



► BÙI NGỌC THANH BÌNH

Bùi Ngọc Thanh Bình hiện là sinh viên năm cuối chương trình chất lượng cao tại khoa Điện tử - Viễn thông, trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM, Việt Nam. Hiện tại anh đang là hỗ trợ nghiên cứu tại phòng thí nghiệm Impact Communication Technology (ICTLAB). Những lĩnh vực nghiên cứu chính của anh bao gồm các giao thức mạng và mạng máy tính.

GIẢI PHÁP BỘ ĐỆM ĐỂ CẢI THIỆN HIỆU SUẤT MẠNG CẢM BIẾN KHÔNG DÂY TUYẾN TÍNH DAO ĐỘNG

Bùi Ngọc Thanh Bình¹, Nguyễn Trường Giang², Trần Thị Thảo Nguyên³ và Nguyễn Việt Hà⁴

¹ Bùi Ngọc Thanh Bình, sinh viên, Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Khoa Học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam (Email: 19207049@student.hcmus.edu.vn)

² Nguyễn Trường Giang, sinh viên, Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Khoa Học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam (Email: 19200288@student.hcmus.edu.vn)

³ Trần Thị Thảo Nguyên, Giảng viên, Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Khoa Học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam (Email: ttnguyen@hcmus.edu.vn)

⁴ Nguyễn Việt Hà, Giảng viên, Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Khoa Học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam (Email: nvha@hcmus.edu.vn)

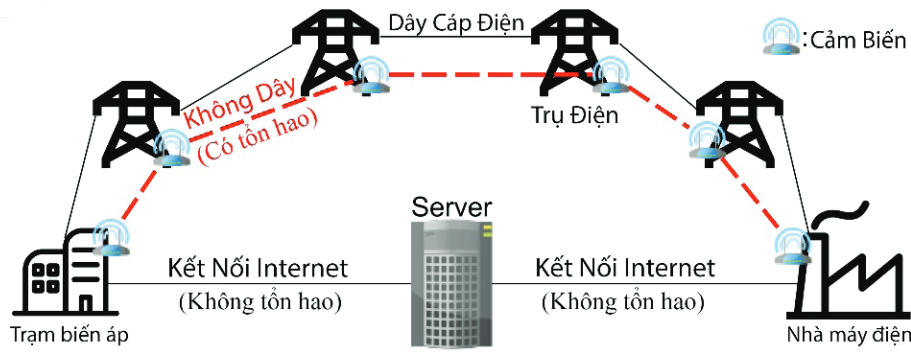
TÓM TẮT:

Mạng cảm biến không dây tuyến tính có nhiều ứng dụng tiềm năng, bao gồm các phương tiện giám sát và giám sát sự kiện cục bộ. Ví dụ, chúng phù hợp trong các tình huống như lưới phân phối điện ở các khu vực đang phát triển nơi không có kết nối cáp thông thường. Trong các mạng này, mỗi nút cảm biến tạo ra các gói thông tin và chuyển tiếp chúng một cách tuần tự qua các nút khác tới các cổng ở cuối mạng. Sau đó, các cổng này truyền dữ liệu đến máy chủ. Những nỗ lực nghiên cứu trước đây đã giới thiệu khung lập kế hoạch dựa trên TDMA không tranh chấp để đảm bảo phân phối hiệu quả và chủ động khôi phục các gói tin bị mất nhằm mục đích triển khai và vận hành ổn định và tiết kiệm chi phí. Tuy nhiên, đôi khi, sự biến động trong việc tạo gói tại một cảm biến vượt quá khả năng được phân bổ của các liên kết, dẫn đến mất gói không thể khôi phục được. Bài viết này giải quyết vấn đề biến động gói bằng cách tập trung vào việc cải thiện xác suất phân phối thành công bằng cách sử dụng phương pháp bộ đệm để nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu. Kết quả mô phỏng chứng minh rằng phương pháp này làm tăng tỷ lệ phân phối thành công lên tới 17% so với phương pháp trước đó.

Từ khóa: Cảm biến không dây tuyến tính, TDMA, phục hồi gói tin bị mất chủ động, bộ đệm.

1. GIỚI THIỆU

Mạng không dây tuyến tính [1] đã thu hút sự chú ý đáng kể trong vài thập kỷ trở lại đây do hiệu quả về chi phí, triển khai nhanh chóng và khả năng kết nối, bao phủ các nút ở các khu vực mà mạng không dây đơn chặng không đáp ứng được (ví dụ như khoảng cách xa). Loại mạng này rất hữu ích trong việc giám sát các khu vực lớn và thu thập dữ liệu khi cơ sở hạ tầng truyền thông không có sẵn



Hình 1: Giám sát hệ thống lưới phân phối và sự kiện cục bộ trong các khu vực có hạ tầng đang phát triển bằng cách sử dụng các cảm biến không dây.

hoặc có chi phí lắp đặt đắt đỏ. Một ứng dụng tiềm năng là việc giám sát cơ sở hạ tầng và giám sát sự kiện cục bộ cho lưới phân phối điện bằng các cảm biến tại cột điện trong các khu vực mạng hạ tầng đang phát triển, nơi cáp kết nối không có sẵn, như được thể hiện trong Hình 1. Trong môi trường như vậy, mất gói dữ liệu có thể xảy ra do sự suy giảm, pha-đỉnh trên mỗi liên kết và nhiễu giữa các nút cảm biến kế cận. Để giảm thiểu các vấn đề này, thông thường các gói dữ liệu bị mất được khôi phục thông qua các phương pháp tiếp cận chủ động như Forward Erasure Correction (FEC) hoặc các phương pháp Automatic Repeat-reQuest (ARQ). Việc truyền gói dữ liệu đồng thời được điều chỉnh bằng các cơ chế Kiểm soát truy cập phương tiện (Media Access Control – MAC), có thể đạt được thông qua các phương pháp dựa trên lịch trình như Time Division Multiple Access (TDMA) [2], [3] hoặc các phương pháp dựa trên độn độ như Carrier Sense Multiple Access (CSMA) [4].

