

NÂNG CAO HIỆU QUẢ SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG TRONG MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY BẰNG KỸ THUẬT ĐỊNH TUYẾN KẾT HỢP ĐIỀU KHIỂN TÔ-PÔ DỰA TRÊN GIAO THỨC DSDV

Lê Đức Huy¹, Trần Thị Phương Chi^{2*}, Lê Hữu Bình², Hoàng Văn Hiếu³

¹Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Kinh doanh và Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

³Trường Đại học Công nghệ và Quản lý Hữu Nghị

*Email: phuongchi0910@husc.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/10/2025; ngày hoàn thành phần biên: 10/10/2025; ngày duyệt đăng: 13/10/2025

TÓM TẮT

Trong mạng cảm biến không dây (WSN), hiệu quả sử dụng năng lượng của các nút cảm biến phụ thuộc rất lớn vào thuật toán điều khiển tô-pô và định tuyến. Các công trình nghiên cứu đã công bố thường tách rời định tuyến và điều khiển tô-pô, dẫn đến có trường hợp tô-pô mạng thu được là tối ưu, nhưng không tối ưu về tập lộ trình truyền dữ liệu và ngược lại. Điều này dẫn đến hiệu quả sử dụng năng lượng trong mạng WSN không tốt. Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi đề xuất một giao thức định tuyến kết hợp điều khiển tô-pô dựa trên giao thức DSDV, được đặt tên là TC-DSDV. Ý tưởng của giao thức TC-DSDV là dựa trên bậc hiện hành của nút cảm biến để chọn lộ trình cập nhật vào bảng định tuyến sao cho tô-pô thu được là tối ưu nhất. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng giao thức TC-DSDV hoạt động hiệu quả hơn giao thức DSDV nguyên bản về độ tối ưu tô-pô và hiệu quả sử dụng năng lượng.

Từ khóa: Định tuyến, điều khiển tô-pô, mạng cảm biến không dây, DSDV.

1. MỞ ĐẦU

Trong thời gian gần đây, mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Networks - WSNs) đã nổi lên như một công nghệ nền tảng, đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực như giám sát môi trường, y tế, giao thông thông minh, thành phố thông minh, và quân sự. Các nút cảm biến trong WSN thường có kích thước nhỏ, giá thành thấp, khả năng tính toán hạn chế và quan trọng nhất là nguồn năng lượng hữu hạn, thường được cung cấp bằng pin không thể thay thế hoặc sạc lại trong suốt vòng đời hoạt động. Do

đó, nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng luôn là thách thức then chốt trong thiết kế và vận hành WSN.

Một trong những hướng tiếp cận quan trọng để kéo dài thời gian sống của mạng là điều khiển tô-pô (topology control) và định tuyến (routing). Điều khiển tô-pô cho phép các nút cảm biến tự điều chỉnh phạm vi truyền thông của mình để đạt được cấu trúc mạng tối ưu về mức kết nối, trong khi định tuyến đảm bảo tìm ra các đường đi hiệu quả để truyền dữ liệu từ nguồn đến đích. Tuy nhiên, phần lớn các công trình nghiên cứu trước đây thường tách rời hai bài toán này, hoặc tập trung tối ưu hóa tô-pô, hoặc cải tiến cơ chế định tuyến. Hệ quả là có những trường hợp mạng đạt được tô-pô tối ưu về mặt kết nối, nhưng các lộ trình dữ liệu lại không tối ưu về năng lượng, hoặc ngược lại. Một số công trình nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng sự kết hợp chặt chẽ giữa điều khiển tô-pô và định tuyến có thể mang lại hiệu quả vượt trội so với việc tối ưu hóa riêng lẻ từng thành phần [7], [8], [9]. Khi một nút cảm biến lựa chọn lộ trình, đồng thời nó cũng ảnh hưởng đến cấu trúc kết nối lân cận và phạm vi truyền thông. Do đó, các quyết định định tuyến cần tính đến đặc điểm tô-pô của mạng và ngược lại. Chẳng hạn, nếu một nút chọn lộ trình thông qua một nút láng giềng xa, nó buộc phải mở rộng phạm vi truyền thông, làm tăng số lượng láng giềng kết nối và gây tiêu hao năng lượng nhiều hơn. Ngược lại, nếu chọn lộ trình đi qua một nút gần hơn, phạm vi truyền thông có thể được thu hẹp, góp phần cân bằng mức độ kết nối trong mạng, từ đó giảm thiểu nhiễu và tiết kiệm năng lượng. Như vậy, tối ưu hóa đồng thời định tuyến và điều khiển tô-pô là hướng nghiên cứu cần thiết để nâng cao hiệu quả tổng thể. Đây chính là động cơ thúc đẩy chúng tôi thực hiện công trình nghiên cứu này. Các đóng góp mới của bài báo bao gồm:

- (i) Đề xuất giao thức TC-DSDV với cơ chế cập nhật bảng định tuyến mới, bổ sung tiêu chí cân bằng bậc nút vào quá trình lựa chọn lộ trình.
- (ii) Bằng phương pháp mô phỏng, chúng tôi đã chứng minh được việc kết hợp định tuyến với điều khiển tô-pô mang lại hiệu quả cao hơn hẳn về năng lượng và độ ổn định mạng so với DSDV gốc.

