireless sensor networks. *Sensors* 22(3) (2022).
- [12] Mikitiuk, A., Trojanowski, K.: Maximization of the sensor network lifetime by activity schedule heuristic optimization. *Ad Hoc Networks* 96, 101994 (2020).
- [13] Jianhu Gong. “An application of meta-heuristic and nature-inspired algorithms for designing reliable networks based on the Internet of things: A systematic literature review”. In: *International Journal of Communication Systems* 36.5 (2023).
- [14] M. Anitha, et al. “Optimal Scheduling of Directional Sensors with QoS Constraints to Enhance the Lifetime”. In: *Wireless Personal Communications* 124.1 (May 2022).
- [15] Z. Liao, J. Wang, S. Zhang, J. Cao and G. Min, "Minimizing Movement for Target Coverage and Network Connectivity in Mobile Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 26, no. 7, pp. 1971-1983, 1 July 2015, doi: 10.1109/TPDS.2014.2333011.
- [16] Q. Wang, W. Liu, T. Wang, M. Zhao, X. Li, M. Xie, M. Ma, G. Zhang, A. Liu, Reducing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with dynamic traffic patterns, in *IEEE Access* 7 (2019).
- [17] M. M. Ahmed, E. H. Houssein, A. E. Hassanien, A. Taha, E. Hassanien, Maximizing lifetime of large-scale wireless sensor networks using multi-objective whale optimization algorithm, *Telecommunication Systems* 72 (2) (2019).
- [18] X. Zhang, X. Lu, X. Zhang, Mobile wireless sensor network lifetime maximization by using evolutionary computing methods, *Ad Hoc Networks* 101 (2020).

- [19] J.-M. Gil, Y.-H. Han, A target coverage scheduling scheme based on geneticalgorithms in directional sensor networks, *Sensors* 11 (2) (2011) 1888–1906.
- [20] X. Gao, Z. Chen, F. Wu, G. Chen, Energy efficient algorithms for k-sink minimum movement target coverage problem in mobile sensor network, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 25 (6) (2017) 3616–3627.
- [21] T. Achterberg, Scip: solving constraint integer programs, *Mathematical Programming Computation* 1 (1) (2009).
- [22] N. T. Hanh, P. Le Nguyen, P. T. Tuyen, H. T. T. Binh, E. Kurniawan, Y. Ji, Node placement for target coverage and network connectivity in wsns with multiple sinks, in: 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Net-working Conference (CCNC), IEEE, 2018.
- [23] N. T. Hanh, H. T. T. Binh, N. X. Hoai, M. S. Palaniswami, An efficient geneticalgorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks, *Information Sciences* 488 (2019).
- [24] A. Jagtap, Minimizing sensor movement in target coverage problem: A hybrid approach using voronoi partition and swarm intelligence, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* 65 (2) (2017).
- [25] N. T. Hanh, P. T. H. Hanh, H. T. T. Binh, N. D. Nghia, Heuristic algorithm for target coverage with connectivity fault-tolerance problem in wireless sensor networks, in: 2016 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI), IEEE, 2016.
- [26] H. El Alami, A. Najid, Ech: An enhanced clustering hierarchy approach to maximize lifetime of wireless sensor networks, *IEEE Access* 7 (2019) 107142–107153.
- [27] J. Zhong, Z. Huang, L. Feng, W. Du, Y. Li, A hyper-heuristic framework for lifetime maximization in wireless sensor networks with a mobile sink, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 7 (1) (2019).
- [28] Bang Wang, et al. “Coverage Control in Sensor Networks”. Springer London, (2010).

- [29] Nguyen Thi Hanh, et al. “An efficient genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks”. In: Information Sciences 488 (2019).
- [30] D Arivudainambi, et al. “Energy efficient sensor scheduling for Q-coverage problem”. In: 2017 IEEE 22nd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). IEEE, (2017).
- [31] Nguyen Thi Hanh, et al. “Node placement optimization under Q-Coverage and Q-Connectivity constraints in wireless sensor networks”. In: Journal of Network and Computer Applications, (2023).
- [32] J. Guo, H. Jafarkhani, Movement-efficient sensor deployment in wireless sensor networks with limited communication range, IEEE Transactions on Wireless Communications 18 (7) (2019) 3469–3484.
- [33] F. El-Moukaddem, E. Torng, G. Xing, Mobile relay configuration in dataintensive wireless sensor networks, IEEE Transactions on Mobile Computing 12 (2) (2013) 261–273.