

wireless body area networks", Journal of Science and Technique, Vol. 20 No. 02 (2025), DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n02.950.

[J5.] Đỗ Thành Quân, **Bùi Tiến Anh**, Tạ Chí Hiếu, "Nghiên cứu, phát triển mô hình mạng cảm biến không dây đa kết nối động", Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, số 98, tháng 10 năm 2024, pp. 69-77, DOI: 10.54939/1859-1043.j.mst.98.2024.69-77.

[J6.] Do Thanh Quan, **Bui Tien Anh**, Pham Thanh Hiep, "Energy-Efficient Power Control with Throughput Constraints for Cell-Free Wireless Body Area Networks", Wireless Networks (**Submitted**).

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU CÓ LIÊN QUAN

[C4.] **Bùi Tiến Anh**, Nguyễn Đình Thái, Phùng Quang Quân, "Đề xuất một thuật toán điều khiển công suất cho mạng cảm biến không dây", Hội nghị Quốc gia lần thứ XXVII về điện tử, truyền thông và công nghệ thông tin (REV-EICT 2024), tháng 12 năm 2024, pp. 113-118.

[J7.] Do Thanh Quan, and **T. A. Bui**, "Developing Power Control Algorithms for Dynamic Multi-Connection Industrial Wireless Sensor Networks", Journal of Military Science and Technology, vol. 100, no. 100, Dec. 2024, pp. 12-21, doi:10.54939/1859-1043.j.mst.100.2024.12-21.

BỘ QUỐC PHÒNG
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

BÙI TIẾN ANH

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH TRUYỀN THÔNG
KẾT HỢP ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT ĐỂ NÂNG CAO
HIỆU NĂNG CHO MẠNG VÔ TUYẾN QUANH CƠ THỂ

Chuyên ngành: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ
Mã số: 9 52 02 03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2026

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS Phạm Thanh Hiệp

2. TS Đỗ Thành Quân

Phản biện 1: GS.TS Trần Đức Tân

Phản biện 2: PGS.TS Hoàng Trọng Minh

Phản biện 3: PGS.TS Nguyễn Tiến Hòa

Luận án đã được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo Quyết định số 6192/QĐ-HV ngày 18 tháng 08 năm 2026 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi ... giờ ... ngày ... tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH
SỬ DỤNG TRONG LUẬN ÁN

[C1.] Anh, B.T, Quan, D.T and Hiep, P.T., "A Study on Power Control Algorithms for Wireless Body Area Networks", Conference of 9th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, NICS 2022, pp. 19- 24.IEEE, 2022, DOI:10.1109/NICS56915.2022.10013433, (**Scopus Index**).

[C2.] B.T.Anh, D. Thanh Quan, D. D. Quoc and P. Thanh Hiep, "Optimizing Transmission Power for Uplink Data in Cell-Free Wireless Body Area Networks", 2023 IEEE Statistical Signal Processing Workshop, Hanoi, Vietnam, pp. 275-279, DOI: 10.1109/SSP53291.2023.10208084, (**Scopus Index**).

[C3.] D. D. Hung, P. T. Huy, N. T. To Uyen, B. T. Anh, P. T. Hiep and D. T. Quan, "Proposal of Cell-Free Model with Power Control Algorithm for Enhancing Throughput of Uplink WBANs," 2024 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2024, pp. 821-826, doi: 10.1109/ATC63255.2024.10908324, (**Scopus Index**).

[J1.] Bui Tien Anh, Do Thanh Quan, Pham Thanh Hiep, "Developing the max-min power control algorithm for distributed wireless body area networks", AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol.158, pp.154448, Jan.2023, DOI:10.1016/j.aeue.2022.154448 (**SCIE, Q2**).

[J2.] Bo Quoc Bao, Bui Tien Anh, Vu Thi Hoang Yen, Pham Thanh Hiep, Le Hai Nam, "Joint Throughput Equalization Power Control and Cell-Free Model for Enhancing Performance of WBANs", Wireless Personal Communications, vol. 139, pp 921–946, Nov.2024. DOI: 10.1007/s11277-024-11647- 6.(**SCIE, Q2**).

[J3.] Do Thanh Quan, Bui Tien Anh, Do Khanh Vinh, and Bo Quoc Bao, "Development of data power control algorithms for downlink transmission in cooperative Wireless Body Area Networks", Journal of Military Science and Technology, vol. 91, no. 91, Nov. 2023, pp. 11-19, DOI:10.54939/1859- 1043.j.mst.91. 2023.11-19.

[J4.] Tien Anh Bui, Thanh Quan Do, Quang Quan Phung, Thanh Hiep Pham, "Development of a power control algorithm based on throughput window for

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA LUẬN ÁN

Một số kết quả đạt được của luận án

1. Đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp phát triển thuật toán MMC.
2. Đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất TTC và TWC cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

Hướng phát triển của luận án

1. Nghiên cứu, đề xuất các mô hình truyền thông WBAN mới kết hợp khảo sát nhiều cấu hình phòng và vị trí cảm biến khác nhau.
2. Nghiên cứu, phát triển các thuật toán điều khiển công suất mới.
3. Phân tích, đánh giá độ phức tạp thuật toán, thời gian hội tụ, chi phí phần cứng của các thuật toán điều khiển công suất TTC, TWC và MMC.
4. Nghiên cứu mô hình truyền thông WBAN có các cảm biến cấy ghép bên trong cơ thể người dùng và hiện tượng sai lệch ghép phân cực.
5. Phân tích, đánh giá phẩm chất hệ thống thông qua các tiêu chí: BER, độ trễ, độ phức tạp.

MỞ ĐẦU

1. Động lực nghiên cứu:

Cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư (Công nghiệp 4.0) đang diễn ra mạnh mẽ, thúc đẩy sự phát triển vượt bậc của các công nghệ tiên tiến như trí tuệ nhân tạo (AI: *Artificial Intelligence*), dữ liệu lớn (*Big Data*), internet vạn vật (IoT: *Internet of Things*), và điện toán lượng tử (*Quantum Computing*). Trong hệ sinh thái IoT, mạng vô tuyến quanh cơ thể (WBAN: *Wireless Body Area Networks*) đang nổi lên như một thành phần quan trọng, đặc biệt trong lĩnh vực chăm sóc sức khỏe. WBAN cấu thành bởi các cảm biến không dây nhỏ gọn gắn trên bề mặt hoặc cấy ghép bên trong cơ thể con người, có chức năng thu thập, truyền tải dữ liệu sinh học như nhịp tim, huyết áp, nhiệt độ cơ thể... nhằm hỗ trợ giám sát sức khỏe liên tục theo thời gian thực. Với yêu cầu cao về độ tin cậy và khả năng duy trì kết nối ổn định trong môi trường truyền dẫn phức tạp và điều kiện vận hành nghiêm ngặt, WBAN đang thu hút sự quan tâm nghiên cứu và được ứng dụng ngày càng phổ biến trong các hệ thống y tế thông minh.

Trong mô hình WBAN sử dụng hub, các cảm biến truyền dữ liệu về một hub trung tâm để tổng hợp và chuyển tiếp đến hệ thống xử lý bên ngoài. Tuy nhiên, mô hình này tồn tại nhiều hạn chế, bao gồm độ trễ truyền tin, nguy cơ gián đoạn toàn mạng khi hub gặp sự cố, cũng như các bất lợi trong triển khai thực tế như hub hoạt động liên tục tốn nhiều năng lượng, bất tiện cho người dùng và dễ gặp trường hợp kênh truyền không theo tầm nhìn thẳng (NLoS: *Non-Line-of-Sight*). Trước các hạn chế của mô hình WBAN sử dụng hub, mô hình truyền thông WBAN off-body một chặng hỗ trợ bởi các điểm truy cập (AP: *Access Point*) phân tán đã được nghiên cứu như một hướng thay thế, cho phép cảm biến truyền dữ liệu trực tiếp đến các AP mà không qua hub. Mô hình này phù hợp cho các ứng dụng giám sát và chăm sóc sức khỏe từ xa, song hiệu năng vẫn có thể suy giảm đối với các liên kết cảm biến-AP có điều kiện truyền bất lợi.

Nhằm khắc phục hạn chế về hiệu năng liên kết của mô hình WBAN off-body một chặng, luận án đề xuất mô hình truyền thông mới cho WBAN, bao gồm: mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kế thừa có chọn lọc ý tưởng tổ chức mạng tế bào nhỏ (SC: *Small-Cell*) và mô hình truyền thông WBAN đa kết nối dựa theo ý tưởng tổ chức mạng không phân chia tế bào (CF: *Cell-Free*). Cách

tiếp cận này giúp đơn giản hóa kết nối, giảm nhiễu và đảm bảo mỗi cảm biến được phục vụ bởi liên kết có chất lượng tốt, qua đó nâng cao độ tin cậy và tính đồng đều dịch vụ mà không làm gia tăng đáng kể độ phức tạp hệ thống.

