

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Ngành: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ
Mã số: 9 52 02 03

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
PGS.TS. PHẠM THANH HIỆP
TS. ĐỖ THÀNH QUÂN

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi được thực hiện dưới sự dẫn dắt của tập thể cán bộ hướng dẫn. Các số liệu và kết quả trong luận án hoàn toàn trung thực, chính xác và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào trước đây. Các tài liệu tham khảo được trích dẫn đầy đủ và tuân thủ theo đúng quy định hiện hành.

Hà Nội, ngày 17 tháng 8 năm 2026

Tác giả

Bùi Tiến Anh

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án, nghiên cứu sinh đã nhận được rất nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu.

Trước tiên, nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến các cán bộ hướng dẫn là PGS. TS **Phạm Thanh Hiệp**, Khoa Vô tuyến điện tử và TS **Đỗ Thành Quân**, Khoa Chỉ huy tham mưu kỹ thuật. Các thầy không chỉ là người hướng dẫn, giúp đỡ nghiên cứu sinh hoàn thành luận án mà còn là người định hướng, truyền động lực, phương pháp làm việc cho nghiên cứu sinh trên con đường tiếp thu, lĩnh hội và phát triển các tri thức khoa học cũng như hoàn thiện bản thân.

Nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn Bộ môn Cơ sở kỹ thuật vô tuyến, Bộ môn Thông tin, Khoa Vô tuyến điện tử, đồng chí, đồng đội, bạn bè, đồng nghiệp vì đã luôn quan tâm, động viên, tạo điều kiện thuận lợi và hỗ trợ tận tình trong quá trình học tập, nghiên cứu của nghiên cứu sinh.

Tiếp theo, nghiên cứu sinh chân thành cảm ơn Phòng Sau đại học, Học viện Kỹ thuật Quân sự và Học viện Phòng không - Không quân, Quân chủng PK - KQ đã luôn ủng hộ, hướng dẫn, giúp đỡ để nghiên cứu sinh hoàn thành nội dung nghiên cứu của mình.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh xin dành kết quả của luận án cho gia đình, người thân vì đã luôn bên cạnh, động viên, khích lệ và chia sẻ những khó khăn, đem lại nguồn động lực lớn để nghiên cứu sinh có được những kết quả như ngày hôm nay.

MỤC LỤC

MỤC LỤC.....	i
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	v
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC.....	vii
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	x
DANH MỤC BẢNG.....	xv
MỞ ĐẦU	1
Chương 1. NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG	13
1.1. Mạng vô tuyến quanh cơ thể.....	13
1.1.1. Khái niệm	13
1.1.2. Thành phần	14
1.1.3. Ứng dụng.....	15
1.2. Tổng quan về kỹ thuật điều khiển công suất	16
1.2.1. Khái niệm	16
1.2.2. Mục đích của điều khiển công suất	17
1.2.3. Phân loại	17
1.3. Các tham số đánh giá chất lượng hệ thống.....	19
1.3.1. Dung lượng.....	19
1.3.2. Thông lượng.....	20
1.3.3. Hiệu quả năng lượng.....	20

1.3.4. Công suất tiêu thụ.....	21
1.3.5. Một số tham số khác.....	22
1.4. Các công trình nghiên cứu có liên quan	23
1.4.1. Các nghiên cứu ngoài nước.....	23
1.4.2. Các nghiên cứu trong nước.....	26
1.4.3. Khoảng trống nghiên cứu	28
1.4.4. Nội dung nghiên cứu của luận án	32
1.5. Kết luận Chương 1	35
Chương 2. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH TRUYỀN THÔNG ĐƠN KẾT NỐI CHO WBAN.....	36
2.1. Động lực nghiên cứu.....	36
2.2. Mô hình WBAN và các đặc trưng kênh truyền.....	38
2.2.1. Mô hình hệ thống.....	38
2.2.2. Hệ số kênh truyền	40
2.2.3. Mô hình suy hao đường truyền điểm cắt động.....	42
2.3. Mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA.....	43
2.3.1. Mô hình hệ thống.....	43
2.3.2. Pha huấn luyện đường lên.....	44
2.3.3. Truyền dữ liệu đường lên.....	45
2.3.4. Truyền dữ liệu đường xuống	46
2.3.5. Nhận xét về mô hình TDMA WBAN	48
2.4. Mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối	48
2.4.1. Khái niệm WBAN đơn kết nối	48

2.4.2. Pha huấn luyện kênh.....	52
2.4.3. Truyền dữ liệu đường lên.....	54
2.4.4. Truyền dữ liệu đường xuống	57
2.4.5. Điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu.....	59
2.5. Kết quả mô phỏng và thảo luận.....	62
2.5.1. Kịch bản mô phỏng.....	62
2.5.2. Đánh giá kết quả mô phỏng.....	64
2.6. Kết luận Chương 2	71
Chương 3. ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT CHO WBAN.....	73
3.1. Động lực nghiên cứu.....	73
3.2. Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.....	75
3.2.1. Mô hình hệ thống.....	75
3.2.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận.....	82
3.2.3. Kết luận Vấn đề nghiên cứu 3.2	88
3.3. Đề xuất thuật toán điều khiển công suất.....	89
3.3.1. Động lực nghiên cứu	89
3.3.2. Thuật toán điều khiển công suất dựa trên ngưỡng thông lượng.	90
3.3.3. Thuật toán điều khiển công suất dựa trên "cửa sổ" thông lượng	92
3.3.4. Phân tích một số đặc tính của thuật toán TTC và TWC	94
3.4. Kết quả mô phỏng và thảo luận.....	98
3.4.1. Kịch bản mô phỏng.....	98
3.4.2. Đánh giá kết quả mô phỏng	101

3.5. Kết luận Chương 3	113
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	114
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....	117
PHỤ LỤC	119
TÀI LIỆU THAM KHẢO	131

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nghĩa Tiếng Anh	Nghĩa Tiếng Việt
5G	5th-Generation Mobile Communication System	Hệ thống truyền thông di động thế hệ thứ năm
6G	6th-Generation Mobile Communication System	Hệ thống truyền thông di động thế hệ thứ sáu
AP	Access Point	Điểm truy cập
BS	Base Station	Trạm gốc
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ lỗi bit
CDF	Cumulative Distribution Function	Hàm phân phối tích lũy
CF	Cell-Free	Không phân chia tế bào
CM	Channel Model	Mô hình kênh
CPU	Central Processing Unit	Bộ xử lý trung tâm
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
FI	Floating-Intercept	Điểm cắt động
ICU	Intensive Care Unit	Khoa Hồi sức tích cực
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Hội kỹ sư điện và điện tử
IoT	Internet of Things	Internet kết nối vạn vật
LoS	Line-of-Sight	Tầm nhìn thẳng
MAI	Multiple Access Interference	Nhiều do truy cập đa người dùng.
mMIMO	Massive Multiple-Input Multiple-Output	Nhiều đầu vào nhiều đầu ra kích thước lớn

MMSE	Minimum Mean Square Error	Sai số bình phương trung bình tối thiểu
MMC	Max-Min Power Control	Điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu
NLoS	Non-Line-of-Sight	Không theo tầm nhìn thẳng
NPC	Non Power Control	Không điều khiển công suất
QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
SC	Small-Cell	Tế bào nhỏ
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên tạp âm
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm
TDD	Time-Division Duplex	Song công phân chia theo thời gian
TDMA	Time-Division Multiple Access	Đa truy cập phân chia theo thời gian
TEC	Throughput Equalization Power Control	Điều khiển công suất cải thiện thông lượng tối thiểu
TTC	Throughput Threshold-based Power Control	Điều khiển công suất dựa trên ngưỡng thông lượng
TWC	Throughput Window-based Power Control	Điều khiển công suất dựa trên "cửa sổ" thông lượng
WBAN	Wireless Body Area Networks	Mạng vô tuyến quanh cơ thể

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
a	a là một biến số.
$\mathbf{a}$	$\mathbf{a}$ là một véc-tơ.
$\mathbf{A}$	$\mathbf{A}$ là một ma trận.
$\mathbf{A}^*$	Liên hợp phức của ma trận $\mathbf{A}$.
$\mathbf{A}^T$	Chuyển vị của ma trận $\mathbf{A}$.
$\mathbf{A}^H$	Chuyển vị liên hợp phức của ma trận $\mathbf{A}$.
$\mathbf{A}_{-l}$	Ma trận $\mathbf{A}$ có kích thước L dòng, L cột nhưng bỏ đi cột thứ l , $l = 1, \dots, L$.
$\mathbf{I}_M$	Ma trận đơn vị có kích thước $M \times M$.
B	Bảng thông.
C	Dung lượng.
T	Thông lượng.
$T_{threshold}$	Mức ngưỡng thông lượng.
T_{down}	Mức ngưỡng dưới "cửa sổ" thông lượng.
T_{up}	Mức ngưỡng trên "cửa sổ" thông lượng.
$T_{u,s}$	Thông lượng đường lên của cảm biến thứ s .
$T_{d,s}$	Thông lượng đường xuống của cảm biến thứ s .
R_u^s	Tốc độ đường lên của cảm biến thứ s .
R_d^s	Tốc độ đường xuống của cảm biến thứ s .
BB	Nhiều do sai số ước lượng kênh.
DD	Cường độ tín hiệu mong muốn.
UU	Nhiều giữa các cảm biến.
$\mathbb{E}$	Giá trị kỳ vọng.

E_i	Hàm tích phân theo cấp số nhân.
H_b	Độ cao của điểm truy cập.
H_m	Độ cao cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể người dùng.
S	Số lượng cảm biến.
A	Số lượng điểm truy cập.
D	Diện tích căn phòng.
N	Số vòng lặp For để phân bố ngẫu nhiên vị trí AP và cảm biến.
max-iter	Số lần lặp tối đa của vòng While trong TTC và TWC.
PL	Thành phần suy hao đường truyền.
$\mathbb{C}^{m \times n}$	Ma trận phức có kích thước $m \times n$.
$\mathcal{S}$	Tập hợp các biến lệch.
Υ	Tập hợp các biến.
$\mathcal{V}_{TTC}$	Tập hợp các cảm biến không đạt mức ngưỡng.
$\mathcal{V}_{TWC}$	Tập hợp các cảm biến không thuộc "cửa sổ" ngưỡng.
δ	Số lượng khe thời gian.
Γ_k	Tập hợp các cảm biến đang được phục vụ tại khe thời gian thứ k , $k=1, \dots, \delta$.
$\ \cdot\ $	Chuẩn Euclid.
τ_u^{hl}	Khoảng thời gian cho pha huấn luyện đường lên.
τ_d^{hl}	Khoảng thời gian cho pha huấn luyện đường xuống.
τ^c	Khoảng thời gian kết hợp.
τ_u	Khoảng thời gian truyền dữ liệu đường lên.
τ_d	Khoảng thời gian truyền dữ liệu đường xuống.
ρ^p	SNR chuẩn hóa của mỗi pilot.
ρ^u	SNR chuẩn hóa đường lên.
ρ^d	SNR chuẩn hóa đường xuống.
ϵ	Dung sai.
f	Tần số.
ϕ, ψ	Chuỗi tín hiệu dẫn đường.

