



Danh sách nội dung có sẵn tại [ScienceDirect](#)

Tính toán mềm ứng dụng

trang chủ tạp chí: www.elsevier.com/locate/asoc



Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu dựa trên phân rã để cân bằng mức tiêu thụ năng lượng của mạng cảm biến không dây

Nguyễn Thị Tâm ^{a,b}, Trần Huy Hùng ^b, Huỳnh Thị Thanh Bình ^b, Lê Trọng Vinh ^a

^a Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Việt Nam, Việt Nam
^b Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Việt Nam

thông tin bài viết

Lịch sử bài viết:
Nhận ngày 5 tháng 8 năm 2020
Nhận được ở dạng sửa đổi ngày 4 tháng 3 năm 2021
Chấp nhận ngày 25 tháng 3 năm 2021
Có sẵn trực tuyến ngày 8 tháng 4 năm 2021

Từ khóa:
Mạng cảm biến không dây
tuổi thọ mạng
Thuật toán tiến hóa đa mục tiêu

trừu tượng

Mạng cảm biến không dây bao gồm nhiều nút cảm biến với tài nguyên và khả năng tính toán hạn chế. Vì vậy, quản lý mức tiêu thụ năng lượng để kéo dài tuổi thọ của mạng là một vấn đề quan trọng. Một số phương pháp đã được đề xuất để kéo dài thời gian tồn tại của mạng, một trong số đó liên quan đến việc triển khai các nút chuyển tiếp để truyền dữ liệu từ các cảm biến đến trạm gốc. Tuy nhiên, số lượng nút chuyển tiếp hạn chế là một thách thức thường bị bỏ qua. Bài báo này xem xét vấn đề tối ưu hóa thời gian tồn tại của mạng và số lượng nút chuyển tiếp trong địa hình ba chiều. Một thuật toán mới gọi là MOEA/D-LS được đề xuất với mục đích đạt được sự đánh đổi tốt hơn giữa hai mục tiêu. Thuật toán này là sự kết hợp giữa thuật toán tiến hóa đa mục tiêu dựa trên phân tách và tìm kiếm cục bộ đặc biệt để tối ưu hóa các bài toán con của thuật toán trừu tượng. Kết quả mô phỏng trên bộ dữ liệu 3D cho thấy thuật toán đề xuất có hiệu suất tốt hơn đáng kể so với các thuật toán hiện có trên tất cả các chỉ số đo được.

© 2021 Elsevier BV Bảo lưu mọi quyền.

1. Giới thiệu

Mạng cảm biến không dây (WSN) là mạng tự tổ chức bao gồm các nút cảm biến có khả năng cảm nhận, xử lý và truyền thông không dây. Các nút cảm biến này thường được triển khai trong một khu vực quan tâm và được sử dụng rộng rãi để thực hiện các nhiệm vụ theo dõi và giám sát [1,2]. Tùy thuộc vào ứng dụng, WSN có thể được thiết kế để tối ưu hóa các khía cạnh khác nhau. Một loạt các khảo sát đã được dành riêng cho các lĩnh vực nghiên cứu khác nhau trong WSN, chẳng hạn như triển khai nút, định tuyến [3,4], nội địa hóa [5], đảm bảo QoS [6], ảo hóa mạng [7], thu thập dữ liệu [8], hiệu quả năng lượng [9] và kiểm soát tắc nghẽn [10].

Thời gian tồn tại của WSN là thời gian từ khi khởi tạo mạng đến thời điểm mạng được coi là không hoạt động. Bởi vì các nút cảm biến có nguồn điện hạn chế và có thể khó sạc lại sau khi triển khai, nên cần có một cơ chế tiết kiệm năng lượng để giảm mức tiêu thụ điện năng trong khi đáp ứng yêu cầu về vùng phủ sóng. Tuổi thọ có thể được tối ưu hóa gián tiếp thông qua mức tiêu thụ năng lượng, do đó phụ thuộc vào nhiều yếu tố, chẳng hạn như tốc độ nhận và truyền, tốc độ cảm nhận dữ liệu và vị trí của các nút. Bài toán bố trí mạng cảm biến không dây nhằm xác định vị trí của các nút và khoảng cách giữa các nút

cho các nút cảm biến để đạt được vùng phủ sóng, kết nối và hiệu quả năng lượng.

Có ba loại nút trong WSN: nút cảm biến, trạm gốc (sink) và nút chuyển tiếp. Một hướng nghiên cứu về mạng cảm biến đã tập trung vào các phương pháp di chuyển trạm gốc để tối đa hóa thời gian tồn tại của mạng [11-14]. Cách tiếp cận này dựa trên quan sát rằng các trạm cơ sở cố định thiết lập các vị trí trung tâm nơi tập trung các hoạt động truyền thông. Điều này có thể dẫn đến cạn kiệt pin cảm biến ở gần trạm gốc. Do đó, việc di dời trạm gốc có thể giúp phân bổ mức tiêu thụ năng lượng đồng đều hơn. Một loại nghiên cứu khác đã tập trung vào vị trí của các nút cảm biến trước khi triển khai, với mục đích đảm bảo độ bao phủ cao cũng như khả năng phục hồi khi thất bại [15,16]. Loại cuối cùng là tận dụng giao tiếp đa chặng để giảm mức tiêu thụ năng lượng tổng thể. Một nhược điểm lớn của phương pháp này là một số nút có thể bị quá tải và tiêu hao năng lượng nhanh hơn. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để giải quyết vấn đề này, trong đó một cách tiếp cận phổ biến là triển khai các nút chuyển tiếp đặc biệt để phân tán tải của chúng [17-21].

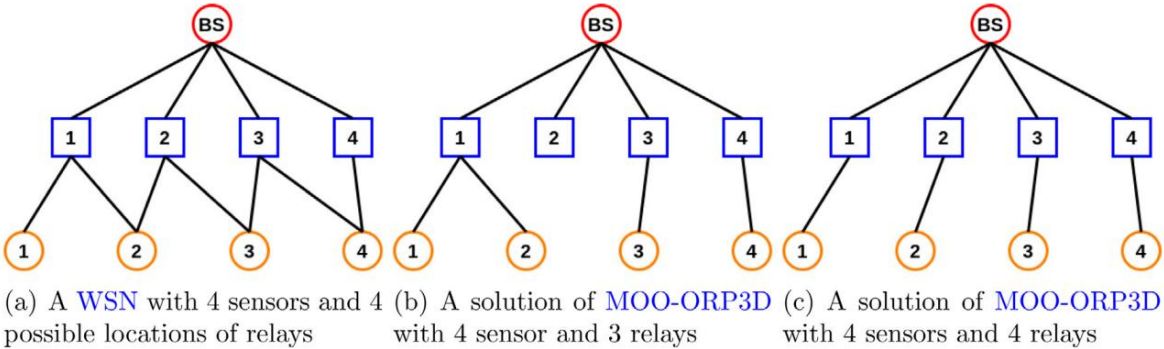
Trong bài báo này, thay vì giải quyết các vấn đề mục tiêu đơn lẻ với các ràng buộc khác nhau được tìm thấy trong các công trình trước đó, chúng tôi xây dựng một bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu để đạt được sự đánh đổi tốt hơn giữa các mục tiêu.

Tổng quan về những đóng góp của chúng tôi như sau:

- Chúng tôi xây dựng bài toán tuổi thọ mạng tối đa trong địa hình ba chiều dưới dạng bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu (MOP), ký hiệu là MOO-ORP3D. Mục tiêu đầu tiên

Đồng tác giả.
Địa chỉ email: tamnt@vnu.edu.vn (NT Tâm),
tranhuylung1998@gmail.com (TH Hùng), binhh@soict.hust.edu.vn (HTT Bình), vinhl@vnu.edu.vn (LT Vinh).

NT Tâm, TH Hùng, HTT Bình et al.	Tin học mềm ứng dụng 107 (2021) 107365
<p>là giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng tối đa của nút để kéo dài thời gian tồn tại của mạng. Mục tiêu thứ hai là giảm thiểu số lượng nút chuyển tiếp được sử dụng. • Lấy cảm hứng từ những lợi ích của</p> <p>khung MOEA/D, một thuật toán mới có tên là MOEA/D-LS được áp dụng cho bài toán MOO-ORP3D. Điểm mới của MOEA/D-LS được đề xuất có thể được tóm tắt như sau: (i) theo các đặc điểm cụ thể của vấn đề, các phương pháp mã hóa và giải mã được phát triển để thể hiện không gian giải pháp. Một số định nghĩa được đề xuất để thực hiện chuẩn hóa khách quan.</p>	<p>giải quyết RNP-FA. Các thuật toán được đề xuất của họ đã cố gắng tăng thời gian tồn tại của mạng bằng cách di chuyển lặp đi lặp lại các nút chuyển tiếp đến các vị trí phù hợp.</p> <p>Senel et al. [18] đã nghiên cứu về việc thiết lập các cấu trúc liên kết được kết nối trong WSN bằng cách triển khai các nút chuyển tiếp. Họ đã đề xuất các phương pháp phỏng đoán mới dựa trên tam giác cây bao trùm tối thiểu và tam giác Delaunay.</p>
<p>Một thủ tục tiết kiệm năng lượng được thiết kế để giảm tiêu thụ năng lượng. Phương pháp mã hóa của chúng tôi chứa thông tin cần thiết về vấn đề: các nút chuyển tiếp được sử dụng và kết nối giữa các nút chuyển tiếp và các nút cảm biến; (ii) các nhà khai thác genetic cũng tạo ra những đứa trẻ khả thi thừa hưởng hoàn toàn các đặc điểm của cha mẹ; (iii) mối quan hệ lân cận được phát triển để thực hiện chia sẻ thông tin giữa các bài toán con nhằm duy trì tính đa dạng của dân số; (iv) một phương pháp tìm kiếm cục bộ được đề xuất để giảm số lượng role được sử dụng và mức tiêu thụ năng lượng nút tối đa. • Thuật toán đề xuất được xác thực dựa trên các phương pháp hiện có bao gồm thuật toán đơn mục tiêu (FCLS [22]) và các MOEA khác: MOEA/D ban đầu [23], thuật toán di truyền sắp xếp không bị chi phối II (NSGA-II) [24], thuật toán tiến hóa Pareto cư ở độ (SPEA2) [25] và tiến hóa vi phân đa mục tiêu (MODE) [26] bằng cách sử dụng bốn thứ đo đo lường được sử dụng. Các thử nghiệm thống kê được thực hiện để xác định thêm những phát hiện của chúng tôi. Kết quả thử nghiệm cho thấy MOEA/D-LS hoạt động tốt nhất trong hầu hết các bộ dữ liệu. Ngoài ra, chúng tôi cũng phân tích tính chất hội tụ của MOEA/D-LS.</p>	<p>Trong [19,20,30], các tác giả đã xem xét vấn đề triển khai các nút chuyển tiếp để kéo dài tuổi thọ mạng của các mạng cảm biến ngâm không dây dưới các ràng buộc cân bằng tải. Họ đã đề xuất thuật toán hai pha [19,30] và thuật toán một pha [20] để giải quyết vấn đề này. Tuy nhiên, các công việc này gặp phải một số vấn đề, đó là: (i) các mô hình bài toán không xem xét ảnh hưởng của địa hình, (ii) chúng chỉ giải quyết thời gian tồn tại của mạng mà không tối ưu hóa số lượng nút chuyển tiếp được triển khai.</p> <p>Thiết kế WSN là một nhiệm vụ tương đối phức tạp, chịu ảnh hưởng đáng kể từ các tham số hiệu suất khác nhau, cụ thể là chất lượng, chi phí và hiệu quả của các ứng dụng cảm biến thực tế. Tham số quan trọng nhất thứ 0ng được chọn làm mục tiêu tối ưu hóa, trong khi phần còn lại được mô hình hóa dưới dạng các ràng buộc. Tuy nhiên, các ứng dụng thực tế có thể cần tối ưu hóa các tham số đồng thời.</p> <p>Do đó, tối ưu hóa đa mục tiêu cung cấp một sự thích ứng tự nhiên để giải quyết vấn đề. Rất thường xuyên, không có giải pháp đơn lẻ nào có thể tối ưu hóa tất cả các mục tiêu trong MOP vì các mục tiêu này xung đột với nhau. Do đó, các giải pháp tối ưu Pareto, đặc trưng cho sự đánh đổi tối ưu giữa các mục tiêu này, có lợi ích thực tế. Hầu hết các thuật toán liên quan đến MOP tìm kiếm một tập hợp các giải pháp tối ưu Pareto hoặc không chi phối này, còn được gọi là tập hiệu quả Pareto hoặc tập Pareto (PS) trong không gian hàm mục tiêu [31,32]. Từ những giải pháp này, người ra quyết định có thể chọn từ nhiều phương án thiết kế khác nhau.</p>
<p>Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau. Trong Phần 2, chúng tôi tóm tắt các công việc liên quan. Phần 3 mô tả MOO ORP3D. Khung của MOEA/D-LS được đề xuất cho MOO ORP3D được trình bày trong Phần 4. Chi tiết về các thử nghiệm của chúng tôi được báo cáo trong Phần 6. Cuối cùng, bài viết được kết luận trong Phần 7.</p>	<p>Ví dụ, Lanza-Gutierrez et al. [33] đã tìm cách triển khai hiệu quả các nút chuyển tiếp thu năng lượng trong WSN. Họ đã xem xét ba mục tiêu xung đột trong Vấn đề vị trí nút chuyển tiếp NP-hard (RNPP): chi phí năng lượng trung bình, vùng nhạy cảm trung bình và độ tin cậy của mạng. Sáu siêu dữ liệu đa mục tiêu khác nhau đã được đề xuất.</p>
<p>2. Công việc liên quan</p> <p>Phần này xem xét một số công trình trước đây về vị trí nút chuyển tiếp, bao gồm các bài toán đơn mục tiêu và các bài toán đa mục tiêu. Nhiều bài báo đã nghiên cứu vị trí nút chuyển tiếp mục tiêu đơn. Các tác giả trong [27] nhằm mục đích đặt một số nút chuyển tiếp tối thiểu vào mạng cảm biến không dây trong khi đáp ứng các yêu cầu về kết nối và khả năng sống sót. Họ đã đề xuất các thuật toán xấp xỉ để giải quyết vấn đề này. Trong [28], các tác giả đã xem xét một mô hình thực tế hơn có tính đến các ràng buộc vật lý như dung lượng kênh, cường độ tín hiệu và cấu trúc liên kết mạng. Hai thuật toán xấp xỉ dựa trên các tập hợp độc lập và tập hợp đánh đã được đề xuất để giải quyết vấn đề của họ. Một chiến lược triển khai các nút chuyển tiếp tối ưu tiết kiệm năng lượng mới được đề xuất trong [29]. Họ đã đề xuất một thuật toán dựa trên các đàn ong nhân tạo để kéo dài thời gian tồn tại bằng cách tối ưu hóa các tham số mạng.</p>	<p>Xu et al. trong [34] đã nghiên cứu bài toán tối ưu điều khiển vùng phủ sóng trong WSN như một bài toán tối ưu đa mục tiêu với ba mục tiêu bao gồm tiêu thụ năng lượng, tốc độ phủ sóng và cân bằng tiêu thụ năng lượng. Họ đã sử dụng hai toán tử sinh sản dựa trên Thuật toán di truyền và Tiến hóa khác biệt trong MOEA/D để bảo tồn các cá thể chất lượng trong mỗi thế hệ. Zhang et al. trong [35]. Nhóm tác giả đã đưa ra ba mục tiêu nhằm giảm thiểu (i) tổng công suất tiêu thụ trong khi vẫn đảm bảo phủ sóng đầy đủ; (ii) số nút cảm biến hoạt động để nâng cao độ tin cậy và (iii) phạm vi cảm biến tối đa của cảm biến hoạt động để duy trì sự công bằng. Vấn đề được gọi là vấn đề bao phủ rào cản đánh đổi. Một thuật toán tiến hóa đa mục tiêu được gọi là PS-MOEA/D được đề xuất để đạt được sự đánh đổi gần như tối ưu giữa ba mục tiêu.</p>
<p>Trong số các chỉ số hiệu suất mạng khác nhau, thời gian tồn tại có thể được coi là mục tiêu quan trọng trong triển khai mạng. Thời gian tồn tại của mạng đã được giải quyết ở nhiều cấp độ khác nhau: thiết kế, vận hành và triển khai. Trong [9], các tác giả đã đưa ra đánh giá quan trọng về các kỹ thuật tối đa hóa tuổi thọ của mạng hiện đại. Một trong số đó liên quan đến việc sử dụng các nút chuyển tiếp để phân phối dữ liệu từ các nút cảm biến đến các trạm cơ sở. Đặc biệt, điều này có thể làm giảm mức tiêu thụ năng lượng của các nút cảm biến ở xa. Lấy cảm hứng từ cách tiếp cận này, một số tác giả đã nghiên cứu các biến thể khác nhau của vấn đề [17-19,21,30]. Trong [17], các vấn đề về vị trí nút chuyển tiếp và phân bổ luồng (RNP-FA) được cùng nhau xây dựng thành một bài toán lập trình phi tuyến số nguyên NP-hard. Họ đã đề xuất một sơ đồ heuristic mới trong kiến trúc 3 chiều (3D) để</p>	<p>Các công trình trước đây về thời gian tồn tại của WSN đã tập trung vào việc triển khai các nút chuyển tiếp ở bất kỳ đâu trên địa hình. Tuy nhiên, trong thực tế, có thể có một số ràng buộc vật lý đối với việc bố trí các nút bố trí lại. Hơn nữa, việc triển khai các nút bổ sung mang lại chi phí nội tại thường bị bỏ qua. Vì những lý do này, bài báo này coi việc bố trí nút chuyển tiếp cho mạng cảm biến không dây trong địa hình ba chiều là một bài toán tối ưu đa mục tiêu với hai mục tiêu: giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng để kéo dài thời gian tồn tại của mạng và giảm thiểu số lượng nút chuyển tiếp được triển khai. .</p> <p>Các phương pháp heuristic và meta-heuristic khác nhau đã được đề xuất để giải quyết các vấn đề đa mục tiêu tương tự, bao gồm các thuật toán tiến hóa. Ví dụ, SPEA2, được giới thiệu trong [25], là một thuật toán di truyền kết hợp phép đo độ mạnh của bản gốc</p>