Tuy nhiên, đối với mô hình truyền thông WBAN đề xuất, cần phải giải quyết bài toán tối ưu công suất để đảm bảo thông lượng tối đa cho cảm biến, đặc biệt là cảm biến có tốc độ truyền thấp nhất. Đồng thời, cần phải duy trì sự công bằng thông lượng vừa đảm bảo chất lượng truyền tin vừa tiết kiệm năng lượng cho cảm biến. Hiện nay, các nghiên cứu về sự kết hợp giữa mô hình truyền thông WBAN và điều khiển công suất vẫn còn hạn chế, khi các nhà khoa học chỉ tập trung vào việc xem xét các mô hình WBAN truyền thống, mà chưa khai thác sâu vai trò của cải tiến, đề xuất mô hình truyền thông mới kết hợp điều khiển công suất nhằm cải thiện thông lượng và tiết kiệm năng lượng. Đồng thời, các giải pháp tối ưu công suất hiện có thường chỉ được áp dụng cho các trường hợp đơn giản và ít quan tâm đến yếu tố đảm bảo phân bố thông lượng đồng đều giữa các cảm biến. Điều này đặt ra nhu cầu cấp thiết cho các nghiên cứu chuyên sâu về tiết kiệm năng lượng và đảm bảo thông lượng cho cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN, đặc biệt là khi xét đến môi trường thực tế với các điều kiện kênh truyền thay đổi và vị trí khác nhau của cảm biến. Do đó, đề tài “*Nghiên cứu mô hình truyền thông kết hợp điều khiển công suất để nâng cao hiệu năng cho mạng vô tuyến quanh cơ thể*” được lựa chọn, nhằm giải quyết những thách thức này và đóng góp vào việc phát triển các mô hình truyền thông WBAN hiệu quả, tin cậy.

2. Các đóng góp của luận án:

1. Đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp thuật toán điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu (MMC: *Max-Min Power Control*) để nâng cao thông lượng cho cảm biến.
2. Đề xuất thuật toán điều khiển công suất dựa trên ngưỡng thông lượng (TTC: *Throughput Threshold - based Power Control*) và dựa trên "cửa sổ" thông lượng (TWC: *Throughput Window - based Power Control*) cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối nhằm tiết kiệm năng lượng trong khi vẫn đảm bảo thông lượng truyền tin cho cảm biến.

3. Bố cục luận án:

Luận án được trình bày trong 146 trang, bao gồm phần Mở đầu; 3 Chương nội dung; Kết luận và Hướng nghiên cứu tiếp theo; Danh mục các công trình đã công bố; Phụ lục và Tài liệu tham khảo.

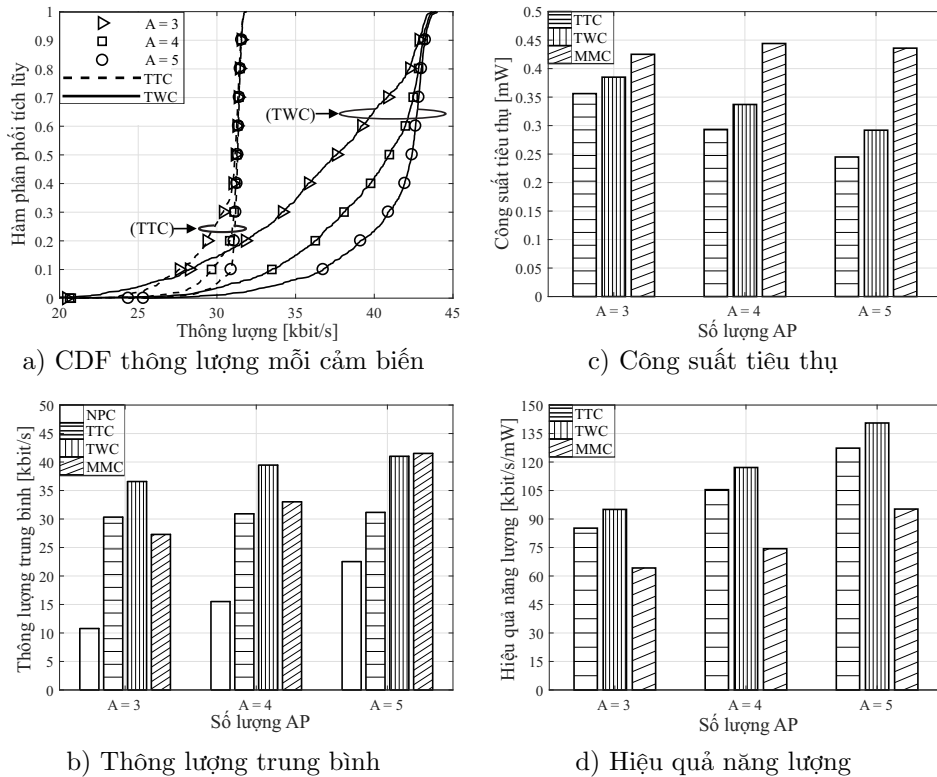
Khi A tăng, mật độ AP trong vùng phủ sóng được cải thiện, giúp giảm xác suất cảm biến nằm ở rìa vùng phủ sóng và có chất lượng kênh yếu. Nhờ đó, số lượng cảm biến đạt ngưỡng thông lượng đối với TTC và nằm trong “cửa sổ” thông lượng đối với TWC tăng lên. Đồng thời thông lượng trung bình của tất cả các cảm biến trong các trường hợp NPC, TWC và MMC cũng được cải thiện. Riêng TTC vẫn duy trì thông lượng trung bình ổn định ở mức 30 kbit/s do chỉ yêu cầu thông lượng đạt ngưỡng $T_{\text{threshold}}$. Ngoài ra, việc tăng A làm giảm khoảng cách truyền trung bình từ cảm biến đến AP, dẫn đến giảm công suất phát và nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, đặc biệt rõ rệt ở TTC và TWC, trong khi MMC vẫn duy trì công suất tiêu thụ gần như không đổi.

3.4 Kết luận Chương 3

Chương 3 đã đề xuất áp dụng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối và nghiên cứu, đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới là TTC và TWC, hướng đến mục tiêu tiết kiệm năng lượng trong khi vẫn đảm bảo thông lượng cảm biến đạt mức ngưỡng (TTC) hoặc nằm trong "cửa sổ" ngưỡng (TWC) cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Bên cạnh đó, Chương này đã tiến hành so sánh hiệu quả của hai thuật toán TTC, TWC với thuật toán MMC và trường hợp NPC. Thuật toán TWC đạt hiệu quả năng lượng cao nhất, còn thuật toán TTC có mức công suất tiêu thụ thấp nhất. Các thuật toán được kiểm chứng qua mô phỏng lý tưởng, tuy chưa xét đến yếu tố phần cứng.

động ra ngoài khoảng $[T_{down}, T_{up}]$. Trong khi đó, TTC duy trì thông lượng ổn định vì chỉ yêu cầu đạt ngưỡng $T_{threshold}$. Trường hợp NPC và thuật toán MMC không phụ thuộc vào η , nên thông lượng trung bình gần như không thay đổi. Về công suất tiêu thụ, TTC thấp nhất, tiếp theo là TWC, còn MMC cao nhất. Xét hiệu quả năng lượng, TWC đạt giá trị cao nhất, tiếp đến là TTC và MMC thấp nhất; nhìn chung các đại lượng này ổn định trước sự thay đổi của η do mục tiêu điều khiển không thay đổi.

Hình 3.5 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số S , D , $T_{threshold}$, T_{down} , T_{up} được thiết lập như Hình 3.4. Trong khi đó, $\eta = 5\%$ và số lượng AP thay đổi theo ba mức khác nhau ($A = 3, 4$, và 5).



Hình 3.5: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán trong trường hợp : $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, và $A = 3, 4, 5$.

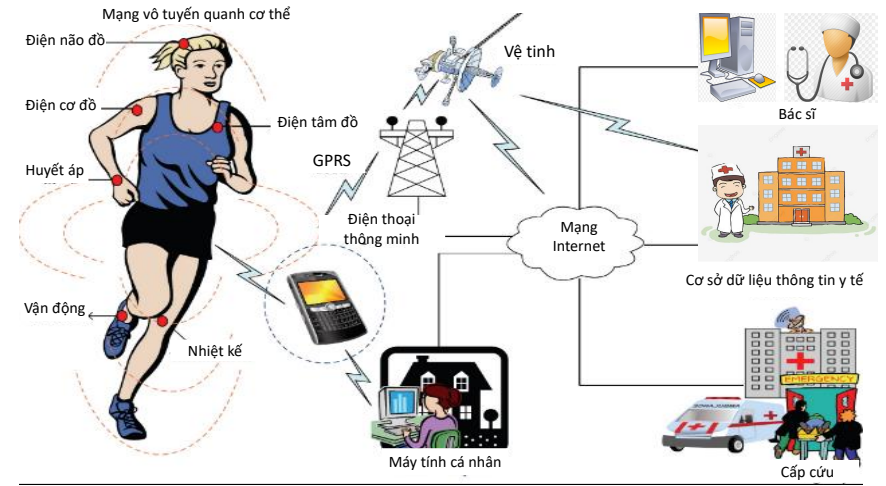
Chương 1

Những vấn đề chung

1.1 Mạng vô tuyến quanh cơ thể

1.1.1 Khái niệm

WBAN là một dạng đặc thù của mạng cảm biến không dây, gồm các cảm biến kích thước nhỏ, công suất thấp và trọng lượng nhẹ được gắn trên bề mặt hoặc cấy ghép trong cơ thể người dùng nhằm giám sát các thông số sinh học. Các cảm biến thu thập dữ liệu như nhịp tim, huyết áp, nhiệt độ cơ thể và truyền về hệ thống xử lý thông qua các giao thức truyền thông không dây. Dữ liệu này hỗ trợ theo dõi sức khỏe theo thời gian thực, phát hiện sớm các vấn đề tiềm ẩn và nâng cao hiệu quả chăm sóc y tế.