κ	Hệ số tương quan giữa các chuỗi tín hiệu dẫn đường.
α_s	Hệ số điều khiển công suất đường lên tại cảm biến.
α_{si}	Hệ số điều khiển công suất thuật toán TTC và TWC.
$\alpha_{d,s}$	Hệ số điều khiển công suất đường xuống tại AP của thuật toán MMC.
α_{as}	Hệ số điều khiển công suất đường xuống tại AP của mô hình TEC.
$q_{u,s}$	Ký hiệu dữ liệu truyền từ cảm biến đến AP.
$q_{d,s}$	Ký hiệu dữ liệu truyền từ AP đến cảm biến.
η	Tỷ lệ điều chỉnh hệ số điều khiển công suất.
h	Hệ số pha-đỉnh diện hẹp.
β	Hệ số pha-đỉnh diện rộng.
γ	Hệ số cắt trong mô hình suy hao đường truyền FI.
∂	Hệ số độ dốc trong mô hình suy hao đường truyền FI.
σ	Độ lệch chuẩn của biến thiên tín hiệu trong mô hình suy hao đường truyền FI.
ν	Giá trị trung gian tìm kiếm trong thuật toán chia đôi.
$\nu_{\min}$	Cận dưới phạm vi tìm kiếm trong thuật toán chia đôi.
$\nu_{\max}$	Cận trên phạm vi tìm kiếm trong thuật toán chia đôi.
θ	Ngưỡng giá trị của hàm mục tiêu.
κ, ι	Biến phụ.
ε	Sai số ước lượng kênh.
$\mathbf{w}$	Véc-tơ nhiễu gồm các phần tử độc lập, phân phối Gauss phức chuẩn.
χ	Giá trị trung bình bình phương của ước lượng kênh.
$\bar{\zeta}, \bar{\mu}$	SINR hiệu dụng được tính dựa trên ước lượng kênh.
Ω_1	Nhiều do trùng lặp chuỗi pilot.
Ω_2	Nhiều gây ra bởi các cảm biến khác.
$\mathcal{CN}(0, 1)$	Biến ngẫu nhiên Gauss phức có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng 1.

DANH MỤC HÌNH VẼ

1.1	Mô hình tổng quan của WBAN [1].	14
1.2	Kiến trúc truyền thông của WBAN [2].	15
2.1	Mô hình tổng quát của mạng WBAN.	39
2.2	Các đường liên kết trong mô hình kênh WBAN.	41
2.3	Kết hợp phương thức TDD và kỹ thuật TDMA trong mô hình TDMA WBAN.	44
2.4	Phương thức TDD trong trường hợp kênh truyền ổn định.	49
2.5	Giản đồ thời gian trong trường hợp kênh truyền ổn định.	50
2.6	Phương thức TDD trong trường hợp kênh truyền biến đổi nhanh.	50
2.7	Giản đồ thời gian trong trường hợp kênh biến đổi nhanh.	51
2.8	Lưu đồ thuật toán MMC sử dụng tìm kiếm nhị phân.	62
2.9	Sơ đồ thể hiện các bước mô phỏng để tối ưu hệ số điều khiển công suất cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối.	64
2.10	Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$	65
2.11	Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 4$	65
2.12	Trường hợp số lượng AP lớn hơn số lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 6$	66

2.13	Kịch bản tăng dần số AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$	66
2.14	Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$	67
2.15	Trường hợp số lượng AP lớn hơn số lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 6$	67
2.16	Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 4$	68
2.17	Kịch bản tăng dần số lượng AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$	68
2.18	So sánh thông lượng cảm biến giữa mô hình truyền thông TDMA WBAN và WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường lên với $A = 4, S = 8$	69
2.19	So sánh thông lượng cảm biến giữa mô hình truyền thông TDMA WBAN và WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường xuống với $A = 4, S = 8$	69
2.20	So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường lên với $A = 4, S = 8$	70
2.21	So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường xuống với $A=4, S=8$	71
3.1	Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.	76

3.2	Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$	82
3.3	Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $A = 4$	83
3.4	Kịch bản tăng dần số AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$	83
3.5	Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$	84
3.6	Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $A = 4$	84
3.7	Kịch bản tăng dần số AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$	85
3.8	So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 4, S = 8$	85
3.9	So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 4, S = 8$	86
3.10	So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 5, S = 4$	86
3.11	So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 5, S = 4$	87

3.12	So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh mô hình truyền thông WBAN đa kết nối khi truyền dữ liệu đường lên với $A = 4$, $S = 8$	87
3.13	So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh mô hình truyền thông WBAN đa kết nối khi truyền dữ liệu đường xuống với $A = 4$, $S = 8$	88
3.14	Lưu đồ thuật toán TTC.	91
3.15	Lưu đồ thuật toán TWC.	93
3.16	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$	102
3.17	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 1\%$, 5% và 10%	105
3.18	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, $A = 3$, 4 và 5	107
3.19	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, $S = 8$, 10 và 12	108
3.20	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, $D = 50 \text{ m}^2$, 100 m^2 và 200 m^2	109
3.21	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $\eta = 5\%$, các mức ngưỡng $T_{threshold}$, T_{down} và T_{up} thay đổi.	110

3.22	Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 50 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 50 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 75 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, mỗi cảm biến có ít nhất một liên kết LoS đến AP.	112
------	---	-----

DANH MỤC BẢNG

1.1	Ưu, nhược điểm của các mô hình WBAN.	24
2.1	Các kịch bản mô hình kênh của WBAN.	40
2.2	Tham số mô hình suy hao đường truyền điểm cắt động [3]. . . .	42
2.3	Tham số mô phỏng cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối.	63
3.1	Tham số mô phỏng cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.	99
3.2	So sánh mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với mô hình SC.	130

MỞ ĐẦU

1. Bối cảnh 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*) [4, 5]. 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 hệ thống các cảm biến không dây nhỏ gọn gắn trên bề mặt hoặc cấy ghép bên trong cơ thể 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 hiệu năng 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 sâu rộng và được ứng dụng ngày càng phổ biến trong các hệ thống y tế thông minh [2, 6, 7].

Xu hướng già hóa dân số toàn cầu đang diễn ra nhanh chóng và trở thành một trong những thách thức lớn đối với hệ thống y tế hiện đại. Theo số liệu thống kê, số lượng người cao tuổi (trên 60 tuổi) đã tăng từ 200 triệu người vào năm 1950 lên 761 triệu người vào năm 2021 và được dự báo sẽ đạt 1,6 tỷ người vào năm 2050. Cùng với sự gia tăng dân số già, tỷ lệ người cao tuổi mắc các bệnh mãn tính như tim mạch, tiểu đường... cũng ngày càng cao [8], kéo theo nhu cầu giám sát sức khỏe liên tục, chính xác và tin cậy.

Trong khi đó, hệ thống y tế truyền thống vẫn phụ thuộc nhiều vào mô hình theo dõi và điều trị tại bệnh viện, gây ra tình trạng quá tải, chi phí điều trị cao và thiếu tính linh hoạt. Việc người bệnh, đặc biệt là những bệnh nhân già yếu phải thường xuyên đến bệnh viện để kiểm tra hoặc điều trị không chỉ gây phiền toái, tốn kém thời gian và chi phí đi lại, mà còn gia tăng gánh nặng cho đội ngũ y tế lẫn cơ sở vật chất hiện có [9, 10].

Trước thực trạng đó, hệ thống y tế hiện đại đang chuyển mình theo hướng

phát triển các giải pháp chăm sóc sức khỏe liên tục, không xâm lấn, kết nối từ xa và cá nhân hóa. Một trong những hướng đi đầy tiềm năng là ứng dụng WBAN trong giám sát và theo dõi sức khỏe liên tục. WBAN cho phép thu thập, xử lý và truyền dữ liệu sinh học từ bệnh nhân một cách tự động và liên tục đến trung tâm xử lý, góp phần nâng cao hiệu quả điều trị bệnh mãn tính, phòng ngừa biến chứng và hỗ trợ ra quyết định y tế kịp thời.

Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các mô hình truyền thông cho WBAN phục vụ theo dõi, giám sát sức khỏe người cao tuổi không chỉ mang tính cấp thiết mà còn có ý nghĩa quan trọng trong việc xây dựng nền tảng công nghệ cho y tế thông minh, hướng đến một hệ sinh thái chăm sóc sức khỏe hiện đại, bền vững và phù hợp với xu thế chuyển đổi số toàn cầu.

Bên cạnh đó, trong các ứng dụng giám sát sức khỏe sử dụng WBAN, các cảm biến thường phải truyền dữ liệu liên tục để đảm bảo thu thập đầy đủ các thông tin sinh học quan trọng như điện tâm đồ, nhịp tim, huyết áp, thân nhiệt [11–13],... Việc duy trì quá trình truyền dữ liệu liên tục là điều kiện tiên quyết để đảm bảo tính toàn vẹn và độ chính xác trong giám sát sinh học, đặc biệt trong các tình huống yêu cầu phản ứng y tế kịp thời. Tuy nhiên, hoạt động truyền liên tục khiến các cảm biến tiêu tốn nhiều năng lượng, trong khi đa số cảm biến trong WBAN đều có dung lượng pin hạn chế và khó thay thế hoặc sạc lại thường xuyên, đặc biệt đối với các cảm biến gắn trên bề mặt hoặc cấy ghép bên trong cơ thể người. Do đó, điều khiển công suất trở thành một giải pháp thiết yếu nhằm tiết kiệm năng lượng trong khi vẫn đảm bảo khả năng truyền dữ liệu liên tục. Cách tiếp cận này không chỉ góp phần kéo dài thời gian hoạt động của các cảm biến mà còn duy trì tính ổn định và độ bền của WBAN, đặc biệt trong các tình huống giám sát sức khỏe liên tục và dài hạn tại nhà hoặc trong bệnh viện.

2. Lý do chọn đề tài

WBAN là một thành phần quan trọng trong hệ thống y tế thông minh, hỗ trợ giám sát liên tục và từ xa các thông số sinh học của con người. Bên cạnh lĩnh vực chăm sóc sức khỏe, WBAN còn được ứng dụng rộng rãi trong thể thao, quân sự và các hệ thống giám sát thời gian thực [6, 7, 14]. Tuy nhiên, việc triển khai WBAN hiệu quả trong thực tế vẫn gặp phải nhiều thách thức, liên quan đến chất lượng truyền tin và hiệu quả năng lượng.