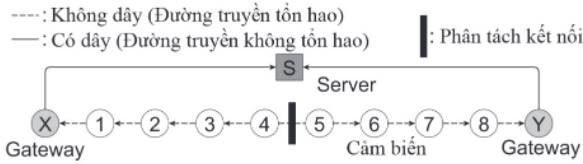
Với ứng dụng trong Hình 1, chỉ cần một cấu trúc liên kết đơn giản nhất của mạng không dây đa bước là đủ. Các cảm biến giám sát được lắp đặt tại mỗi cột điện, thiết lập một kết nối không dây giữa chúng, và định kỳ tạo ra các gói dữ liệu giám sát và cuối cùng chuyển tiếp đến máy chủ quản lý trung tâm. Các cảm biến cố định được sắp xếp theo hàng và kết nối liên tiếp thông qua các liên kết không đáng tin cậy và dễ mất dữ liệu. Mỗi cảm biến hoạt động như một thiết bị gửi dữ liệu, tạo ra một gói dữ liệu trong mỗi chu kỳ và đồng thời là một thiết bị chuyển tiếp dữ liệu, truyền các gói dữ liệu với số lần truyền dự phòng giới hạn đến đầu cuối của mạng nối tiếp. Hai cổng được đặt ở hai đầu của mạng và kết nối với máy chủ quản lý trung tâm thông qua một mạng tin tưởng.

Vấn đề chính là việc trao đổi các gói tin diễn ra độc lập giữa các nút cảm biến lân cận bằng cách sử dụng các liên kết không dây giới hạn khoảng cách, chi phí thấp và bị mất mát trong khi vẫn đảm bảo tính ổn định của cấu trúc mạng tổng thể. Trong các cấu trúc liên kết mạng tổng quát, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc kiểm soát các luồng gói tin liên quan đến thời gian (lập lịch) và không gian (định tuyến hoặc phân bổ băng tần) để ngăn sự xung đột giữa các truyền dẫn đồng thời. Đồ thị xung đột thường được sử dụng để mô tả tình huống xung đột giữa các liên kết [5]; tuy nhiên, việc tạo lịch trình và/hoặc

định tuyến tối ưu từ những đồ thị này có thể rất phức tạp. Ngược lại, trong các liên kết mạng tuyến tính, mô hình đường dẫn cho việc định tuyến và đồ thị xung đột có thể được xử lý đơn giản hơn, cho phép công thức tối ưu hóa đơn giản hơn trong việc lập lịch và định tuyến.

Công trình nghiên cứu trước đây [6]-[8] đã giới thiệu một khung lịch trình trung tâm để thiết kế việc phân bổ khe thời gian tĩnh cho việc truyền gửi gói tin dự phòng. Trong khung lịch trình này, một bộ lập lịch trung tâm biết tất cả các tham số điều kiện, như cấu trúc mạng, thời gian chu kỳ thu thập dữ liệu, băng thông truyền gửi (dung lượng), tỷ lệ mất gói dữ liệu trên từng liên kết và số gói tin được tạo ra tại mỗi nút (cảm biến). Bộ lập lịch xác định một lịch trình tối ưu dựa trên xác suất thành công trong việc truyền dữ liệu từ tất cả các cảm biến đến một trong các cổng và thiết lập lịch trình đó tới từng nút. Phương pháp được đề xuất có thể xử lý các liên kết không đồng nhất, tỷ lệ mất gói dữ liệu khác nhau và tỷ lệ tạo gói tin khác nhau tại các nút. Là một phương pháp truyền gửi gói tin dự phòng chủ động để ứng phó với các liên kết mất gói, phương pháp này có thể tích hợp một phương pháp truyền lại đơn giản trong đó cùng một gói tin được truyền lại liên tục và một phương pháp dựa trên FEC trong đó các gói tin dự phòng đa dạng được tạo ra thông qua mã hóa XOR giữa các gói tin. Tuy nhiên, tối ưu hóa của phương pháp này phụ thuộc vào tính ổn định của các điều kiện. Tỷ lệ mất gói dữ liệu trên từng liên kết là xác suất và về cơ bản là một giá trị trung bình, vì vậy nó có thể được coi là ổn định trong trường hợp hệ thống mạng cố định. Tuy nhiên, số lượng gói tin mà một cảm biến tạo ra có thể thay đổi từ chu kỳ này sang chu kỳ khác tùy thuộc vào loại dữ liệu cảm biến, ngay cả khi giá trị trung bình của nó ổn định. Khi một biến động gói tin tại một cảm biến xảy ra, đôi khi số lượng gói tin cần truyền vượt quá khả năng của các liên kết được phân bổ bởi lịch trình tối ưu, làm tăng tỷ lệ mất gói tin và không thể phục hồi. Bài báo này giải quyết vấn đề này bằng cách sử dụng một chiến lược đệm gói tin.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Phần II giới thiệu về lập lịch TDMA. Phần III giải thích về phương pháp đệm gói tin. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Phần IV, và kết luận được đưa ra trong phần V.