Hình 1.1: Mô hình tổng quan WBAN.

1.1.2 Thành phần

WBAN được phân thành ba phân lớp: lớp bên trong (lớp 1), lớp bên ngoài (lớp 2) và lớp mở rộng (lớp 3). Lớp 1 gồm các cảm biến gắn trên bề mặt hoặc cấy ghép bên trong cơ thể, thu thập dữ liệu sinh học theo thời gian thực và

truyền đến AP gần nhất thông qua các kênh truyền trong mô, từ mô ra ngoài và trên bề mặt cơ thể. Lớp 2 đóng vai trò trung gian, kết nối WBAN với các mạng bên ngoài như mạng di động, Wi-Fi hoặc Internet. Lớp 3 cung cấp giao diện với các hệ thống và dịch vụ y tế, nơi dữ liệu WBAN được xử lý, quản lý và khai thác cho các ứng dụng chăm sóc sức khỏe.

1.2 Tổng quan về kỹ thuật điều khiển công suất

Điều khiển công suất là một yếu tố quan trọng trong WBAN. Quá trình điều khiển công suất bao gồm việc điều chỉnh mức công suất phát của các thiết bị để cải thiện chất lượng mạng, giảm nhiễu và tiết kiệm năng lượng. Điều này đòi hỏi các thuật toán thông minh để điều chỉnh công suất theo từng điều kiện cụ thể của kênh truyền và vị trí cảm biến, giúp nâng cao chất lượng dịch vụ và giảm thiểu tác động của các yếu tố gây nhiễu từ các cảm biến khác.

1.3 Các tham số đánh giá chất lượng hệ thống

Dung lượng, thông lượng, hiệu quả năng lượng, công suất tiêu thụ, tỷ lệ lỗi bit, độ trễ, độ tin cậy, tốc độ truyền dữ liệu, độ phức tạp hệ thống.

1.4 Khoảng trống nghiên cứu

Các nghiên cứu hiện nay vẫn chưa khai thác hiệu quả ý tưởng tổ chức mạng SC và CF vào WBAN. So với các mô hình trạm gốc truyền thống, SC có chi phí thấp hơn, yêu cầu ít không gian và tiêu thụ ít năng lượng hơn. Mô hình CF với các AP phân tán, kết nối về CPU và phối hợp phục vụ người dùng giúp loại bỏ ranh giới tế bào góp phần cung cấp dịch vụ tốt đồng đều cho tất cả người dùng trong vùng phủ sóng. Việc kế thừa có chọn lọc các ý tưởng SC/CF vào mô hình truyền thông WBAN góp phần mở rộng vùng phủ sóng và cải thiện chất lượng kết nối, tuy nhiên hướng tiếp cận này vẫn còn mới và chưa được nghiên cứu rộng rãi.

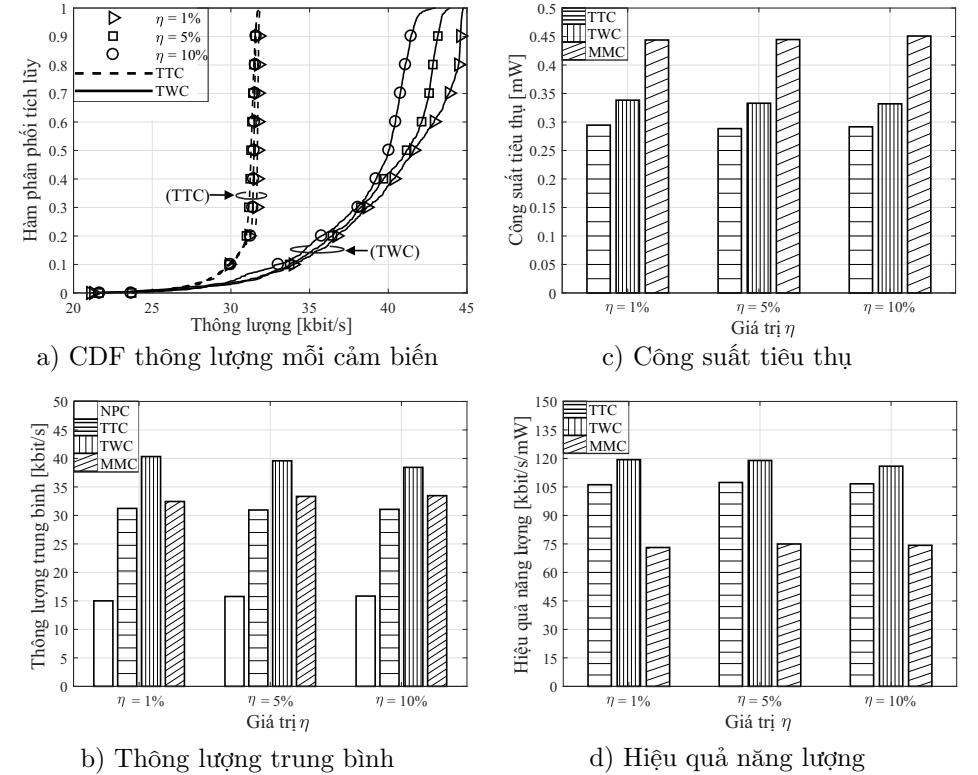
1.5 Kết luận Chương 1

Chương 1 đã trình bày các kiến thức nền tảng liên quan trực tiếp đến nội dung nghiên cứu của luận án, bao gồm khái quát chung về WBAN và các kỹ thuật điều khiển công suất. Qua quá trình khảo sát và đánh giá toàn diện, các ưu điểm và hạn chế của cả mô hình WBAN và điều khiển công suất đã được làm rõ. Dựa trên đó, luận án đề xuất mô hình truyền thông mới cho WBAN kế thừa có chọn lọc ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC và mô hình CF, nhằm nâng cao chất lượng hệ thống thông qua các thuật toán điều khiển công suất. Những nội dung này đặt nền tảng quan trọng cho các nghiên cứu và phân tích trong các Chương tiếp theo của luận án.

đa 20.000 vòng lặp, đảm bảo đủ số lần điều chỉnh để thuật toán hội tụ và tối ưu hóa các HSDKCS một cách chính xác.

3.3.2 Đánh giá kết quả mô phỏng

Hình 3.4 khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất TTC, TWC và MMC khi thay đổi tỷ lệ điều chỉnh HSDKCS η .



Hình 3.4: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán trong trường hợp: $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{\text{threshold}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{down}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{up}} = 45 \text{ kbit/s}$, và $\eta = 1\%$, 5% , 10% .

Khi η tăng, thông lượng trung bình của từng cảm biến trong trường hợp TWC có xu hướng giảm do bước điều chỉnh công suất lớn hơn, dễ gây dao

đơn kết nối chỉ cho phép mỗi cảm biến kết nối với một AP duy nhất trong một khe thời gian, thì mô hình đa kết nối cho phép các cảm biến được phục vụ đồng thời bởi nhiều AP. Cấu trúc này không chỉ khai thác hiệu quả tổng hợp tín hiệu từ nhiều đường truyền tốt mà còn tăng cường độ tin cậy và ổn định liên kết nhờ khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa các AP.

3.2 Đề xuất thuật toán điều khiển công suất

3.2.1 Thuật toán điều khiển công suất dựa trên ngưỡng thông lượng

Thuật toán TTC được thiết kế nhằm mục đích tiết kiệm năng lượng nhưng vẫn đảm bảo thông lượng truyền tin cho cảm biến, thông qua điều chỉnh công suất phát của cảm biến sao cho cực đại hóa số lượng cảm biến có thông lượng đạt một ngưỡng xác định trước. Công thức điều kiện có dạng như sau:

$$T_{u,s} \geq T_{threshold}, \quad (3.10)$$

trong đó $T_{u,s}$ là thông lượng của cảm biến thứ s , $T_{threshold}$ là mức ngưỡng thông lượng do người thiết kế lựa chọn tùy theo yêu cầu cụ thể của ứng dụng.