Các phần còn lại của bài báo được bố cục như sau: Phần 2 trình bày các công trình nghiên cứu liên quan. Phần 3 trình bày thuật toán định tuyến kết hợp điều khiển tô-pô được đề xuất. Các kết quả mô phỏng và thảo luận được trình bày trong Phần 4. Cuối cùng là kết luận và đề xuất hướng phát triển tiếp theo, được trình bày trong Phần 5.

2. CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

Trong thời gian gần đây, nhiều công trình đã đề cập đến việc tối ưu hóa định tuyến trong mạng WSN, trong đó giao thức DSDV [2] là một trong những giao thức định tuyến theo bảng ghi tiên phong, dựa trên nguyên tắc duy trì bảng định tuyến tại mỗi nút với trọng số là tổng số chặng (hop-count). Ưu điểm của DSDV là đơn giản, đảm bảo tìm

được đường đi ngắn nhất và hạn chế vòng lặp định tuyến. Tuy nhiên, vì chỉ dựa trên số chặng, DSDV chưa tính đến yếu tố cân bằng năng lượng hay tối ưu hóa tô-pô mạng. Để giải quyết vấn đề này, một số công trình nghiên cứu đã cải tiến giao thức DSDV nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong mạng không dây tùy biến. Nhóm tác giả trong [3] đã đề xuất một cải tiến của giao thức DSDV, được đặt tên là EEDSDV (Energy Efficient DSDV), trong đó điều chỉnh cơ chế truyền/nhận và logic cập nhật bảng định tuyến để giảm tiêu hao năng lượng. EEDSDV thay đổi một số tham số truyền dẫn và ưu tiên các lộ trình tiêu thụ ít năng lượng hơn khi cập nhật bảng định tuyến, nhằm kéo dài tuổi thọ của các nút mạng so với giao thức DSDV gốc. Hạn chế của công trình này là giao thức EEDSDV chủ yếu tập trung vào tiêu chí năng lượng và thử nghiệm trong mô phỏng, chưa đưa vào các yếu tố cấu trúc tô-pô như bậc nút để cân bằng phân bố kết nối. Một công trình nghiên cứu khác cũng đã cải tiến giao thức DSDV bằng cách sử dụng đa tiêu chí (multi-cost) khi lựa chọn lộ trình [4]. Ngoài hop-count còn kết hợp các yếu tố như năng lượng còn lại của nút, chất lượng liên kết, và độ trễ. Việc sử dụng hàm trọng số đa tiêu chí cho phép cân nhắc giữa hiệu năng truyền gói và tiết kiệm năng lượng, giúp cải thiện các độ đo hiệu năng quan trọng như thời gian sống trung bình của nút và tổng năng lượng tiêu thụ. Mặc dù tích hợp nhiều tham số năng lượng, phương pháp này vẫn chưa khai thác trực tiếp thông tin tô-pô (ví dụ bậc nút hay điều khiển vùng truyền thông) để điều chỉnh định tuyến theo mục tiêu cân bằng tô-pô. Một công trình khác cũng đã cải tiến giao thức DSDV thành EDSDV (Efficient DSDV) nhằm giảm độ trễ, mức độ tắc nghẽn và cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng bằng một số kỹ thuật tối ưu hóa cập nhật bảng định tuyến và giảm phụ tải định tuyến. Kết quả mô phỏng đã cho thấy rằng EDSDV cải thiện một vài thông số hiệu năng (delay, overhead) và việc sử dụng năng lượng tiết kiệm hơn so với giao thức DSDV nguyên bản. Tuy nhiên, công trình này cũng có một số hạn chế như các công trình trước, cụ thể là giao thức EDSDV chủ yếu tập trung tối ưu về giao tiếp/băng thông và tiêu thụ năng lượng tổng thể, không sử dụng tiêu chí cân bằng bậc nút như một phần của chiến lược chọn lộ trình và điều khiển tô-pô.