Hình 2: Mô hình mạng cảm biến không dây tuyến tính

2. LẬP LỊCH TDMA

2.1. Mô hình hệ thống

Mô hình trong bài báo này là một môi trường trong đó có nhiều nút (Cảm biến) được kết nối đến một máy chủ (Server) thông qua các cổng (Gateway) dựa trên môi trường được giả định như trong Hình 1. Đây được gọi là mô hình truyền thông không dây đa chặng tuyến tính và mục tiêu là cấu trúc liên kết mạng với các cổng được đặt ở cả hai đầu, như được thể hiện trong Hình 2. Giữa hai cổng, tồn tại một số lượng tùy ý các nút (được ký hiệu là N , trong trường hợp này, $N = 8$). Mục tiêu cuối cùng là thu thập thông tin từ các nút cảm biến đến máy chủ. Các điều kiện cần thiết cho mô hình truyền thông không dây đa bước nhảy tuyến tính được mô tả như sau và trong Bảng I.

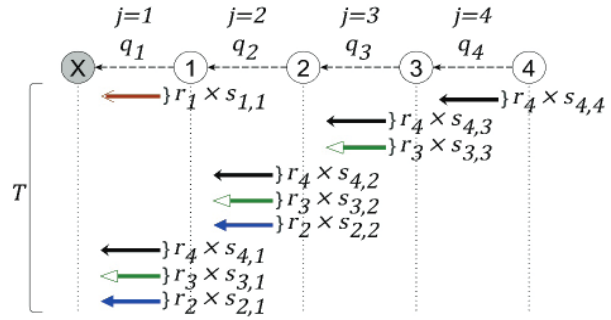
- Có nút được đánh số từ đến theo từ trái bên trái.

- Tổng cộng có $N + 1$ liên kết không dây. j là chỉ số liên kết với $j = (1, 2, \dots, N + 1)$ giữa các nút và giữa các nút và cổng ở cả hai đầu..

- Trong một khe thời gian của một chu kỳ, N nút tạo ra các gói tin một cách độc lập (r_i gói tin cho mỗi nút). Số khe thời gian trong một chu kỳ là T . Hai nút kế cận không truyền các gói tin đồng thời theo cùng một hướng để tránh nhiễu vô tuyến.

- Trong một khoảng thời gian nhất định, các gói tin được chuyển tiếp từ các nút tạo ra đến một trong hai Cổng (X hoặc Y) ở hai đầu của mạng bằng cách sử dụng phương pháp lưu trữ và chuyển tiếp (store-and-forward), và chúng được truyền đến máy chủ trung tâm S thông qua một mạng cơ sở đáng tin cậy (không gây ra mất gói tin).

- Tỷ lệ mất gói tin trên mỗi liên kết được biểu thị bằng q_j , trong đó $0 < q_j \leq 1$. Lưu ý rằng máy chủ S và các



Hình 3: Phần bên trái của liên kết tách biệt trong Mô hình 4-4.

Cổng được kết nối thông qua một mạng cơ sở đáng tin cậy (không gây ra mất gói tin), ví dụ như mạng internet với kết nối có dây..

Một “liên kết tách biệt” tạo ra hai đường dẫn riêng biệt: đường dẫn bên trái và đường dẫn bên phải. Bất kỳ liên kết nào cũng có thể được chọn là liên kết tách biệt, miễn là không có lỗi vật lý hoặc gián đoạn. Bằng cách sử dụng các kế hoạch được giải thích trong các Chương II-B và II-C, một lịch trình tối ưu và hiệu suất tương ứng của từng trường hợp vị trí liên kết tách biệt được tính toán. Do đó, sau khi xem xét tất cả các vị trí có thể, vị trí tốt nhất của liên kết tách biệt có thể được lựa chọn. Ví dụ, trong Hình 2, liên kết tách biệt nằm giữa các nút 4 và 5. Các nút nằm bên trái của liên kết tách biệt sẽ gửi gói tin của họ đến Cổng X, trong khi các nút nằm bên phải của liên kết tách biệt sẽ gửi gói tin của họ đến Cổng Y. Mô hình này được gọi là một mô hình $l - r$, trong đó l đại diện cho số lượng nút nằm bên trái của liên kết tách biệt, và đại diện cho số lượng nút nằm bên phải. Hình 2 là một ví dụ về một mô hình 4-4.

Trong mô hình này, tổng cộng $\sum_{i=1}^N r_i$ gói tin cần được gửi đến máy chủ S. Đối với mỗi nút i , xác suất để tất cả r_i gói tin đến cổng GW trong một chu kỳ thời gian cần được tối ưu; nhưng cũng cần xem xét tính công bằng giữa tất cả các nút. Do đó, chúng tôi thiết kế một lịch trình tối ưu để tối đa hóa tích của xác suất gửi thành công cho tất cả các nút. Tích này bằng với xác suất gửi thành công của tất cả các gói tin bất kể các nút tạo ra chúng nếu tất cả

Bảng 1: Miêu tả thuật ngữ

Tên gọi	Mô tả
N	Tổng số nút có trong liên kết mạng.
i	Thứ tự của nút ($0 < i < N$).
j	Thứ tự của liên kết ($0 < j \leq N + 1$).
r_i	Số lượng gói tin được tạo ra tại nút trong một chu kỳ thời gian.
q_j	Tỉ lệ rớt gói trong liên kết j .
T	Số khe thời gian trong một chu kỳ.
$s_{(i,j)}$	Số lần truyền dư thừa cho một gói tin duy nhất được tạo ra tại nút i trên liên kết j .