Môi trường truyền tin trong WBAN có những đặc điểm khác biệt đáng kể so với các mạng cảm biến không dây truyền thống [15–17]. Kênh truyền bị ảnh hưởng mạnh bởi mô sinh học, chuyển động cơ thể và các vật cản xung quanh, gây ra hiện tượng pha-đỉnh, suy hao và độ trễ. Do đó, việc nghiên cứu, đề xuất các mô hình truyền thông phù hợp với đặc thù của WBAN là cần thiết để đảm bảo khả năng hoạt động ổn định của hệ thống.

Các cảm biến trong WBAN thường có kích thước nhỏ, dung lượng pin hạn chế và khó có khả năng thay thế hoặc sạc lại trong quá trình sử dụng liên tục [13, 18]. Do đó, tiết kiệm năng lượng trong quá trình truyền dữ liệu trở thành một yêu cầu quan trọng nhằm kéo dài thời gian hoạt động của cảm biến và đảm bảo tính ổn định của hệ thống. Tuy nhiên, trong các ứng dụng y tế, đặc biệt là giám sát sức khỏe theo thời gian thực, cảm biến cần duy trì truyền tin ổn định và liên tục. Điều này dẫn đến mâu thuẫn trực tiếp giữa mục tiêu tiết kiệm năng lượng và yêu cầu duy trì hiệu quả truyền dữ liệu. Trong một số hướng tiếp cận khác, khi tốc độ truyền dữ liệu vượt quá mức cần thiết, cảm biến có thể được chuyển sang trạng thái "*ngủ*" nhằm tiết kiệm năng lượng. Tuy nhiên, trong khuôn khổ luận án này, mục tiêu không tập trung vào tối ưu hóa cơ chế chuyển trạng thái hoạt động, mà hướng đến việc nâng cao thông lượng truyền tin thông qua các thuật toán điều khiển công suất, nhằm đảm bảo WBAN vận hành ổn định và hiệu quả lâu dài.

Thực tế cho thấy, nhiều nghiên cứu về WBAN hiện nay vẫn chủ yếu tập trung vào việc xây dựng các mô hình truyền thông dưới những giả định đơn giản [19–22], hoặc còn hạn chế trong việc đề xuất các thuật toán điều khiển công suất có khả năng đáp ứng đồng thời hai mục tiêu: nâng cao thông lượng và tiết kiệm năng lượng. Chính khoảng trống nghiên cứu này là động lực để luận án lựa chọn hướng tiếp cận tập trung vào hai mục tiêu cốt lõi: (i) đề xuất mô hình truyền thông mới cho WBAN, trong đó các cảm biến hoạt động liên tục nhằm hỗ trợ hiệu quả cho việc theo dõi và giám sát sức khỏe bệnh nhân; (ii) phát triển các thuật toán điều khiển công suất thích nghi, cho phép phân bổ công suất dựa trên điều kiện kênh truyền và đặc thù của từng ứng dụng. Thông qua đó, luận án hướng đến việc nâng cao hiệu quả toàn hệ thống, đồng thời đảm bảo tính khả thi khi triển khai trong các giải pháp y tế thông minh.

Để định hình rõ hơn bối cảnh triển khai mô hình truyền thông trong WBAN, việc khảo sát các mô hình truyền thông tiêu biểu trong các nghiên cứu liên quan là cần thiết. Các mô hình truyền thông WBAN có thể được xem xét theo hai hướng: mô hình sử dụng bộ điều phối trung tâm (*hub/coordinator*) và mô hình truyền thông *off-body* một chặng với các điểm truy cập (AP: *Access Point*) phân tán [15,23]. Trong mô hình truyền thông WBAN sử dụng hub, các cảm biến kết nối trực tiếp đến một hub, có nhiệm vụ thu thập, tổng hợp và chuyển tiếp dữ liệu đến hệ thống xử lý bên ngoài [24–27]. Tuy nhiên, mô hình truyền thông WBAN sử dụng hub bộc lộ một số hạn chế đáng kể trong cả khía cạnh kỹ thuật lẫn khả năng triển khai thực tế. Thứ nhất, có thể xảy ra độ trễ truyền tin do dữ liệu từ các cảm biến phải được truyền qua hub để tổng hợp trước khi chuyển đến hệ thống xử lý. Nếu hub gặp sự cố, toàn bộ hoạt động của mạng sẽ bị gián đoạn. Bên cạnh đó, khi số lượng cảm biến và lưu lượng truy cập dữ liệu tăng cao, hub dễ trở thành điểm “*ngẽn cổ chai*” và có thể làm suy giảm đáng kể thông lượng. Về mặt triển khai thực tế, đối với các ứng dụng như theo dõi chuyển động cơ thể con người, việc sử dụng hub có thể gây bất tiện cho người dùng trong quá trình di chuyển, đồng thời việc duy trì hub hoạt động liên tục cũng tiêu tốn nhiều năng lượng. Một vấn đề khác phát sinh khi cảm biến được gắn ở sau lưng trong khi hub đặt ở trước bụng người dùng. Trong trường hợp này, việc truyền tín hiệu giữa cảm biến và hub có thể là không theo tầm nhìn thẳng (NLoS: *Non-Line-of-Sight*). Hơn nữa, việc phụ thuộc vào hub để tổng hợp và chuyển tiếp dữ liệu có thể làm giảm tính linh hoạt trong việc truy cập trực tiếp hoặc tương tác với các hệ thống mạng bên ngoài.

Trước những hạn chế của mô hình truyền thông WBAN sử dụng *hub*, mô hình truyền thông *off-body* một chặng hỗ trợ bởi các AP phân tán đã được nghiên cứu như một hướng tiếp cận thay thế. Trong mô hình này, các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể truyền dữ liệu trực tiếp đến các AP được bố trí trong môi trường xung quanh, thay vì phải thông qua một *hub* trung tâm đặt trên cơ thể người dùng. Cách tiếp cận này giúp hệ thống trở nên linh hoạt hơn và đảm bảo thông lượng vì nếu một AP mất kết nối thì các AP khác vẫn đảm bảo quá trình truyền dữ liệu của cảm biến đến AP không bị gián đoạn. Trong Khoa Hồi sức tích cực (ICU: *Intensive Care Unit*) chuyên

điều trị bệnh nhân nặng, nguy kịch tại bệnh viện, yêu cầu theo dõi liên tục 24/7 đặt ra tiêu chí ưu tiên cao về thông lượng và hiệu quả năng lượng, theo dõi sát sao các chỉ số sinh tồn và khả năng duy trì chất lượng dịch vụ (QoS: *Quality of Service*) cho mọi cảm biến, hơn là chỉ tối thiểu hóa công suất phát tại từng cảm biến riêng lẻ. Mặc dù mô hình truyền thông WBAN sử dụng hub có lợi thế về cự ly truyền ngắn, nhưng vẫn tồn tại các hạn chế như điểm lỗi duy nhất, suy hao do che khuất theo tư thế bệnh nhân và gánh nặng năng lượng cũng như vận hành đối với hub.

Ngược lại, mô hình truyền thông WBAN off-body một chặng hỗ trợ bởi các AP phân tán khai thác hạ tầng các AP cố định được bố trí trong ICU, cho phép mỗi cảm biến được gán và kết nối tới AP có điều kiện kênh thuận lợi nhất thông qua cơ chế điều phối tập trung tại CPU. Nhờ phân tập thu từ nhiều AP, ảnh hưởng của suy hao che khuất và biến thiên tư thế bệnh nhân được giảm thiểu đáng kể, đồng thời hạn chế rủi ro gián đoạn do phụ thuộc vào một nút trung gian duy nhất. Cách tiếp cận này giúp nâng cao chất lượng kết nối và tính sẵn sàng của hệ thống trong các cơ sở y tế có hạ tầng mạng cố định, đặc biệt phù hợp với yêu cầu giám sát liên tục và ổn định trong môi trường hồi sức tích cực.

Mặc dù mô hình truyền thông WBAN off-body một chặng mang lại nhiều lợi ích về tính linh hoạt, khả năng mở rộng, nhưng vẫn tồn tại hạn chế do các cảm biến phải truyền dữ liệu trực tiếp đến các AP, có thể làm suy giảm hiệu quả truyền tin của các cảm biến có điều kiện truyền bất lợi. Nhằm khắc phục điểm hạn chế này, luận án đề xuất mô hình truyền thông mới cho WBAN là mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kế thừa có chọn lọc ý tưởng tổ chức mạng của mô hình tế bào nhỏ (SC: *Small-Cell*) [28] để đơn giản hóa kết nối và giảm nhiễu. Sự phát triển nhanh chóng và mức độ phổ cập rộng rãi của công nghệ 5G đã mở đường cho việc nghiên cứu các hệ thống không dây tiên tiến, đòi hỏi mật độ mạng cao hơn và lưu lượng dữ liệu di động lớn hơn trước đây. Để đáp ứng các yêu cầu này, mô hình SC đang được xem xét như một giải pháp hiệu quả nhằm cải thiện vùng phủ và dung lượng trong môi trường đô thị mật độ cao [29]. 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 [30]. Do đó, việc vận dụng ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC vào WBAN là

một giải pháp hợp lý nhằm đảm bảo mỗi cảm biến luôn được phục vụ bởi liên kết có chất lượng tốt nhất mà không gia tăng độ phức tạp xử lý. Bên cạnh đó, luận án cũng đề xuất áp dụng mô hình truyền thông đa kết nối cho WBAN kế thừa có chọn lọc ý tưởng tổ chức mạng của mô hình không phân chia tế bào (CF: *Cell-Free*) [28] nhằm cung cấp dịch vụ tốt đồng đều cho các cảm biến trong vùng phủ sóng. Kể từ sau công bố nền tảng trong [28], các nhà khoa học trên thế giới đã công bố nhiều công trình nghiên cứu về mô hình mạng CF, mở rộng và khai thác ý tưởng này trong nhiều bối cảnh khác nhau [31–35]. Các kết quả nghiên cứu đã được cộng đồng khoa học quốc tế thừa nhận rộng rãi, khẳng định vai trò quan trọng của CF như một xu hướng phát triển mới nhằm nâng cao hiệu quả trong các hệ thống truyền thông không dây. Mặc dù mô hình CF trong nghiên cứu [28] được phát triển chủ yếu cho mạng di động tế bào (*cell*) với hệ thống nhiều đầu vào nhiều đầu ra kích thước lớn (mMIMO: *Massive Multiple-Input Multiple-Output*), nguyên lý tổ chức mạng "*không phân chia tế bào*", trong đó nhiều AP phối hợp phục vụ nhiều người dùng, vẫn có thể được kế thừa và điều chỉnh để thiết kế các mô hình truyền thông phù hợp và hiệu quả cho WBAN. Việc kế thừa ý tưởng tổ chức mạng của mô hình CF vào WBAN đặc biệt phù hợp với môi trường trong nhà, vốn chịu ảnh hưởng đáng kể từ suy hao tín hiệu và hiện tượng đa đường, qua đó giúp cải thiện chất lượng truyền tin. Mô hình CF được đặc trưng bởi việc loại bỏ các đường biên phân chia giữa các tế bào. Thay vì phụ thuộc vào các trạm gốc (BS: *Base Station*) cố định để phục vụ từng khu vực riêng lẻ, CF triển khai một mạng lưới dày đặc các AP, cung cấp dịch vụ liên tục và đồng nhất cho người dùng được phân bố trong toàn khu vực. Cách tiếp cận này mang lại sự cải thiện đáng kể chất lượng kết nối trong mạng. Mặc dù trong WBAN các cảm biến thường gắn cố định trên bề mặt cơ thể người dùng, sự thay đổi tư thế và chuyển động của người dùng trong môi trường thực tế vẫn dẫn đến sự biến động kênh truyền. Do đó, việc áp dụng ý tưởng tổ chức mạng không phân chia tế bào từ mô hình CF vào mô hình truyền thông WBAN, nơi các cảm biến truyền và nhận dữ liệu trực tiếp với các AP, là một giải pháp hiệu quả nhằm nâng cao độ ổn định và chất lượng truyền tin. Bên cạnh đó, WBAN có yêu cầu cao về công bằng thông lượng giữa các cảm biến, điều mà ý tưởng "*không phân chia tế bào*" của CF có thể

đáp ứng nhờ tránh hiện tượng “*cảm biến ở xa hub bị thiệt thòi*”. Cách tiếp cận này đáp ứng tốt các yêu cầu về phạm vi phủ sóng rộng và liên tục, đặc biệt trong môi trường ICU.