Song song đó, hướng nghiên cứu về điều khiển tô-pô trong mạng WSN cũng đã phát triển mạnh. Nhóm tác giả trong [1] đã đề xuất một thuật toán điều khiển tô-pô dựa trên học tăng cường (reinforcement learning), cho phép các nút cảm biến tự điều chỉnh vùng phủ sóng nhằm đạt được tô-pô cân bằng và tiết kiệm năng lượng hơn. Kết quả cho thấy các phương pháp học máy mang lại triển vọng lớn, nhưng các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào tô-pô, ít quan tâm đến ảnh hưởng đến định tuyến. Cũng với phương pháp ứng dụng học tăng cường vào bài toán điều khiển tô-pô, năm 2024, nhóm tác giả Hồ Hải Quân cùng các cộng sự đã chứng minh rằng các hệ số học (learning rate) và hệ số chiết khấu (discount factor) trong học tăng cường ảnh hưởng mạnh mẽ đến khả năng hội tụ và hiệu quả của thuật toán điều khiển tô-pô [6]. Tuy nhiên, công trình này cũng chỉ tập trung vào khía cạnh tô-pô, chưa kết nối trực tiếp với cơ chế định tuyến truyền thống. Một công trình khác đã tập trung vào việc điều khiển tô-pô cho mạng tùy biến di

đồng trên nền tảng 5G [10]. Trong công trình này, nhóm tác giả thuật toán TFACR (Topology control by Flexibly Adjusting the Coverage Radius), nhằm nâng cao hiệu năng mạng thông qua cơ chế điều chỉnh linh hoạt bán kính phủ sóng của các nút. Khác với các phương pháp truyền thống vốn sử dụng bán kính cố định, TFACR cho phép mỗi nút thích nghi với điều kiện mạng như mật độ nút, độ di động và độ tin cậy liên kết để lựa chọn phạm vi truyền thông phù hợp. Nhờ đó, thuật toán giúp cân bằng giữa tiết kiệm năng lượng và duy trì kết nối ổn định. Kết quả mô phỏng cho thấy TFACR đạt hiệu suất vượt trội hơn so với các thuật toán điều khiển tô-pô khác, với các chỉ số nổi bật như thông lượng cao hơn, tỉ lệ chuyển gói thành công lớn hơn, độ trễ thấp hơn và tiêu hao năng lượng giảm đáng kể. Bên cạnh đó, thuật toán cũng kéo dài tuổi thọ mạng trong nhiều kịch bản khác nhau, đặc biệt khi mật độ hoặc độ di động của nút tăng cao. Tuy nhiên, nghiên cứu chủ yếu mới dừng lại ở mô phỏng, chưa triển khai thực nghiệm và chưa tích hợp sâu với các giao thức định tuyến cụ thể. Đây là hướng mở để phát triển trong tương lai nhằm tối ưu hơn nữa hiệu năng của WSN và MANET thế hệ mới.

Gần đây hơn, một số công trình đã thử nghiệm việc kết hợp điều khiển tô-pô với định tuyến, tuy nhiên vẫn tồn tại hạn chế [7], [8], [9]. Chẳng hạn, các phương pháp dựa trên AODV hoặc DSDV được cải tiến có xét đến yếu tố năng lượng, nhưng thường chỉ bổ sung tiêu chí năng lượng dư thừa của nút, chưa khai thác yếu tố cấu trúc mạng và bậc nút. Việc duy trì phân bố bậc nút cân bằng là yếu tố quan trọng để tránh tình trạng một số nút phải chịu tải lưu lượng quá nhiều dẫn đến hao pin nhanh chóng.

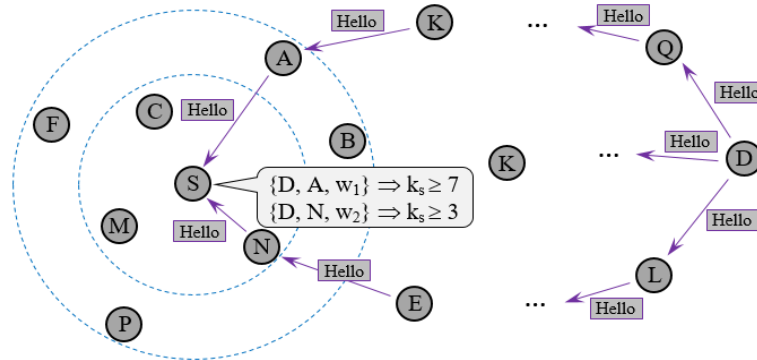
Từ việc khảo sát ở trên có thể thấy rằng, mặc dù đã có nhiều hướng tiếp cận trong các bài toán định tuyến và điều khiển tô-pô, nhưng hầu hết các nghiên cứu vẫn dừng lại ở việc tối ưu hóa đơn lẻ. Vấn đề còn tồn tại lớn hiện nay nằm ở chỗ cần một giải pháp kết hợp đồng thời định tuyến và điều khiển tô-pô, trong đó các quyết định định tuyến được hỗ trợ bởi thông tin về bậc nút và cấu trúc kết nối. Để giải quyết vấn đề này, bài báo đề xuất giao thức TC-DSDV (Topology Control aware DSDV), được cải tiến từ DSDV truyền thống. Ý tưởng chính là khi xử lý gói Hello, ngoài việc cập nhật dựa trên số chặng và số thứ tự, nút còn so sánh chênh lệch giữa bậc nút hiện tại với bậc nút mong đợi. Nhờ đó, mạng có thể đạt được tô-pô cân bằng, giảm tiêu hao năng lượng và tăng độ bền vững. Chi tiết về giao thức này được trình bày trong các phần tiếp theo dưới đây.