các mắt mát gói trên bất kỳ liên kết nào xảy ra độc lập. Trong các phần tiếp theo, tích này đôi khi được gọi tắt là tỷ lệ thành công (success rate). Xin lưu ý rằng một bộ lập lịch trung tâm tính toán lịch trình dựa trên TDMA. Để thu được một lịch trình tối ưu, tất cả các thông số điều kiện cần thiết như số lần chạy T của các khe trong một chu kỳ, tỷ lệ mất kết nối trên liên kết q_j và tỷ lệ tạo gói r_i đều được có sẵn thông qua bộ lập lịch. Bài báo này không bàn về cách cài đặt một lịch trình tạo ra cho từng nút..

2.2. Phân bổ khe thời gian

Phân bổ khe thời gian được thiết kế để ngăn chặn nhiều vô tuyến bằng cách đảm bảo rằng các liên kết lân cận (liên kết nằm trong phạm vi nhiễu) không truyền cùng lúc trong cùng một hướng và trong cùng một khe thời gian. Như một phương pháp truyền gói tin dự phòng chủ động để khắc phục mất mát gói tin trên các liên kết, bài báo này áp dụng một phương pháp lập đơn giản vì chúng tôi tập trung vào việc nghiên cứu tác động cơ bản của phương pháp bộ đệm được đề xuất. Trong phương pháp lập, nút i truyền các gói tin mà nó đang giữ, có thể là nhận từ nút kế tiếp trước đó hoặc được tạo ngay tại nút i . Các gói tin được truyền lại nhiều lần để đảm bảo việc truyền tải đáng tin cậy. Gọi $s_{i,j}$ đại diện cho số lần truyền lại được lên lịch trên liên kết j cho một gói tin duy nhất được tạo ra tại nút i . Để phù hợp với việc truyền $s_{i,j}$ lần, các khe thời gian $r_j \times s_{i,j}$ phải được phân bổ trên liên kết j cho tất cả các gói tin được tạo ra tại nút i . Hình 3 minh họa một ví dụ về phân bổ khe thời gian cho phía trái của liên kết tách biệt trong Mô hình 4-4. Lưu ý rằng phương pháp phân bổ khe thời gian của chúng tôi có thể áp dụng cho bất kỳ mô hình $l - r$ nào..

2.3. Tối đa hóa xác suất phân bổ thành công

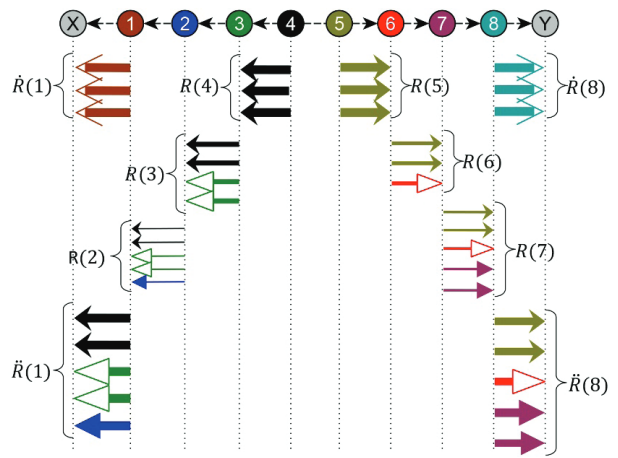
Lịch trình tối ưu cho mỗi đoạn (phía trái và phía phải) được tính toán độc lập cho mọi phân chia cụ thể. Phía trái được gán $i \leq n$, và phía phải được gán $i > n$, trong đó n là số lượng nút phía trái. Chúng tôi sử dụng trường hợp mô hình 4-4 như được thể hiện trong Hình 3 để giải thích cách thu được phân bổ khe tối ưu, đặc biệt là trên phân đoạn phía trái. Đối với mỗi nút i trên phân đoạn phía trái, xác suất của nút i gửi thành công tất cả các gói tin đến máy chủ S là (1). Tích của những xác suất đó cho tất cả các nút trên phân đoạn phía trái là (2).

$$M(i) = \prod_{j=1}^i (1 - q_j^{s_{i,j}}) \#(1)$$

$$M_{left} = \prod_{i=1}^n M(i) \#(2)$$

Trong trường hợp cho phép truyền cùng lúc bởi các nút cách xa hai bước, tổng số khe thời gian T trong một chu kỳ là bằng (3) trên phân đoạn phía trái. Ví dụ, trong Hình 3, các khe thời gian của $r_1 \times s_{1,1} = r_4 \times s_{4,4}$ được sử dụng cho các truyền cùng lúc bởi cả các nút 1 và 4, và do đó chúng chỉ nên được tính một lần trong T.

$$T = \sum_{i=n-2}^n \sum_{j=1}^i r_i \times s_{i,j} \#(3)$$



Hình 4: Ví dụ về truyền tải đồng thời trong mô hình 4-4.