Tuy nhiên, khác với CF triển khai hàng trăm AP và phục vụ nhiều người dùng, mô hình truyền thông WBAN luận án đề xuất chỉ áp dụng cho môi trường trong nhà, với số lượng AP và cảm biến hạn chế, tập trung vào bài toán tiết kiệm năng lượng và đảm bảo thông lượng ổn định cho cảm biến. Đây là một sự kế thừa có chọn lọc và điều chỉnh phù hợp để đáp ứng đặc thù và yêu cầu của mô hình truyền thông WBAN.

Trong mô hình truyền thông WBAN luận án đề xuất, một trong những yếu tố quan trọng là duy trì thông lượng ổn định, đồng thời đảm bảo tính liên tục và chính xác của dữ liệu truyền từ cảm biến đến AP. Điều này đặc biệt quan trọng khi dữ liệu thu thập từ các cảm biến là các thông tin sinh học quan trọng như nhịp tim, điện tâm đồ, nồng độ oxy trong máu... Tùy thuộc vào ứng dụng, thông lượng yêu cầu có thể từ 10 kbit/s đến 100 kbit/s đối với các dữ liệu cơ bản hoặc cao hơn đối với các dữ liệu phức tạp [36–38].

Tuy nhiên, trong điều kiện môi trường truyền không ổn định và sự thay đổi vị trí giữa cảm biến và AP, việc duy trì mức thông lượng ổn định là một thách thức không nhỏ. Nếu không có cơ chế điều chỉnh thích hợp, tín hiệu có thể bị suy hao nghiêm trọng, dẫn đến mất dữ liệu. Trong bối cảnh đó, cơ chế điều khiển công suất đóng một vai trò hết sức quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng truyền tin. Mặc dù có nhiều phương pháp khác nhau để cải thiện thông lượng truyền tin cho WBAN, điều khiển công suất vẫn được xem là sự lựa chọn hàng đầu, giúp cân bằng giữa hiệu suất truyền dữ liệu và tuổi thọ cảm biến. Mục tiêu chính của điều khiển công suất trong WBAN là điều chỉnh công suất phát của các cảm biến nhằm hạn chế nhiễu giữa các cảm biến, từ đó cải thiện hiệu quả truyền dữ liệu, nâng cao chất lượng kết nối, đảm bảo tín hiệu ổn định và kéo dài tuổi thọ cảm biến. Trong khuôn khổ phân tích này, nhiễu xuất hiện ở mẫu số của tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng tạp âm (SINR: *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), bao gồm hai thành phần chính: (i) nhiễu do sai số ước lượng kênh của chính cảm biến đang xét, và (ii) nhiễu đa người dùng, gây ra bởi tín hiệu chồng lấn từ các cảm biến khác. Khi công suất phát được điều chỉnh hợp lý, cả hai thành phần nhiễu

này đều được giảm thiểu, dẫn đến SINR của từng cảm biến tăng lên. Theo định lý Shannon, thông lượng kênh tỷ lệ thuận với $\log_2(1 + \text{SINR})$. Do đó, việc cải thiện SINR sẽ trực tiếp làm tăng thông lượng kênh. Đồng thời, SINR cao hơn cũng giúp giảm xác suất lỗi bit, qua đó nâng cao hiệu quả toàn hệ thống. Đồng thời, việc giảm nhiễu còn kéo theo giảm tỷ lệ lỗi bit (BER: *Bit Error Rate*), làm giảm số lượng gói tin phải truyền lại, từ đó cải thiện thông lượng hiệu dụng. Ngoài ra, việc điều chỉnh công suất phát còn góp phần thu hẹp vùng gây nhiễu, từ đó nâng cao khả năng tái sử dụng phổ tần. Điều này cho phép nhiều cảm biến truyền dữ liệu đồng thời mà vẫn đảm bảo hiệu suất của hệ thống không bị suy giảm đáng kể. Nhờ đó, mạng đạt thông lượng cao hơn và vận hành ổn định, đáp ứng tốt các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác và tin cậy. Bằng cách điều chỉnh công suất phát của cảm biến theo thời gian thực dựa trên điều kiện kênh truyền, hệ thống không chỉ duy trì thông lượng ở mức yêu cầu mà còn tiết kiệm năng lượng, yếu tố rất quan trọng đối với các cảm biến trong WBAN. Chính vì vậy, luận án tập trung nghiên cứu, phát triển, đề xuất các thuật toán điều khiển công suất nhằm nâng cao thông lượng truyền tin và tiết kiệm năng lượng cho cảm biến trong các mô hình truyền thông WBAN.

Mặc dù đã có nhiều thuật toán điều khiển công suất được đề cập đến trong các nghiên cứu trước đây nhằm cải thiện hiệu suất mạng nhưng phần lớn các thuật toán này lại chưa thật sự phù hợp với đặc trưng của WBAN. Cụ thể, nhiều thuật toán có độ phức tạp tính toán cao, yêu cầu thông tin toàn cục hoặc đòi hỏi khả năng đồng bộ chặt chẽ giữa các nút mạng [39–41], những điều kiện khó có thể đáp ứng trong môi trường WBAN, nơi mà cảm biến bị giới hạn thời gian hoạt động bởi dung lượng pin. Bên cạnh đó, các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể người dùng trong WBAN còn phải đối mặt với những thách thức truyền tin đáng kể, chẳng hạn như nhiễu tín hiệu hoặc gián đoạn kết nối tạm thời khi người dùng thay đổi tư thế. Trên cơ sở đó, luận án lựa chọn áp dụng, phát triển thuật toán điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu (MMC: *Max-Min Power Control*) [42] cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối như một giải pháp phù hợp hơn, với mục tiêu cải thiện thông lượng truyền tin của cảm biến có hiệu suất thấp nhất, và cân bằng thông lượng giữa các cảm biến. Thuật toán MMC có ý nghĩa đặc biệt quan

trọng đối với WBAN vì hai lý do chính. Thứ nhất, trong WBAN, các cảm biến thường có sự không đồng nhất về vị trí, hướng truyền tín hiệu và đặc tính kênh truyền nên dẫn đến hiện tượng một số cảm biến rơi vào trạng thái suy giảm nghiêm trọng về chất lượng đường truyền thường được gọi là "cảm biến yếu", tức các cảm biến có thông lượng rất thấp. Việc tối đa hóa mức thông lượng tối thiểu của các cảm biến sẽ đảm bảo rằng mọi cảm biến trong mạng đều đạt được một mức thông lượng tối thiểu chấp nhận được, tránh tình trạng một số cảm biến bị suy giảm đáng kể về thông lượng. Thứ hai, MMC góp phần duy trì tính công bằng và ổn định của toàn hệ thống, đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng y tế nơi mà việc mất dữ liệu từ bất kỳ cảm biến nào (chẳng hạn như cảm biến nhịp tim) đều có thể gây hậu quả nghiêm trọng.

Bên cạnh đó, việc duy trì thông lượng ổn định trong khi vẫn tiết kiệm năng lượng là yêu cầu cốt lõi trong WBAN, bởi các cảm biến cần đảm bảo khả năng truyền dữ liệu liên tục và chính xác trong thời gian dài, trong khi dung lượng pin rất hạn chế và khó có thể thay thế hoặc sạc lại thường xuyên trong điều kiện thực tế. Điều này đòi hỏi một cơ chế điều khiển công suất vừa đảm bảo thông lượng truyền tin, vừa tiết kiệm năng lượng. Trên cơ sở đó, luận án đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới có tên là "*Điều khiển công suất dựa trên ngưỡng thông lượng*" (TTC: *Throughput Threshold-based Power Control*) và "*Điều khiển công suất dựa trên cửa sổ thông lượng*" (TWC: *Throughput Window-based Power Control*) cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Thuật toán TTC được đề xuất dựa trên nguyên tắc điều chỉnh công suất để cực đại hóa số lượng cảm biến có thông lượng đạt một mức ngưỡng xác định, giúp duy trì khả năng truyền tín hiệu ổn định, đồng thời tiết kiệm năng lượng để kéo dài tuổi thọ của cảm biến. Thuật toán TWC được đề xuất với mục tiêu cực đại hóa số lượng cảm biến có thông lượng trong một khoảng "*cửa sổ*" xác định, đáp ứng các yêu cầu của hệ thống và tránh lãng phí năng lượng. Hai thuật toán này không chỉ đảm bảo cực đại hóa số lượng cảm biến có thông lượng đạt mức ngưỡng hoặc "*cửa sổ*" yêu cầu mà còn tiết kiệm năng lượng cho cảm biến, góp phần duy trì mô hình truyền thông WBAN đa kết nối hoạt động hiệu quả.

Xuất phát từ việc nghiên cứu và phân tích đã trình bày ở trên, nghiên

cứu sinh lựa chọn thực hiện 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***". Đề tài này nhằm bổ sung kiến thức về các mô hình truyền thông WBAN, kỹ thuật điều khiển công suất và các phương pháp kết hợp mô hình truyền thông và điều khiển công suất để cải thiện thông lượng truyền tin và tiết kiệm năng lượng. Việc thực hiện thành công đề tài không chỉ góp phần nâng cao tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của WBAN mà còn mang lại ý nghĩa khoa học thực tiễn. Đề tài phù hợp với xu hướng nghiên cứu hiện nay và định hướng trong tương lai, đồng thời đáp ứng nhu cầu cấp thiết trong việc phát triển các mô hình truyền thông WBAN hiệu quả và tin cậy. Kết quả nghiên cứu không chỉ củng cố cơ sở lý thuyết về các mô hình truyền thông WBAN, mà còn có thể là tài liệu tham khảo, hỗ trợ quá trình triển khai và ứng dụng các mô hình này trong các lĩnh vực như y tế, công nghiệp, quốc phòng, an ninh.

3. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Nâng cao thông lượng cảm biến bằng cách kết hợp đề xuất mô hình truyền thông mới cho WBAN và các phương pháp điều khiển công suất;
- Tiết kiệm năng lượng cho cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đề xuất trong khi vẫn bảo đảm thông lượng truyền tin.

4. Đối tượng nghiên cứu của luận án

- Mô hình truyền thông WBAN: Gồm các cảm biến, AP và đặc trưng kênh truyền, trong đó các yếu tố như mô hình kênh, mô hình suy hao đường truyền có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất mạng.
- Thông lượng cảm biến trong WBAN: Các yếu tố ảnh hưởng đến thông lượng như số lượng AP, số lượng cảm biến; phương pháp xác định và đánh giá thông lượng trong các điều kiện khác nhau.
- Kỹ thuật điều khiển công suất trong WBAN: Các thuật toán điều chỉnh công suất phát nhằm nâng cao thông lượng; đánh giá sự ảnh hưởng của điều khiển công suất đến hiệu quả năng lượng và công suất tiêu thụ của cảm biến.

5. Phạm vi nghiên cứu của luận án

- Lý thuyết thông tin vô tuyến, kỹ thuật ước lượng kênh, phương thức song công phân chia theo thời gian (TDD: *Time-Division Duplex*), kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian (TDMA: *Time-Division Multiple Access*).

- Lý thuyết toán xác suất thống kê và các bài toán tối ưu biến đổi toán học theo hàm tuyến tính, hàm lồi, hàm lõm.

- Mô hình truyền thông WBAN theo dõi sức khỏe người dùng, với giả định các cảm biến có quyền ưu tiên như nhau và người dùng có thể di chuyển.

- Mô hình truyền thông WBAN nhỏ và vừa trong ICU chuyên điều trị bệnh nhân nặng, nguy kịch. Cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể người bệnh phục vụ cho mục đích theo dõi liên tục 24/7, yêu cầu tốc độ truyền tin đồng đều.

6. Phương pháp nghiên cứu của luận án

- Tổng hợp và phân tích tài liệu: Nghiên cứu, phân tích và đánh giá các công trình khoa học liên quan đến lý thuyết thông tin, các hệ thống thông tin tiên tiến, kỹ thuật điều khiển công suất và các mô hình WBAN. Từ đó, bổ sung và hoàn thiện kiến thức, đồng thời nghiên cứu, đề xuất các mô hình truyền thông WBAN cũng như các phương pháp điều khiển công suất mới.

- Xây dựng mô hình toán học: Thiết lập các mô hình toán học, trên cơ sở đó sử dụng phương pháp giải tích để xây dựng các biểu thức tường minh nhằm đánh giá các tham số hiệu năng quan trọng của WBAN như thông lượng, hiệu quả sử dụng năng lượng và công suất tiêu thụ của cảm biến.

- Mô phỏng và kiểm chứng: Sử dụng phần mềm Matlab và CVX để mô phỏng và phân tích các tham số hiệu năng của WBAN, từ đó kiểm chứng tính chính xác, hiệu quả của các mô hình truyền thông và thuật toán đề xuất.

7. Đóng góp của luận án

- Đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và áp dụng thuật toán điều khiển công suất MMC để nâng cao thông lượng cho cảm biến.
- Đề xuất thuật toán điều khiển công suất TTC và TWC 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.

8. Bố cục của luận án

Bao gồm phần Mở đầu, ba Chương nội dung và phần Kết luận. Cụ thể:

• Chương 1: NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG

Chương 1 trình bày tổng quan về WBAN bao gồm khái niệm, thành phần, ứng dụng và các tiêu chí đánh giá chất lượng truyền tin. Đồng

thời, Chương này cũng giới thiệu các vấn đề cơ bản về điều khiển công suất, bao gồm khái niệm, phân loại và một số kỹ thuật điều khiển công suất tiêu biểu. Bên cạnh đó, Chương 1 tiến hành khảo sát có hệ thống các công trình nghiên cứu liên quan nhằm xác định khoảng trống nghiên cứu, từ đó định hình rõ hướng tiếp cận và nội dung nghiên cứu của luận án. Mặt khác, Chương 1 khảo sát một số tham số quan trọng dùng để phân tích chất lượng hệ thống, làm nền tảng cho các nội dung nghiên cứu ở những Chương tiếp theo.

- **Chương 2: ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH TRUYỀN THÔNG ĐƠN KẾT NỐI CHO WBAN**

Chương 2 trình bày chi tiết mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA, pha huấn luyện đường lên, pha truyền dữ liệu đường lên, đường xuống, cũng như nhận xét về hiệu quả của mô hình này. Trên cơ sở đó, luận án đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, làm rõ khái niệm, cấu trúc hệ thống và cơ chế truyền tin. Các biểu thức toán học mô tả tốc độ truyền dữ liệu và thông lượng của cảm biến được xây dựng, từ đó thiết lập bài toán tối ưu công suất phát dựa trên thuật toán MMC. Cuối cùng, hiệu suất của mô hình được đánh giá thông qua việc thay đổi các tham số hệ thống như số lượng cảm biến và số lượng AP.

- **Chương 3: ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT CHO WBAN**

Chương 3 đề xuất, áp dụng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối và đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất TTC và TWC cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Các thuật toán này được phân tích và đánh giá dựa trên sự thay đổi của tỷ lệ điều chỉnh hệ số điều khiển công suất, số lượng AP, số lượng cảm biến, diện tích căn phòng và các mức ngưỡng thông lượng. Hiệu suất của hai thuật toán được so sánh với trường hợp không điều khiển công suất (NPC: *Non Power Control*) và thuật toán MMC, xét theo các tiêu chí về thông lượng cảm biến, hiệu quả năng lượng và công suất tiêu thụ.

Trong phần Kết luận, nghiên cứu sinh tóm tắt các nội dung đề xuất chính trình bày trong luận án và đưa ra những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu.

Chương 1

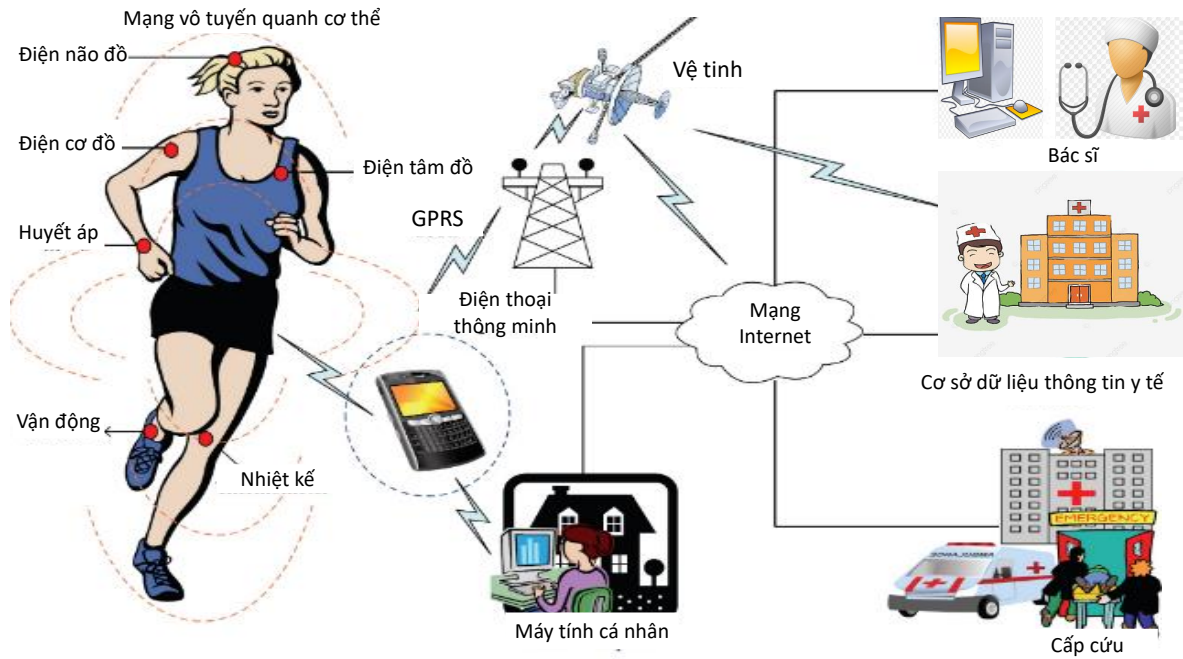
NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG

Chương 1 trình bày tổng quan về khái niệm, thành phần, ứng dụng và các tiêu chí đánh giá chất lượng truyền tin trong WBAN. Chương này cũng phân tích các phương pháp nhằm cải thiện thông lượng, bao gồm việc cải tiến mô hình truyền thống và áp dụng các kỹ thuật điều khiển công suất. Bên cạnh đó, các nghiên cứu liên quan được tổng hợp và phân tích chi tiết, từ đó xây dựng nền tảng lý thuyết cho việc đề xuất các mô hình truyền thông WBAN và phát triển các thuật toán điều khiển công suất trong các Chương tiếp theo.

1.1. Mạng vô tuyến quanh cơ thể

1.1.1. Khái niệm

WBAN là một trường hợp đặc biệt của mạng cảm biến không dây, được hình thành từ các cảm biến nhỏ gọn, công suất thấp và trọng lượng nhẹ. Các cảm biến này được gắn trên bề mặt hoặc cấy ghép bên trong cơ thể người để giám sát các chức năng sinh học và môi trường xung quanh. Trong WBAN, các cảm biến chủ yếu thu thập thông tin sinh học như nhịp tim, huyết áp, nồng độ oxy trong máu, nhiệt độ cơ thể, và sử dụng các giao thức truyền thông không dây như Bluetooth, Zigbee hoặc các giao thức mạng vô tuyến khác để truyền dữ liệu về trung tâm giám sát. Dữ liệu thu thập được từ các cảm biến trong WBAN cung cấp thông tin giá trị cho bác sĩ và nhân viên y tế trong việc theo dõi tình trạng sức khỏe, phát hiện sớm các vấn đề tiềm ẩn và đưa ra các biện pháp điều trị kịp thời. Điều này không chỉ góp phần nâng cao chất lượng cuộc sống mà còn cải thiện hiệu quả chăm sóc y tế trong các ứng dụng liên quan đến giám sát sức khỏe liên tục và điều trị từ xa [2]. Mô hình tổng quan của WBAN được minh họa trong Hình 1.1.