Hình 1. Một ví dụ minh họa xung đột giữa các mục tiêu.

4. Thuật toán tiến hóa đa mục tiêu dựa trên vị trí phân tách cho MOO-ORP3D

4.1. chuẩn hóa khách quan

Chuẩn hóa mục tiêu đã được chứng minh là có hiệu quả đối với MOEA để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu (MOP) với các mục tiêu được chia tỷ lệ khác nhau. Trong bài báo này, chúng tôi áp dụng một phương pháp chuẩn hóa đơn giản biến đổi từng mục tiêu theo dạng sau để giải các MOP với các mục tiêu có tỷ lệ khác nhau:

$$\overline{f_i(x)} = \frac{f_i(x)}{f_i^{max}}$$
 (10)

nad nơi $f_i^{max} = \max\{f_i(x)\}$ là giới hạn trên của mục tiêu thứ i của các giá trị tập tối ưu Pareto. Ngoài ra, tất cả t vào một t cuối cùng được kết hợp điểm duy nhất gọi là điểm Nadir. Phương pháp tính điểm Nadir của bài toán này sẽ được trình bày chi tiết trong phần dự đoán.

Theo cách này, hai mục tiêu trong các phương trình (8) và (9) có thể được viết lại BẢNG:

$$\overline{F}(x) = (\overline{f_1(x)}, \overline{f_2(x)})$$
 (11)

Tất cả các hàm mục tiêu sau khi chuẩn hóa sẽ được giới hạn bởi $0 \leq \overline{f_i(x)} \leq 1, i = 1, 2$.

4.2. phương pháp phân rã

Chúng tôi xem xét một sự kết hợp lỗi của các mục tiêu khác nhau. Đặt $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$ là một vectơ trọng số trong đó $0 \leq \lambda_1, \lambda_2 \leq 1$ và $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$. Lời giải tối ưu u thỏa mãn bài toán tối ưu vô hướng sau:

$$\text{cực tiểu hóa } \lambda_1 \overline{f_1(x)} + \lambda_2 \overline{f_2(x)}$$
 (12)

MOEA/D [23] ban đầu phân tách các MOP thành N bài toán con mục tiêu đơn lẻ. Có một số kỹ thuật phân rã, chẳng hạn như cách tiếp cận tổng trọng số [40], cách tiếp cận Tchebycheff [40], cách tiếp cận giao cắt biên [41], ... Trong phần này, chúng tôi sử dụng phương pháp Tchebycheff để phân tách MOP thành một số vấn đề phụ. Đặt z^j vectơ cho z^1, z^2, \dots, z^N tập hợp có trọng số, mỗi bài toán con, $z^j = (\lambda^j \text{ bài toán con tối ưu } f_1, f_2)^T$ với $j = 1, \dots, N$. Các ưu đơn mục tiêu thứ j được định nghĩa là: cực tiểu gte($X|z^j$)

$$f_j(z^j) = \max_{x \in X} \{ \lambda^j |f_1(x)| + (1 - \lambda^j) |f_2(x)| \}$$
 (13)

phương trình (13) giới thiệu một yếu tố mới-điểm tham chiếu z Điểm này lưu giá trị khách quan tốt nhất đạt được trong quá trình tìm kiếm tính đến thời điểm hiện tại. Chẳng hạn, nếu tập $S1 = \{x\}$ bao gồm tất cả các giải pháp được tìm thấy cho đến thời điểm t , thì z^i với $i = 1, 2$ có thể được sử dụng thay cho giá trị mục tiêu trong quá trình tìm kiếm để đánh giá (so sánh) con. Do đó, cách tiếp cận của Tchebycheff sử dụng nó làm cơ sở để ước tính "khoảng cách" giữa một cá nhân và các giải pháp tối ưu. z

cũng được chuẩn hóa để tương thích với $f_i(x)$.

4.3. Tạo vectơ trọng lượng

Theo khuôn khổ MOEA/D-LS, N vectơ trọng số tương ứng với các bài toán con phải trải đều. Hơn nữa, vì MOO-ORP3D có hai mục tiêu, mỗi vectơ trọng số có dạng $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$. Vì những lý do này, chúng tôi đề xuất một công thức đơn giản cho λ :

$$\lambda = \left(\frac{f_1}{N}, \frac{f_2}{N} \right)$$
 (14)

Đẳng thức đảm bảo các phần tử tương ứng của hai vectơ liên tiếp λ luôn có cùng hiệu $\lambda_i - \lambda_{i+1}$ và λ_{i+1}

$\frac{1}{N}$. Để minh họa, nếu $N = 11$, trọng số thu được sẽ là:

$$\Lambda = \{(0, 0, 1, 0); (0, 1; 0, 9); (0, 2, 0, 8); \dots; (1, 0, 0, 0)\}$$

Các vấn đề phụ được xác định bởi các vectơ trọng số này gần bằng nhau, do đó cải thiện tính tương tự giữa các giải pháp liên kề.

4.4. MOEA/D và MOEA/D-LS cho MOO-ORP3D

Trước tiên, chúng tôi sẽ mô tả khuôn khổ chung và các cài đặt ban đầu cho MOEA/D-LS. Tại mỗi lần lặp, hãy xem xét dân số 1 với N cá thể x tương ứng với N bài toán con. Ngoài ra, các thông số sau được duy trì:

- $z = (z_1, z_2)$: Các điểm tham chiếu được sử dụng trong Tchebycheff phương trình
- EP: Một quần thể bên ngoài chứa tất cả các giải pháp không bị chi phối được tìm thấy trong quá trình tìm kiếm. Nó luôn tạo thành Mặt trận Pareto của các giải pháp tốt nhất sau mỗi lần lặp lại.

Dưới đây là mô tả chi tiết về MOEA/D-LS. Sự khác biệt chính so với MOEA/D ban đầu là ở bước 2.2 (chi tiết trong Phần 5.5). Do đó, chúng tôi biểu thị từng thuật toán như sau:

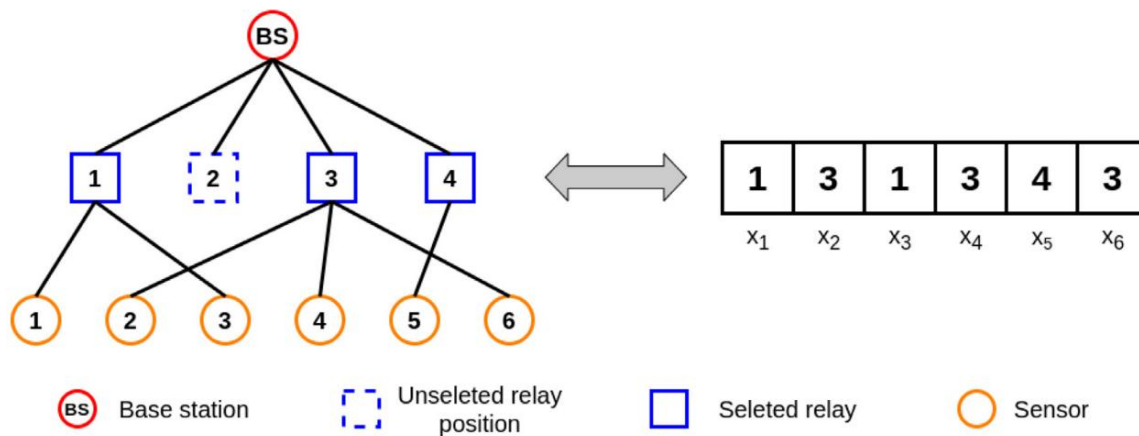
- MOEA/D: Thuật toán MOEA/D tương tự như Thuật toán 1 không có bước 2.2.
- MOEA/D-LS: Sự kết hợp giữa MOEA/D và mô-đun trong Phần 5.5, được mô tả trong Thuật toán 1.

Các sửa đổi cụ thể so với khung ban đầu được giải thích thêm trong Phần 5.

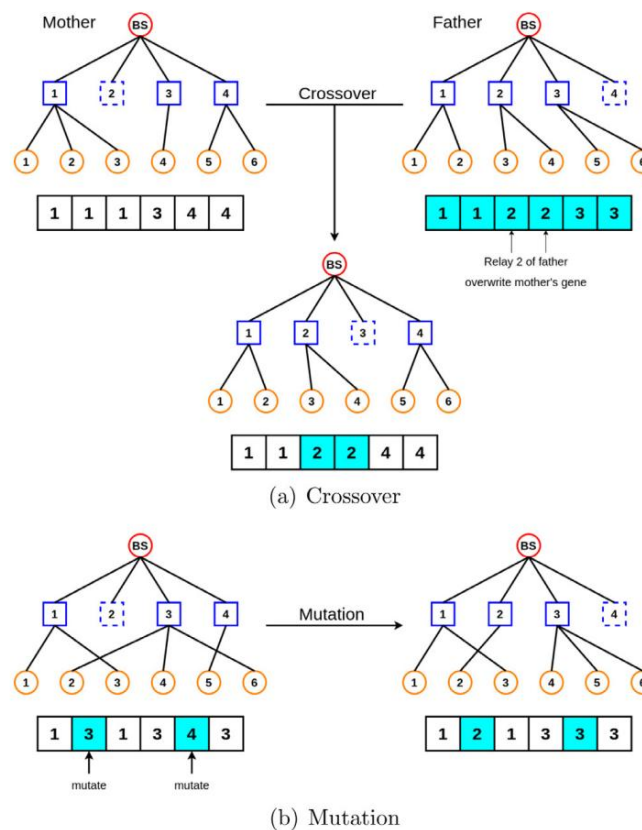
5. Chi tiết về MOEA/D-LS

5.1. Mã hóa giải pháp và khởi tạo dân số

5.1.1. Mã hóa giải pháp Các phương pháp mã hóa giải pháp là cần thiết cho các thuật toán di truyền. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng một vectơ n chiều $x =$



Hình 2. Một ví dụ về phương pháp mã hóa.