Để tìm một phân bổ khe thời gian tối ưu, tức là một tập hợp $\{s_{i,j}\}$ tối đa hóa (2) với điều kiện (3), chúng ta áp dụng phương pháp hệ số nhân Lagrange [9] cho một bài toán nói lỏng bằng cách cho phép một giải pháp số thực của $\{s_{i,j}\}$ trong đó giải pháp nói lỏng được biểu thị bởi (4) bằng cách sử dụng biến trung gian α . Lưu ý rằng hoặc $s_{i,1}$ hoặc $s_{i,4}$ nên được biểu diễn bằng (4), không phải cả hai. Do đó, chúng ta cần chia thành hai trường hợp; một trường hợp trong đó liên kết $j = 4$ nên được ưu tiên hơn liên kết $j = 1$ và trường hợp ngược lại. Giải pháp tối ưu tồn tại trong một trong hai trường hợp. Đối với mạng lưới lớn hơn (với một số lượng lớn các nút), chúng ta cần một phân chia thành nhiều trường hợp. Tuy nhiên, điều này có thể được thực hiện theo cách có hệ thống và đệ quy.

$$s_{i,j} = - \frac{\log(1 - \alpha \log q_j)}{\log q_j} \#(4)$$

Sau đó, chúng ta tìm kiếm nghiệm số nguyên tối ưu của $\{s_{i,j}\}$ xung quanh giải pháp số thực đã thu được. Lưu ý rằng ràng buộc nghiêm ngặt của giải pháp số nguyên có thể tạo ra khoảng cách so với tối ưu. Đối với một giải pháp số thực, như đã chỉ ra bởi (4), một giải pháp tối ưu $s_{i,j}$ là giống nhau cho tất cả các i . Tuy nhiên, đối với một giải pháp số nguyên, tổng số lượng khe thời gian được phân bổ cho tất cả các truyền trên liên kết j nên được chia cho tất cả các gói tin được tạo ra tại một số nút, nhưng đôi khi chúng không thể được chia đều; do đó, số lượng khe thời gian được phân bổ có thể khác nhau giữa các gói tin khác nhau được truyền trên cùng một liên kết. Hình 4 là một ví dụ minh họa. Tổng số khe thời gian $\bar{R}(1)$ được phân bổ trên liên kết 1 cho các gói tin được tạo ra tại nút 2,3 và 4, nhưng số khe thời gian được phân bổ cho các gói tin được tạo ra tại nút 2 nhỏ hơn so với các gói tin khác.

III. PHƯƠNG PHÁP ĐỆM GÓI TIN

Lập lịch tối ưu được giải thích trong phần trước dựa trên số lượng gói tin r_i được tạo ra tại nút i nên là ổn định. Khi một biến động về việc tạo ra gói tin xảy ra, tức là, số r_i của một số nút i thay đổi theo chu kỳ, số lượng gói tin



Bảng 2: Ba kịch bản (tương ứng trường hợp A, B và C) với số lượng tạo gói trung bình khác nhau tại mỗi nút (i)

Trường hợp	Nút i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	3	3	3	3	3	3	3	3
B	5	4	2	1	1	2	4	5
C	1	2	4	5	5	4	2	1

Bảng III: Phân bố khe thời gian cho từng trường hợp.

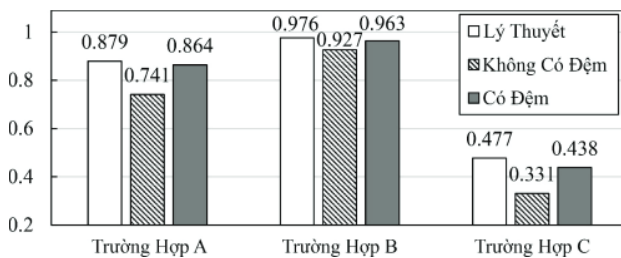
Trường hợp	Trường hợp			Trường hợp	Trường hợp		
	A	B	C		A	B	C
R(1)	15	32	20	R(5)	15	32	20
R(1)	47	44	43	R(6)	32	19	35
R(2)	46	45	42	R(7)	46	45	42
R(3)	32	19	35	R(8)	15	32	20
R(4)	15	32	20	R(8)	47	44	43

Bảng IV: Các biến động gói tin với một sự thay đổi nhỏ.

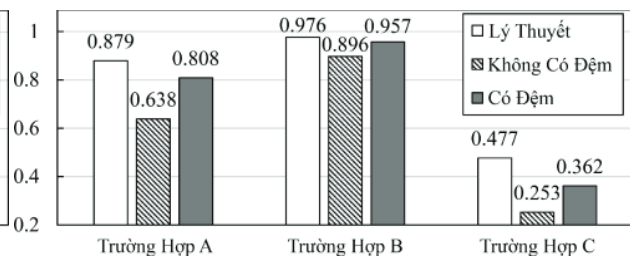
Trường hợp	Nút i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	±1	0	±1	±1	±1	±1	0	±1
B	±1	±1	±1	0	0	±1	±1	±1
C	0	±1	±1	±1	±1	±1	±1	0

Bảng V: Các biến động gói với những thay đổi đáng kể.

Trường hợp	Nút i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	±1	±1	±1	±2	±2	±1	±1	±1
B	±2	±2	±1	0	0	±1	±2	±2
C	0	±1	±2	±2	±2	±2	±1	0



Hình 5: Tỷ lệ thành công trong việc phân bổ tất cả các gói tin đến máy chủ S trong trường hợp biến động đáng kể của gói tin.