3.2.2 Thuật toán điều khiển công suất dựa trên "cửa sổ" thông lượng

Thuật toán TWC điều chỉnh công suất phát của các cảm biến nhằm cực đại hóa số lượng cảm biến có thông lượng nằm trong một khoảng "cửa sổ" thông lượng được xác định trước. Cách tiếp cận này giúp giới hạn thông lượng ở mức đủ đáp ứng yêu cầu truyền dữ liệu, đồng thời tránh tiêu tốn năng lượng không cần thiết, qua đó cân bằng giữa hiệu quả năng lượng và thông lượng truyền tin ở mức chấp nhận được. Khoảng "cửa sổ" thông lượng này được xác định theo công thức điều kiện sau:

$$T_{down} \leq T_{u,s} \leq T_{up}, \quad (3.11)$$

trong đó T_{down} là mức ngưỡng dưới và T_{up} là mức ngưỡng trên.

3.3 Kết quả mô phỏng và thảo luận

3.3.1 Kịch bản mô phỏng

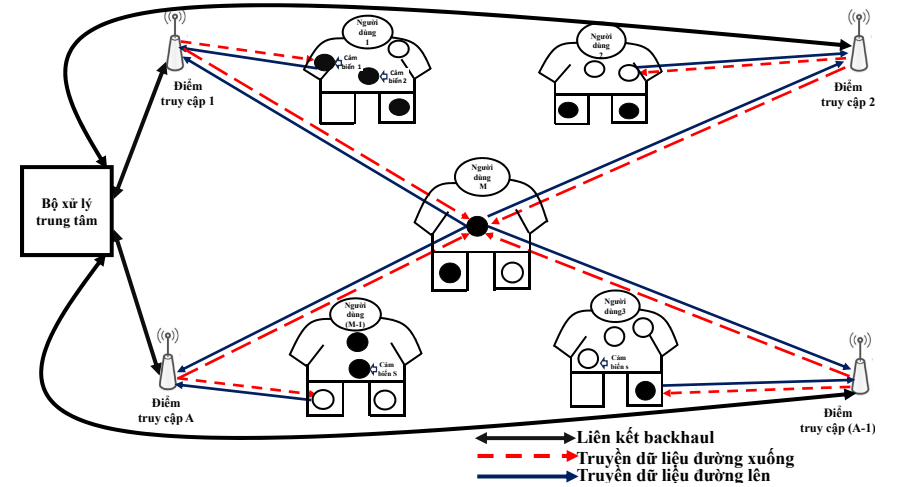
Có A AP và S cảm biến được bố trí ngẫu nhiên trong một phòng điều trị có diện tích $D \text{ m}^2$. Thực hiện 1000 lần gieo vị trí ngẫu nhiên, tương ứng với 1.000 cấu hình phân bố khác nhau giữa AP và cảm biến, nhằm phản ánh sự đa dạng của các kịch bản phân bố trong không gian. Mỗi lần gieo ứng với một lần lặp của vòng For. Đối với mỗi cấu hình phân bố, vòng While thực hiện tối

Chương 2

Đề xuất mô hình truyền thông đơn kết nối cho WBAN

2.1 Mô hình WBAN và các đặc trưng kênh truyền

2.1.1 Mô hình hệ thống



Hình 2.1: Mô hình tổng quát của mạng WBAN.

Hình 2.1 mô tả mô hình tổng quát của mạng WBAN bao gồm A AP gắn trên tường và S cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể của một số người dùng. Mỗi AP và mỗi cảm biến có một ăng-ten, tất cả được phân bố ngẫu nhiên trong một căn phòng. Bộ xử lý trung tâm (CPU: *Central Processing Unit*) là trung tâm xử lý tín hiệu, tối ưu hóa hiệu suất, phân phối tín hiệu và quản lý công suất cho AP và cảm biến. Truyền tin trong mô hình gồm hai giai đoạn: kết nối cảm biến-AP và kết nối AP-CPU. AP sử dụng kỹ thuật giải mã chuyển tiếp (DF: *Decode-and-Forward*) để chuyển tiếp tín hiệu, liên lạc giữa cảm biến và AP ở cả hai chiều truyền dữ liệu đường lên và đường xuống được thiết lập theo cơ chế song công phân chia theo thời gian (TDD: *Time-Division Duplex*). Bên cạnh đó,

kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian (TDMA: *Time-Division Multiple Access*) cũng được tích hợp nhằm tổ chức truy cập hiệu quả cho nhiều cảm biến trong từng pha truyền dẫn.

2.1.2 Hệ số kênh truyền

Các cảm biến được gắn trên bề mặt cơ thể người dùng, thực hiện truyền nhận dữ liệu trực tiếp với các AP gắn trên tường trong một căn phòng điều trị tại bệnh viện. Kết nối giữa cảm biến và AP theo mô hình kênh CM4, tương ứng với các kịch bản S6 và S7 (từ bề mặt cơ thể đến thiết bị bên ngoài), và sử dụng tần số 4,5 GHz phù hợp với môi trường trong nhà.

Hệ số kênh truyền g_{as} phản ánh đồng thời ảnh hưởng của suy hao trung bình và biến động ngẫu nhiên của tín hiệu trong môi trường truyền dẫn thực tế giữa AP thứ a và cảm biến thứ s . Tham số này được mô hình hóa dưới dạng tích của hai thành phần: hệ số pha-đỉnh diện rộng β_{as} và hệ số pha-đỉnh diện hẹp h_{as} . Biểu thức toán học của g_{as} được cụ thể hóa như sau:

$$g_{as} = \sqrt{\beta_{as}} h_{as}. \quad (2.1)$$

trong đó, hệ số pha-đỉnh diện hẹp h_{as} phản ánh sự biến thiên nhanh của tín hiệu do các yếu tố như tán xạ, phản xạ và nhiễu đa đường, và được giả định là các biến ngẫu nhiên phức với phân phối chuẩn có kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1. Hệ số pha-đỉnh diện rộng β_{as} mô tả suy hao tín hiệu theo quy mô lớn và bao gồm các thành phần như suy hao đường truyền (*path loss*) và hiện tượng che khuất (*shadowing*). Hệ số β_{as} được tính theo biểu thức:

$$\beta_{as} = 10^{\frac{PL_{as}}{10}}, \quad (2.2)$$

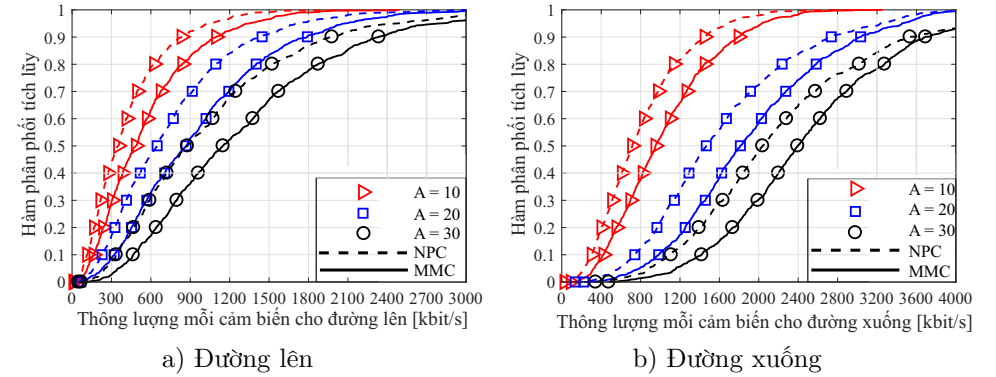
trong đó, PL_{as} đại diện cho suy hao đường truyền, đơn vị là dB. PL_{as} được tính toán dựa theo mô hình điểm cắt động (FI: *Floating-Intercept*).

2.1.3 Mô hình suy hao đường truyền điểm cắt động

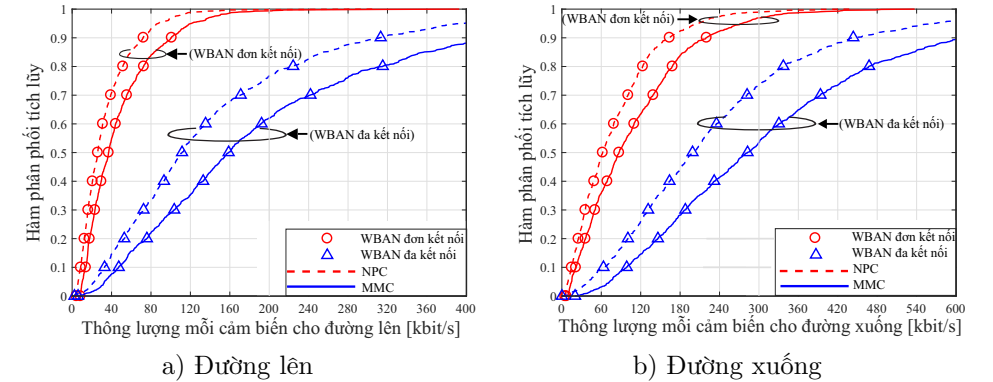
Suy hao đường truyền đối với mô hình truyền thông WBAN đề xuất sử dụng tần số 4,5 GHz được mô tả bằng mô hình FI và được biểu diễn dưới dạng:

$$PL_{FI}(d) [\text{dB}] = \gamma + 10\vartheta \log_{10}(d) + X_{\sigma}^{FI}, \quad (2.3)$$

trong đó, γ là hệ số cắt, ϑ là hệ số độ dốc, và X_{σ}^{FI} là giá trị trung bình của một biến ngẫu nhiên Gauss với độ lệch chuẩn σ .



