

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**

Chuyên ngành: Hệ thống thông tin

Mã số: 8.48.01.04

TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

HÀ NỘI – NĂM 2025

Đề án tốt nghiệp được hoàn thành tại:

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS. Lê Nhật Thăng, TS. Nguyễn Xuân
Thăng

Phản biện 1: TS. Nguyễn Văn Vinh

Phản biện 2: PGS. TS. Trần Đăng Hưng

Đề án tốt nghiệp được bảo vệ trước Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp Thạc
sĩ tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Vào lúc: 8 giờ 25 ngày 19 tháng 07 năm 2025

Có thể tìm hiểu đề án tốt nghiệp tại:

- Thư viện của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.

I. MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa 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.

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 nhiều 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 giám sát đối tượng sử dụng mạng cảm biến không dây di động (MWSN), việc đảm bảo rằng tất cả các đối tượng được bao phủ bởi ít nhất một cảm biến tại mọi thời điểm là điều kiện tiên quyết để duy trì "sự sống" của mạng. Nếu có bất kỳ đối tượng nào không được giám sát, mạng được xem là đã kết thúc thời gian sống. Các nút cảm biến trong MWSN có khả năng di chuyển, từ đó tạo điều kiện kéo dài tuổi thọ mạng bằng cách thay thế các nút đã cạn kiệt năng lượng.

Bài toán bao phủ đối tượng trong MWSN đã được chứng minh là NP-Khó, đòi hỏi xác định số lượng cảm biến tối thiểu cũng như chiến lược triển khai sao cho đồng thời đảm bảo bao phủ và kết nối. Tương tự, bài toán tối đa hóa thời gian sống của mạng cảm biến cũng thuộc lớp NP-Khó, trong đó nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc bố trí các cảm biến một cách hiệu quả hoặc thiết kế giải thuật lập lịch nhằm tiết kiệm năng lượng, đặc biệt khi các cảm biến gần trạm cơ sở có xu hướng tiêu hao năng lượng nhanh hơn.

Đề án nghiên cứu đặt ra bài toán triển khai các cảm biến trong MWSN với mục tiêu đảm bảo bao phủ tất cả đối tượng tại mọi thời điểm và đồng thời tối đa hóa thời gian sống của mạng, có tính đến yếu tố di động của cảm biến. Các cảm biến trong mô hình được giả định đồng nhất về năng lượng, phạm vi cảm biến, bán kính giao tiếp và khả năng di chuyển. Bài toán yêu cầu xác định các vị trí đích mà cảm biến cần di chuyển đến, cùng với thời hạn quy định thời gian cảm biến có mặt tại các vị trí đó, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc về bao phủ và tuổi thọ mạng.

Do tính chất NP-Khó, hai nhóm phương pháp giải được xem xét là giải đúng (như quy hoạch động, quay lui, nói lỏng ràng buộc) và giải gần đúng (như mô phỏng luyện kim, giải thuật di truyền, tìm kiếm tabu). Trong đó, giải đúng đảm bảo tối ưu nhưng chỉ khả thi với bộ dữ liệu nhỏ, còn giải gần đúng phù hợp với bài toán lớn nhờ thời gian xử lý hợp lý.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu xoay quanh hai bài toán chính là bao phủ đối tượng và kéo dài tuổi thọ mạng, phần lớn các công trình vẫn xem xét tách biệt từng bài toán và chưa

tích hợp yếu tố di động của cảm biến. Do vậy, đề án này có tính cấp thiết, mang ý nghĩa khoa học rõ nét và có tiềm năng ứng dụng cao trong các hệ thống giám sát thực tế.

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

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

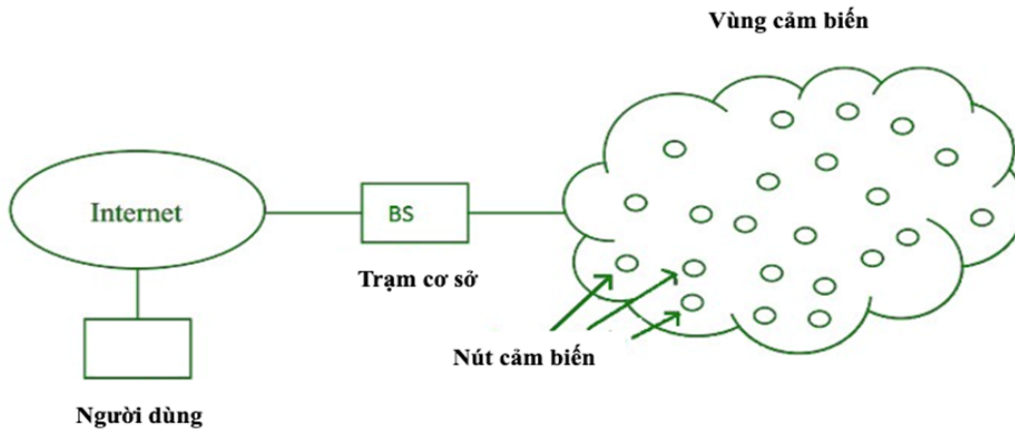
Có nhiều cách để phân loại các mạng cảm biến không dây khác nhau: phân loại dựa trên ứng dụng, cấu trúc mạng, cách thức triển khai, mức tiêu thụ năng lượng, cách thức giao tiếp,.... Dựa trên phương thức truyền dữ liệu, các WSN có thể chia thành một số loại như sau: i) Mạng Single-Hop; ii) Mạng Multi-Hop.