3. ĐỊNH TUYẾN KẾT HỢP ĐIỀU KHIỂN TÔ-PÔ DỰA TRÊN GIAO THỨC DSDV

Trong phần này, chúng tôi trình bày thuật toán định tuyến kết hợp điều khiển tô-pô được đề xuất có tên là DSDV-TC, được cải tiến từ cơ chế cập nhật bảng định tuyến của giao thức DSDV [2]. Trước tiên chúng tôi trình bày ý tưởng của thuật toán được đề xuất, sau đó là chi tiết về nguyên lý hoạt động của thuật toán.

3.1. Ý tưởng của thuật toán DSDV-TC

Hình 1 minh họa ý tưởng của thuật toán TC-DSDV. Xét trường hợp nút D gửi quảng bá gói Hello đến các nút khác trong mạng để cập nhật thông tin định tuyến. Theo nguyên lý của giao thức DSDV, khi một nút trung gian nhận được một gói Hello, trước tiên nó sẽ đọc địa chỉ nút đích trong gói Hello, sau đó kiểm tra trong bảng định tuyến của nó xem có lộ trình nào đến nút đích đó hay không. Nếu không, nó sẽ cập nhật một bản ghi mới vào bảng định tuyến với khuôn dạng $\{D, N, w, [các\ trường\ khác]\}$, trong đó D biểu thị nút đích, N biểu thị nút tiếp theo để đi đến đích và w là trọng số của lộ trình này. Trong trường hợp bảng định tuyến của nút đang xét đã có lộ trình đến D , nó sẽ đọc thông tin lộ trình hiện có trong bảng định tuyến. Nếu trọng số của lộ trình hiện có lớn hơn trọng số của lộ trình mới thì lộ trình mới sẽ được cập nhật vào bảng định tuyến để thay thế lộ trình hiện có. Trọng số được sử dụng trong giao thức DSDV là tổng số chặng.