Hình 3. Ví dụ về hoạt động di truyền.

5.5. tìm kiếm địa phương

Trong MOEA/D ban đầu, giai đoạn hậu tìm kiếm được sử dụng để sửa các giải pháp không hợp lệ. Tuy nhiên, toán tử di truyền của chúng tôi đảm bảo rằng tất cả các cá thể y được tạo ra đều khả thi. Vì vậy, thay vì sửa chữa, chúng tôi đề xuất một phương pháp tìm kiếm cục bộ để cải thiện các giải pháp. Cụ thể, giai đoạn này tìm cách giảm cả số lượng relay được sử dụng và mức tiêu thụ năng lượng nút tối đa.

Đầu tiên, để giảm số lượng relay, chúng tôi cố gắng loại bỏ một số relay có rất ít kết nối. Đối với mỗi relay được chọn l, thuật toán tìm kiếm một relay được chọn khác có thể xử lý tất cả các cảm biến được chỉ định của l mà không vượt quá mức tiêu thụ năng lượng nút tối đa hiện tại (xem Hình 4). Nếu một nút như vậy

tồn tại, việc loại bỏ l là an toàn sau khi gán lại các cảm biến của nó cho nút khác. Thuật toán 3 minh họa phương pháp này.

Thứ hai, chúng tôi tập trung vào mục tiêu năng lượng. Với một y riêng lẻ, vì giá trị tiêu thụ năng lượng của y phụ thuộc vào nút sử dụng nhiều năng lượng nhất, chúng tôi gọi nó là crit "nút quan trọng" của y. Do phụ thuộc trình năng lượng và các giá trị không đổi, nút quan trọng thứ 2 là nút chuyển tiếp. Trong trường hợp này, có hai cách để cải thiện mức tiêu thụ năng lượng:

- Để giảm tải cho nút quan trọng, hãy tìm một cảm biến si được gán cho lcrit và thử gán lại nó cho một nút chuyển tiếp khác. Relay thay thế l phải là relay được chọn và không sử dụng nhiều năng lượng như lcrit ban đầu (xem Hình 5 (a)).
- Nếu phương pháp trên không hiệu quả, hãy thử thay lcrit bằng lalt thay thế. lalt được tìm kiếm trong tập hợp không được chọn

role và phải có khả năng xử lý tất cả các cảm biến dòng điện của lcrit với mức tiêu thụ năng lượng thấp hơn. Giả sử rằng lalt tồn tại, mục tiêu năng lượng sẽ được cải thiện, trong khi số lượng role cần thiết không thay đổi (xem Hình 5 (b)).

Chúng tôi mô tả các bước trên trong Thuật toán 5. Nó được thực hiện cho đến khi nút tới hạn là nút cảm biến hoặc không thể giảm thêm f2(y) . Quá trình này được trình bày chi tiết dưới dạng mô-đun con trong Algorithm 4.

Kết hợp cả hai thuật toán được đề xuất, chúng tôi thu được thuật toán tìm kiếm cục bộ cuối cùng, được trình bày chi tiết trong Thuật toán 2. Điều quan trọng cần lưu ý là thứ tự của chúng cũng quan trọng, vì thuật toán được thực hiện sớm hơn sẽ có tác động lớn hơn đến giải pháp. Mặt khác, chúng ta biết rằng trong Thuật toán 1, mỗi nghiệm mới y được tạo ra đặc biệt cho một bài toán con cơ sở thứ i. Vì vậy, chúng ta sử dụng vectơ trọng số tương ứng thứ i để quyết định mô-đun con nào = (λ), cơ hội là mô-đun đầu tiên, trong khi năng lượng áp dụng cho y đầu tiên. Nếu vectơ được sử dụng cho y là λ^{1, ..., t₀}, mô-đun role có xác suất λ¹ của λ mô-đun là λ².

Thuật toán 2: Mô-đun tìm kiếm cục bộ

```
Đầu vào :
    sol: Một giải pháp hoàn chỉnh nhận được sau lần trừớc
    bước c chẵn;
    λ = (λ1, λ2): Vectơ trọng số của bài toán con cơ sở;

Kết quả: new_sol: Phiên bản cải tiến của y if random <
λ1 then new_sol
    Relay_Count_Reduction(sol); // thuật toán 3 new_sol
    Energy_Reduction(sol); // thuật toán 4 other new_sol
Energy_Reduction(sol); // thuật toán 4 new_sol
    Relay_Count_Reduction(sol); // thuật toán 3 return new_sol;
```

Thuật toán 3: Giảm số lần chuyển tiếp

```
Đầu vào :
    S: bộ cảm biến;
    L: tập hợp các nút chuyển tiếp có thể;
    C : (cij)n×m: ma trận kết nối; sol: Dung
    dịch bazơ;

Dữ liệu ra: new_sol: Giải pháp đã sửa đổi với số lượng kết nối role được triển
    khai đã giảm
    Bộ n kết nối role cảm biến trong sol;

RNs  lj  L[zj(sol) = 1\{lcrit}; // Các vị trí role được chọn trong y (không
    bao gồm lcrit) foreach lj
    RNs do childrenj
    {si  S[(si, lj  )}  kết nối; // Các nút cảm biến kết nối với lj  in sol
    foreach lj  RNs do if cij = 1 si
        childrenj  then
            new_sol  sol; foreach si  conj
                làm
                Thay thế kết nối (si, lj  ) bằng (si, lj) trong new_sol;
            Bỏ chọn nút lj  trong new_sol; nếu
            f2(new_sol) < f2(sol) thì sol
                new_sol; phá vỡ;

    trở lại sol;
```

Thuật toán 4: Giảm năng lượng

```
Đầu vào : sol: Một giải pháp hoàn chỉnh nhận được sau bước trừớc
Kết quả: new_sol: Phiên bản cải tiến của y new_sol
sol; old_consumption  +=; nodecritical  "Nút
    quan trọng" của giải pháp new_sol; while (f2(new_sol) <
    old_consumption) và (nodecritical là nút chuyển tiếp) do old_consumption
    f2(new_sol);
    new_sol  Relay_Energy_Reduction(new_sol,
        nodecritical); // thuật toán 5
    Cập nhật nốt; trả về
new_sol;
```

Thuật toán 5: Giảm năng lượng một lần

```
Đầu vào :
    S: bộ cảm biến;
    L: tập hợp các nút chuyển tiếp có thể;
    C : (cij)n×m: ma trận kết nối; sol: Dung
    dịch bazơ; lcrit: Nút chuyển
    tiếp quan trọng

Đầu ra: new_sol: Giải pháp đã sửa đổi giúp giảm kết nối tiêu thụ của lcrit
    Bộ n kết nối
    role cảm biến trong sol;
RNs  lj  L[zj(sol) = 1\{lcrit}; // Các vị trí role được chọn trong y (không
    bao gồm lcrit) childrencrit
    {si  S[(si, lcrit)}  kết nối; // Các nút cảm biến kết nối với lcrit trong
    sol
    // Di chuyển một kết nối cảm biến từ lcrit sang một kết nối khác
    chuyển
    tiếp foreach si  childrencrit
        do foreach lj  RNs do
            if cij = 1 then
                new_sol  sol;
                Thay thế kết nối (si, lcrit) bằng (si, lj) trong new_sol; nếu
                f2(new_sol) < f2(sol) thì trả về
                    new_sol;

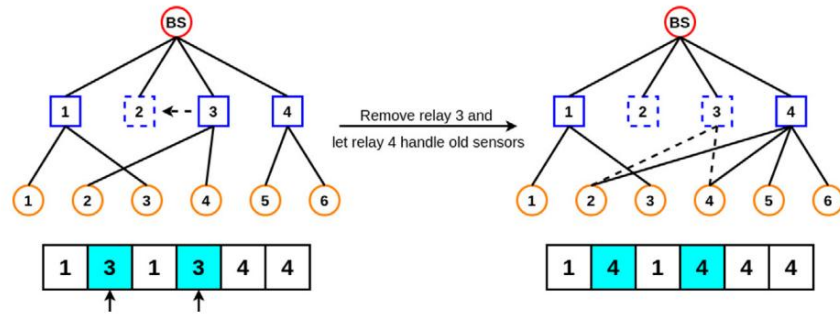
    // Thay thế lcrit bằng role tiết kiệm năng lượng tốt hơn
    nút
    foreach lj  L\RNs thực
        hiện if cij = 1 si  childrencrit
            then new_sol  sol;
            Chọn nút lj trong new_sol;
            foreach si  childrencrit do
                Thay thế kết nối (si, lcrit) bằng (si, lj) trong new_sol;
            Bỏ chọn nút lcrit trong new_sol; nếu
            f2(new_sol) < f2(sol) thì trả về
                new_sol;
```

```
trở lại sol;
```

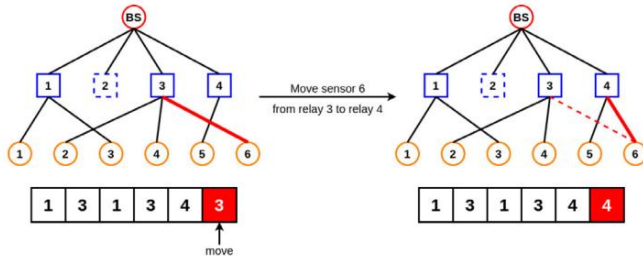
6. Kết quả thực nghiệm

6.1. Cài đặt thử nghiệm

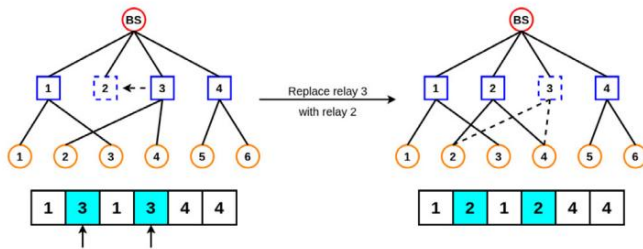
Dữ liệu thử nghiệm của chúng tôi dựa trên dữ liệu địa lý của Việt Nam, như được sử dụng trong [39]. Bộ dữ liệu chứa mười bản đồ địa hình 3D (T1-T10) với nhiều hình thái khác nhau. Bảng 2 và Hình 6 mô tả ngắn gọn về các địa hình này. Địa hình 3D được xác định theo tiêu chuẩn Mô hình độ cao kỹ thuật số (DEM). Các thông số được thiết lập như trong Bảng 3. Các thuật toán được thực hiện trên một PC duy nhất (CPU Intel Xeon x5450



Hình 4. Giảm số lượng rơle.



(a) Move one sensor out of critical relay



(b) Replace critical relay

Hình 5. Rơ-le giảm năng lực.

- Loại 3s (uu25s_1 đến uu25s_10) và Loại 3l (uu25l_1 đến uu25l_10): Tương tự như Loại 1 và Loại 2, tuy nhiên các nút được tạo ra theo Phân bố đồng nhất.
- Loại 4s (uu30s_1 đến uu30s_10) và Loại 4l (uu30l_1 đến uu30l_10): Các nút phát sinh trên địa hình nhỏ và địa hình lớn từ T1 đến T10 theo phân bố đều.
- Phạm vi liên lạc được đặt ở mức 30 m.
- Loại 5s (uu45s_1 đến uu45s_10) và Loại 5l (uu45l_1 đến uu45l_10): Tương tự như Loại 4 nhưng phạm vi liên lạc là 45 m.

6.3. số liệu đánh giá

Trong tối ưu hóa đa mục tiêu, hiệu suất của một thuật toán được xác định cả về mặt hội tụ và tính đa dạng của mặt trước thu được. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng một số phép đo phổ biến như sau:

- Coverage-metric [24,42] Số liệu $C(A, B)$, thường được coi là số liệu chất lượng của MOEA, đánh giá tỷ lệ của các giải pháp không bị chi phối trong một thuật toán Mặt trận Pareto của A bị chi phối bởi các giải pháp không bị chi phối trong mặt trước Pareto của thuật toán B, chia cho tổng số nghiệm không trội thu được bằng thuật toán A. $|x \setminus B| \cdot y \setminus A : y \text{ trội } x|$ $C(A, B) = \frac{|x \setminus B| \cdot y \setminus A}{|x \setminus B| \cdot y \setminus A + |y \setminus A| \cdot x \setminus B}$

(17)

$C(A, B)$ không nhất thiết phải bằng 1 $C(B, A)$. Nếu $C(A, B) = 1$, tất cả các giải pháp trong B bị chi phối bởi ít nhất một giải pháp trong A. $C(A, B) = 0$ ngụ ý rằng không có giải pháp nào trong B bị chi phối bởi một giải pháp trong A.