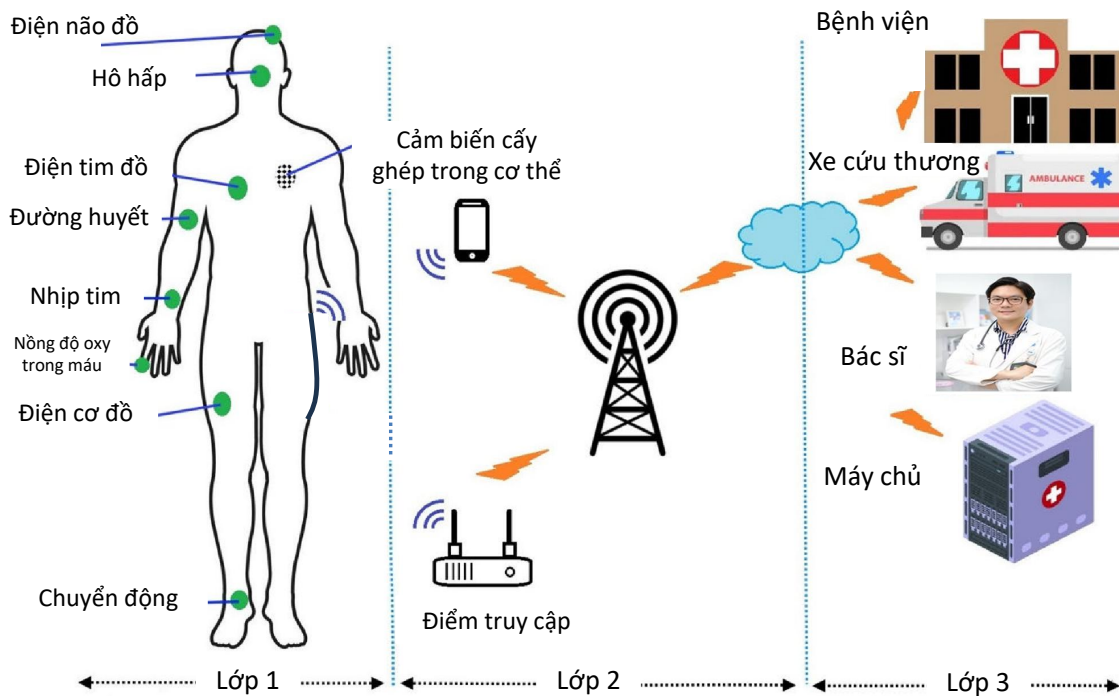


Hình 1.1: Mô hình tổng quan của WBAN [1].

1.1.2. Thành phần

WBAN có thể được chia ra thành ba phân lớp: lớp bên trong (lớp 1), lớp bên ngoài (lớp 2) và lớp mở rộng (lớp 3) [6], như được minh họa trong Hình 1.2. Lớp 1 bao gồm các cảm biến gắn trên cơ thể hoặc cấy ghép trong cơ thể để thu thập các thông tin sinh học như: điện não đồ, điện tim đồ, điện cơ đồ, nhịp tim, đường huyết, nồng độ oxy trong máu, hô hấp, chuyển động.

Lớp 1 có nhiệm vụ thu thập dữ liệu y tế theo thời gian thực từ người dùng sau đó gửi dữ liệu đến một AP gần đó để xử lý hoặc truyền lên mạng cao hơn. Do đặc thù trong cách bố trí cảm biến, truyền tin trong lớp 1 có ba kênh truyền chính: truyền tin trong môi trường mô tế bào, truyền tin từ mô tế bào ra bên ngoài và truyền tin trên bề mặt cơ thể. Lớp 2 là lớp trung gian, có chức năng kết nối giữa WBAN với các mạng bên ngoài như mạng di động, Wi-Fi hoặc Internet, gồm các thiết bị như AP, điện thoại di động hoặc trạm thu phát sóng không dây. Lớp 3 là lớp kết nối với các dịch vụ và ứng dụng y tế, đây là lớp cuối cùng, nơi dữ liệu từ WBAN được chuyển đến các hệ thống quản lý y tế, bệnh viện, bác sĩ hoặc các dịch vụ chăm sóc sức khỏe.



Hình 1.2: Kiến trúc truyền thông của WBAN [2].

1.1.3. Ứng dụng

a) Y tế

WBAN đóng vai trò quan trọng trong việc chăm sóc sức khỏe bệnh nhân tại các khu vực vùng sâu, vùng xa hoặc những nơi khó tiếp cận, đồng thời kết hợp với Telehealth nhằm giảm tải cho hệ thống y tế [43]. WBAN cũng hỗ trợ thực hiện các phương pháp điều trị, bao gồm phát hiện các biểu hiện bất thường, phát hiện sớm các bệnh, giám sát sự tiến triển của bệnh. Đáng chú ý, WBAN có vai trò đặc biệt quan trọng trong việc giám sát và theo dõi sức khỏe người cao tuổi, góp phần đáng kể giảm nguy cơ đột quỵ và tai biến [44].

b) Quốc phòng - An ninh

WBAN giám sát nhịp tim, huyết áp, thân nhiệt, mức độ căng thẳng cũng như vị trí, tốc độ và hướng di chuyển của binh sĩ. WBAN cũng có khả năng phát hiện các hành vi bất thường, góp phần đảm bảo an ninh và an toàn cho khu vực đóng quân của các đơn vị quân sự [45].

c) Trường hợp khẩn cấp

Trong tình huống cấp cứu, WBAN gửi thông tin về các chỉ số sức khỏe

đến các bác sĩ, giúp cải thiện khả năng phản ứng nhanh của đội ngũ cán bộ y tế, tiết kiệm thời gian và nâng cao hiệu quả cứu sống bệnh nhân [46], [47]. Bên cạnh đó, WBAN cũng có thể xác định vị trí chính xác của lính cứu hỏa trong các khu vực khó tiếp cận hoặc nguy hiểm, từ đó hỗ trợ việc điều phối nguồn lực và đảm bảo an toàn cho các hoạt động cứu hỏa [48].

d) Thể thao, giải trí

Để giám sát sức khỏe của vận động viên trong các hoạt động thể dục thể thao, WBAN sử dụng các thiết bị như đồng hồ thông minh, dây đeo tay, vòng đeo cổ và giày cảm biến. Những thiết bị này hỗ trợ theo dõi nhịp tim, lượng calo tiêu thụ, số bước chân và nhiều thông số khác, từ đó cải thiện điểm yếu để nâng cao thành tích thi đấu đồng thời giảm thiểu các nguy cơ chấn thương, tai nạn,... Trong lĩnh vực giải trí, WBAN còn được kết hợp với công nghệ thực tế ảo để tạo ra các trò chơi thể thao tương tác độc đáo, cho phép người chơi tham gia một cách chân thực [49].

1.2. Tổng quan về kỹ thuật điều khiển công suất

1.2.1. Khái niệm

Điều khiển công suất là một kỹ thuật quan trọng trong các mạng cảm biến không dây nói chung và WBAN nói riêng. Kỹ thuật này nhằm điều chỉnh mức công suất phát của các cảm biến sao cho đảm bảo chất lượng kết nối, đồng thời tiết kiệm năng lượng, một yếu tố rất quan trọng đối với các cảm biến có nguồn pin hạn chế. Trong WBAN, các cảm biến thường được gắn trên cơ thể người dùng theo cấu trúc phân tán, với khả năng truyền dữ liệu không dây để gửi thông tin về các AP hoặc bộ điều phối. Tùy thuộc vào khoảng cách và điều kiện kênh, mỗi cảm biến có thể sử dụng mức công suất phát khác nhau để gửi tín hiệu đến các nút nhận. Tuy nhiên, việc phát tín hiệu với công suất quá lớn có thể gây ra tình trạng lãng phí năng lượng và làm tăng nhiễu giữa các cảm biến trong mạng. Ngược lại, nếu công suất phát được thiết lập ở mức quá thấp, tín hiệu có thể không đủ mạnh để truyền đến thiết bị thu, gây lỗi trong quá trình truyền dữ liệu và làm suy giảm hiệu suất mạng [50].

1.2.2. Mục đích của điều khiển công suất

Trước tiên, điều khiển công suất giúp giảm nhiễu gây ra cho các thiết bị lân cận trong cùng băng tần hoặc các hệ thống gần đó, đặc biệt khi công suất phát của cảm biến quá lớn. Thứ hai, điều khiển công suất giúp tiết kiệm năng lượng, kéo dài thời gian hoạt động của hệ thống bằng cách chỉ sử dụng lượng công suất cần thiết để truyền dữ liệu đến các thiết bị thu một cách hiệu quả. Thứ ba, trong môi trường phức tạp, việc điều chỉnh công suất còn giúp đảm bảo SINR duy trì ở mức phù hợp nhằm đảm bảo chất lượng kết nối, khi môi trường truyền tin có nhiều yếu tố gây nhiễu và suy hao đường truyền. Vì vậy, điều khiển công suất đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện hiệu suất hệ thống, đảm bảo chất lượng tín hiệu và tiết kiệm năng lượng cho WBAN.

1.2.3. Phân loại

- Điều khiển công suất tĩnh [51], [52]: Là phương pháp thiết lập mức công suất phát cố định cho các cảm biến trong mạng. Phương pháp này được đánh giá cao về sự đơn giản trong triển khai. Tuy nhiên, nó không đạt được hiệu quả tối ưu trong các môi trường có điều kiện truyền thông biến động phức tạp. Trong các mạng cảm biến triển khai trên phạm vi rộng hoặc hoạt động trong các môi trường có đặc tính truyền thông không đồng nhất, việc áp dụng công suất cố định dẫn đến sự phân bổ tài nguyên năng lượng không hợp lý. Cụ thể, các cảm biến ở gần trạm điều khiển hoặc các nút thu nhận dữ liệu thường tiêu thụ năng lượng vượt mức cần thiết, gây lãng phí nguồn năng lượng. Ngược lại, các cảm biến ở xa có thể gặp tình trạng công suất không đủ để đảm bảo truyền tín hiệu đến thiết bị thu, dẫn đến tăng tỷ lệ lỗi trong truyền thông. Hơn nữa, đối với các hệ thống đòi hỏi độ ổn định cao trong truyền tải dữ liệu, chẳng hạn như các hệ thống giám sát môi trường hoặc y tế, việc sử dụng mức công suất cố định không phản ánh được sự thay đổi của điều kiện môi trường theo thời gian. Điều này có thể dẫn đến mất mát dữ liệu hoặc suy giảm chất lượng kết nối mạng, gây ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu năng của hệ thống. Vì vậy, mặc dù có lợi thế về tính đơn giản trong triển khai, phương pháp điều khiển công suất tĩnh không phải là lựa chọn tối ưu cho các mạng cảm biến hiện đại, trong đó hiệu quả năng lượng và thông lượng là các yếu tố quan trọng hàng đầu.