Hình 3.2: CDF của thông lượng mỗi cảm biến ở cả đường lên và đường xuống trong các trường hợp có/không điều khiển công suất, với số lượng cảm biến $S = 8$ và thay đổi số lượng AP A .



Hình 3.3: CDF của thông lượng mỗi cảm biến ở cả đường lên và đường xuống trong các trường hợp có/không điều khiển công suất, của hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối, với $A = 4$ và $S = 8$.

Hình 3.3 hiển thị CDF thông lượng cảm biến của hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và WBAN đa kết nối trong cả hai kịch bản truyền dữ liệu đường lên và đường xuống.

Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình truyền thông WBAN đa kết nối đạt thông lượng cao hơn đáng kể so với mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối trong cả hai trường hợp có điều khiển công suất và NPC. Trong khi mô hình

c) Truyền dữ liệu đường xuống

CPU phân tích, xử lý tín hiệu sau đó truyền dữ liệu đến các AP qua đường truyền hữu tuyến tốc độ cao. AP thu, xử lý sơ bộ và chuyển tiếp đến cảm biến. Thông tin kênh truyền ước lượng được sử dụng để xử lý luồng tín hiệu phát cho S cảm biến bởi kỹ thuật định dạng búp sóng liên hợp (CB: *Conjugate Beamforming*), tương tự kỹ thuật tiền mã hóa phân tập phát tỉ số cực đại (MRT: *Maximum Ratio Transmission*). Tốc độ truyền dữ liệu đạt được của cảm biến thứ s được thể hiện theo công thức sau:

$$R_d^s = \log_2 \left(1 + \frac{\rho^d \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} \chi_{m,as} \right)^2}{\rho^d \sum_{s' \neq s}^S \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as}}{\beta_{as'}} \right)^2 |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 + \rho^d \sum_{s'=1}^S \sum_{a=1}^A \alpha_{as'} \chi_{m,as'} \beta_{as} + 1} \right). \quad (3.7)$$

c) Điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu

- Mô hình toán học của bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất đường xuống được trình bày cụ thể như sau:

$$\begin{aligned} \max_{\{\alpha_{as}\}} \quad & \min_{s=1, \dots, S} R_d^s \\ \text{ràng buộc:} \quad & \sum_{s=1}^S \alpha_{as} \chi_{m,as} \leq 1, \quad a = 1, \dots, A, \\ & \alpha_{as} > 0, \quad s = 1, \dots, S, \quad a = 1, \dots, A. \end{aligned} \quad (3.8)$$

- Mô hình toán học của bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất đường lên được trình bày cụ thể như sau:

$$\begin{aligned} \max_{\{\alpha_s\}} \quad & \min_{s=1, \dots, S} R_u^s \\ \text{ràng buộc:} \quad & 0 < \alpha_s \leq 1, \quad s = 1, \dots, S. \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.1.2 Kết quả mô phỏng và thảo luận

Hình 3.2 thể hiện CDF thông lượng mỗi cảm biến ở đường lên và đường xuống khi có điều khiển công suất và khi NPC. Kết quả cho thấy tối ưu công suất giúp cải thiện đáng kể thông lượng. Bên cạnh đó, khi tăng số lượng AP (A), thông lượng cảm biến cũng tăng. Nguyên nhân do khi A tăng, cường độ tín hiệu nhận được cũng tăng, dẫn đến tốc độ truyền dữ liệu được cải thiện, kéo theo sự gia tăng rõ rệt thông lượng cảm biến.

2.2 Mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA

2.2.1 Mô hình hệ thống và cơ chế truyền tin

Trong mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA (TDMA WBAN) kết hợp với phương thức TDD, một chu kỳ truyền tin được chia thành ba pha: pha huấn luyện đường lên, pha truyền dữ liệu đường lên và pha truyền dữ liệu đường xuống. Mỗi pha lại được chia thành các khe thời gian, và mỗi khe thời gian được dành riêng cho việc truyền tin của từng cảm biến, như được minh họa trong Hình 2.2. Trong đó, τ_u^{hl} là khoảng thời gian dành cho pha huấn luyện đường lên của một cảm biến; $S \times \tau_u^{hl}$ là tổng thời gian dành cho pha huấn luyện đường lên cho toàn bộ S cảm biến; τ_u là khoảng thời gian truyền dữ liệu đường lên, τ_d là khoảng thời gian truyền dữ liệu đường xuống, τ^c là khoảng thời gian kết hợp trong một chu kỳ truyền tin. Công thức quan hệ giữa các khoảng thời gian được cho bởi: $\tau^c = S \times \tau_u^{hl} + \tau_u + \tau_d$.

Pha huấn luyện đường lên $S \times \tau_u^{hl}$				Truyền dữ liệu đường xuống τ_u				Truyền dữ liệu đường lên τ_d			
Khe 1 (cảm biến thứ 1)	Khe 2 (cảm biến thứ 2)	...	Khe S (cảm biến thứ S)	Khe 1 (cảm biến thứ 1)	Khe 2 (cảm biến thứ 2)	...	Khe S (cảm biến thứ S)	Khe 1 (cảm biến thứ 1)	Khe 2 (cảm biến thứ 2)	...	Khe S (cảm biến thứ S)

Hình 2.2: Kết hợp phương thức TDD và kỹ thuật TDMA trong mô hình truyền thông TDMA WBAN.

2.2.2 Pha huấn luyện đường lên

Chuỗi pilot $\phi_s \in \mathbb{C}^{\tau_u^{hl} \times 1}$ được chuẩn hoá với $\|\phi_s\|^2 = 1$ nhằm đảm bảo năng lượng trung bình của tín hiệu pilot là không đổi, giúp chuẩn hóa tỉ số tín hiệu trên tạp âm (SNR: *Signal-to-Noise Ratio*) trong quá trình ước lượng kênh. Mỗi cảm biến phát pilot ở các khe thời gian riêng biệt, cho phép AP ước lượng kênh chính xác. Biểu thức toán học cho tín hiệu nhận được tại AP thứ a là:

$$\mathbf{y}_a^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} \phi_s + \mathbf{w}_a. \quad (2.4)$$

trong đó, ρ^p là SNR đã được chuẩn hóa của mỗi ký hiệu pilot và $\mathbf{w}_a$ nhiễu tạp tại AP thứ a , với kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1.

AP thứ a thực hiện ước lượng kênh g_{as} cho cảm biến thứ s . Quá trình ước lượng được thực hiện bằng cách chiếu $\mathbf{y}_a^p$ lên liên hợp chuyển vị của chuỗi pilot

cảm biến thứ s . Biểu thức ước lượng kênh, ký hiệu là $\tilde{y}_{as}^p$, được tính như sau:

$$\tilde{y}_{as}^p = \phi_s^H \mathbf{y}_a^p = \phi_s^H \left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} \phi_s + \mathbf{w}_a \right) = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} + \phi_s^H \mathbf{w}_a. \quad (2.5)$$

Ước lượng sai số bình phương trung bình tối thiểu (MMSE: *Minimum Mean Square Error*) của hệ số kênh g_{as} được biểu diễn như sau:

$$\hat{g}_{as} = \frac{\mathbb{E}\{g_{as} \tilde{y}_{as}^{p*}\}}{\mathbb{E}\{|\tilde{y}_{as}^p|^2\}} \tilde{y}_{as}^p = c_{as} \tilde{y}_{as}^p, \quad (2.6)$$

trong đó,

$$c_{as} \triangleq \frac{\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as}}{\tau_u^{hl} \rho^p \beta_{as} + 1}. \quad (2.7)$$

Ký hiệu χ_{as} biểu thị giá trị trung bình bình phương của ước lượng kênh $\hat{g}_{as}$ giữa AP thứ a và cảm biến thứ s , được xác định như sau:

$$\chi_{as} \triangleq \mathbb{E}\{|\hat{g}_{as}|^2\} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as} c_{as} = \frac{\tau_u^{hl} \rho^p \beta_{as}^2}{\tau_u^{hl} \rho^p \beta_{as} + 1}. \quad (2.8)$$

2.2.3 Truyền dữ liệu đường lên

Trước khi truyền dữ liệu, cảm biến thứ s điều chỉnh ký hiệu dữ liệu (*data symbol*) $q_{u,s}$, với giả thiết $\mathbb{E}\{|q_{u,s}|^2\} = 1$, bằng một hệ số điều khiển công suất (HSDKCS) α_s , thỏa mãn điều kiện $0 < \alpha_s \leq 1$. Tuy nhiên, trong mô hình TDMA WBAN, $\alpha_s = 1$, tương ứng với việc cảm biến truyền với công suất tối đa. Tín hiệu nhận được tại AP thứ a được mô tả bởi biểu thức:

$$y_a^u = \sqrt{\rho^u} g_{as} q_{u,s} + \mathbf{w}_a, \quad (2.9)$$

trong đó, ρ^u là SNR đường lên đã được chuẩn hóa.