Hình 6: Tỷ lệ thành công trong việc phân bổ tất cả các gói tin đến máy chủ S trong trường hợp biến động đáng kể của gói tin.

cần giao vượt quá khả năng của các liên kết được phân bổ bởi lịch trình tối ưu, và do đó nó có thể không còn là tối ưu nữa, dẫn đến việc tăng số lượng gói tin không được khôi phục. Lưu ý rằng mỗi nút không thể biết được liệu gói tin được truyền thành công đến nút kế tiếp hay bị mất trên liên kết. Trong phần này, để giải quyết vấn đề này, chúng tôi nghiên cứu việc sử dụng bộ đệm gói tin tại các nút, cho phép lưu trữ tạm thời các gói tin mà số lần truyền lại không đủ để khôi phục lại các gói tin bị mất trong chu kỳ hiện tại. Các gói tin được đệm có thể được xử lý trong các chu kỳ tiếp theo. Tại mỗi nút, các gói tin được đệm tại nút nhưng chưa được truyền theo số lần tối ưu s_{ij} , cùng với các gói tin mới nhận hoặc được tạo ra trong chu kỳ hiện tại, được truyền đến nút kế tiếp theo theo trình tự tuần hoàn sử dụng phương pháp round-robin.

Cụ thể hơn, tại một số nút i , khi số lượng gói tin được tạo ra trong chu kỳ hiện tại lớn hơn so với r_i ban đầu, có một số gói tin k trong số những gói tin được tạo ra đó, số lần truyền lại x_k đến nút tiếp theo ít hơn so với số lần được phân bổ tối ưu s_{ij} cho gói tin k . Tương tự, khi số lượng gói tin được nhận trong chu kỳ hiện tại lớn hơn số lượng tổng kế hoạch ban đầu $\sum_h r_h$ của các gói tin được tạo ra tại các nút nguồn ở phía trên, có một số gói tin k trong số những gói tin được nhận đó, số lần truyền lại x_k đến nút tiếp theo ít hơn so với số lần được phân bổ tối ưu s_{ij} cho gói tin k . Trong cả hai trường hợp này, gói tin k được lưu trữ tại nút i . Trong chu kỳ tiếp theo, nếu tổng số lượng gói tin được tạo ra và nhận tại nút i nhỏ hơn so với số lượng tổng kế hoạch ban đầu $r_i + \sum_h r_h$, có thể có chỗ cho các khe thời gian được phân bổ cho gói tin được đệm k được truyền đi lại ($s_{ij} - x_k$) lần. Sau những lần truyền bù đắp đó trong chu kỳ tiếp theo, gói tin k sẽ được loại bỏ khỏi bộ đệm.

Trong bài báo này, chúng ta giả định rằng, trong biến động về gói tin, số lượng gói tin được tạo ra biến động xung quanh r_i và xấp xỉ bằng r_i trung bình qua vài chu kỳ. Chúng ta quyết định rằng một gói tin có thể được lưu trữ trong bộ đệm trong vòng tối đa hai chu kỳ trước khi bị xóa. Cụ thể, tại chu kỳ thứ n , bộ đệm chỉ có thể chứa các gói tin được tạo ra trong chu kỳ $(n - 2)$ và $(n - 1)$. Cơ chế này tránh tình trạng bộ đệm bị chiếm bởi các gói tin cũ. Ngoài ra, thời gian trễ tối đa cho việc phân bổ gói tin bị giới hạn trong $2T$ khe thời gian. Bất kỳ gói tin nào được tạo ra trong chu kỳ n có thể bị mất trên đường đi hoặc được chuyển tới cổng vào cuối cùng của chu kỳ muộn nhất $(n + 2)$.

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. Thiết Lập Mô Phỏng

Mô phỏng và đánh giá hiệu suất được thực hiện bằng cách sử dụng mô hình mạng 4-4 được hiển thị trong Hình 4. Chương trình Python được sử dụng cho việc mô phỏng. Mô hình mạng này bao gồm 8 nút được đặt giữa hai cổng. Tất cả các giá trị q_j được đặt thành 0.3, T được đặt thành 140 khe thời gian, và các mô phỏng được tiến

hành trong khoảng thời gian 10.000 chu kỳ.

Ba kịch bản khác nhau được đánh giá bằng cách thay đổi số lượng trung bình của gói tin được tạo ra tại mỗi nút. Các kịch bản này được tóm tắt trong Bảng II. Trong Trường hợp A, tất cả các nút tạo ra cùng một số lượng gói tin trung bình. Trong Trường hợp B và Trường hợp C, số lượng trung bình của gói tin được tạo ra tăng và giảm từ các nút xa cổng đến các nút gần cổng. Số lượng khe thời gian được phân bổ cho mỗi nút được tối ưu hóa bằng cách sử dụng phương pháp được giải thích trong Mục II-C, và kết quả được trình bày trong Bảng III. Để mô phỏng biến động trong việc tạo ra gói tin tại mỗi nút, mẫu với cả biến động nhỏ (± 1 gói tin) và biến động đáng kể (± 2 gói tin) được xem xét. Phạm vi của biến động gói tin tại mỗi nút được xác định trong Bảng IV và Bảng V cho các kịch bản tương ứng. Các mô phỏng được thực hiện cho cả các trường hợp có đệm và không có đệm để so sánh tác động của chúng, đặc biệt là đối với xác suất phân bổ thành công.