- Điều khiển công suất động [53,54]: Điều khiển công suất động khắc phục các hạn chế của điều khiển công suất tĩnh bằng cách cho phép các cảm biến tự động điều chỉnh mức công suất phát dựa trên điều kiện môi trường và trạng thái hoạt động. Phương pháp này thường sử dụng các thuật toán tối ưu hóa để xác định mức công suất cần thiết nhằm cân bằng giữa việc tiết kiệm năng lượng và duy trì chất lượng kết nối. Các thuật toán hiện đại, chẳng hạn như các thuật toán học sâu, đã được áp dụng trong các hệ thống IoT để cải thiện hiệu năng của điều khiển công suất động. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là khả năng thích ứng với sự thay đổi liên tục của môi trường truyền thông, bao gồm nhiễu, thay đổi khoảng cách giữa các cảm biến và thiết bị thu, hoặc sự di chuyển của các thiết bị. Tuy nhiên, nhược điểm chính của điều khiển công suất động là yêu cầu cao về khả năng tính toán, tiêu tốn năng lượng cho việc thực hiện các thuật toán phức tạp và có thể tạo ra độ trễ do quá trình điều chỉnh liên tục. Những hạn chế này đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng trong việc triển khai, đặc biệt đối với các mạng cảm biến không dây có yêu cầu nghiêm ngặt về năng lượng, năng lực xử lý.

- Điều khiển công suất tập trung [55], [56]: Là phương pháp mà một trung tâm điều khiển chịu trách nhiệm điều chỉnh mức công suất phát cho toàn bộ các cảm biến trong mạng. Phương pháp này mang lại hiệu quả cao trong các hệ thống có quy mô nhỏ hoặc vừa, nơi trung tâm điều khiển có thể tối ưu hóa việc sử dụng tài nguyên nhờ khả năng giám sát và quản lý tập trung. Tuy nhiên, trong các mạng quy mô lớn hoặc mạng phân tán, điều khiển tập trung bộc lộ nhiều hạn chế. Đặc biệt, sự phụ thuộc vào trung tâm điều khiển có thể dẫn đến hiện tượng tắc nghẽn tại điểm tập trung xử lý, khi nút trung tâm phải xử lý một khối lượng lớn thông tin đồng thời từ các cảm biến, gây ra quá tải và làm suy giảm hiệu năng tổng thể của hệ thống. Hơn nữa, sự phụ thuộc này còn làm tăng nguy cơ mất ổn định trong mạng nếu trung tâm điều khiển gặp sự cố. Do đó, điều khiển tập trung chỉ phù hợp với mạng nhỏ nhưng không hiệu quả đối với mạng lớn.

- Điều khiển công suất phân tán [57,58]: Là phương pháp trong đó các cảm biến tự động quyết định mức công suất dựa trên thông tin cục bộ thu được từ các cảm biến lân cận. Phương pháp này đặc biệt phù hợp với các mạng cảm biến có quy mô lớn hoặc mật độ cao, nhờ khả năng mở rộng và linh hoạt

trong việc thích ứng với sự thay đổi của môi trường truyền thông. Một ưu điểm nổi bật của điều khiển phân tán là khả năng hoạt động hiệu quả mà không cần đến trung tâm điều khiển, giảm thiểu hiện tượng tắc nghẽn xử lý tại nút trung tâm, thường gặp trong các phương pháp điều khiển tập trung. Tuy nhiên, để thực hiện được việc tự điều chỉnh công suất, mỗi cảm biến cần được trang bị khả năng tự động hóa cao, có thể làm tăng mức tiêu thụ năng lượng do các yêu cầu xử lý bổ sung. Bên cạnh đó, việc điều khiển công suất phân tán đòi hỏi sự quản lý phối hợp giữa các cảm biến để tránh xung đột và hiện tượng nhiễu lẫn nhau, đặc biệt tại các khu vực có mật độ cảm biến cao. Do đó, các thuật toán điều khiển phân tán cần được thiết kế một cách tối ưu để đảm bảo cân bằng giữa hiệu quả năng lượng và chất lượng kết nối, đồng thời giảm thiểu tác động của nhiễu và mất đồng bộ trong hệ thống.

1.3. Các tham số đánh giá chất lượng hệ thống

1.3.1. Dung lượng

Dung lượng kênh là tốc độ truyền dữ liệu tối đa mà một kênh truyền có thể đạt được mà không gây lỗi, thường được đo bằng đơn vị bit/s. Theo định lý Shannon-Hartley, dung lượng kênh phụ thuộc vào băng thông khả dụng và tỷ số tín hiệu trên tạp âm (SNR: *Signal-to-Noise Ratio*). Dung lượng kênh được xác định theo công thức [50]:

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}), \quad (1.1)$$

trong đó, C là dung lượng kênh, B là băng thông của kênh. Mô hình Shannon-Hartley thiết lập giới hạn lý thuyết cho dung lượng kênh trong điều kiện lý tưởng. Tuy nhiên, trong thực tế, dung lượng đạt được thường thấp hơn do ảnh hưởng của các yếu tố như nhiễu, tạp âm, suy hao kênh, méo tín hiệu và nhiễu xuyên kênh. Dung lượng kênh có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất truyền tải dữ liệu của hệ thống truyền thông. Cụ thể, dung lượng cao hơn cho phép truyền tải lượng dữ liệu lớn hơn trong cùng một đơn vị thời gian, từ đó nâng cao tốc độ truyền dữ liệu. Một hệ thống có dung lượng lớn sẽ có khả năng phục vụ đồng thời nhiều người dùng mà vẫn duy trì chất lượng dịch vụ ổn định, không bị suy giảm.

1.3.2. Thông lượng

Theo lý thuyết thông tin, thông lượng là lượng dữ liệu thực tế mà hệ thống truyền tải hoặc xử lý trong một đơn vị thời gian, thường được đo bằng đơn vị bit/s. Trong thực tế, thông lượng luôn thấp hơn dung lượng lý thuyết do ảnh hưởng của các yếu tố như nhiễu, mất gói dữ liệu, và chi phí mào đầu (*overhead*); vì vậy, đây là đại lượng phản ánh hiệu suất truyền thông thực tế. Trong mô hình truyền thông WBAN, khái niệm thông lượng bao gồm cả thông lượng đường lên (từ cảm biến đến AP) và thông lượng đường xuống (từ AP đến cảm biến). Đối với mô hình truyền thông WBAN sử dụng pha huấn luyện và hai pha truyền dữ liệu đường lên và truyền dữ liệu đường xuống có thời gian như nhau, thông lượng ứng với cảm biến thứ s có thể được tính theo công thức [28]:

$$T_{u,d}^{(s)} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c}}{2} R_{u,d}^{(s)}, \quad (1.2)$$

trong đó, $T_{u,d}^{(s)}$ là thông lượng của cảm biến s , B là băng thông hệ thống (Hz), $R_{u,d}^{(s)}$ là tốc độ dữ liệu (bit/s/Hz) của cảm biến s tương ứng với truyền dữ liệu đường lên (u) hoặc đường xuống (d), τ^c là khoảng thời gian kết hợp (*coherence interval*) biểu thị bằng số ký hiệu truyền dẫn (*symbol*) trong khoảng thời gian mà kênh vô tuyến được coi là không đổi. Giá trị τ^c được xác định bằng tích giữa thời gian kết hợp (*coherence time*) và băng thông kết hợp (*coherence bandwidth*) của kênh truyền, τ_u^{hl} là khoảng thời gian dành cho pha huấn luyện đường lên trong mỗi τ^c .

1.3.3. Hiệu quả năng lượng

Hiệu quả năng lượng (EE: *Energy Efficiency*) là một chỉ số quan trọng phản ánh khả năng truyền tải dữ liệu của hệ thống so với mức tiêu thụ năng lượng. Trong WBAN, cải thiện hiệu quả năng lượng đóng vai trò then chốt nhằm kéo dài thời gian hoạt động của cảm biến và nâng cao tuổi thọ toàn hệ thống. Hiệu quả năng lượng được định nghĩa là tỷ số giữa thông lượng đạt được và tổng công suất tiêu thụ, đơn vị tính bằng bit/s/W:

$$EE = \frac{T}{P_{\text{total}}}, \quad (1.3)$$

trong đó, T là thông lượng (bit/s) và P_{total} là tổng công suất tiêu thụ (W).

Hệ thống đạt hiệu quả năng lượng cao hơn khi có thể truyền tải được nhiều dữ liệu hơn với cùng mức năng lượng tiêu thụ, hoặc giảm công suất tiêu thụ trong khi vẫn duy trì thông lượng ở mức chấp nhận được. Trong thiết kế WBAN, cải thiện hiệu quả năng lượng đòi hỏi phải đồng thời cân nhắc các yếu tố như: kỹ thuật điều khiển công suất, số lượng cảm biến hoạt động, và cơ chế lựa chọn liên kết cảm biến - AP.

1.3.4. Công suất tiêu thụ

Trong hệ thống truyền thông không dây, công suất tiêu thụ bao gồm: công suất phát, công suất tiêu hao trong quá trình xử lý tín hiệu, và công suất duy trì các chức năng hỗ trợ (như đồng bộ hóa, kiểm soát lỗi, quản lý giao thức điều khiển truy cập môi trường truyền). Đối với các cảm biến trong WBAN, công suất tiêu thụ tập trung chủ yếu vào hai thành phần chính:

Công suất phát (P_{tx}): Công suất cần thiết để truyền tín hiệu từ cảm biến đến AP.

Công suất mạch ($P_{circuit}$): Năng lượng tiêu hao bởi các phần tử điện tử hỗ trợ như bộ mã hóa, bộ giải mã và bộ chuyển đổi tương tự - số.

Tổng công suất tiêu thụ tại một cảm biến được xác định như sau:

$$P_{total} = P_{tx} + P_{circuit}, \quad (1.4)$$

trong đó, P_{tx} phụ thuộc vào khoảng cách truyền, điều kiện kênh truyền, cũng như kỹ thuật điều khiển công suất được áp dụng. Trong khi đó, $P_{circuit}$ thường được coi là một hằng số cố định đối với mỗi thiết bị, mặc dù giá trị này có thể dao động nhẹ tùy theo tốc độ xử lý hoặc chế độ hoạt động của thiết bị. Do $P_{circuit}$ gần như tương đương trong tất cả các phương pháp nên trong phạm vi nghiên cứu của luận án, $P_{circuit}$ được giả thiết gần như không đổi giữa các thuật toán so sánh. Do đó luận án tập trung đánh giá thành phần công suất phát P_{tx} trong các thuật toán khác nhau.

Việc giảm công suất tiêu thụ đóng vai trò thiết yếu để kéo dài thời gian hoạt động của cảm biến trong các ứng dụng WBAN, nơi mà việc thay thế hoặc sạc lại pin cho cảm biến thường gặp nhiều khó khăn trong thực tế.