Tín hiệu nhận được tại CPU được biểu diễn dưới dạng:

$$r_u^s = \sum_{a=1}^A \sqrt{\rho^u} \hat{g}_{as}^* g_{as} q_{u,s} + \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* \mathbf{w}_a. \quad (2.10)$$

Tốc độ truyền dữ liệu đạt được của cảm biến thứ s được tính toán như sau:

$$R_u^s = \log_2 \left(1 + \rho^u \sum_{a=1}^A \chi_{as} \right). \quad (2.11)$$

Thông lượng đường lên của cảm biến thứ s , có xét đến chi phí ước lượng kênh, được biểu diễn như sau:

$$T_{u,s} = B \frac{\left(1 - \frac{S \cdot \tau_u^{hl}}{\tau_c^u}\right)}{2} \frac{1}{S} R_u^s. \quad (2.12)$$

- Giai đoạn 2: Xử lý dữ liệu pilot nhận được sau khi thu tại AP thứ a . Đầu tiên, thực hiện việc ánh xạ $\mathbf{y}_a^p$ lên ϕ_s^H , phương trình toán học được biểu diễn dưới đây:

$$\tilde{y}_{as}^p = \phi_s^H \mathbf{y}_a^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'} \phi_s^H \phi_{s'} + \phi_s^H \mathbf{w}_a. \quad (3.2)$$

Tiếp theo, các AP tính toán ước lượng kênh truyền bằng cách sử dụng kỹ thuật MMSE. Do đó, ước lượng kênh g_{as} được tính toán theo biểu thức sau:

$$\hat{g}_{as} = \frac{\mathbb{E}\{\tilde{y}_{as}^{p*} g_{as}\}}{\mathbb{E}\{|\tilde{y}_{as}^p|^2\}} \tilde{y}_{as}^p = c_{m,as} \tilde{y}_{as}^p, \quad (3.3)$$

trong đó,

$$c_{m,as} \triangleq \frac{\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as}}{\tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s'=1}^S \beta_{as'} |\phi_s^H \phi_{s'}|^2 + 1}. \quad (3.4)$$

Giá trị trung bình bình phương của ước lượng kênh được xác định bởi:

$$\chi_{m,as} \triangleq \mathbb{E}\{|\hat{g}_{as}|^2\} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as} c_{m,as} = \frac{\tau_u^{hl} \rho^p \beta_{as}^2}{\tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s'=1}^S \beta_{as'} |\phi_s^H \phi_{s'}|^2 + 1}. \quad (3.5)$$

b) Truyền dữ liệu đường lên

Các cảm biến truyền dữ liệu đồng thời đến tất cả các AP. Mỗi AP thu đồng thời tín hiệu từ tất cả các cảm biến gồm thành phần mong muốn của từng cảm biến, nhiễu giữa các cảm biến và tạp âm. Các AP cùng thực hiện xử lý tín hiệu nhận được, áp dụng kỹ thuật lọc phối hợp (MF: *Matched Filtering*), tương tự như kỹ thuật kết hợp tỉ số cực đại (MRC: *Maximum Ratio Combining*). Mỗi AP nhân tín hiệu thu được với liên hợp của ước lượng kênh để tăng cường thành phần tín hiệu mong muốn theo từng cảm biến rồi truyền về CPU thông qua đường truyền hữu tuyến tốc độ cao. CPU thu, xử lý tín hiệu và tách ra thành phần mong muốn của từng cảm biến. Tốc độ truyền dữ liệu đạt được của cảm biến thứ s được thể hiện theo công thức sau:

$$R_u^s = \log_2 \left(1 + \frac{\rho^u \alpha_s \left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \right)^2}{\rho^u \sum_{s' \neq s}^S \alpha_{s'} \left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as'}}{\beta_{as}} \right)^2 |\phi_s^H \phi_{s'}|^2 + \rho^u \sum_{s'=1}^S \alpha_{s'} \sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \beta_{as'} + \sum_{a=1}^A \chi_{m,as}} \right). \quad (3.6)$$

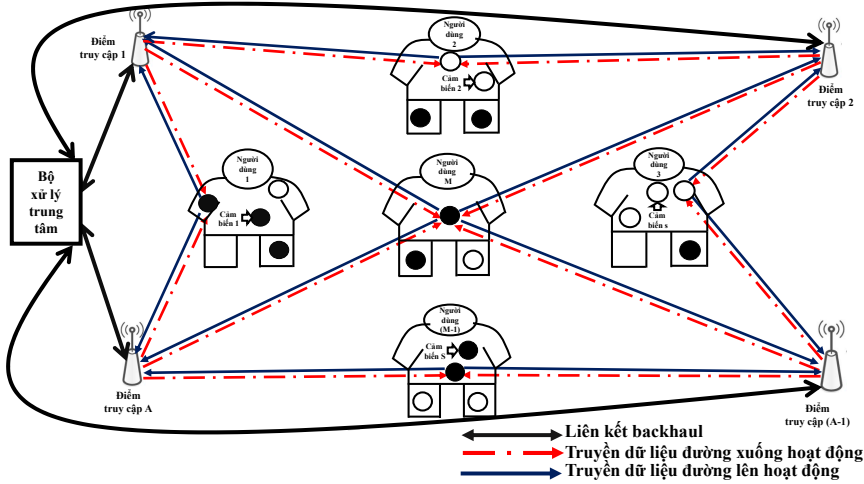
Chương 3

Đề xuất thuật toán điều khiển công suất cho WBAN.

3.1 Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

3.1.1 Mô hình hệ thống

Cấu trúc mô hình hệ thống đã được mô tả chi tiết trong Chương 2. Điểm khác biệt chính là cơ chế kết nối và phục vụ: tại mỗi thời điểm, tất cả các AP đồng thời tham gia phục vụ tất cả các cảm biến với cùng tần số sóng mang và mô hình truyền thông WBAN đa kết nối không chia khe thời gian.



Hình 3.1: Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

a) Ước lượng kênh truyền

- Giai đoạn 1: Tất cả cảm biến cùng một lúc truyền chuỗi pilot ϕ_s đến các AP. Biểu thức toán học cho tín hiệu nhận được tại AP thứ a là:

$$\mathbf{y}_a^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s=1}^S g_{as} \phi_s + \mathbf{w}_a. \quad (3.1)$$

2.2.4 Truyền dữ liệu đường xuống

Tín hiệu được phát từ AP thứ a được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{x}_a = \sqrt{\rho^d} \alpha_{d,s}^{1/2} \hat{g}_{as}^* q_{d,s}, \quad (2.13)$$

trong đó, ρ^d là SNR đường xuống đã được chuẩn hoá, HSDKCS $\alpha_{d,s} = 1$, $q_{d,s}$ là ký hiệu dữ liệu truyền đến cảm biến thứ s với giả thiết $\mathbb{E}\{|q_{d,s}|^2\} = 1$.

Tại cảm biến thứ s tín hiệu thu được là:

$$\mathbf{r}_d^s = \sum_{a=1}^A g_{as} \mathbf{x}_a + \mathbf{w}_s = \sqrt{\rho^d} \sum_{a=1}^A g_{as} \hat{g}_{as}^* q_{d,s} + \mathbf{w}_s, \quad (2.14)$$

trong đó, $\mathbf{w}_s$ là nhiễu tạp tại cảm biến thứ s .

Tốc độ truyền dữ liệu đạt được của cảm biến thứ s được xác định bởi:

$$R_d^s = \log_2 \left(1 + \frac{\rho^d \left(\sum_{a=1}^A \chi_{as} \right)^2}{\rho^d \sum_{a=1}^A \chi_{as} \beta_{as} + 1} \right). \quad (2.15)$$

Thông lượng đường xuống của cảm biến thứ s , có xét đến chi phí ước lượng kênh, được biểu diễn như sau:

$$T_{d,s} = B \frac{\left(1 - \frac{S \cdot \tau_u^{hl}}{\tau_c} \right)}{2} \frac{1}{S} R_d^s. \quad (2.16)$$

2.2.5 Nhận xét về mô hình TDMA WBAN

Thông lượng của từng cảm biến trong mô hình TDMA WBAN phụ thuộc vào số lượng cảm biến S . Khi S tăng, thời gian dành cho pha huấn luyện chiếm phần lớn thời gian trong khoảng thời gian kết hợp. Vì thế, thời gian dành cho truyền tín hiệu đường lên và đường xuống bị rút ngắn, nên thông lượng toàn bộ hệ thống dự kiến sẽ bị suy giảm và không đáp ứng mức ngưỡng ứng dụng của WBAN. Trong bối cảnh này, xu hướng thiết kế hiện đại trong các hệ thống truyền thông không dây là loại bỏ đa truy cập trực giao nhằm cải thiện hiệu suất sử dụng tài nguyên, đồng thời kết hợp với các kỹ thuật xử lý tín hiệu để giảm nhiễu và tăng tốc độ truyền dữ liệu.