Dựa trên bảo mật, các WSN có thể được phân loại như sau: i) WSN an toàn; ii) WSN không an toàn; iii) WSN bảo mật nhẹ; iv) WSN bảo mật bằng phần cứng; v) WSN với bảo vệ dữ liệu phân tán; vi) WSN với hệ thống phát hiện xâm nhập.

Dựa trên môi trường triển khai, các WSN có thể được phân loại như sau: i) WSN trong nhà; ii) WSN ngoài trời; iii) WSN dưới nước; iv) WSN trong môi trường khắc nghiệt; v) WSN trong không gian.

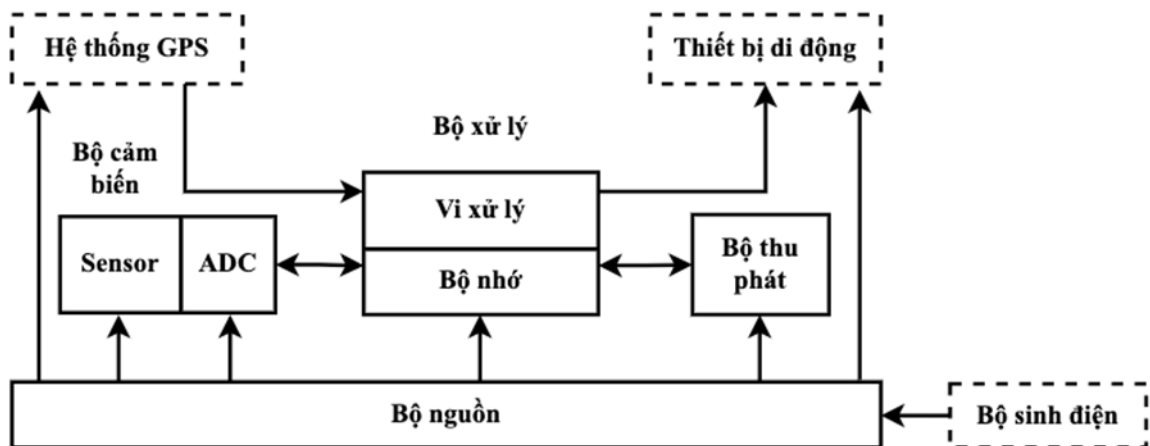
1.1.3 Cấu trúc

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

Một nút cảm biến được tạo thành từ bốn thành phần cơ bản gồm: bộ phận cảm biến, bộ xử lý, bộ thu phát vô tuyến và nguồn cấp. Tùy theo ứng dụng cụ thể, nút cảm biến còn có thể có các thành phần bổ sung như hệ thống định vị GPS, bộ phát điện và thiết bị di động. Hình 2 mô tả cấu trúc cơ bản của một nút cảm biến không dây.



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

1.1.4 Ứng dụng

WSN được sử dụng rất nhiều trong các vấn đề thực tế như: thành phố thông minh, giao thông thông minh, nhà thông minh, quan sát môi trường, quân sự, công nghiệp, ... Một số ứng dụng của WSN bao gồm: i) Ứng dụng trong quân sự; ii) Ứng dụng trong môi trường; iii) Ứng dụng trong nhà thông minh; iv) Ứng dụng trong công nghiệp; v) Ứng dụng trong y tế

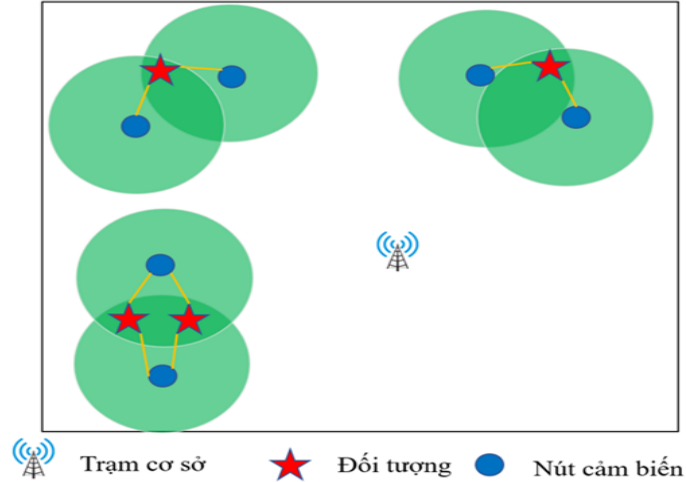
1.1.5. Vấn đề của mạng cảm biến không dây

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. Sau đây là một số thách thức của WSN: i)

Vấn đề về mạng quy mô lớn; ii) Khả năng chịu lỗi; iii) Độ chính xác và lưu lượng dữ liệu; iv) Vấn đề năng lượng.