Để thuận tiện, trong bài báo này, chúng tôi xác định một số liệu khác biệt mới về phạm vi bảo hiểm:

$$\delta(A, B) = C(A, B) - C(B, A) \quad (18)$$

Số liệu này luôn nằm trong khoảng $[-1, 1]$. $\delta(A, B) = 1$ có nghĩa là A lấn át hoàn toàn B. Trong trường hợp ngược lại, $\delta(A, B) = -1$. $\delta(A, B) = 0$ có nghĩa là A và B không thể so sánh được.

giá trị của tập nghiệm A được tính như sau:

$$|A| = \frac{\sum_{j=1}^d (d_j - \min_j d_j)}{|A| \cdot d} \quad (19)$$

trong đó d_j là khoảng cách giữa các điểm liên tiếp và d là giá trị trung bình của tất cả các khoảng cách đó. $|A| = 0$ có nghĩa là sự trải đều các nghiệm trong không gian mục tiêu, do đó, $|A|$ thấp hơn sẽ tốt hơn. ND (Non dominated solutions)

metric [42] là số

của các giải pháp không bị chi phối trong tập nghiệm A, tức là

$$|ND(A)| = |A| \quad (20)$$

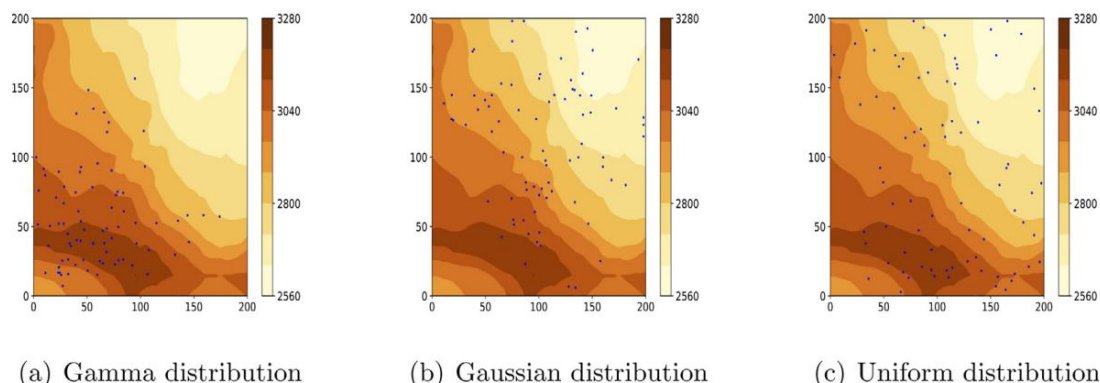
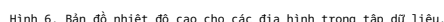
3 GHz, RAM 16 GB). Tất cả các thuật toán đã được thực hiện bằng ngôn ngữ lập trình Python. Mỗi kết quả thử nghiệm được đo trên 30 lần chạy độc lập.

6.2. trường hợp vấn đề

Do không có sẵn tập hợp các phiên bản của sự cố nên mười bộ dữ liệu (100 phiên bản) được tạo và phân loại thành hai kịch bản. Kịch bản 1 là một mạng có 40 nút cảm biến và 40 vị trí chuyển tiếp có diện tích $200m \times 200m$. Kịch bản 2 bao gồm năm bộ dữ liệu (Loại 1 đến Loại 5). Trong kịch bản 2, 100 nút cảm biến và 100 vị trí chuyển tiếp được phân bố trên diện tích $500m \times 500m$. Các bộ dữ liệu từ Loại 1l đến Loại 5l được bao gồm trong kịch bản 2. Chi tiết về các bộ dữ liệu được mô tả như sau:

- Loại 1s (ga25s_1 đến ga25s_10) và Loại 1l (ga25l_1 đến ga25l_10): Các nút (nút cảm biến và nút chuyển tiếp) được tạo trên các địa hình nhỏ và địa hình lớn từ T1 đến T10 theo phân bố Gamma như trong Hình 7. phạm vi giao tiếp của các nút được đặt ở mức 25 m.
- Loại 2s (no25s_1 đến no25s_10) và Loại 2l (no25l_1 đến no25l_10): Các nút được tạo trên các địa hình nhỏ và địa hình lớn từ T1 đến T10 theo phân bố Gaussian như trong Hình 7. Phạm vi liên lạc của các nút được đặt ở mức 25 m.

Vị trí địa hình		Hình thái
T1	Hồ Chí Minh	Thành phố có chiều cao tòa nhà thay đổi, không có đồi hoặc sông
T2	Vũng Tàu	Thành phố có hầu hết các tòa nhà có chiều cao trung bình, đồi thoải thoải và một phần
T3	Phú Quốc	biển Một hòn đảo với những ngọn đồi
T4	Đồng Tháp	thấp Đồng bằng với các tòa nhà thưa a thớt, dọc theo nhiều sông và kênh rạch, không có đồi.
T5	Vĩnh Long	Đồng bằng nhiều sông rạch, không có đồi núi.
T6	Lâm Đồng	Khu vực Tây Nguyên, nhiều núi đồi.
T7	Cao Nguyên	Cao nguyên với những ngọn núi cao và đồi núi cao Thành
T8	Đà Nẵng	phố với những tòa nhà thưa a thớt và những ngọn núi giáp biển.
T9	hà nội	Thành phố với nhiều tòa nhà và số lư ợng hồ lớn.
T10	Hạ Long	Ven biển có nhiều đảo nhỏ cao thấp khác nhau



Hình 7. Sự phân bố khác nhau của cảm biến được nghiên cứu trong các thí nghiệm của chúng tôi.

metric [43]: Chỉ báo hypervolume là một thước đo phổ biến được sử dụng để đánh giá cả sự hội tụ và đa dạng của Pareto front. Nó là thể tích của không gian trong không gian khách quan bị lấn át bởi xấp xỉ Pareto front và được giới hạn từ phía trên bởi điểm Nadir (điểm cực tiểu trong Phần 5.2), như trong Hình 8.

không có trợ ứng hợp

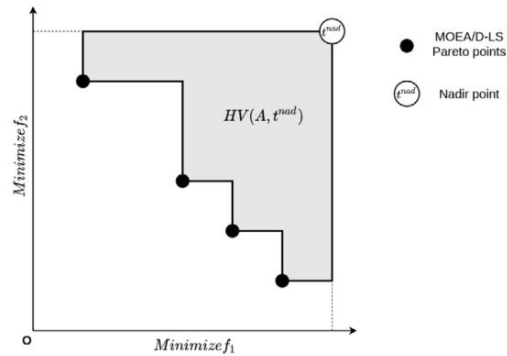
284

Để đánh giá hiệu suất của MOEA/D-LS trong việc giải quyết các vấn đề MOO-ORP3D, chúng tôi đã thực hiện các thí nghiệm sau:

Tham số	Giá trị
Số thế hệ tối đa	200
Quy mô dân số	40
Số bài toán con	40
Quy mô vùng lân cận	
tỷ lệ chéo	3
tỷ lệ đột biến	0,9 0,01

- Thử nghiệm 1: chúng tôi so sánh thuật toán đư ợc đề xuất với MOEA/D ban đầu [23] để đánh giá tác động của giai đoạn cải tiến đối với hiệu suất của thuật toán đư ợc đề xuất (MOEA/D-LS). • Thử nghiệm 2: chúng tôi so sánh MOEA/D-LS đư ợc đề xuất với một số thuật toán tiến hóa đã mục tiêu trên các số liệu khác nhau như đã đề cập trong Phần 6.3:

- NSGA-II [24] lựa chọn các cá thể theo mỗi quan hệ ưu thế Pareto và lặp đi lặp lại quá trình sinh sản. Cụ thể, dân số mới được sắp xếp theo



Hình 8. Minh họa chỉ báo siêu âm lưu ý cho bài toán 2 mục tiêu.

xếp hạng theo mối quan hệ thống trị và các giải pháp được phủ phồng rộng rãi bằng cách sử dụng khoảng cách đồng đức.

- SPEA2 [25] là một MOEA ưu tú. Thuật toán này đã sử dụng các phương pháp cắt xén kho lưu trữ mới để đảm bảo duy trì các nghiệm biên.
- MODE [26] không giống như một số kỹ thuật siêu dữ liệu như thuật toán di truyền và chiến lược tiến hóa, trong đó nhiều loạn xảy ra theo một đại lượng ngẫu nhiên. CHẾ ĐỘ sử dụng sự khác biệt có trọng số giữa các vectơ giải pháp để gây nhiễu dân số.

Lưu ý rằng chúng tôi đang sử dụng cùng một cơ chế đại diện và sản xuất lại (chéo, đột biến và lựa chọn giải pháp) cho MOEA/D-LS và bốn MOEA ở trên. • Thí nghiệm 3: so sánh tốc độ hội tụ của MOEA/D-LS, MOEA/D với các MOEA khác. • Thí nghiệm 4: so sánh MOEA/D-LS với các MOEA khác về hai mục tiêu (số lưu ý nút chuyển tiếp được triển khai và mức tiêu thụ năng lượng).

- Thí nghiệm 5: so sánh giữa MOEA/D-LS và đơn thuật toán mục tiêu FCLS [22].

6.4.1. Đánh giá hiệu quả của tìm kiếm cục bộ

Thử nghiệm đầu tiên của chúng tôi tập trung vào hiệu quả của giai đoạn tìm kiếm cục bộ (Phần 5.5). Chúng tôi so sánh kết quả của MOEA/D và MOEA/D-LS. Mỗi phiên bản được chạy 10 lần. Biên độ Pareto của tất cả các lần chạy được đo và tính trung bình bằng cách sử dụng δ -metric. Quy trình tự động tự động áp dụng cho chỉ số S về số lưu ý cải tiến và các giá trị siêu âm lưu ý trung bình của một phiên bản cho cả hai thuật toán được dùng để so sánh. Ngoài ra, đối với mỗi trường hợp, chúng tôi ghép nối các mặt trước Pareto của tất cả các lần chạy từ MOEA/D và MOEA/D-LS và báo cáo chỉ số δ trung bình cho tất cả các cặp.

Các kết quả trong Bảng 4 cho thấy MOEA/D-LS vượt trội hơn rất nhiều so với MOEA/D. Tất cả các giá trị δ đều xấp xỉ 1,00, có nghĩa là mặt trước của MOEA/D LS chiếm ưu thế so với mặt trước của MOEA/D trong hầu hết mọi trường hợp. Mặt trận Pareto của MOEA/D-LS tốt hơn trong hầu hết các trường hợp, cả về tính đa dạng và tính tối ưu, thể hiện tác dụng của Thuật toán 2.

Bảng 5 và 7 cũng cho thấy sự cải thiện đáng kể về tính đa dạng và mật độ Pareto. Giá trị càng nhỏ, Pareto front càng đồng đều. Trong Bảng 5, giảm từ 0,17 của MOEA/D xuống 0,13 của MOEA/D-LS đối với tập dữ liệu nhỏ và từ 0,22 xuống 0,12 đối với tập dữ liệu lớn. Bên cạnh đó, NDS trung bình của MOEA/D-LS cao hơn nhiều (10,5 cho 200 × 200 và 21,0 cho 500 × 500, tương ứng).

Ngoài ra, sự khác biệt về kết quả giữa hai phương pháp cao hơn trong kịch bản lớn (bộ dữ liệu 500 × 500), có nghĩa là mô-đun tìm kiếm cục bộ có tác động lớn hơn đến hình dạng của mặt trận Pareto khi giải quyết các trường hợp lớn hơn.

Bảng 4

So sánh δ -số liệu giữa MOEA/D-LS (A) và các MOEA khác. $\delta(A, MOEA/D)$ $\delta(A, NSGA-$				
Bộ dữ liệu	II) $\delta(A, SPEA2)$	$\delta(A, MODE)$		
200 m × 200 m 1,00 500 m ×	0,99	1,00	1,00	
500 m 1,00	1,00	1,00	1,00	

Bảng 5 -

số liệu cho MOEA/D-LS và các MOEA khác. Các giá trị in nghiêng cho biết kết quả tốt nhất cho từng tập dữ liệu.

Bộ dữ liệu	(MOEA/D-LS)	(MOEA/D)	(NSGA-II)	(SPEA2)	(CHẾ ĐỘ)
Loại 1s 0,14		0,18	0,22	0,20	0,22
Loại 2s 0,09		0,14	0,14	0,15	0,21
Loại 3s 0,16		0,19	0,18	0,17	0,25
Loại 4s 0,15		0,18	0,22	0,21	0,25
Loại 5s 0,13		0,16	0,13	0,13	0,25
Trung bình 0,13		0,17	0,18	0,17	0,24
Loại 1l 0,13		0,21	0,19	0,20	0,19
Loại 2l 0,10		0,22	0,19	0,20	0,24
Loại 3l 0,15		0,25	0,19	0,21	0,24
Loại 4l 0,06		0,22	0,14	0,17	0,18
Loại 5l 0,15		0,22	0,12	0,16	0,09
Trung bình 0,12		0,22	0,17	0,19	0,19

Bảng 6

So sánh S-metric giữa MOEA/D-LS (A) và các MOEA khác.				
Bộ dữ liệu	S (A, MOEA/D)	S (A, NSGA-II)	S (A, SPEA2)	S (A, MODE)
200 m × 200 m 50 500 m ×		50	50	50
500 m 50		50	50	50

6.4.2. So sánh với các MOEA khác Bảng 4

cho thấy sự so sánh của δ -metric (C-metric) đối với các bộ dữ liệu khác nhau. Chúng ta có thể thấy rằng δ -số liệu cho MOEA/D-LS thực hiện tốt hơn các MOEA khác trong mọi trường hợp. Trung bình, các giải pháp không bị chi phối trong mặt trận Pareto của MOEA/D-LS chiếm ưu thế khoảng 100% so với các giải pháp trong mặt trận Pareto của MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE.

Ngoài ra, MOEA/D-LS cho mức trung bình tốt hơn với 0,13, so với 0,17, 0,18, 0,17 và 0,24 do MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE thu được trên các địa hình có kích thước 200m × 200m.