2.3 Mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối

2.3.1 Khái niệm WBAN đơn kết nối

Tại mỗi thời điểm trong một khe thời gian, mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến duy nhất. Khi $S \leq A$, tất cả cảm biến được gán cho các AP có kênh tốt nhất và truyền đồng thời trong một khe. Khi $S > A$, quá trình truyền được chia thành $\delta = \lceil S/A \rceil$ khe liên tiếp; trong đó mỗi khe phục vụ tối đa A cảm biến, các cảm biến còn lại được phục vụ ở các khe tiếp theo; quy tắc gán AP–cảm biến được xác định bởi công thức:

$$a_s \triangleq \arg \max_{a \in \mathcal{A}_{\text{avail}}} \beta_{as}, \quad (2.17)$$

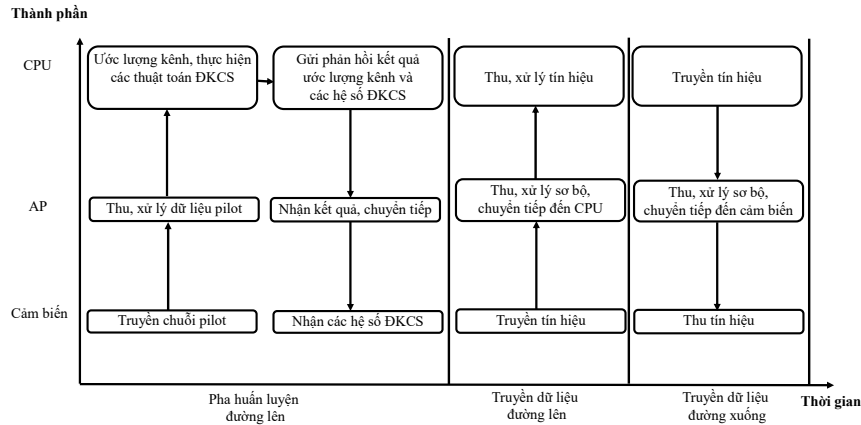
trong đó, $\mathcal{A}_{\text{avail}}$ là tập các AP chưa được gán trong khe thời gian hiện tại. Sau mỗi lần gán, AP được chọn sẽ bị loại khỏi tập $\mathcal{A}_{\text{avail}}$.

a) Trường hợp kênh truyền ổn định

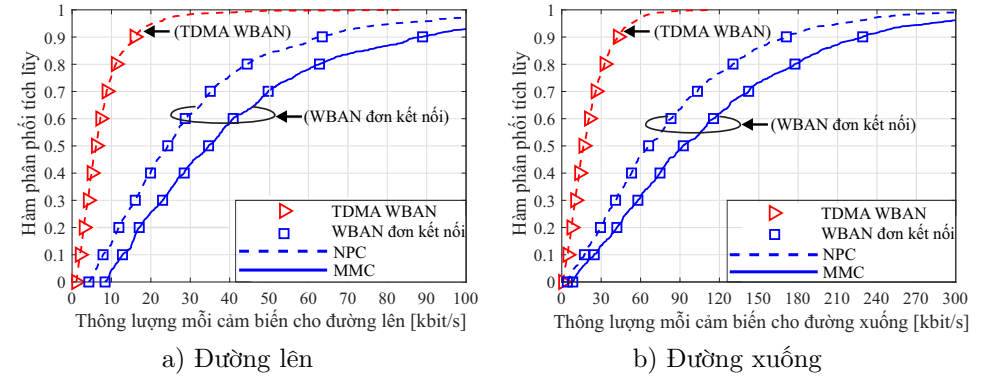
Hiệu ứng thuận nghịch cho phép ước lượng kênh đường xuống dựa trên kênh đường lên, do đó chỉ cần ước lượng kênh đường lên. Phương thức TDD và giản đồ thời gian hoạt động được mô tả lần lượt trong Hình 2.3 và Hình 2.4.

Pha huấn luyện đường lên τ_u^{hl}	Truyền dữ liệu đường lên τ_u				Truyền dữ liệu đường xuống τ_d			
	Khe 1	Khe 2	...	Khe δ	Khe 1	Khe 2	...	Khe δ

Hình 2.3: Phương thức TDD trong trường hợp kênh truyền ổn định.



Hình 2.4: Giản đồ thời gian trong trường hợp kênh truyền ổn định.



Hình 2.8: So sánh thông lượng cảm biến giữa hai mô hình truyền thông TDMA WBAN và WBAN đơn kết nối với $A = 4$, $S = 8$.

xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và mô hình truyền thông TDMA WBAN. Trong mô hình truyền thông TDMA WBAN, mỗi cảm biến chỉ được cấp một khe thời gian duy nhất trong tổng số S khe của mỗi chu kỳ truyền. Vì vậy, thông lượng của mỗi cảm biến bị giảm tỷ lệ thuận với $\frac{1}{S}$. Nói cách khác, dù kênh truyền thuận lợi, mỗi cảm biến vẫn chỉ khai thác một phần nhỏ thời lượng của tài nguyên thời gian, dẫn tới suy giảm đáng kể thông lượng. Ngược lại, với mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, trong một khe thời gian, mỗi cảm biến truyền dữ liệu đến một AP và toàn hệ thống có thể hoạt động đồng thời tới $\min(A, S)$ cặp cảm biến-AP. Khi đó, thông lượng cảm biến không bị chia cho $\frac{1}{S}$. Kết quả là, dù NPC hay MMC, thông lượng mỗi cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối vẫn vượt trội so với mô hình truyền thông TDMA WBAN trong các kịch bản mô phỏng.

2.5 Kết luận Chương 2

Chương 2 đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp thuật toán MMC để điều khiển công suất cảm biến cho cả đường lên và đường xuống. Hiệu quả của mô hình đề xuất được phân tích với các kịch bản thay đổi số lượng cảm biến, số lượng AP. So với trường hợp NPC, mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp với thuật toán MMC mang lại sự cải thiện đáng kể thông lượng cho cảm biến. Bên cạnh đó, mô hình WBAN đơn kết nối cho thông lượng cảm biến tốt hơn mô hình TDMA WBAN trong các kịch bản mô phỏng.

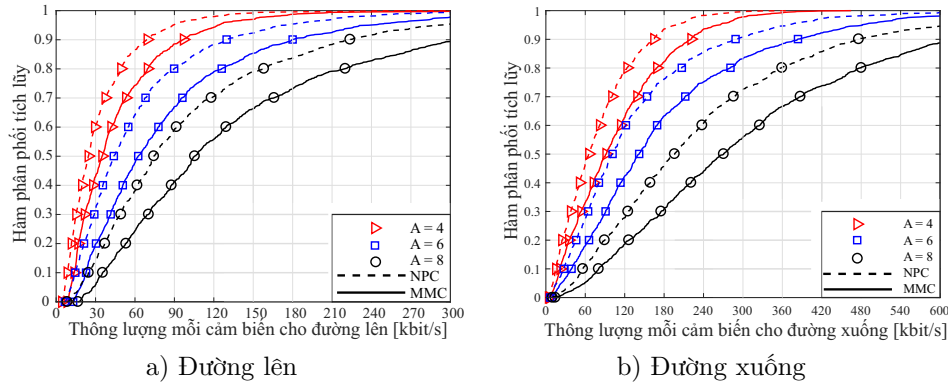
2.4 Kết quả mô phỏng và thảo luận

2.4.1 Kích bản mô phỏng

Sử dụng hàm phân bố tích lũy (CDF: *Cumulative Distribution Function*) đánh giá thông lượng cho mỗi cảm biến ở cả đường lên và đường xuống, đã tính toán đến chi phí ước lượng kênh. Triển khai A AP và S cảm biến một cách ngẫu nhiên trong một căn phòng điều trị tại bệnh viện có diện tích $10 m^2$. Tiến hành khởi tạo 200 cách sắp xếp vị trí ngẫu nhiên cho các AP và cảm biến trong một kịch bản hoặc mô hình mạng cụ thể tương ứng 200 lần lặp.

2.4.2 Đánh giá kết quả mô phỏng

Hình 2.7 cho thấy CDF của thông lượng mỗi cảm biến ở đường lên và đường xuống khi có và không điều khiển công suất (NPC: *Non Power Control*). Kết quả cho thấy điều khiển công suất giúp cải thiện đáng kể thông lượng và thông lượng cảm biến trong trường hợp áp dụng thuật toán MMC luôn cao hơn so với NPC. Nguyên nhân là do khi NPC các cảm biến cùng duy trì một mức công suất phát cực đại, dẫn đến sự lãng phí công suất tại các cảm biến có điều kiện kênh tốt. Trong khi đó, MMC phân bổ công suất theo tiêu chí tối đa hóa mức tối thiểu, giúp nâng cao thông lượng cảm biến yếu nhất, đồng thời cải thiện sự công bằng thông lượng giữa các cảm biến.



Hình 2.7: CDF của thông lượng mỗi cảm biến ở cả đường lên và đường xuống trong các trường hợp có/không điều khiển công suất, với số lượng cảm biến $S = 8$ và thay đổi số lượng AP A .