1.2. Vấn đề bao phủ và kết nối trong mạng cảm biến không dây

1.2.1. Vấn đề bao phủ



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

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 đối tượng trong vùng triển khai 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. Hình 3 là một ví dụ đơn giản về vấn đề K-bao phủ đối tượng trong mạng cảm biến không dây với $K=2$. Theo đó mỗi đối tượng (ký hiệu bởi dấu sao) cần được bao phủ bởi ít nhất hai nút cảm biến.

1.2.2. Thời gian sống của mạng cảm biến không dây

Thời gian sống trong mạng cảm biến không dây được định nghĩa là khoảng thời gian mà hệ thống mạng có khả năng duy trì hoạt động bình thường và đáp ứng các yêu cầu chức năng như bao phủ không gian, truyền dữ liệu và giám sát trước khi năng lượng của các nút cảm biến bị cạn kiệt hoặc mạng không còn thỏa mãn các tiêu chí nhiệm vụ đã định trước. Khái niệm này có tầm quan trọng đặc biệt do hạn chế về nguồn năng lượng của các nút cảm biến và yêu cầu về độ tin cậy, tính liên tục của quá trình giám sát trong các ứng dụng như giám sát môi trường, quốc phòng, nông nghiệp thông minh và y tế.

Yếu tố Ảnh hưởng: Thời gian sống chịu tác động của nhiều yếu tố phức hợp, trong đó tiêu hao năng lượng đóng vai trò quan trọng nhất bao gồm năng lượng cho các hoạt động cảm nhận, xử lý dữ liệu và đặc biệt là truyền thông không dây. Khoảng cách truyền, tần suất

truyền và số lượng nút tham gia chuyển tiếp tác động trực tiếp đến mức độ tiêu hao năng lượng. Bên cạnh đó, các điều kiện môi trường triển khai khắc nghiệt về nhiệt độ, độ ẩm, địa hình có thể làm suy giảm hiệu suất của cảm biến, pin và hệ thống giao tiếp. Topology mạng bao gồm mật độ nút và bố cục mạng cũng quyết định đến sự cân bằng giữa độ bao phủ không gian và tiêu hao năng lượng, từ đó ảnh hưởng đến thời gian sống tổng thể của hệ thống.

Tiêu chí Đánh giá: Các tiêu chí đánh giá thời gian sống được phân loại theo mức độ chi tiết khác nhau. Tiêu chí cơ bản nhất là thời điểm nút đầu tiên ngừng hoạt động, đánh dấu sự bắt đầu suy giảm tính năng mạng. Tiêu chí chi tiết hơn là thời gian đến khi một tỷ lệ phần trăm nút nhất định ngừng hoạt động, cho phép đánh giá quá trình suy tàn dần của mạng. Quan trọng nhất là tiêu chí về thời gian duy trì được mức độ bao phủ hoặc kết nối tối thiểu để đáp ứng yêu cầu nhiệm vụ, tập trung vào chức năng thực tế của mạng thay vì chỉ đếm số nút bị lỗi.

Phương pháp Tối ưu hóa: Các phương pháp kéo dài thời gian sống được triển khai ở nhiều tầng kiến trúc khác nhau. Ví dụ ở tầng vật lý, tầng giao thức...

1.3. Bài toán tối ưu và giải thuật Heuristic

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

Bài toán tối ưu là bài toán mà lời giải cần tìm là một giá trị hoặc một cách thức tốt nhất để giải quyết một vấn đề. Các bài toán tối ưu thường đòi hỏi tìm ra giá trị lớn nhất hoặc nhỏ nhất của một hàm mục tiêu, hoặc tìm ra một tập hợp các giá trị nào đó mà giá trị của hàm mục tiêu được tối ưu hóa. Một số bài toán tối ưu bao gồm: i) Tối ưu thời gian sống của mạng; ii) Tối ưu định tuyến và truyền thông; iii) Tối ưu bao phủ và kết nối; iv) Lập lịch hoạt động và điều khiển năng lượng; v) Xử lý và tổng hợp dữ liệu; vi) Định vị và định danh trong mạng.

1.3.2. Giải thuật Heuristic

Giải thuật heuristic là giải thuật được thiết kế để giải quyết vấn đề theo cách nhanh hơn và hiệu quả hơn so với các phương pháp truyền thống bằng cách đánh đổi giữa tính tối ưu, độ chính xác hoặc tính đầy đủ với tốc độ tính toán. Một số nguyên lý cơ sở thường được áp dụng để xây dựng giải thuật heuristic bao gồm: i) Nguyên lý vét cạn thông minh; ii) Nguyên lý tham lam; iii) Nguyên lý thử tự; iv) Hàm heuristic.