Trên các địa hình 500m × 500m lớn hơn, các số liệu là 0,12, 0,22, 0,17, 0,19 và 0,19 đối với MOEA/D-LS, MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE.

Từ Bảng 6, chúng tôi thấy rằng thuật toán được đề xuất cũng thực hiện MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE trong mọi trường hợp (100/100). MOEA/D-LS cho thấy lợi thế vượt trội trong δ -metric, δ -metric và hypervolume. Điều này càng làm nổi bật tính ổn định của MOEA/D-LS từ việc thay đổi các yêu cầu vấn đề (phân phối nút khác nhau, bán kính cảm biến khác nhau).

Bảng 7 so sánh số liệu NDS của thuật toán được đề xuất của chúng tôi với các MOEA khác trong mỗi kịch bản. Các thử nghiệm của chúng tôi cho thấy rằng tất cả các giá trị NDS của MOEA/D-LS đều tốt hơn hoặc bằng giá trị của các thuật toán còn lại. Ví dụ: giá trị trung bình của NDS-số liệu của MOEA/D-LS lần lượt là 10,5 và 21,0 đối với kịch bản 1 và kịch bản 2. Các số liệu này lần lượt là 6,4 và 11,9 đối với NSGA II, 6,5 và 10,8 đối với SPEA2, 3,2 và 3,7 đối với MODE.

Đối với các giá trị NDS trong Bảng 7, MOEA/D-LS hoạt động tốt nhất, có lợi thế rõ ràng so với các MOEA khác trong tất cả các trường hợp thử nghiệm. Đặc biệt, tất cả các MOEA/D-LS đều thu được kết quả tốt hơn trên các trường hợp thử nghiệm Gaussian hơn là Đồng nhất và Gamma.

Để xác minh tính hiệu quả của MOEA/D-LS, phân tích thống kê là cần thiết. Một lần nữa, chúng tôi chọn ric hypervolume met làm giá trị đo lường vì nó thể hiện cả mức độ tối ưu hóa và tính đa dạng của mặt trận Pareto. Ngoài ra, kết quả không tuân theo phân phối thống kê, vì vậy số liệu thống kê của chúng tôi sử dụng kiểm tra phi tham số.

Đầu tiên, Kiểm định Friedman được thực hiện để kiểm định giả thuyết H0 sau: "không có sự khác biệt giữa các kết quả

Bảng 7

So sánh số liệu NDS giữa MOEA/D-LS và các MOEA khác.						
Bộ dữ liệu	MOEA/D-LS	MOEA/D	NSGA-II	CHẾ ĐỘ SPEA2		
-	Loại 1	9,4	6,3	5,3	5,6	3,1
	Loại 2s	12,8	8,8	8,8	8,4	4,5
	Loại 3s	8,4	6,6	5,6	5,9	3,1
	Loại 4s	7,7	5,9	4,4	4,9	2,4
	Loại 5s	14,5	8,0	7,8	7,9	3,1
	Trung bình	10,5	7,1	6,4	6,5	3,2
-	Loại 1l	24,6	10,0	13,4	12,1	4,0
	Loại 2l	30,8	12,5	17,3	15,3	4,7
	Loại 3l	26,4	11,1	15,3	13,6	4,4
	Loại 4l	18,1	9,0	10,0	9,3	3,4
	Loại 5l	5,0	3,7	3,3	3,5	1,7
	Trung bình	21,0	9,3	11,9	10,8	3,7

Bảng 8

Kiểm tra Friedman cho MOEA/D-LS và các MOEA khác.				
CHẾ ĐỘ MOEA/D-LS NSGA-II SPEA2				
-	Có nghĩa	0,7320	0,6231	0,6268 0,5420 0,0539
	là Std. Thứ hạng	0,0708	0,0531	0,0492 2,70 1,00
	trung bình phải sinh	4,00	2,30	
	Số thử ứng hợp		50	
	χ^2		137.40	
	df			
-	p		3 0.000	
	Có nghĩa	0,7076	0,5367	0,5263 0,4796 0,1528
	là Std. Thứ hạng	0,2089	0,1543	0,1432 2,02 1,00
	trung bình phải sinh	4,00	2,98	
	Số thử ứng hợp		50	
	2χ		148.824	
	df			
	p		3 0.000	

của các giá trị siêu âm lư ợng trung bình mà thuật toán thu đ ợc''. **Bảng 8** đ ư a ra chi tiết về kiểm định thống kê, bao gồm các giá trị sau: Xếp hạng trung bình trong nhóm các thuật toán (càng cao càng tốt), giá trị chỉ bình phư ơng χ^2 , bậc tự do df và giá trị p có ý nghĩa tiệm cận. giá trị p trong cả hai kịch bản đều xấp xỉ 0,000, điều này bác bỏ H_0 (vì $p < 0,05$) và chỉ ra rằng có sự khác biệt đáng chú ý giữa các kết quả của thuật toán.

Bài kiểm tra trên cũng xác định MOEA/D-LS có thứ hạng trung bình cao nhất trong bốn phư ơng pháp. Do đó, chúng tôi chạy các bài kiểm tra sau đại học để xác minh hiệu suất của MOEA/D-LS. Wilcoxon Signed Rank Tests đư ợc thực hiện trên ba cặp khác nhau: MOEA/D-LS-NSGA-II, MOEA/D-LS-SPEA2 và MOEA/D-LS-MODE. Ngoài ra, nhiều phép so sánh yêu cầu áp dụng điều chỉnh Bonferroni cho kết quả thử nghiệm của chúng. Chia mức ý nghĩa ban đầu 0,05 cho số phép thử so sánh, chúng ta thu đư ợc mức ý nghĩa mới là $0,05/3 = 0,017$. Tóm tắt các bài kiểm tra đư ợc trình bày chi tiết trong **Bảng 9**. Một lần nữa, MOEA/D-LS có kết quả cao hơn với giá trị p là 0,000 ($< 0,0017$) trong cả ba bài kiểm tra. Tóm lại, chúng tôi khẳng định rằng hiệu suất của MOEA/D-LS tốt hơn ba đối tác.

6.4.3. Đánh giá tốc độ hội tụ Thí

nh nghiệm này nhằm đánh giá tính chất hội tụ của thuật toán. Chúng tôi sử dụng mặt trư ớc Pareto tối ưu của một phiên bản thử nghiệm làm đư ờng cơ sở đo lư ờng. Mặc dù các mặt trận tối ưu trong các thí nghiệm này vẫn chư a đư ợc biết, nhưng các phần trư ớc cho thấy MOEA/D-LS có nhiều khả năng đạt đư ợc mặt trận gần như tối ưu. Do đó, chúng tôi sử dụng kết quả của MOEA/D-LS để thay thế cho mặt trận tối ưu thực sự, như sau:

- Đối với mỗi phiên bản, chúng tôi chạy MOEA/D-LS tối đa 100 thế hệ và gọi Pareto front base_Pareto cuối cùng của phiên bản đó.
- Để đánh giá hiệu suất của một phư ơng pháp trên một lập trư ờng cụ thể, chúng tôi chạy phư ơng pháp đó trong 20 thế hệ. đạt đư ợc

kết quả đư ợc so sánh với base_Pareto, như đư ợc phản ánh bởi ''tỷ lệ hội tụ'' (CR):

$$CR(A) = HV(A, t \text{ nad})/HV(\text{base_Pareto}, t \text{ nad}) \tag{22}$$

trong đó A là mặt trư ớc kết quả sau 20 lần lặp và base_Pareto đã đư ợc xác định ở trên. CR = 1 nghĩa là mặt trư ớc A gần như trùng với mặt trư ớc cơ sở (giả sử A không vư ợt tối ưu).

Lưu ý rằng công thức này chỉ đư ợc sử dụng cho một phư ơng thức và một trư ờng hợp tại một thời điểm. Đối với tất cả các thuật toán, mỗi phiên bản đư ợc chạy 10 lần, sau đó tính giá trị trung bình của 10 giá trị CR. Cuối cùng, CR trung bình của tất cả các phiên bản trong tập dữ liệu tư ơng ứng với từng thuật toán đư ợc trình bày trong **Bảng 10**.

Bảng 10 cho thấy MOEA/D-LS có tốc độ hội tụ nhanh nhất, với giá trị CR xấp xỉ 1. Sự hội tụ này tốt hơn nhiều so với Pareto một phần của các MOEA khác, vì NSGA-II chỉ đạt đư ợc CR trung bình = 0,85 đối với các phiên bản nhỏ và CR = 0,76 đối với tập hợp lớn.

Cuối cùng, minh họa về quá trình hội tụ của MOEA đư ợc trình bày trong **Hình. 9** và **10**. Mỗi mặt trận đư ợc thể hiện bằng một đư ờng riêng biệt nổi tất cả các nghiệm của nó.

Các thí nghiệm của chúng tôi dẫn đến kết luận rằng hầu hết các MOEA hội tụ sau khoảng 200 thế hệ. Ngoại lệ duy nhất là MOEA/D-LS, mặt trư ớc không có cải tiến đáng kể sau 10 thế hệ. Do đó, trong những trư ờng hợp này, chúng tôi chạy mỗi phiên bản trong 200 thế hệ và vẽ một Pareto phía trư ớc cũ sau 40 lần lặp (ngoại trừ MOEA/D-LS chỉ chạy tối đa 10 thế hệ đầu tiên và đư ợc vẽ sau 2 lần lặp liên tiếp).

Do các đặc tính hội tụ của thuật toán di truyền (GA), tất cả các thuật toán ngoại trừ MOEA/D-LS đều hội tụ dần dần và cải thiện đáng kể mặt trư ớc. Tuy nhiên, MOEA/D-LS không chỉ hội tụ nhanh hơn nhiều trong **Hình. 9** và **10**, mà còn có các giải pháp cuối cùng rộng hơn và đư ợc tối ưu hóa tốt hơn trong **Hình 11**.

Từ những kết quả này, có thể quan sát thấy một số yếu tố quan trọng góp phần vào sự hội tụ của MOEA/D-LS. Trư ớc hết, hiệu quả của mô-đun tối ưu hóa, đã đư ợc chứng minh trong phần trư ớc, là lý do chính đằng sau tốc độ hội tụ nhanh. Do hai phần của mô-đun này tập trung vào hai mục tiêu nên cả hai giá trị mục tiêu của MOEA/D-LS đều tốt hơn giá trị của các mục tiêu khác, như trong **Hình 11**. Tuy nhiên, điều này cũng dẫn đến xung đột vì hai mục tiêu đối lập nhau. Trong **hình. 9(a)** và **10(a)**, MOEA/D-LS vẫn có thể duy trì tính đa dạng của các mặt trư ớc của nó, nhờ vào cơ chế lựa chọn của MOEA/D ban đầu giúp duy trì các giải pháp tốt nhất cho các vectơ trọng số khác nhau. Cách chúng tôi sắp xếp hai mô-đun con của thuật toán tìm kiếm cục bộ dựa trên các vectơ trọng số cũng đảm bảo các cá nhân chuyển nhiều sang một mục tiêu có cơ hội tốt hơn để mở rộng các điểm cực trị của mặt trận Pareto. Mặt khác, tần suất sử dụng tìm kiếm cục bộ có thể ảnh hưởng đến tốc độ hội tụ. Sau một số thử nghiệm, chúng tôi kết luận rằng hầu hết các cá nhân không đư ợc tối ưu hóa sẽ ngay lập tức bị loại bỏ bởi những cá nhân đư ợc tối ưu hóa. Do đó, tốt nhất là áp dụng mô-đun tìm kiếm cục bộ cho tất cả các giải pháp mới. Quy mô dân số cũng là một yếu tố đáng chú ý. Nhiều bài toán con hơn có nghĩa là kết quả tốt hơn nhưng độ phức tạp về thời gian cao hơn.

6.4.4. Đánh giá trên hai mục tiêu

Chúng tôi cũng xác định số lần cải thiện S1 và S2 là số trư ờng hợp mà một thuật toán hoạt động tốt hơn thuật toán kia về mục tiêu tiêu thụ năng lượng và mục tiêu rò rỉ đư ợc sử dụng, tư ơng ứng.

$$S1(A, B) = \frac{\text{không có trư ờng hợp}}{\text{tổng - 1}} \left(\overline{f_1^b} - \overline{f_1^A} \right) > 0 \tag{23}$$

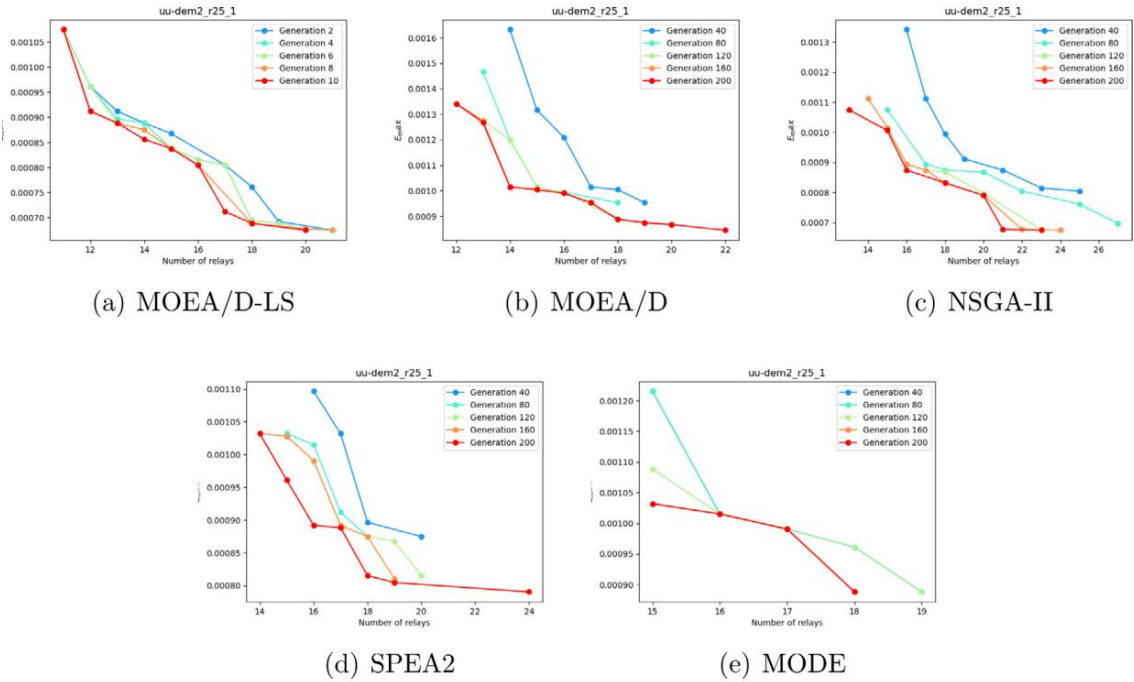
$$S2(A, B) = \frac{\text{không có trư ờng hợp}}{\text{tổng - 1}} \left(\overline{f_2^b} - \overline{f_2^A} \right) > 0 \tag{24}$$

Bảng 9

Kiểm tra Wilcoxon để so sánh giữa MOEA/D-LS và các MOEA khác.