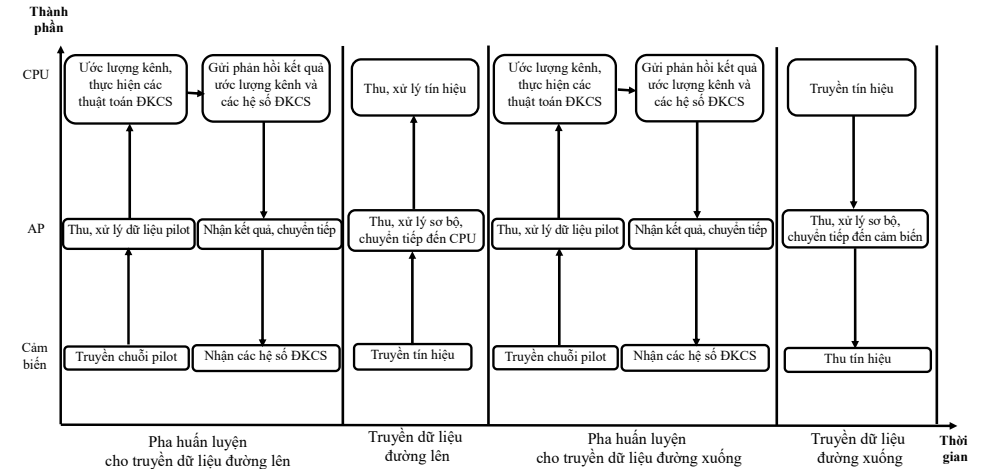
Hình 2.8 biểu diễn CDF thông lượng của mỗi cảm biến ở đường lên và đường

b) Trường hợp kênh biến đổi nhanh

Hiện tượng đông cứng kênh không còn tồn tại và tính đối xứng kênh trong TDD không còn đảm bảo. Khi đó, hệ thống buộc phải thu thập thông tin trạng thái kênh (CSI: *Channel State Information*) cho cả đường lên và đường xuống. Phương thức TDD và giản đồ thời gian hoạt động được mô tả lần lượt trong Hình 2.5 và Hình 2.6.

Pha huấn luyện đường lên τ_u^{hl}	Truyền dữ liệu đường lên τ_u				Pha huấn luyện đường xuống τ_d^{hl}	Truyền dữ liệu đường xuống τ_d			
	Khe 1	Khe 2	...	Khe δ		Khe 1	Khe 2	...	Khe δ

Hình 2.5: Phương thức TDD trong trường hợp kênh biến đổi nhanh.



Hình 2.6: Giản đồ thời gian trong trường hợp kênh biến đổi nhanh.

2.3.2 Pha huấn luyện kênh

Biểu thức toán học cho tín hiệu nhận được tại AP thứ a_s (AP thứ a phục vụ cảm biến thứ s) trong khe thời gian thứ k được biểu diễn dưới dạng:

$$\mathbf{y}_{a_s}^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s \in \Gamma_k} g_{a_s s} \phi_s + \mathbf{w}_{a_s}, \quad (2.18)$$

trong đó, Γ_k là tập các cảm biến đang được phục vụ trong khe thời gian thứ k , ϕ_s là chuỗi pilot của cảm biến thứ s , và $\mathbf{w}_{a_s}$ là nhiễu tạp tại AP thứ a_s .

Ước lượng kênh $g_{a_s s}$ được tính theo biểu thức sau:

$$\hat{g}_{a_s s} = \frac{\mathbb{E}\{\tilde{y}_{a_s s}^{p*} g_{a_s s}\}}{\mathbb{E}\{|\tilde{y}_{a_s s}^p|^2\}} \tilde{y}_{a_s s}^p = c_{a_s s} \tilde{y}_{a_s s}^p, \quad (2.19)$$

trong đó,

$$c_{a_s s} \triangleq \frac{\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{a_s s}}{\tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s' \in \Gamma_k} \beta_{a_s s'} \left| \phi_s^H \phi_{s'} \right|^2 + 1}. \quad (2.20)$$

Giá trị trung bình bình phương của ước lượng kênh $\hat{g}_{a_s s}$ giữa AP thứ a_s và cảm biến thứ s được biểu diễn dưới dạng:

$$\chi_{a_s s}^u \triangleq \mathbb{E}\{|\hat{g}_{a_s s}|^2\} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{a_s s} c_{a_s s} = \frac{\tau_u^{hl} \rho^p \beta_{a_s s}^2}{\tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s' \in \Gamma_k} \beta_{a_s s'} \left| \phi_s^H \phi_{s'} \right|^2 + 1}. \quad (2.21)$$

2.3.3 Truyền dữ liệu đường lên

Cảm biến truyền tín hiệu, AP thu và xử lý sơ bộ rồi chuyển đến CPU. CPU thu, xử lý tín hiệu, tính tỉ số tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm (SINR: *Signal-to-Interference-plusNoise Ratio*) hiệu dụng tại cảm biến s theo biểu thức:

$$\bar{\zeta}_{a_s s} = \frac{\rho^u \alpha_s \chi_{a_s s}^u}{\rho^u \alpha_s (\beta_{a_s s} - \chi_{a_s s}^u) + \rho^u \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{s'} \beta_{a_s s'} + 1}. \quad (2.22)$$

Sau khi xác định được SINR hiệu dụng, tốc độ truyền dữ liệu đường lên của cảm biến thứ s được tính như sau:

$$R_u^s = -(\log_2 e) e^{1/\bar{\zeta}_{a_s s}} \text{Ei}\left(-\frac{1}{\bar{\zeta}_{a_s s}}\right). \quad (2.23)$$

Trong trường hợp kênh truyền ổn định, thông lượng của cảm biến thứ s đã tính toán đến chi phí ước lượng kênh, được đề xuất theo biểu thức sau:

$$T_{u,s} = B \frac{\left(1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c}\right)}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_u^s. \quad (2.24)$$

Trong trường hợp kênh biến đổi nhanh, thông lượng của cảm biến thứ s được đề xuất theo biểu thức sau:

$$T_{u,s} = B \frac{\left(1 - \frac{\tau_u^{hl} + \tau_d^{hl}}{\tau^c}\right)}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_u^s. \quad (2.25)$$

2.3.4 Truyền dữ liệu đường xuống

Tương tự đường lên, SINR hiệu dụng và tốc độ truyền dữ liệu đường xuống của cảm biến thứ s lần lượt được biểu diễn như sau:

$$\bar{\mu}_{a_s s} \triangleq \frac{\rho^d \alpha_{d,s} \chi_{a_s s}^u}{\rho^d \alpha_{d,s} (\beta_{a_s s} - \chi_{a_s s}^u) + \rho^d \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{d,s'} \beta_{a_s s'} + 1}, \quad (2.26)$$

$$R_d^s = -(\log_2 e) e^{\frac{1}{\bar{\mu}_{a_s s}}} \text{Ei}\left(-\frac{1}{\bar{\mu}_{a_s s}}\right). \quad (2.27)$$

Thông lượng của cảm biến thứ s trong trường hợp kênh truyền ổn định và kênh biến đổi nhanh lần lượt được đề xuất theo các biểu thức dưới đây:

$$T_{d,s} = B \frac{\left(1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c}\right)}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_d^s. \quad (2.28)$$

$$T_{d,s} = B \frac{\left(1 - \frac{\tau_u^{hl} + \tau_d^{hl}}{\tau^c}\right)}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_d^s. \quad (2.29)$$

2.3.5 Điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu

a) Tối ưu hệ số điều khiển công suất đường xuống

Tính toán hệ số điều khiển công suất nhằm mục tiêu tối ưu hóa công suất cho những cảm biến có tốc độ truyền dữ liệu thấp nhất. Quá trình tối ưu hóa này được lặp lại cho đến khi tất cả cảm biến có tốc độ truyền dữ liệu tương đồng, đạt được điểm tối ưu. Chi tiết mô hình toán học được trình bày như sau:

$$\max_{\{\alpha_{d,s}\}} \min_{s=1,\dots,S} \bar{\mu}_{a_s s} \quad (2.30)$$

ràng buộc: $0 < \alpha_{d,s} \leq 1, \quad s = 1, \dots, S.$

Thực hiện các phép biến đổi theo phương pháp bài toán tối ưu truyền thống, biến đổi bài toán (2.30) về dạng hàm lồi. Sử dụng thuật toán phân đôi (*bisection*) để tìm kiếm nghiệm tối ưu $\alpha_{d,s}$.

b) Tối ưu hệ số điều khiển công suất đường lên

Mô hình toán học của bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất đường lên được mô tả cụ thể như sau:

$$\max_{\{\alpha_s\}} \min_{s=1,\dots,S} \bar{\zeta}_{a_s s} \quad (2.31)$$

ràng buộc: $0 < \alpha_s \leq 1, \quad s = 1, \dots, S.$

Tương tự (2.30), sử dụng thuật toán phân đôi để tìm kiếm nghiệm tối ưu α_s .