1.4. Các nghiên cứu liên quan

Các nghiên cứu hiện tại về mạng cảm biến không dây di động (MWSN) tập trung chủ yếu vào hai hướng tiếp cận chính: tối đa hóa thời gian tồn tại của mạng và giải quyết bài toán bao phủ mục tiêu.

Nhiều nghiên cứu đã phát triển các giải thuật heuristic nhằm tìm số lượng nút cảm biến tối thiểu cần triển khai trong khu vực xác định, đồng thời đáp ứng yêu cầu về phạm vi phủ sóng và kết nối mạng. Các giải thuật này cũng tập trung vào việc duy trì khả năng chịu lỗi của mạng ngay cả khi có nút cảm biến bị hỏng. Bài toán đặt vị trí nút để đảm bảo vùng phủ sóng mục tiêu đã được chứng minh là NP-khó, dẫn đến việc phát triển các giải thuật heuristic để đưa ra lời giải xấp xỉ.

Hướng nghiên cứu thứ hai tập trung vào vấn đề thời gian sống của mạng cảm biến không dây. Bài toán đặt cảm biến tối thiểu với giới hạn tuổi thọ (MSPRL) đã được chứng minh có tính NP-hard và các nghiên cứu đã xác định được giới hạn dưới của số lượng cảm biến cần thiết. Các phương pháp tối ưu đa mục tiêu như giải thuật đàn cá voi (MOWOA) đã được áp dụng để xác định số trạm thu phát tối thiểu, giúp giảm tiêu thụ năng lượng và kéo dài thời gian sống cho mạng cảm biến quy mô lớn.

Trong MWSN, quá trình di chuyển của các nút cảm biến di động tiêu hao nhiều năng lượng và là nguyên nhân chính khiến các nút cạn kiệt năng lượng. Bài toán triển khai cảm biến di động (MSD) được phát triển để tối ưu tổng khoảng cách di chuyển, bao gồm hai bài toán con: bao phủ đối tượng (TCOV) và đảm bảo kết nối (NCON). Các giải thuật heuristic dựa trên phân vùng Voronoi và Cây Steiner nhỏ nhất đã được đề xuất để giải quyết các bài toán này.

Phân tích các nghiên cứu hiện tại cho thấy tồn tại hai khoảng trống chính: một số nghiên cứu chỉ quan tâm đến bao phủ đối tượng mà chưa giải quyết vấn đề thời gian sống mạng, trong khi một số nghiên cứu khác tuy quan tâm đến cả hai vấn đề nhưng không xem xét đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến mức tiêu thụ năng lượng, đặc biệt là sự kết hợp giữa năng lượng tiêu hao trong quá trình di chuyển, cảm biến và truyền tin.

Từ những phân tích trên, nghiên cứu về bài toán tối đa thời gian sống đảm bảo bao phủ đối tượng trong mạng cảm biến không dây di động (LMTCP) với việc xem xét đồng thời các quá trình di chuyển, cảm biến và truyền tin của các cảm biến di động là cần thiết và có ý nghĩa khoa học.

CHƯƠNG 2 – MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ GIẢI THUẬT ĐỀ XUẤT

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. Có 4 mô hình cảm biến thông dụng, đó là: i) Mô hình quạt nhị phân; ii) Mô hình đĩa nhị phân; iii) Mô hình suy giảm; iv) Mô hình suy giảm rút gọn.

2.1.2. Mô hình kết nối của cảm biến

Một số mô hình thông dụng bao gồm: i) Mô hình đĩa nhị phân; ii) Mô hình suy hao đường truyền; iii) Mô hình đĩa xác suất.

Trong đề án này, tác giả lựa chọn sử dụng mô hình kết nối đĩa nhị phân để giảm bớt khối lượng tính toán khi thực hiện mô phỏng các giải thuật trên mạng WSN.

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.

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.

2.2.2. Mô hình bao phủ và mô hình năng lượng

Mô hình Bao phủ: Nghiên cứu sử dụng mô hình đĩa nhị phân để mô tả khả năng bao phủ. Đối tượng được bao phủ khi có ít nhất một cảm biến hoạt động trong phạm vi bán kính cảm

biến. Thời gian sống mạng được định nghĩa là thời điểm đầu tiên có một đối tượng không còn được bao phủ, tính bằng giá trị nhỏ nhất của thời gian sống các đối tượng riêng lẻ.

Mô hình Năng lượng: Mô hình năng lượng bao gồm hai thành phần chính:

Năng lượng di chuyển: Tỷ lệ thuận với khoảng cách di chuyển

Năng lượng hoạt động: Tiêu thụ cố định e đơn vị/thời gian khi cảm biến ở trạng thái hoạt động. Thời gian hoạt động dự kiến của cảm biến phụ thuộc vào năng lượng còn lại sau khi trừ đi năng lượng tiêu hao cho di chuyển.