	NSGA-II	SPEA2	CẢ CH THỨC
	Tiêu cực Tích cực Tiêu cực Tích cực	Tiêu cực Tích cực Tiêu cực Tích cực	Tiêu cực Tích cực Tiêu cực Tích cực
Số lượng phiên bản 50 Xếp hạng trung bình 25,50 Tổng xếp hạng 1275	0 0.00 0	50 25.50 1275	50 25.50 1275
-	6,514	6,514	6,514
Z (dựa trên) p (2 đuôi)	(xếp hạng tích cực) 0,000	(xếp hạng tích cực) 0,000	(xếp hạng tích cực) 0,000
Số lượng phiên bản 50 Xếp hạng trung bình 25,50 Tổng xếp hạng 1275	0 0.00 0	50 25.50 1275	50 25.50 1275
-	6,514	6,514	6,514
z (dựa trên) p (2 đuôi)	(xếp hạng tích cực) 0,000	(xếp hạng tích cực) 0,000	(xếp hạng tích cực) 0,000

*Xếp hạng âm: siêu âm lượng của thuật toán cũ < MOEA/D-LS's.
*Xếp hạng tích cực: hypervolume của thuật toán cũ > MOEA/D-LS's.



Hình 9. Thí nghiệm 3: Sự hội tụ trên bài kiểm tra uu25s_2 của Loại 3s.

ở đâu \overline{X}_1 là các nút chuyển tiếp được sử dụng tối thiểu thu được bởi thuật toán X và \overline{X}_2 an là mức tiêu thụ năng lượng tối thiểu thu được bằng thuật toán X.

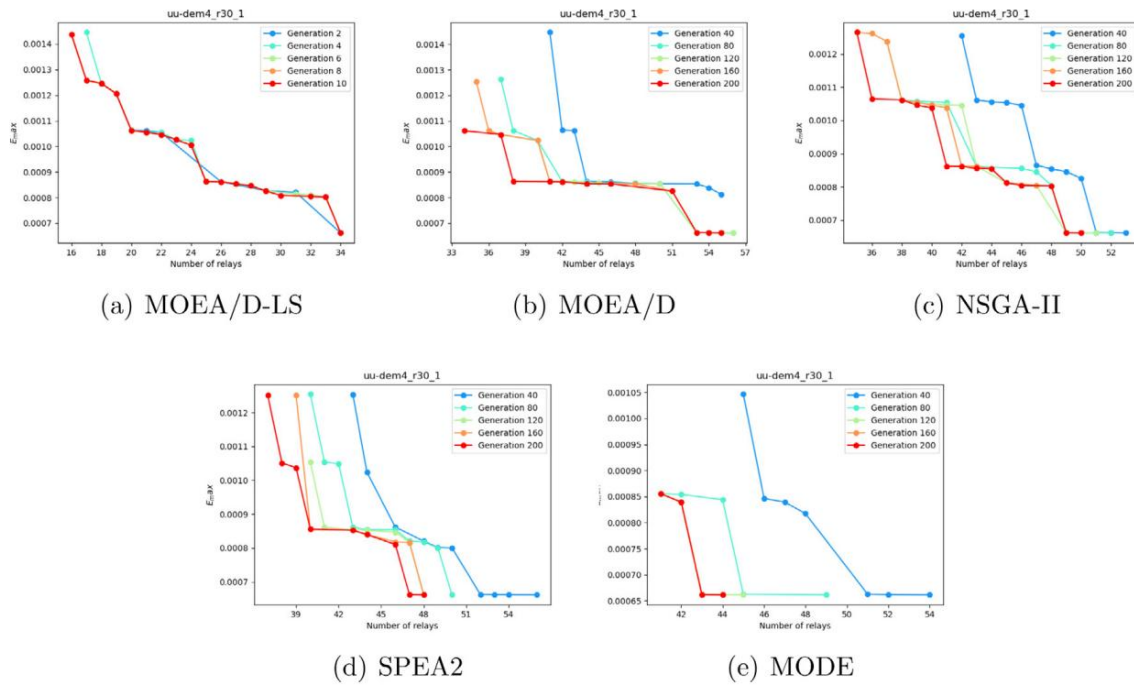
Bảng 11 tóm tắt số trợ ứng hợp mà MOEA/D-LS vượt trội so với các MOEA khác trong cả hai mục tiêu (số nút chuyển tiếp và mức tiêu thụ năng lượng). Đầu tiên, chúng tôi so sánh số nút chuyển tiếp đã triển khai của MOEA/D-LS và NSGA-II với tìm kiếm cục bộ (NSGA-II-LS) trong **Hình. 12 và 13**. Rõ ràng là MOEA/D-LS được đề xuất hoạt động tốt hơn MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE truyền thống đối với các kịch bản được xem xét.

Trong **Hình 12**, chúng ta có thể thấy rằng MOEA/D-LS có xu hướng hoạt động tốt bất kể phân phối nút và phạm vi liên lạc trong cả hai tình huống (địa hình nhỏ và địa hình lớn). Cụ thể, kết quả trung bình của MOEA/D-LS với phân phối Gamma (Loại 1) sử dụng 13 rơle, trong khi kết quả của MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE lần lượt là 13, 14, 14 và 16. Kết quả trung bình cho phân phối Gaussian và Thống nhất (Loại 2 và Loại 3) là 14 và 11 so với 16 và 14 đối với các thuật toán tốt nhất còn lại.

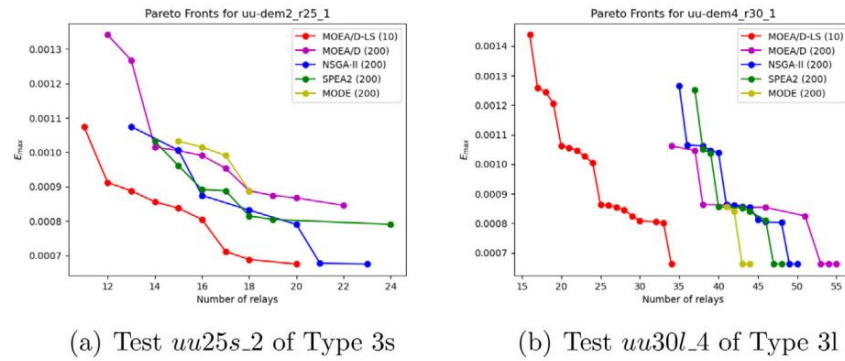
Bảng 10 CR cho MOEA/D-LS và các MOEA khác. Các giá trị in nghiêng cho biết kết quả tốt nhất cho từng tập dữ liệu.

Bộ dữ liệu	MOEA/D-LS	MOEA/D	NSGA-II	CHẾ ĐỘ SPEA2
Loại 1	0,99	0,78	0,86	0,76
Loại 2s	0,99	0,77	0,85	0,75
Loại 3s	0,99	0,76	0,87	0,74
Loại 4s	1,00	0,75	0,86	0,73
Loại 5s	1,00	0,71	0,83	0,70
Trung bình	0,99	0,75	0,85	0,74
Loại 11	0,99	0,67	0,76	0,65
Loại 21	0,99	0,66	0,75	0,64
Loại 31	0,99	0,68	0,77	0,66
Loại 41	0,99	0,68	0,78	0,67
Loại 51	1,00	0,62	0,75	0,62
Trung bình	0,99	0,66	0,76	0,65

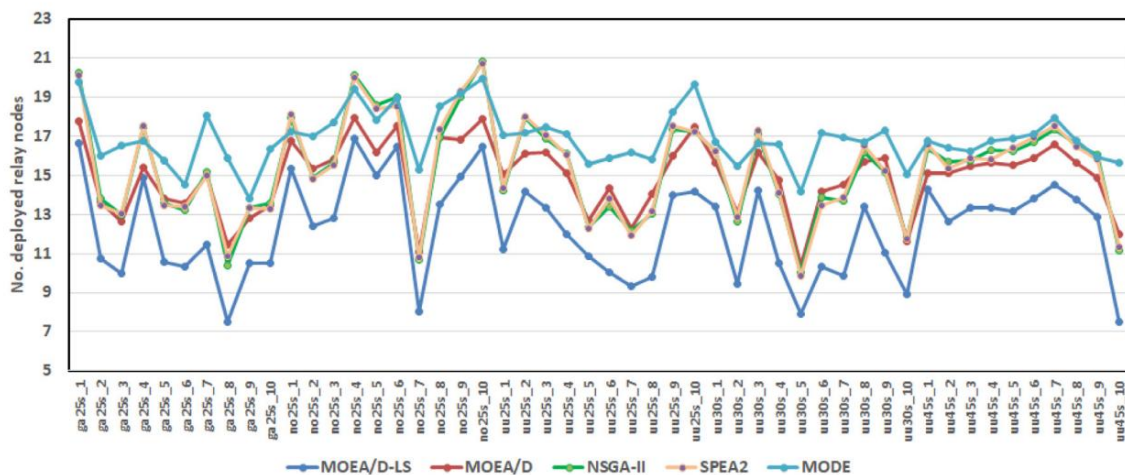
Kết quả MOEA/D-LS trong Kịch bản 2 từ **Hình 13** lần lượt là 26, 30 và 30 đối với Loại 11, Loại 21, Loại 31. Đối với MOEA/D, các số liệu này là 41, 45 và 43. Điều này cho thấy rằng thuật toán được đề xuất của chúng tôi hoạt động tốt trong tất cả các bản phân phối.



Hình 10. Thí nghiệm 3: Sự hội tụ trên thí nghiệm uu30l_4 của Loại 31.



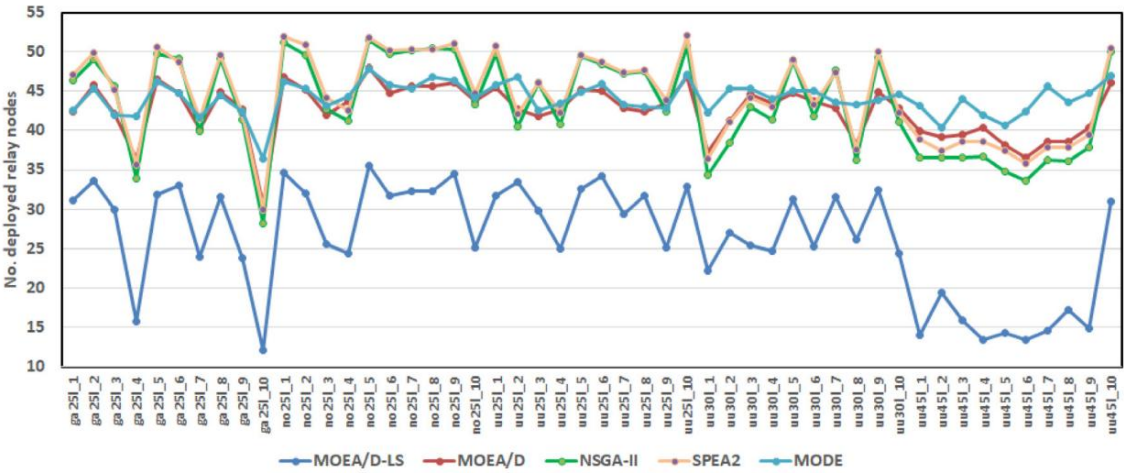
Hình 11. Thí nghiệm 3: So sánh giữa các thể hệ trúc của MOEA. (Số thể hệ đư ợc đặt trong ngoặc đơn ngay sau nh ̃n của thuật toán).



Hình 12. Số nút chuyển tiếp đư ợc triển khai trong Kịch bản 1 (Loại 1 đến Loại 5).

Chúng tôi điều tra hiệu suất của thuật toán khi áp dụng cho hai bán kính giao tiếp cảm biến khác nhau: 30m và 45m. Kiểu

4s, Loại 41 (bán kính 30m), Loại 5s và Loại 51 (bán kính 45m) đư ợc sử dụng trong thí nghiệm này.



Hình 13. Số nút chuyển tiếp đã triển khai trong Kịch bản 2 (Loại 11 đến Loại 51).

Bảng 11

Tóm tắt số trữ ởng hợp mà MOEA/D-LS vượt trội so với các MOEA khác.