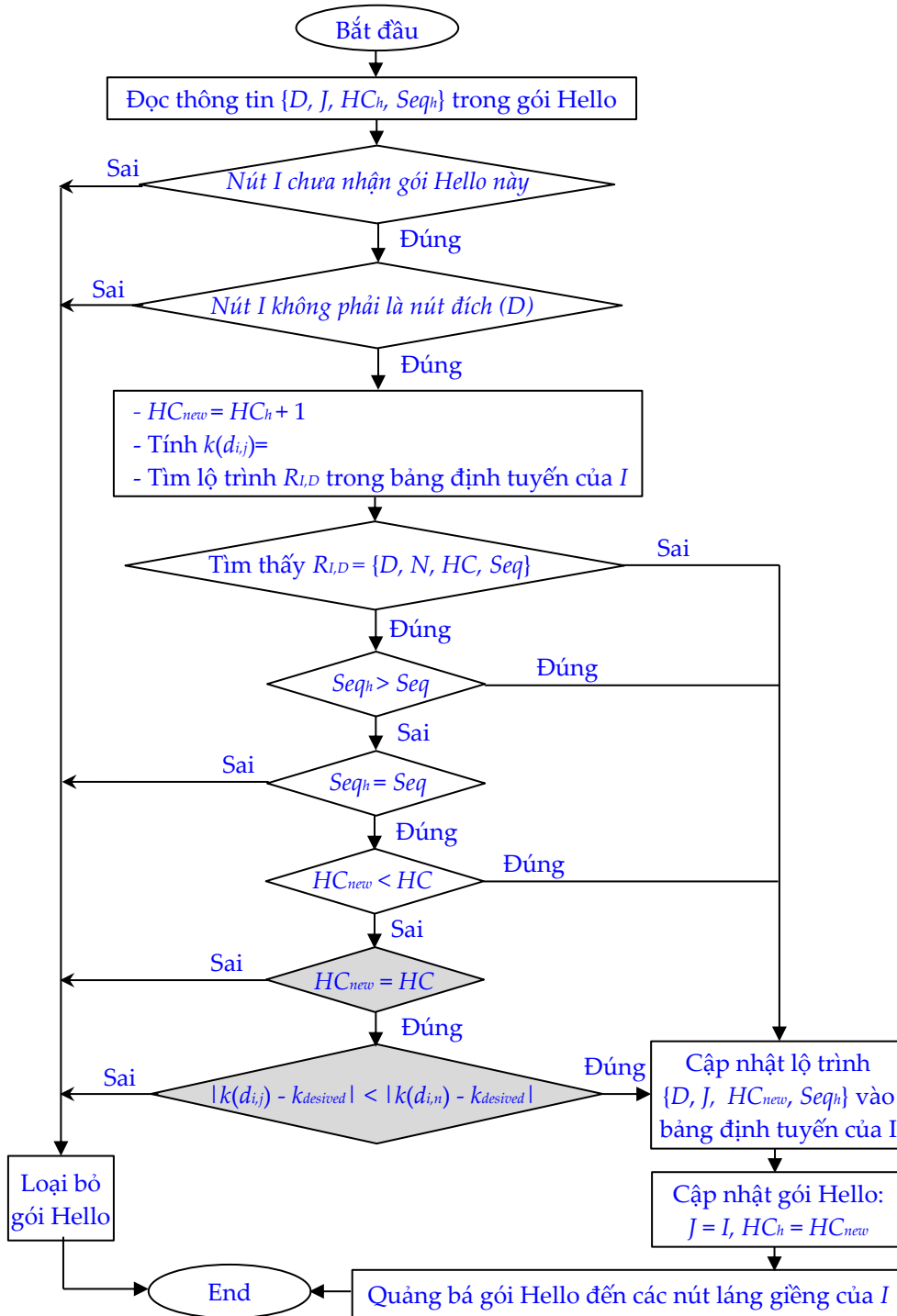


Hình 1. Minh họa ý tưởng của thuật toán DSDV-TC

Dựa trên nguyên lý hoạt động của giao thức DSDV được mô tả ở trên, chúng tôi thấy rằng, giao thức DSDV dựa trên trọng số là tổng số chặng để lựa chọn lộ trình cập nhật vào bảng định tuyến của mỗi nút. Kết quả là các lộ trình truyền dữ liệu trong mạng luôn luôn là lộ trình ngắn nhất (theo nghĩa đi qua ít nút trung gian nhất). Điều này cho phép giảm thiểu độ trễ của việc truyền dữ liệu trong mạng. Tuy nhiên, nếu xét về độ tối ưu tô-pô thì có thể không đạt được. Trở lại ví dụ ở Hình 1, khi nút S nhận gói Hello từ nút A, nếu nút S cập nhật vào bảng định tuyến lộ trình $\{D, A, w, [các\ trường\ khác]\}$ thì bậc của nút S luôn luôn lớn hơn hoặc bằng 7, vì nút S phải duy trì vùng truyền thông tối thiểu để phủ sóng được nút A, khi đó các nút B, C, F, N, M và P cũng nằm trong vùng phủ sóng của nút S, nghĩa là nút S có ít nhất 7 nút láng giềng. Khi nút S nhận gói Hello từ nút N, nếu nút S cập nhật vào bảng định tuyến lộ trình $\{D, N, w, [các\ trường\ khác]\}$ thì bậc của nút S có thể rút gọn về 3 vì nút S có thể thu nhỏ vùng truyền thông đủ để phủ sóng đến nút N, khi đó chỉ có 2 nút láng giềng khác được phủ sóng là C và M. Như vậy, tùy theo lộ trình được chọn mà mỗi nút có thể điều chỉnh vùng truyền thông phù hợp để thu được tô-pô mạng tối ưu, đây là ý tưởng của thuật toán DSDV-TC.

3.2. Thuật toán DSDV-TC

Thuật toán 1 mô tả cơ chế xử lý gói hello trong thuật toán định tuyến DSDV-TC. Khi nút I nhận gói hello từ một nút lân cận, nó sẽ đọc các thông tin chứa trong gói hello gồm các trường $\{D, J, HC_h, Seq_h\}$, trong đó D là nút đích (nút ban đầu tạo ra gói hello), J là nút chuyển tiếp gói hello cho nút I , HC_h là tổng số chặng tính từ nút J đến nút D và số Seq_h là số thứ tự đến đích của gói. Nếu gói tin này chưa từng được xử lý trước đó, nút I sẽ tiếp tục kiểm tra các điều kiện. Trường hợp I không phải là nút đích, nghĩa là gói tin không xuất phát từ chính nó, nút I sẽ tính toán số chặng mới HC_{new} bằng cách tăng giá trị HC_h thêm một. Đồng thời, nút I cũng tính toán bậc $k(d_{i,j})$ của nó nếu vùng truyền thông là $d_{i,j}$. Sau đó, nút I tìm kiếm trong bảng định tuyến của mình để kiểm tra xem đã tồn tại lộ trình đến đích D hay chưa. Nếu có, thuật toán tiến hành so sánh thông tin mới với thông tin cũ dựa trên giá trị số thứ tự Seq và số chặng HC . Nguyên tắc chung là lộ trình nào có số thứ tự lớn hơn hoặc mới hơn sẽ được ưu tiên. Nếu số thứ tự bằng nhau, lộ trình nào có số chặng ngắn hơn sẽ được chọn.