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

Mô hình bài toán

Đầu vào:

- Tập m đối tượng T được triển khai trên miền quan tâm ($W \times H$);
- 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.

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

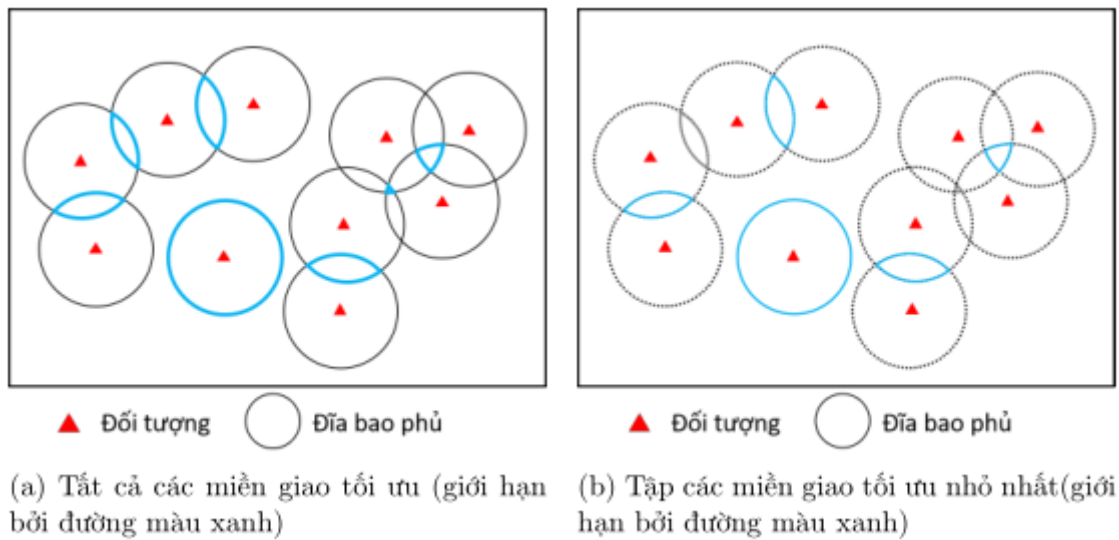
Trong đề án này, tác giả đề xuất một giải thuật heuristics, gọi là Lifetime Effective Movement Algorithm (LEMA), nhằm tối ưu hóa thời gian tồn tại của mạng cảm biến không dây di động. Động cơ chính thúc đẩy sự ra đời của LEMA là giảm thiểu số lượng cảm biến

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: giai đoạn chọn vùng phủ và giai đoạn lập lịch di chuyển.

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 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, $SC(r_k) \cap SC(r_h) = \emptyset \forall h \neq k$.

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

Trong quá trình tối ưu hóa di chuyển cảm biến trong mạng cảm biến không dây di động (MWSN), việc xác định vị trí dừng tối ưu khi cảm biến tiến đến một miền giao là yếu tố then chốt nhằm rút ngắn quãng đường di chuyển và tiết kiệm năng lượng. Cụ thể, vị trí lý tưởng nên nằm trên biên của miền giao, và việc tính khoảng cách tối thiểu từ cảm biến đến các cung giao – những đường cong tạo nên ranh giới của miền – trở nên cần thiết. Trong trường hợp cung giao nằm trên đường tròn bao phủ một cảm biến, nếu cung đó cắt đoạn thẳng nối cảm biến đến trung tâm mục tiêu, thì điểm cắt là điểm gần nhất. Nếu không, điểm gần nhất là một trong hai điểm đầu của cung. Hình minh họa kèm theo trong tài liệu thể hiện rõ cách xác định điểm gần nhất trên các cung giao, từ đó giúp xác lập vị trí dừng tối ưu.

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

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

Trong phương pháp IMRL, cảm biến được coi là tự do nếu chưa được phân công cho bất kỳ vùng giao nào. Một cảm biến được xem là phù hợp với một vùng cụ thể nếu nó vừa ở trạng thái tự do và có khả năng đóng góp năng lượng cho vùng đó. Trường hợp không tìm thấy cảm biến phù hợp, có thể thực hiện cơ chế thay thế cảm biến – trong đó một cảm biến tự do sẽ thay thế cảm biến đang hoạt động ở một vùng khác, từ đó giải phóng cảm biến đó để sử dụng tại vùng ưu tiên. Cơ chế thay thế được minh họa qua một ví dụ sử dụng sáu cảm biến và ba vùng giao, từ đó tối ưu lại chiến lược phân bổ cảm biến nhằm tăng thời gian sống mạng từ 1 lên 2 đơn vị thời gian.