Bộ dữ liệu		MOEA								Số thử ởng hợp
		MOEA/D NSGA-II				CHẾ ĐỘ SPEA2				
		S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	
-	Loại 1s 2	10		0 10		0 10		0 10 10		
	Loại 2s 8	10		0 10		1 10		0 10 10		
	Loại 3s 6 10			0 10		1 10		5 10 10		
	Loại 4s 9 10			1 10		1 10		8 10 10		
	Loại 5s 9 10			1 10		1 10		9 10 10		
-	Loại 11 1	10		1 10		1 10		0 10 10		
	Loại 21 0 10			0 10		0 10		0 10 10		
	Loại 31 4 10			3 10		4 10		0 10 10		
	Loại 41 4 10			4 10		5 10		0 10 10		
	Loại 51 3	10		3 10		3 10		0 10 10		

Từ Hình 12, chúng ta có thể thấy rằng số nút chuyển tiếp trung bình cho bán kính 30m (Loại 4) cho thuật toán được đề xuất của chúng tôi và NSGA-II (thuật toán tốt nhất trong số các thuật toán còn lại) là 10 và 14 cho địa hình nhỏ (kịch bản 1). Trong Type 5s, những con số này không thay đổi đáng kể: 12 đối với MOEA/D-LS và 15 đối với NSGA-II.

Trong kịch bản 2, kết quả của MOEA/D-LS và NSGA-II trên Loại 41 lần lượt là 27 và 42. Khi bán kính tăng lên, thông tin liên lạc trở nên dày đặc hơn, cho phép kết nối tối ưu hơn, dẫn đến kết quả tối ưu hơn. Số nút chuyển tiếp giảm xuống còn 16 cho MOEA/D-LS và 37 cho NSGA-II với bán kính 45m (Loại 51).

Thứ hai, chúng tôi so sánh các thuật toán về mức tiêu thụ năng lượng. Các MOEA khác nhau đều có mức tiêu thụ năng lượng xấp xỉ như nhau. Trong Bảng 12, chúng tôi báo cáo mức tiêu thụ năng lượng từ MOEA, trong đó các giá trị in nghiêng cho biết kết quả tốt nhất cho từng trữ ởng hợp. Chúng tôi cũng tính toán mức tiêu thụ năng lượng tối thiểu từ các giải pháp không bị chi phối thu được trong từng trữ ởng hợp. Có thể thấy kết quả từ MOEA/D-LS tốt hơn so với Type 31, Type 41, Type 51. Trong kịch bản 2, MOEA/D-LS cải thiện mức tiêu thụ năng lượng trung bình so với MOEA/D, NSGA-II, SPEA2 và MODE tương ứng khoảng 1,14%, 0,897%, 0,37% và 3,01%. Ngoài ra, ta có thể thấy hiệu quả của MOEA/D-LS càng rõ rệt khi làm việc với địa hình rộng, bán kính liên lạc càng lớn.

Bảng 12

So sánh mức tiêu thụ năng lượng (mJ) của các thuật toán khác nhau trong Kịch bản 2. Các giá trị in nghiêng cho biết kết quả tốt nhất cho từng trữ ởng hợp.

Bộ dữ liệu	MOEA/D-LS	MOEA/D	NSGA-II	CHẾ ĐỘ SPEA2	
Loại 1s 0,952	Loại 0,915	0,848	0,865	0,834	
2s 0,797	Loại 0,819	0,738	0,751	0,747	
1,091	Loại 1,105	1,018	1,031	1,083	
1,148	Loại 1,160	1,081	1,112	1,137	
4,383	Trung bình 4,432	4,316	4,337	4,413	
1,674		1,686	1,600	1,619	1,643
Loại 11	2.799	2.839	2.713	2.733	2.680
Loại 21	0.840	0.858	0.737	0.756	0.705
Loại 31	7.373	7.614	7.594	7.498	7.464
Loại 41	13.692	13.791	13.708	13.742	13.945
Loại 51	34.779	35.071	34.950	35.291	36.540
Trung bình	11.897	12.035	11.940	12.004	12.267

Bảng 13

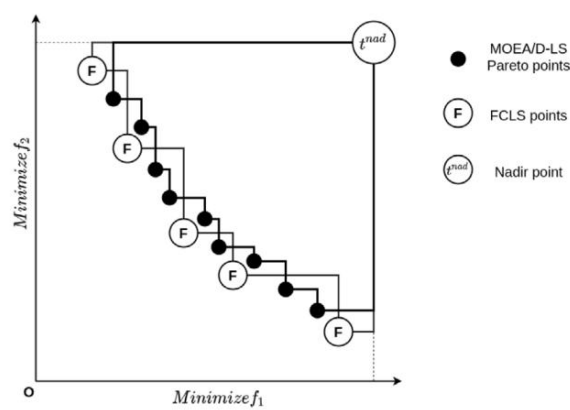
So sánh S-metric giữa MOEA/D-LS và FCLS.

Bộ dữ liệu	S(MOEA/D-LS, FCLS)
Loại 1	3
Loại 2s	6
Loại 3s	9
Loại 4s	4
Loại 5s	4
Trung bình	5,2
Loại 11	6
Loại 21	4
Loại 31	6
Loại 41	5
Loại 51	9
Trung bình	6

6.4.5. So sánh với FCLS đơn mục tiêu

Trong thử nghiệm cuối cùng của chúng tôi, MOEA/D-LS được so sánh với FCLS - một phương pháp khác được đề xuất cho cùng một mô hình. Sự khác biệt chính là FCLS chuyển đổi MOO-ORP3D thành một bài toán mục tiêu duy nhất bằng vectơ trọng số. Do đó, chúng tôi áp dụng các phương pháp được mô tả trong [44] để so sánh FCLS đơn mục tiêu với MOEA/D-LS đa mục tiêu.

Trong số ba biến thể của thuật toán đơn mục tiêu được giới thiệu trong [44], chúng tôi chọn SOGA-3 cho FCLS. Với $d = 4$ được chỉ định trước, phương pháp này tạo ra 5 vectơ trọng số: $(0,0, 1,0)$, $(0,25, 0,75)$, $(0,5, 0,5)$, $(0,75, 0,25)$, $(1,0, 0,0)$. Năm vectơ khác nhau được sử dụng cho FCLS có thể trả về năm giải pháp riêng biệt, chúng sẽ được tập hợp lại để tạo thành một mặt trận Pareto duy nhất. Chúng tôi so sánh mặt trận Pareto này với MOEA/D-LS trong Hình 14.



Hình 14. Đây là hình đầu tiên.

Bảng 13 cho thấy số lượng cải thiện S giữa FCLS và MOEA/D-LS đạt được sau khi tính toán chỉ số siêu âm lượng. Tuy nhiên, có thể thấy rằng số lượng cải thiện trong cả hai kịch bản đều gần với mức trung bình (5,2 cho bộ dữ liệu $200m \times 200m$ và 6,0 cho bộ dữ liệu $500m \times 500m$). Điều này có nghĩa là kết quả của hai thuật toán không có sự khác biệt đáng kể.

Mặt khác, FCLS yêu cầu 5 lần chạy liên tiếp để thu được hệ số Pareto tương đương với một lần chạy MOEA/D-LS, nghĩa là MOEA/D-LS vẫn có lợi thế về tải tính toán.

6.5. phân tích độ phức tạp

6.5.1. Độ phức tạp về thời gian của mô-đun tìm kiếm cục bộ

Mô-đun tìm kiếm cục bộ trong Phần 5.5 được sử dụng để tối ưu hóa mọi cá thể y mới sau bước sao chép. Mỗi lần chạy có hai bước chính bất kể thứ tự:

- Giảm số lần chuyển tiếp (Thuật toán 3): Chúng tôi xác định $R = \{r_1, r_2, \dots\}$ làm tập hợp các nút chuyển tiếp đã chọn trong y ($r_j \in L$) và làm số lượng cảm biến có kết nối với r_j . Đối với mỗi nút đã chọn r_j , phải mất $|R| - 1$ lần lặp hoặc ít hơn để lặp qua các lần lặp khác, nhân với n để kiểm tra xem r_j một rơle khác có đủ điều kiện để xử lý các kết nối của r_j hay không. Do đó, chi phí để cố gắng loại bỏ r_j là $O(|R|)$ và chi phí cho tất cả các nút là $O(|R| \times \sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j)$. Điều thú vị là số cảm biến, vì vậy $(n \times |R| \times \sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j)$. Điều thú vị là $\sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j = n$. Do đó, độ phức tạp của bước này là: $O(|R| \times \sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j) = O(|R| \times n) = O(m \times n)$.
- Giảm năng lượng (Thuật toán 4): Bước này thực chất là lặp đi lặp lại việc áp dụng hai kỹ thuật nhỏ trên một rơle tiêu thụ năng lượng: ngắt kết nối nó với một cảm biến (bằng cách chuyển liên kết của cảm biến đó sang một rơle khác), hoặc trao đổi trực tiếp với một chuyển tiếp không được chọn tốt hơn.

- Trong trường hợp trước, nó yêu cầu tối đa n vòng lặp để lặp qua tất cả các cảm biến con của r_{crit} , sau đó tìm một rơle thay thế cho từng cảm biến trong số $|R| - 1$ cái còn lại. Độ phức tạp của bước này là $O(|R| \times \sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j)$.
- Cái sau cũng có hai vòng lặp lồng nhau, một vòng để tìm chuyển tiếp giữa m $|R|$ các nút không được chọn và nút còn lại để xác minh xem nút đó có thể kết nối với tất cả n cảm biến hay không. Như vậy, r_{crit} phải mất $O(m \times |R| \times \sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j)$ thời gian cho mỗi lần chạy.

Kết quả là, mỗi bước bao gồm cả hai lần chạy $y = O(m \times n)$ thời gian. Phép đo trong $O(m \times \sum_{r_j \in R} \text{số kết nối của } r_j)$ phức tạp

Bảng 14

Chi phí tính toán của MOEA cho mỗi thế hệ.

thuật toán	Độ phức tạp
MOEA/D	tập $O(Nn + NK)$
MOEA/D-LS	$O(Nn + NK + Nmn(m + T))$
NSGA-II	$O(Nn + N^2)$
SPEA2	$O(Nn + N^2 \text{nhật ký}(N))$
CÁ CH THỨC	$O(Nn + N^2)$

đây là khoảng thời gian hai bước đó được thực hiện. Thuộc tính này chủ yếu bị ảnh hưởng bởi mật độ kết nối hợp lệ trong một phiên bản. Sẽ an toàn hơn nếu chỉ định tham số T - số lần tối đa Thuật toán 5 được áp dụng, giới hạn chi phí tính toán là $O(Tmn)$. Trong thực tế, mô-đun này thực sự chạy khá nhanh ngay cả khi không thêm bất kỳ tiêu chí dừng bổ sung nào.

Tóm lại, mô-đun chạy trong thời gian $O(m2n+Tmn) = O(mn(m + T))$ cho mỗi y riêng lẻ. Vì mỗi thế hệ tạo ra N giải pháp mới, nên tổng độ phức tạp của tìm kiếm cục bộ trong mỗi thế hệ là $O(Nmn(m + T))$.

6.5.2. Chi phí tính toán của MOEA Cần lưu ý

rằng mỗi thao tác (toán tử di truyền, quy trình sao chép của MODE hoặc tính toán thể lực) trong bài toán này có độ phức tạp $O(n)$. Vì tất cả các MOEA đều sử dụng cùng một quy mô dân số $N = 40$, nên độ phức tạp về thời gian của bước tái sản xuất là $O(Nn)$. Hiệu suất của họ khác nhau do các bước tùy chỉnh:

- Bước cập nhật dân số của MOEA/D có độ phức tạp $O(NK)$.
- Thuật toán sắp xếp nhanh không chiếm ưu thế được sử dụng trong NSGA-II và CHẾ ĐỘ chi phí $O(N^2)$.
- Quy trình cắt ngắn của SPEA2 chạy trong $O(N \times \text{Chi phí của } \log(N))$ thời gian. mô-đun tìm kiếm cục bộ là $O(Nmn(m + T))$, như đã đề cập trước đây.

Vì MOO-ORP3D chỉ có hai mục tiêu nên hằng số này bị bỏ qua. **Bảng 14** cho thấy thời gian chạy của MOEA cho mỗi thế hệ.

Kết quả cho thấy mô-đun tối ưu hóa của MOEA/D-LS có độ phức tạp cao hơn đáng kể so với MOEA. Đây là một sự đánh đổi dự kiến cho các mặt trận Pareto được cải thiện. Mặt khác, vì nó là thuật toán tìm kiếm cục bộ nên hiệu suất của nó trong thực tế tốt hơn so với đánh giá dựa trên lý thuyết. Hơn nữa, MOEA/D-LS hội tụ nhanh hơn nhiều so với các MOEA khác, điều này cũng góp phần tạo nên sự cân bằng hợp lý giữa độ phức tạp và tối ưu hóa.