Hình 2. Lưu đồ thuật toán DSDV-TC

Điểm khác biệt giữa thuật toán được đề xuất, DSDV-TC so với thuật toán DSDV nguyên bản là trường hợp số chặng bằng nhau, thuật toán DSDV-TC bổ sung thêm một tiêu chí mới, đó là so sánh mức độ chênh lệch giữa bậc nút thực tế $k(d_{i,j})$ so với bậc nút mong đợi $k_{desired}$. Nút nào có mức chênh lệch nhỏ hơn sẽ được ưu tiên, tức là lộ trình nào

giúp mạng duy trì phân bố bậc nút cân bằng và ổn định hơn sẽ được chọn. Đây chính là điểm khác biệt quan trọng ở các lệnh từ (16) đến (20) so với giao thức gốc AODV, bởi vì AODV nguyên thủy chỉ xét đến số thứ tự và số chặng, mà không quan tâm đến yếu tố điều khiển tô-pô hay sự cân bằng về mức độ kết nối của các nút. Sau khi quá trình so sánh kết thúc, nếu lộ trình mới thỏa mãn điều kiện, nó sẽ thay thế lộ trình cũ trong bảng định tuyến của nút I , đồng thời gói hello sẽ được cập nhật lại thông tin, trong đó trường J được gán bằng I và số chặng được tăng lên HC_{new} . Sau đó, gói tin được tiếp tục quảng bá đến tất cả các nút lân cận của I , giúp lan truyền thông tin định tuyến trong toàn mạng. Ngược lại, nếu không thỏa mãn các điều kiện, gói tin sẽ bị loại bỏ để tránh tràn ngập thông tin không cần thiết. Như vậy, việc bổ sung điều kiện ràng buộc liên quan đến bậc nút giúp thuật toán DSDV-TC chỉ tìm được tập lộ trình hiệu quả mà còn duy trì được cấu trúc mạng tối ưu hơn, giảm thiểu hiện tượng mất cân bằng kết nối trong mạng cảm biến không dây, nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng.

Về độ phức tạp tính toán, thuật toán DSDV-TC có độ phức tạp tính toán cao hơn thuật toán DSDV gốc do bổ sung hai khối kiểm tra điều kiện liên quan đến sự chênh lệch giữa bậc nút hiện tại và bậc mong đợi ($|k(d_{i,j}) - k_{desired}|$). Trong khi DSDV gốc có độ phức tạp trung bình $O(N^2)$ với N là số nút trong mạng, DSDV-TC bổ sung thêm phép so sánh và tính toán bậc nút nên độ phức tạp tăng lên thành $O(N^2 + E)$, trong đó E là số kết nối trung bình đến các nút láng giềng. Tuy nhiên, việc tăng nhẹ độ phức tạp này giúp thuật toán cải thiện đáng kể tính ổn định và giảm số lần cập nhật không cần thiết.

4. MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

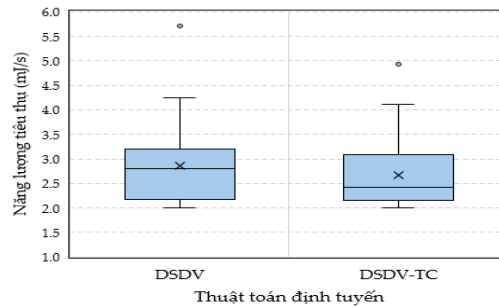
4.1. Kịch bản mô phỏng

Mô phỏng được triển khai trên OMNeT++, mạng được bố trí trong diện tích $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ với 50 nút cảm biến được phân bố ngẫu nhiên. Mỗi nút có năng lượng ban đầu là 20 J và phạm vi truyền thông tối đa là 250 m. Mô hình suy hao tín hiệu sử dụng không gian tự do. Trong kịch bản này, hai giao thức định tuyến được triển khai song song là DSDV truyền thống và giao thức được đề xuất TC-DSDV. Kết quả so sánh sẽ tập trung vào các độ đo quan trọng như mức tiêu thụ năng lượng và thông lượng mạng nhằm chứng minh ưu thế của giao thức TC-DSDV so với giao thức gốc.

4.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

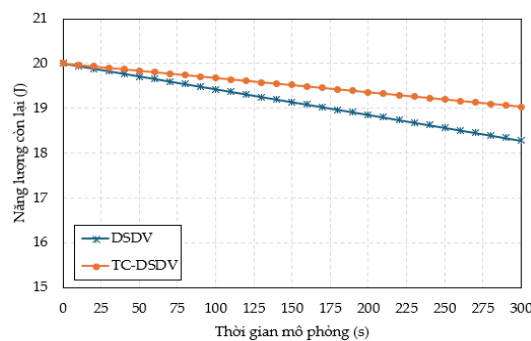
Kết quả mô phỏng ở Hình 3 thể hiện sự so sánh mức năng lượng tiêu thụ trung bình của hai giao thức định tuyến DSDV và DSDV-TC. Kết quả cho thấy DSDV có mức tiêu thụ năng lượng cao hơn, với giá trị trung vị khoảng 2.7 mJ/s và phân bố dao động rộng từ 2.0 đến 4.2 mJ/s, đồng thời xuất hiện giá trị ngoại lai lên tới gần 5.8 mJ/s, phản ánh sự kém ổn định về hiệu quả sử dụng năng lượng. Ngược lại, DSDV-TC đạt được mức tiêu thụ năng lượng thấp hơn và ổn định hơn, với trung vị khoảng 2.4 mJ/s, biên độ