Giải thuật này được xây dựng trên khái niệm “đường thay thế”, được mô hình hóa thông qua một đồ thị có hướng đơn $G = (V, \epsilon)$, trong đó mỗi đỉnh đại diện cho một cảm biến,

và một cung nối giữa hai đỉnh được hình thành khi việc thay thế giữa hai cảm biến không làm giảm thời gian sống của mạng. Một đường thay thế hợp lệ cần thỏa mãn ba điều kiện: cảm biến đầu tiên phải ở trạng thái tự do, cảm biến cuối cùng chưa được dùng để bao phủ vùng sống ngắn nhất, và không có hai cảm biến trong đường thay thế bao phủ cùng một vùng.

Việc thực hiện thay thế theo đường hợp lệ giúp nâng cao hiệu quả giám sát mà không làm suy giảm chất lượng mạng. Quá trình thay thế đảm bảo rằng mỗi vùng chỉ có tối đa một thay đổi trong tập cảm biến giám sát, nhằm tránh làm phát sinh một vùng mới với thời gian sống thấp hơn. Giải thuật IMRL được triển khai qua sáu bước: (1) xác định vùng có thời gian sống thấp nhất, (2) xây dựng đồ thị thay thế, (3) xác định các đỉnh tiềm năng để kết thúc đường thay thế, (4) tìm đường thay thế hợp lệ, (5) thực hiện thay thế và điều phối cảm biến, và (6) lặp lại quá trình cho đến khi không còn đường thay thế khả thi.

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

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

$G \leftarrow (V, \varepsilon) \setminus \setminus$ 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** $\setminus \setminus$ duyệt từng cảm biến tiềm năng

$\pi = (v_{\pi_1}, v_{\pi_2}, \dots, v_{\pi_q}) \leftarrow FINDPATH(G, v_j) \setminus \setminus$ tìm đường đi từ vị trí cảm biến hiện tại tới v_j

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

break

$SC(r_x).add(S_{\pi_q}) \setminus \setminus$ Thêm cảm biến cuối đường đi vào vùng r_x

for $i \leftarrow 1$ **to** $q - 1$ **do** $\setminus \setminus$ Dịch chuyển cảm biến theo đường đi

$r = RC(s_{\pi_{i+1}}) \setminus \setminus$ Xác định vùng đang sử dụng cảm biến ở bước tiếp theo

$SC(r).remove(s_{\pi_{i+1}}) \setminus \setminus$ Loại cảm biến khỏi vùng cũ

$SC(r).add(s_{\pi_i}) \setminus \setminus$ 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 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 của mạng cảm biến không dây. Một số ứng dụng tiêu biểu:

i) Giám sát môi trường; ii) An ninh và quốc phòng; iii) Quản lý tài nguyên đô thị.

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 $O(m)$. Tiếp theo, quá trình xây dựng đồ thị G ở bước 2 cần thực hiện $O(n^2)$ phép tính. 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 $O(n^2)$. Do một đường thay thế có độ dài tối đa là n , 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 $m \lceil \frac{n+E}{e} \rceil$ lần. Do đó, độ phức tạp của IMRL là $O(\max(m, n^2)m \lceil \frac{n+E}{e} \rceil)$.

CHƯƠNG 3: THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.1 Kịch bản và dữ liệu thử nghiệm

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.

Nghiên cứu thử 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.

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. Tất cả các bộ dữ liệu này đều được thực hiện trong cùng một miền quan tâm A có kích thước 1000m × 1000m, 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. Tất cả các thí nghiệm đều được thực hiện trong cùng một miền quan tâm có kích thước 1000m × 1000m, 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. Các bộ dữ liệu được triển khai trên miền quan tâm A (1000 m × 1000 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.

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. Các bộ dữ liệu được triển khai trên miền quan tâm A (1000 m × 1000 m) với số lượng đối tượng và bán kính cảm biến không thay đổi trong khi số 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. Tất cả các thí nghiệm đều được thực hiện trong một miền quan tâm A có kích thước đồng nhất $1000m \times 1000m$, 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.

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 Intel Core i5, RAM 16GB, SSD 256GB.

3.2 Kết quả thực 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.

Tổng hợp các kết quả 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.