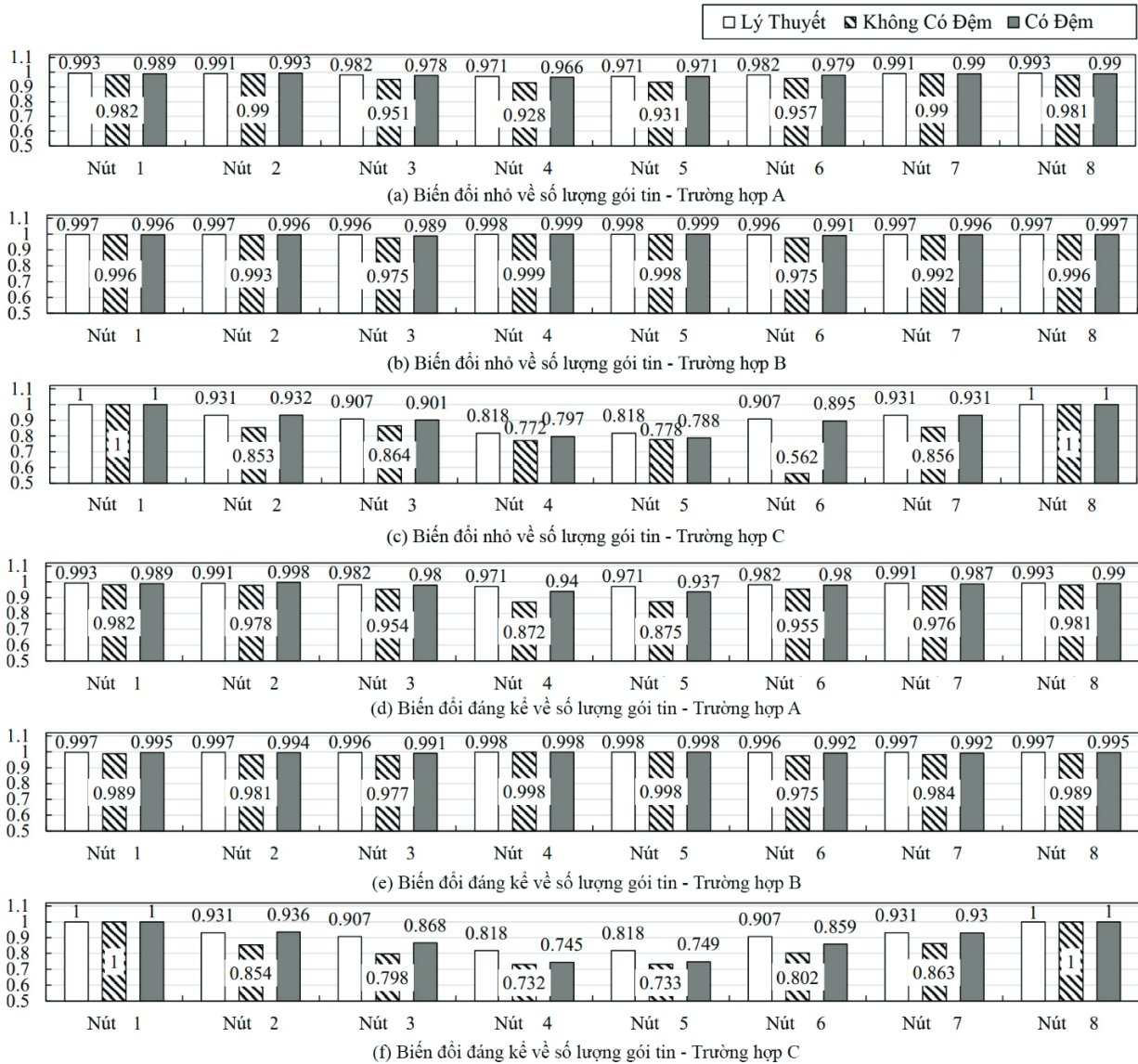
4.2. Đánh giá xác suất phân bổ thành công

Xác suất thành công trong việc phân bổ tất cả các gói tin từ tất cả các nút tới máy chủ S được biểu đồ trong Hình 5 cho biến động gói tin nhỏ và Hình 6 cho biến động gói tin đáng kể trong ba trường hợp A, B và C. Trong các biểu đồ này, “Lý thuyết” là giá trị tính toán trong trường hợp không có biến động gói tin. “Không có đệm” và “Có đệm” là các giá trị thực nghiệm trong mô phỏng trong các trường hợp khác nhau về biến động gói tin, mà không có và có sử dụng bộ đệm gói tin.

Đầu tiên, kết quả cho thấy rằng Trường hợp B (trong đó số lượng gói tin được tạo ra tại máy chủ xa máy chủ S ít hơn so với những nơi gần máy chủ S) đạt được tỷ lệ thành công cao nhất trên tất cả các điều kiện biến động gói tin. Điều này được quyết định bởi khả năng cao hơn của việc không phục hồi được mất gói tin tại các nút nguồn do sự tăng cường liên kết.

Thứ hai, kết quả cho thấy rằng một phạm vi lớn hơn của biến động gói tin được liên kết với tỷ lệ thành công thấp hơn. Điều này có thể được quyết định bởi việc khi phạm vi biến động tăng, giá trị tối đa được đặt cho các khe thời gian cũng tăng lên, dẫn đến sự giảm tỷ lệ thành công. Ngoài ra, khi có một số lượng lớn các nút nguồn, sự giảm tỷ lệ thành công trở nên đáng kể hơn khi số lượng nút được tạo ra biến động. Điều này do số lượng lần truyền lại trên mỗi gói tin giảm khi số lượng gói tin biến động, kết hợp với việc gói tin từ các nút nguồn đi qua một số lượng lớn liên kết, do đó tăng khả năng mất gói tin.