dao động hẹp hơn (2.0–3.8 mJ/s) và chỉ có một giá trị ngoại lai ở mức 5.0 mJ/s. Giá trị trung bình của DSDV-TC cũng thấp hơn so với DSDV, khẳng định vai trò của cơ chế kiểm soát tô-pô trong việc giảm năng lượng tiêu hao của các nút mạng. Như vậy, có thể nhận thấy rằng DSDV-TC giúp tiết kiệm năng lượng hiệu quả hơn, góp phần kéo dài thời gian sống của mạng và cải thiện tính bền vững trong quá trình vận hành.



Hình 3. So sánh năng lượng tiêu thụ của giao thức DSDV và DSDV-TC

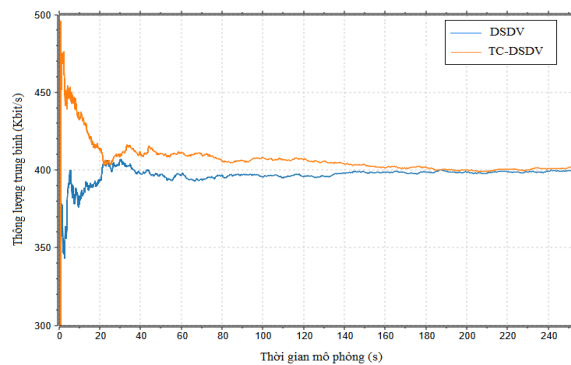
Tiếp theo, chúng tôi phân tích năng lượng còn lại tại các nút cảm biến theo thời gian mô phỏng, kết quả thu được như ở Hình 4. Năng lượng của cả hai giao thức đều giảm dần theo thời gian do hoạt động truyền nhận và xử lý gói tin, tuy nhiên tốc độ suy giảm giữa chúng có sự khác biệt rõ rệt. Với DSDV, năng lượng còn lại giảm nhanh hơn, sau 300 giây mô phỏng chỉ còn khoảng 18.2 J. Trong khi đó, TC-DSDV duy trì mức năng lượng cao hơn, khoảng 18.9 J vào cùng thời điểm. Kết quả này chứng tỏ rằng cơ chế kiểm soát tô-pô trong TC-DSDV giúp hạn chế số lượng gói tin cần truyền, giảm thiểu các hoạt động không cần thiết và từ đó tiết kiệm năng lượng cho toàn mạng. Sự chênh lệch về năng lượng còn lại giữa hai giao thức ngày càng rõ khi thời gian mô phỏng kéo dài, cho thấy lợi thế lâu dài của TC-DSDV trong việc kéo dài tuổi thọ mạng cảm biến.



Hình 4. So sánh năng lượng còn lại tại các nút của giao thức DSDV và DSDV-TC

Trong khi các kết quả về năng lượng cho thấy TC-DSDV vượt trội hơn trong việc tiết kiệm và duy trì năng lượng của các nút, thì để đánh giá toàn diện hiệu quả giao thức, cần xem xét thêm khả năng truyền dữ liệu của mạng thông qua chỉ số thông lượng trung bình, được minh họa trong Hình 5. Trong giai đoạn đầu (từ 0 đến 40 giây), thông lượng của cả hai giao thức biến động mạnh do quá trình khởi tạo mạng và thiết lập bảng định

tuyến. TC-DSDV nhanh chóng đạt được mức thông lượng ổn định cao hơn, trong khi DSDV mất nhiều thời gian hơn để hội tụ và có mức thông lượng thấp hơn. Khi hệ thống đi vào trạng thái ổn định (sau khoảng 60 giây), thông lượng trung bình của DSDV duy trì ở mức xấp xỉ từ 395 đến 400 Kbit/s, trong khi TC-DSDV đạt khoảng 410 đến 420 Kbit/s. Sự khác biệt này cho thấy việc tích hợp cơ chế kiểm soát tô-pô trong TC-DSDV đã giúp giảm tải việc xử lý các gói định tuyến dư thừa, đồng thời tối ưu hóa đường truyền dữ liệu. Mặc dù sau khoảng 200 giây, hai giao thức có xu hướng hội tụ gần nhau, nhưng TC-DSDV vẫn giữ được ưu thế nhẹ về thông lượng so với DSDV. Kết quả này khẳng định rằng TC-DSDV không chỉ tiết kiệm năng lượng mà còn cải thiện hiệu quả truyền dữ liệu, góp phần nâng cao hiệu suất toàn mạng trong giai đoạn hoạt động ổn định.