3.3 Đánh giá giải thuật

3.3.1. So sánh với giải thuật chính xác

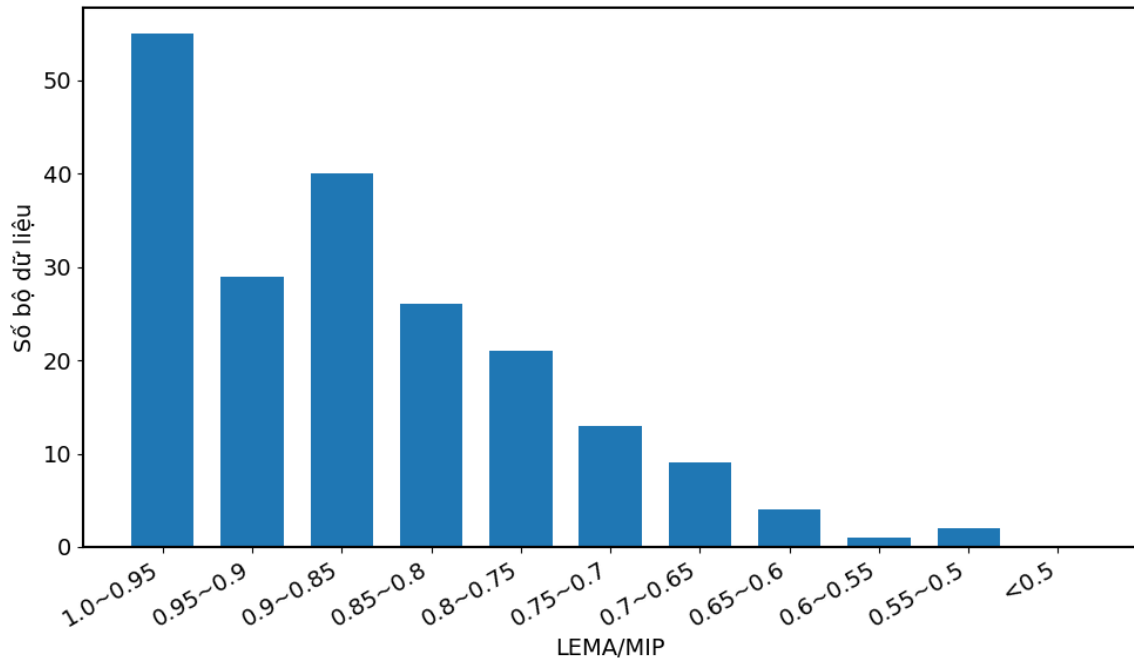
Để đánh giá tính khả thi và hiệu quả của giải thuật LEMA, chúng tôi đã tiến hành so sánh định lượng với giải pháp tối ưu thu được từ phương pháp chính xác. Mặc dù giai đoạn thứ hai của bài toán LMTCP có thể được giải quyết bằng các phương pháp quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MIP), song những phương 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.

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
S1-1	38.25	43.52	87.88%
S1-2	33.45	38.11	87.79%
S1-3	29.13	32.95	88.41%
S1-4	26.21	29.93	87.58%
S1-5	23.23	26.75	86.84%
S1-6	20.4	24.42	83.55%
S1-7	18.76	22.48	83.46%

(a) Kịch bản 1

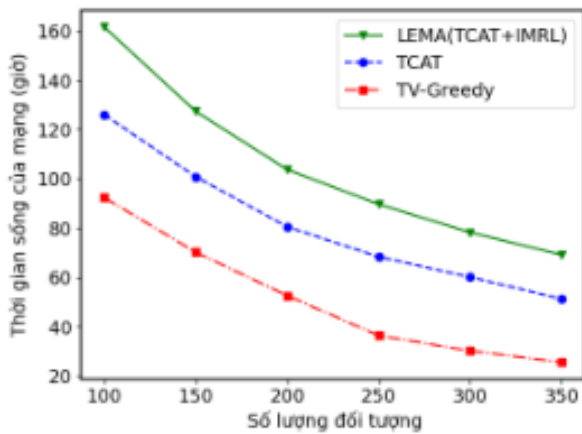
Bộ dữ liệu	Thời gian sống (LEMA)	Thời gian sống (SCIP)	Tỷ lệ LEMA/SCIP
S2-1	12.41	15.11	82.14%
S2-2	16.27	19.34	84.13%
S2-3	19.59	23.21	84.41%
S2-4	23.23	26.75	86.84%
S2-5	26.79	30.51	87.80%
S2-6	29.37	33.52	87.59%
S2-7	32.21	36.89	87.31%

(b) Kịch bản 2

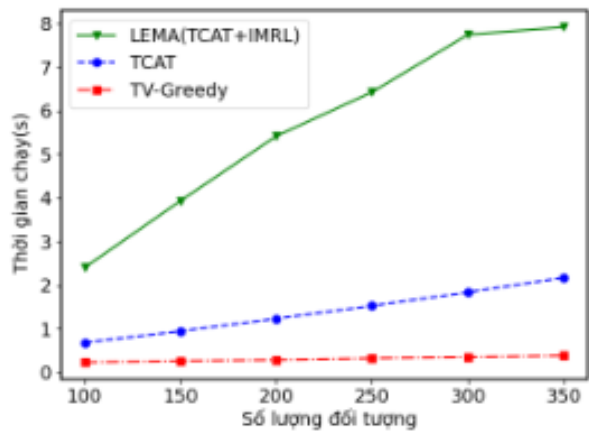
3.3.2. So sánh với giải thuật tham lam

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. 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.