Thứ ba, giá trị tỷ lệ thành công thực nghiệm được quan sát thấp hơn so với giá trị lý thuyết. Sự sai khác này có thể được quyết định bởi biến động gói tin, dẫn đến sự biến động trong số lượng gói tin được tạo ra trong mỗi chu kỳ. Khi số lượng gói tin được tạo ra trong một chu kỳ vượt quá số lần truyền đã được lên kế hoạch, số lượng gói tin dự phòng bị giảm xuống, ảnh hưởng xấu đến việc khôi



Hình 7: Tỷ lệ phân bố thành công tại mỗi nút so với sự biến động của gói tin.

phục mất gói tin và dẫn đến tỷ lệ thành công thấp hơn. Tuy nhiên, tỷ lệ thành công có thể được cải thiện thông qua việc sử dụng đệm gói tin, đặc biệt là ở các trường hợp A và B. Đệm gói tin đến cho sự thiếu hụt trong số lần truyền do biến động trong số lượng gói tin được tạo ra. Do đó, các gói tin ban đầu không được giao tới công có thể được truyền thành công tới công trong các chu kỳ tiếp theo. Bộ đệm cho phép sử dụng hiệu quả hơn các khe thời gian có sẵn, từ đó tăng tỷ lệ thành công. Trong Trường hợp A của Hình 6, tỷ lệ thành công của phương pháp đệm là 0,808 so với 0,638 của không có đệm, sự khác biệt 0,17.

Trong Hình 7, kết quả cho thấy việc sử dụng bộ đệm làm cho giá trị cao hơn cho tất cả các nút trừ những nút không thay đổi. Hơn nữa, tổng tỷ lệ phân bố gói tin được cải thiện khi số lượng nút tăng. Như đã đề cập trước đó, gói tin được tạo ra bởi các nút dễ mất hơn, dẫn đến việc giảm tỷ lệ thành công tổng thể khi số lượng gói tin được tạo ra tăng lên. Tuy nhiên, với đệm, tỷ lệ thành công đối

với gói tin được tạo ra bởi các nút được cải thiện tổng thể về tỷ lệ thành công rõ rệt hơn.

V. KẾT LUẬN

Bài báo này đề xuất và nghiên cứu việc sử dụng việc bộ đệm gói tin tạm thời (packet buffering) để cải thiện độ tin cậy của việc truyền dữ liệu được lên lịch tối ưu dựa trên TDMA (Time Division Multiple Access) trong các mạng cảm biến không dây đa bước tuyến tính. Phương pháp này mang lại lợi ích đáng kể trong trường hợp gói tin có sự biến động. Kết quả mô phỏng cho thấy tỷ lệ phân bố gói tin thành công tăng lên đến 17% so với tỷ lệ của phương pháp trước đây mà không sử dụng bộ đệm tạm thời.

Trong tương lai, công việc của chúng tôi bao gồm đánh giá và tối ưu hóa hệ thống dưới các điều kiện và tham số thực tế hơn bằng cách xem xét khả năng chấp nhận được của độ trễ cho phép và kích thước của bộ đệm. Hơn nữa, chúng tôi sẽ tích hợp một cơ chế hiệu quả dựa

trên FEC (Forward Error Correction) bằng cách tận dụng phương pháp mã hóa mạng [10]. Khung tối ưu hóa của chúng tôi giả định một bộ lập lịch trung tâm trong đó tất cả các tham số điều kiện cần thiết đều có sẵn. Chúng tôi sẽ thiết kế triển và khai một hệ thống thu thập, ước tính hoặc cập nhật thông số đó đúng lúc và cách cài đặt lịch tối ưu cập nhật tại mỗi nút.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] I. Jawhar, N. Mohamed, and D. P. Agrawal, "Linear wireless sensor networks: Classification and applications," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1671–1682, 2011, dependable Multimedia Communications: Systems, Services, and Applications.
- [2] J. Yeo, H. Lee, and S. Kim, "An efficient broadcast scheduling algorithm for TDMA ad-hoc networks," *Computers & Operations Research*, vol. 29, no. 13, pp. 1793–1806, 2002.
- [3] M. Tummala and S. Saha, "Concurrent transmission-based data sharing with run-time variation of TDMA schedule," in *2020 IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 2020, pp. 461–464.
- [4] J. Sobrinho and A. Krishnakumar, "Quality-of-service in ad hoc carrier sense multiple access wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1353–1368, 1999.
- [5] W. Li, J. Zhang, and Y. Zhao, "Conflict graph embedding for wireless network optimization," in *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, 2017, pp. 1–9.
- [6] Agussalim and M. Tsuru, "Message transmission scheduling on tandem multi-hop lossy wireless links," in *Wired/Wireless Internet Communications*, L. Mamas, I. Matta, P. Papadimitriou, and Y. Koucheryavy, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 28–39.
- [7] R. Yoshida, M. Shibata, and M. Tsuru, "Transmission scheduling for tandemly-connected sensor networks with heterogeneous packet generation rates," in *Advances in Intelligent Networking and Collaborative Systems*, L. Barolli, K. F. Li, and H. Miwa, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 437–446.
- [8] R. Kimura, M. Shibata, and M. Tsuru, "Scheduling for tandemly connected sensor networks with heterogeneous link transmission rates," in *2020 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 2020, pp. 590–595.
- [9] R. Weatherwax, "General Lagrange multiplier theorems," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 51–72, Jul. 1974.
- [10] N. V. Ha, T. T. T. Nguyen, and M. Tsuru, "TCP with network coding enhanced in bi-directional loss tolerance," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 3, pp. 520–524, 2020.