Hình 5. So sánh thông lượng khi sử dụng giao thức định tuyến DSDV và DSDV-TC

5. KẾT LUẬN

Hiệu năng tổng thể luôn là thách thức quan trọng trong thiết kế và vận hành mạng cảm biến không dây. Để giải quyết vấn đề này, bài báo đã đề xuất giao thức TC-DSDV, được cải tiến từ DSDV bằng cách kết hợp đồng thời định tuyến với điều khiển tô-pô. Điểm mới của TC-DSDV là bổ sung tiêu chí so sánh dựa trên chênh lệch bậc nút hiện tại và bậc nút mong đợi, giúp duy trì cấu trúc mạng cân bằng và ổn định hơn. Kết quả mô phỏng trên OMNeT++ và INET Framework cho thấy TC-DSDV giảm tiêu thụ năng lượng, duy trì năng lượng còn lại lâu hơn và cải thiện thông lượng so với DSDV truyền thống. Trong tương lai, giao thức có thể được mở rộng cho các kịch bản mạng lớn hơn và tích hợp các kỹ thuật học máy để nâng cao tính thích ứng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Le, Thien Moh, Sangman. (2017), "An Energy-Eficient Topology Control Algorithm Based on Reinforcement Learning for Wireless Sensor Networks", *International Journal of Control and Automation*, 10. 233-244. 10.14257/ijca.2017.10.5.22.
- [2] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat (1994), "Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers", *Proceedings of SIGCOMM'94*,

- Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp.234-244.
- [3] Dheeraj K. A., Shiva P. (2012), "Design an Energy Efficient DSDV routing protocol for Mobile Ad Hoc Network", *Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 5, no.1, pp. 526-535.
- [4] D.Loganathan, P.Ramamoorthy (2013), "Performance Analysis of Enhanced DSDV Protocol for Efficient Routing In Wireless Ad Hoc Networks", *Research Inventy: International Journal Of Engineering And Science*, vol. 2, no.10, pp. 1-8.
- [5] M. Naseem and C. Kumar (2013), "EDSDV: Efficient DSDV routing protocol for MANET," *2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, Enathi, India, pp. 1-4.
- [6] H. H. Quân, L. H. Bình, N. Đ. H. Cường, N. N. Lương, "Khảo sát ảnh hưởng của hệ số học và hệ số chiết khấu trong học tăng cường khi áp dụng vào bài toán điều khiển tô-pô trong mạng cảm biến không dây", *Tạp chí khoa học và công nghệ, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế*, tập 27, số 1B, 2024, trang 95-107.
- [7] Zhao Q., Wei Y., and Liya Zhang, (2023), "Energy-Efficient Opportunistic Routing Algorithm for Post-Disaster Mine Internet of Things Networks", *Sensors*, vol. 23, no. 16, pp. 7213.
- [8] T.-V. T. Duong, L. H. Binh, and L. D. Huy, "Routing-based Optimal Topology Control for Improving Quality of Transmission and Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks", *Eng. J.*, vol. 29, no. 5, pp. 95-105, May 2025.
- [9] Huang Y. *et. al.*, "A Novel Topology Control Approach to Maintain the Node Degree in Dynamic Wireless Sensor Networks", *Sensors*, vol.14, no.3, 2014; 14(3), pp.4672-4688.
- [10] L. H. Binh, T. -V. T. Duong and V. M. Ngo, "TFACR: A Novel Topology Control Algorithm for Improving 5G-Based MANET Performance by Flexibly Adjusting the Coverage Radius", *IEEE Access*, vol. 11, 2023, pp. 105734-105748.

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING A TOPOLOGY CONTROL AWARE ROUTING TECHNIQUE BASED ON THE DSDV PROTOCOL

Le Duc Huy¹, Le Huu Binh², Tran Thi Phuong Chi^{2*}, Hoang Van Hieu³

¹Faculty of Information Technology, Hanoi University of Business and Technology

²Faculty of Information Technology, University of Sciences, Hue University

³Faculty of Information Technology, University of Technology and Management

*Email: phuongchi0910@husc.edu.vn

ABSTRACT

In wireless sensor networks (WSNs), the energy efficiency of sensor nodes strongly depends on topology control and routing algorithms. Most existing studies treat these two problems separately, which may lead to suboptimal results: a network topology may be optimal, but the routing paths are not energy-efficient, or vice versa. To address this issue, we propose a topology-control-aware routing protocol based on DSDV, referred to as TC-DSDV. The key idea of TC-DSDV is to use the current node degree when selecting routing paths to update in the routing table, thereby optimizing the resulting network topology. Simulation results demonstrate that TC-DSDV outperforms the original DSDV protocol in terms of topology optimization and energy efficiency.

Keywords: Routing, topology control, wireless sensor networks, DSDV.