(a) Chất lượng lời giải

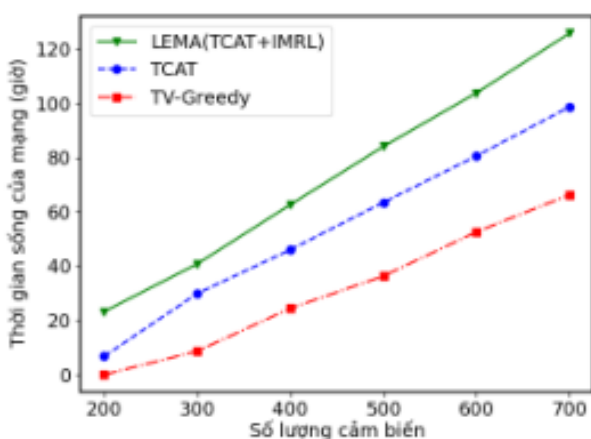


(b) Thời gian chạy

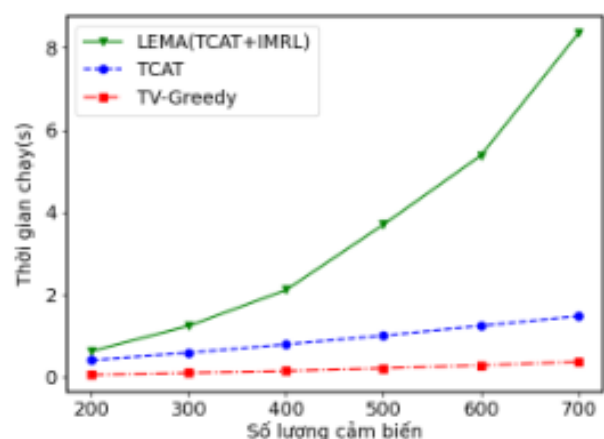
Hình 3.5. Ảnh hưởng của số lượng đối tượng đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy

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.



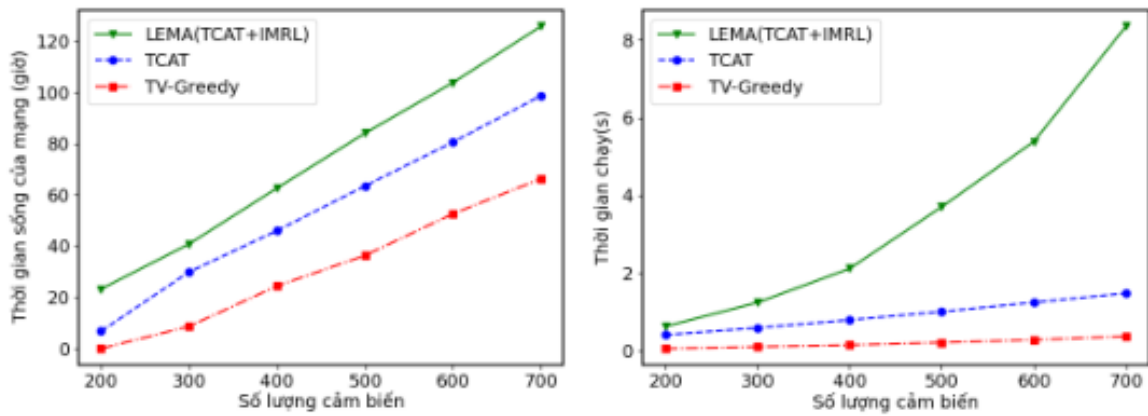
(a) Chất lượng lời giải



(b) Thời gian chạy

Hình 0.1. 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 hợp 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 0.2. Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến chất lượng lời giải và thời gian chạy của LEMA, TCAT và TV-Greedy

KẾT LUẬN

Nghiên cứu tập trung vào bài toán triển khai mạng cảm biến không dây di động (MWSN) nhằm đồng thời đảm bảo bao phủ các mục tiêu giám sát và tối đa hóa thời gian sống của mạng – một thách thức quan trọng trong lĩnh vực mạng cảm biến do hạn chế về năng lượng của các nút cảm biến. Đề án đề xuất một giải pháp heuristic mới, khai thác khả năng di chuyển của cảm biến để tối ưu hóa vị trí triển khai và lịch di chuyển, từ đó tiết kiệm năng lượng và kéo dài tuổi thọ mạng.

Giải thuật được thiết kế gồm hai giai đoạn: (1) xác định các vị trí chiến lược cần bao phủ và (2) lập lịch di chuyển hợp lý nhằm duy trì bao phủ liên tục với số lượng cảm biến hoạt động tối thiểu. 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. Kết quả mô phỏng trên 32 bộ dữ liệu thuộc 5 kịch bản thử nghiệm cho thấy giải pháp đạt hiệu suất vượt trội so với giải thuật tham lam, cả về thời gian sống mạng và số lượng cảm biến cần sử dụng.

Tuy đạt được kết quả tích cực, nghiên cứu vẫn còn hạn chế như chưa xét đến yếu tố địa hình, điều kiện môi trường thời gian thực và yêu cầu QoS. Trong tương lai, hướng phát triển sẽ tập trung mở rộng mô hình cho mạng cảm biến không đồng nhất và tích hợp các yếu tố môi trường thực tế nhằm nâng cao tính khả thi và hiệu quả ứng dụng của giải pháp trong thực tiễn.