7. Kết luận

Một thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu nhằm mục đích tạo ra các giải pháp càng gần với Tập tối ưu Pareto càng tốt và càng đa dạng càng tốt trong tập hợp không bị chi phối thu được. Tập hợp đa dạng các giải pháp tối ưu này thể hiện sự đánh đổi giữa các mục tiêu khác nhau. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất thuật toán MOEA/D-LS để tối đa hóa thời gian tồn tại của mạng với sự đánh đổi giữa số lượng nút chuyển tiếp được sử dụng và mức tiêu thụ năng lượng. Một chức năng phù hợp đa mục tiêu được lấy để mô hình hóa hai mục tiêu xung đột, trong khi sự thống trị Pareto được sử dụng để chọn giải pháp tốt nhất cục bộ và toàn cầu cho từng cá nhân. Thuật toán MOEA/D-LS đã được đề xuất dựa trên thuật toán MOEA/D nổi tiếng. Trong MOEA/D-LS, mã hóa giải pháp đảm bảo rằng tất cả các cá nhân được tạo đều khả thi. Các toán tử di truyền cũng tạo ra những đứa trẻ thừa hưởng hoàn toàn các đặc điểm của cha mẹ. Để cải thiện các giải pháp, một phư ơng pháp tìm kiếm cục bộ được đề xuất để giảm số lượng rơle được sử dụng và mức tiêu thụ năng lượng tối đa của nút. Thuật toán đã được đưa vào mô phỏng nghiêm ngặt và

đánh giá. Kết quả của chúng tôi chứng minh rằng MOEA/D-LS bên ngoài hình thành các phur ơng pháp hiện có trong một số chỉ số hiệu suất quan trọng. Trong công việc tư ơng lai của chúng tôi, chúng tôi dự định áp dụng các chiến lược học tập để cải thiện hơn nữa hiệu suất của các thuật toán đư ợc đề xuất của chúng tôi. Ngoài ra, chúng tôi xem xét cân bằng vấn đề tiêu thụ năng lượng của WSN trong các tình huống thực tế phức tạp hơn, chẳng hạn như các tình huống có các nút di động trong mạng. Hơn nữa, chúng tôi cũng có ý định mở rộng tư ơng tự cho mạng cảm biến không dây không đồng nhất hoạt động trái ngược với sơ đồ đư ợc đề xuất chỉ hoạt động cho các WSN đồng nhất.

Tuyên bố đóng góp quyền tác giả của CRediT

Nguyễn Thị Tâm: Methodology, Algorithms, Coding, Writing - original draft. Trần Huy Hùng: Algorithms, Coding, Experiment, Writing - original draft. Huỳnh Thị Thanh Bình: Phur ơng pháp luận, Thuật toán, Viết - thảo gốc, Giám sát. Lê Trọng Vinh: Phur ơng pháp luận, Thuật toán, Viết - thảo gốc, Giám sát.

Tuyên bố về lợi ích cạnh tranh

Các tác giả tuyên bố các lợi ích tài chính/mối quan hệ cá nhân sau đây có thể đư ợc coi là lợi ích cạnh tranh tiềm tàng: Nguyễn Thị Tâm, Trần Huy Hùng, Huỳnh Thị Thanh Bình, Lê Trọng Vinh

Sự nhìn nhận

Nguyễn Thị Tâm đư ợc tài trợ bởi Công ty Cổ phần Tập đoàn Vingroup, Việt Nam và đư ợc hỗ trợ bởi Chương trình đào tạo Thạc sĩ/Tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Tập đoàn Vingroup (VINIF), Viện Dữ liệu lớn Tập đoàn Vingroup (VINBIGDATA), mã số VINIF.2020.TS. 105.

Ngư ời giới thiệu

[1] D. Bruckner, C. Picus, R. Velik, W. Herzner, G. Zucker, Kiến trúc xử lý ngư nghĩa phân cấp cho cảm biến thông minh trong mạng giám sát, IEEE Trans. Ind. Inf. 8(2) (2012) 291-301.

[2] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, Khảo sát mạng cảm biến không dây, Máy tính. mạng. 52 (12) (2008) 2292-2330.

[3] H. Mostafaei, Thuật toán tiết kiệm năng lượng để định tuyến tín cậ y cho mạng cảm biến không dây, IEEE Trans. Ấn Độ điện tử. 66 (7) (2018) 5567-5575.

[4] SP Singh, S. Shazma, Một cuộc khảo sát về các giao thức định tuyến dựa trên cụm trong mạng cảm biến không dây, Procedia Comput. Khoa học. 45 (2015) 687-695.

[5] A. Paul, T. Sato, Nội địa hóa trong mạng cảm biến không dây: khảo sát về thuật toán, kỹ thuật đo lường, ứng dụng và thách thức, J. Sensor Actuator Netw. 6(4)(2017)24.

[6] N. Yessad, M. Omar, A. Tari, A. Bouabdallah, Định tuyến dựa trên QoS trong Mạng vùng cơ thể không dây: Khảo sát và phân loại, Máy tính 100 (3) (2018) 245-275.

[7] I. Khan, F. Belqasmi, R. Glitho, N. Crespi, M. Morrow, P. Polakos, Ảo hóa mạng cảm biến không dây: Một cuộc khảo sát, IEEE Commun. sống sót Gia sư. 18(1) (2015) 553-576.

[8] G. Dhand, S. Tyagi, Kỹ thuật tổng hợp dữ liệu trong WSN: Khảo sát, Procedia Điện toán. Khoa học. 92 (2016) 378-384.

[9] H. Yetgin, KTK Cheung, M. El-Hajjar, LH Hanzo, Khảo sát về kỹ thuật tối đa hóa thời gian sống của mạng trong mạng cảm biến không dây, IEEE Commun. sống sót Gia sư. 19 (2) (2017) 828-854.

[10] A. Ghaffari, Cơ chế kiểm soát tắc nghẽn trong mạng cảm biến không dây: Một cuộc khảo sát, J. Netw. Điện toán. ứng dụng 52 (2015) 101-115.

[11] O. Cayirpunar, E. Kadioglu-Urtis, B. Tavli, Các mẫu di động trạm gốc tối ưu để tối đa hóa tuổi thọ của mạng cảm biến không dây, IEEE Sens. J. 15 (11) (2015) 6592-6603.

[12] O. Moh'd Alia, Di chuyển động trạm gốc di động trong mạng cảm biến không dây sử dụng thuật toán tìm kiếm hài hòa dựa trên cụm, Thông báo. Khoa học. 385 (2017) 76-95.

[13] NT Tung, DH Ly, HTT Binh, Tối đa hóa thời gian tồn tại của mạng cảm biến không dây với vị trí đặt trạm gốc, trong: Hội nghị quốc tế về bản chất của tính toán và truyền thông, Springer, 2014, trang 108-116.

[14] NT Tùng, HTT Bình, Mô hình tối ưu hóa nhận biết vị trí trạm gốc trong thời gian tồn tại của mạng cảm biến không dây, Mob. mạng. ứng dụng 21(1)(2016) 10-17.

[15] HZ Abidin, NM Din, NAM Radzi, ZI Rizman, Đánh giá về kỹ thuật đặt nút cảm biến trong mạng cảm biến không dây, Int. J. Adv. Khoa học. Tiếng Anh thông tin liên lạc công nghệ. 7 (1) (2017) 190-197.

[16] KY Bendigeri, JD Mallapur, Chiến lược đư ợc đặt nhiều nút để định tuyến hiệu quả trong mạng cảm biến không dây, Wirel. Mạng cảm biến 7(08)(2015)101.

[17] L. Liu, M. Ma, C. Liu, Y. Shu, Vị trí nút chuyển tiếp tối ưu và phân bổ luồng trong mạng cảm biến âm thanh đư ới nư ớc, IEEE Trans. cộng đồng. 65(5) (2017) 2141-2152.

[18] F. Seneel, M. Younis, Các thuật toán sắp xếp nút chuyển tiếp tiểu thuyết để thiết lập cấu trúc liên kết đư ợc kết nối, J. Netw. Điện toán. ứng dụng 70 (2016) 114-130.

[19] NT Tam, HTT Binh, DA Dung, PN Lan, B. Yuan, X. Yao, et al., Một cách tiếp cận tiến hóa và phân cụm lai để tối đa hóa tuổi thọ của mạng cảm biến ngầm không dây, Inform. Khoa học. 504 (2019) 372-393.

[20] NT Tam, HTT Binh, TH Hung, DA Dung, et al., Kéo dài tuổi thọ mạng của các mạng cảm biến ngầm không dây bằng vị trí nút chuyển tiếp tối ưu, trong: Hội nghị quốc tế về ứng dụng tính toán tiến hóa (Phần của EvoStar), Springer, 2019, trang 439-453.

[21] Y. Xu, Y. Xiao, Q. Sun, Siêu kinh nghiệm dựa trên bày đàn cho vị trí nút chuyển tiếp trong mạng cảm biến không dây, Int. J. Đối mới. Điện toán. thông tin liên lạc Kiểm soát 15 (2) (2019) 551-567.

[22] NT Tam, HTT Binh, VT Dat, PN Lan, et al., Hư ớng tới tuổi thọ mạng cảm biến ít dây tối ưu trong địa hình ba chiều sử dụng metaheuristics bố trí r ờ le, Knowl.-Based Syst. 206 (2020) 106407.

[23] Q. Zhang, H. Li, MOEA/D: Thuật toán tiến hóa đa mục tiêu dựa trên sự phân rã, IEEE Trans. tiến hóa. Điện toán. 11(6) (2007) 712-731.

[24] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, Một thuật toán di truyền đa mục tiêu nhanh và ưu tú: NSGA-II, IEEE Trans. tiến hóa. Điện toán. 6(2) (2002) 182-197.

[25] E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele, SPEA2: Cải thiện sức mạnh Thuật toán tiến hóa Pareto, Tập. 103, TIK-Report, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Institut für Technische, 2001.

[26] F. Xue, AC Sanderson, RJ Graves, Tiến hóa vi phân đa mục tiêu dựa trên Pareto, trong: The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003, Vol. 2, CEC'03, IEEE, 2003, trang 862-869.

[27] S. Misra, SD Hong, G. Xue, J. Tang, Vị trí nút chuyển tiếp bị ràng buộc trong mạng cảm biến không dây: Công thức và xấp xỉ, IEEE/ACM Trans. mạng. 18(2) (2009) 434-447.

[28] W. Zhang, S. Bai, G. Xue, J. Tang, C. Wang, Darp: Vị trí r ờ le nhận biết khoảng cách trong mạng lưu ới wimax, trong: Kỳ yếu 2011 IEEE INFOCOM, IEEE, 2011, trang 2060- 2068.

[29] HA Hashim, BO Ayinde, MA Abido, Vị trí tối ưu của các nút chuyển tiếp trong mạng cảm biến không dây sử dụng thuật toán đàn ong nhân tạo, J. Netw. Điện toán. ứng dụng 64 (2016) 239-248.

[30] B. Yuan, H. Chen, X. Yao, Vị trí chuyển tiếp tối ưu để tối đa hóa tuổi thọ trong mạng cảm biến ngầm không dây, Thông báo. Khoa học. 418 (2017) 463-479.

[31] W. Peng, Q. Zhang, H. Li, So sánh giữa MOEA/D và NSGA-II về bài toán ngư ời bán hàng du lịch đa mục tiêu, trong: Thuật toán ghi nhớ đa mục tiêu, Springer, 2009, trang 309-324.

[32] A. Zhou, B.-Y. Qu, H. Li, S.-Z. Zhao, PN Suganthan, Q. Zhang, Các thuật toán tiến hóa đa mục tiêu: Một cuộc khảo sát về trạng thái của nghệ thuật, Swarm Evol. Điện toán. 1 (1) (2011) 32-49.

[33] JM Lanza-Gutierrez, JA Gomez-Pulido, Giá sử siêu chẩn đoán đa mục tiêu để giải quyết vấn đề tối ưu hóa ba mục tiêu để triển khai Nút chuyển tiếp trong Mạng cảm biến không dây, Ứng dụng. Máy tính mềm. 30 (2015) 675-687.

[34] Y. Xu, O. Ding, R. Qu, K. Li, Thuật toán tiến hóa đa mục tiêu lai dựa trên sự phân tách để tối ưu hóa vùng phủ sóng của mạng cảm biến không dây, Appl. Máy tính mềm. 68 (2018) 268-282.

[35] X. Zhang, Y. Zhou, Q. Zhang, VC Lee, M. Li, MOEA/D vấn đề cụ thể đối với vùng phủ sóng rào cản với cảm biến không dây, IEEE Trans. điện tử. 47 (11) (2016) 3854-3865.

[36] M. Baghour, A. Hajraoui, S. Chakkor, Phân cấp phân cụm thích ứng năng lượng thấp cho mạng cảm biến không dây ba chiều, Adv gần đây. cộng đồng. (2015) 214-218.

[37] RD Gawade, SL Nalbalwar, Giao thức định tuyến dựa trên khoảng cách tiết kiệm năng lượng tập trung cho mạng cảm biến không dây, J. Sensors 2016 (2016).

[38] DT Hai, T. Le Vinh, et al., Sơ đồ phân cụm mở mới cho mạng cảm biến không dây 3D, Appl. Máy tính mềm. 54 (2017) 141-149.

[39] NT Tam, DT Hai, et al., Cải thiện tuổi thọ và kết nối mạng của mạng cảm biến không dây 3D dựa trên phân cụm mờ và tối ưu hóa bầy đàn hạt, Wirel. mạng. 24(5)(2018) 1477-1490.

[40] K. Miettinen, Nonlinear Multiobjective Optimization, Vol. 12, Lò xo Khoa học & Truyền thông Kinh doanh, 2012.

[41] I. Das, J. Dennis, Giao lộ ranh giới bình thường: Một phương pháp mới để tạo ra các điểm tối ưu Pareto trong các vấn đề tối ưu hóa đa tiêu chí, SIAM J. Optim. (1996).

[42] M. Laszczyk, PB Myszkowski, Khảo sát đo lường chất lượng để tối ưu hóa đa mục tiêu. Xây dựng bộ bổ sung các thước đo chất lượng đa mục tiêu, Swarm Evol. Điện toán. 48 (2019) 109-133.

[43] E. Zitzler, L. Thiele, Thuật toán tiến hóa đa mục tiêu: nghiên cứu trừu tượng hợp so sánh và cách tiếp cận Pareto mạnh, IEEE Trans. tiến hóa. Điện toán. 3 (4) (1999) 257-271.

[44] H. Ishibuchi, Y. Nojima, T. Doi, So sánh giữa các thuật toán di truyền đơn mục tiêu và đa mục tiêu: So sánh hiệu suất và các phép đo hiệu suất, trong: 2006 Hội nghị quốc tế về tính toán tiến hóa của IEEE, IEEE, 2006, pp. 1143-1150.