1.3.5. Một số tham số khác

a) Tỷ lệ lỗi bit (*BER*) [50]: BER là một chỉ số quan trọng để đánh giá hiệu suất của hệ thống truyền thông không dây. BER đo lường số lượng bit lỗi xảy ra trong quá trình truyền dữ liệu, biểu thị mức độ chính xác của dữ liệu nhận được so với dữ liệu gốc. BER càng thấp cho thấy chất lượng tín hiệu càng tốt, hạn chế mất mát dữ liệu và giảm thiểu yêu cầu truyền lại, qua đó nâng cao hiệu quả truyền thông. Trong WBAN, việc duy trì BER dưới một ngưỡng chấp nhận được là một trong những yếu tố để đảm bảo chất lượng dịch vụ.

b) Độ trễ (*Latency*) [50]: Độ trễ là khoảng thời gian từ khi gói dữ liệu được tạo tại cảm biến cho đến khi được truyền qua mạng và tiếp nhận bởi thiết bị thu (như điện thoại thông minh, máy tính bảng hoặc cổng truy cập). Trong WBAN, độ trễ là một chỉ số quan trọng quyết định hiệu năng hệ thống, đặc biệt đối với các ứng dụng đòi hỏi truyền dữ liệu theo thời gian thực. Độ trễ thấp đảm bảo khả năng phản hồi nhanh, hỗ trợ hiệu quả cho các ứng dụng quan trọng như giám sát sức khỏe bệnh nhân, phẫu thuật từ xa, và hệ thống cảnh báo khẩn cấp, nơi mà độ trễ trong quá trình truyền dữ liệu có thể gây ra hậu quả nghiêm trọng.

c) Độ tin cậy (*Reliability*) [50]: Độ tin cậy là khả năng đảm bảo dữ liệu được truyền tải chính xác, liên tục và an toàn từ các cảm biến đến thiết bị thu nhận hoặc hệ thống điều khiển trung tâm. Trong WBAN, độ tin cậy đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng y tế và chăm sóc sức khỏe. Tính chính xác và sự liên tục của dữ liệu là những yếu tố then chốt, bởi bất kỳ sai sót hoặc gián đoạn trong quá trình giám sát cũng có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến các quyết định điều trị và sự an toàn của bệnh nhân.

d) Tốc độ truyền dữ liệu (*Data Rate*) [50]: Tốc độ truyền dữ liệu là khả năng truyền tải tối đa lượng thông tin qua kênh truyền trong một đơn vị thời gian, thường được đo bằng các đơn vị như bit/s, kbit/s, Mbit/s, hoặc Gbit/s. Đây là một chỉ số quan trọng trong thiết kế và đánh giá hiệu suất của WBAN, đặc biệt đối với các ứng dụng đòi hỏi khả năng truyền dữ liệu lớn trong thời gian ngắn. Tốc độ truyền dữ liệu cao góp phần nâng cao hiệu quả truyền tin, giảm độ trễ và đáp ứng yêu cầu trong các ứng dụng như truyền video, giám sát thời gian thực hoặc phân tích dữ liệu phức tạp.

e) Độ phức tạp của hệ thống (*System Complexity*) [50]: Độ phức tạp của hệ thống phản ánh mức độ khó khăn trong quá trình thiết kế, triển khai, quản lý và bảo trì WBAN. Độ phức tạp có thể phát sinh từ các yếu tố như tính toán thuật toán, cấu trúc giao thức, quản lý kết nối, và tích hợp với các hệ thống khác. Độ phức tạp cao đòi hỏi nhiều tài nguyên tính toán, năng lượng, và thời gian xử lý, dẫn đến hiệu suất giảm và tăng chi phí vận hành. Do đó, việc giảm thiểu độ phức tạp mà vẫn đảm bảo hiệu quả và tính ổn định là một trong những thách thức lớn trong thiết kế các mô hình WBAN.

1.4. Các công trình nghiên cứu có liên quan

1.4.1. Các nghiên cứu ngoài nước

- Các mô hình WBAN: Trong những năm gần đây, đã có nhiều nghiên cứu đề xuất các kiến trúc mạng khác nhau dành cho WBAN nhằm cải thiện hiệu suất truyền thông, tiết kiệm năng lượng và nâng cao thông lượng. Các mô hình tiêu biểu bao gồm: mô hình cổng [59], mô hình phân cụm [60], mô hình cây [61], mô hình chuyển tiếp [62], mô hình thông minh [63] và mô hình phân tán [64–66]. Công trình nghiên cứu [59] đề xuất một mô hình WBAN tập trung, trong đó dữ liệu từ cảm biến được thu thập và xử lý tại thiết bị cổng. Mô hình này giúp tiết kiệm năng lượng nhờ giảm số lần truyền, tuy nhiên phụ thuộc vào một điểm tập trung, làm tăng nguy cơ mất kết nối và giảm khả năng chịu lỗi. Nghiên cứu [60] trình bày kiến trúc WBAN phân cụm, nơi các cảm biến được tổ chức thành các cụm nhỏ với một cụm trưởng phụ trách tổng hợp và truyền dữ liệu. Phương pháp này giúp giảm tải cho mạng và tiết kiệm năng lượng, nhưng thông lượng phụ thuộc vào cụm trưởng và không linh hoạt khi mạng thay đổi. Công trình [61] triển khai mô hình cây phân cấp cho WBAN, có khả năng mở rộng và tổ chức dữ liệu hiệu quả theo tầng. Tuy nhiên, việc truyền qua nhiều lớp trung gian làm gia tăng độ trễ và nguy cơ mất gói dữ liệu nếu một nút trung gian gặp lỗi. Kết quả công bố trong [62] áp dụng mô hình chuyển tiếp, nơi một số cảm biến đóng vai trò truyền dữ liệu cho các cảm biến khác. Mô hình này mở rộng phạm vi truyền thông nhưng tăng tiêu hao năng lượng cho các nút truyền tiếp, gây mất cân bằng tải năng lượng. Một hướng tiếp cận nữa là đề xuất mô hình WBAN thông minh tích hợp AI nhằm cải thiện khả năng phân tích và chẩn

Bảng 1.1: Ưu, nhược điểm của các mô hình WBAN.

STT	TLTK	Tên mô hình	Ưu điểm	Nhược điểm
1	[59, 67, 68]	Cổng	Tiết kiệm năng lượng	Điểm lỗi duy nhất, nghẽn cổ chai, phụ thuộc vị trí hub
2	[37, 60, 69, 70]	Phân cụm	Giảm độ trễ tăng tính bảo mật	Phụ thuộc nút trưởng cụm mất cân bằng năng lượng
3	[61, 71, 72]	Cây	Linh hoạt trong thiết kế	Tăng độ trễ, lỗi nút trung gian
4	[62, 73, 74]	Chuyển tiếp	Mở rộng phạm vi hoạt động	Tiêu hao năng lượng cao
5	[63, 75, 76]	Thông minh	Cung cấp dịch vụ tốt	Chi phí phần cứng, khó phù hợp cảm biến năng lượng thấp
6	[64–66]	Phân tán	Giảm độ trễ Tiết kiệm năng lượng	Khó phối hợp AP và cảm biến

đoán dữ liệu tại chỗ [63]. Dù đem lại độ chính xác cao, hệ thống này yêu cầu phần cứng mạnh và chi phí triển khai lớn, chưa phù hợp cho các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể người yêu cầu năng lượng thấp. Các công bố khoa học trong [64–66] là những nghiên cứu tiêu biểu cho mô hình WBAN phân tán. Các cảm biến có thể truyền trực tiếp đến AP hoặc trao đổi dữ liệu trực tiếp với nhau mà không cần bộ điều phối. Mô hình này giảm độ trễ, tiết kiệm năng lượng, tuy nhiên còn hạn chế về khả năng đảm bảo kết nối ổn định trong khi không có cơ chế phối hợp giữa các AP. Các ưu, nhược điểm của các mô hình WBAN được tổng hợp cụ thể trong Bảng 1.1.

Từ các công trình trên, có thể nhận thấy rằng chưa có mô hình truyền thông WBAN nào đồng thời giải quyết hiệu quả các vấn đề: suy hao kênh không đồng đều, tiết kiệm năng lượng và duy trì hiệu quả truyền dữ liệu ổn định. Đặc biệt, các mô hình hiện tại vẫn chưa tận dụng được lợi thế đơn giản hóa kết nối và cung cấp dịch vụ tốt đồng đều, vốn đã được chứng minh hiệu quả trong các mô hình SC và CF. Từ đó, luận án đề xuất mô hình truyền thông cho WBAN, dựa theo ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC và CF, trong đó cảm biến truyền dữ liệu trực tiếp tới AP không qua hub.

- Một số thuật toán điều khiển công suất cho WBAN: Trong những năm gần đây, nhiều hướng tiếp cận điều khiển công suất đã được đề xuất nhằm nâng cao hiệu suất truyền tin và kéo dài thời gian hoạt động của cảm biến trong WBAN. Có thể phân loại các nghiên cứu liên quan thành ba nhóm chính: (i) các phương pháp tối ưu hóa, (ii) các phương pháp dựa trên lý thuyết trò chơi, và (iii) các phương pháp điều khiển tuân theo chuẩn IEEE

802.15.6. Trong nhóm thứ nhất, các công trình như [77–79] xây dựng các mô hình tối ưu hóa nhằm cực tiểu hóa công suất phát hoặc cực đại hóa thông lượng trong khi vẫn đảm bảo duy trì hiệu quả truyền dữ liệu và đáp ứng các yêu cầu hoạt động của hệ thống. Bài toán thường được giải bằng các kỹ thuật tối ưu lồi, phương pháp nhân tử Lagrange hoặc điều kiện cần để tìm nghiệm tối ưu cho các bài toán có ràng buộc bất đẳng thức và đẳng thức. Mặc dù đạt hiệu suất cao trong môi trường kênh tĩnh và khi thông tin trạng thái kênh (CSI: *Channel State Information*) đầy đủ, các phương pháp này lại yêu cầu độ chính xác cao về CSI và có độ phức tạp tính toán lớn, khó phù hợp với thiết bị cảm biến hạn chế về tính toán và bộ nhớ.

Trong nhóm thứ hai, các nghiên cứu như [80–82] ứng dụng lý thuyết trò chơi để mô hình hóa tương tác giữa các cảm biến như một trò chơi không hợp tác hoặc tiềm năng. Mỗi cảm biến hoạt động như một tác nhân độc lập, tối ưu hóa công suất phát dựa trên hàm lợi ích phụ thuộc vào thông lượng và mức tiêu thụ năng lượng. Hướng tiếp cận này cho phép điều khiển công suất theo cách phân tán, không cần trung tâm điều phối, phù hợp với mạng động. Tuy nhiên, các thuật toán hội tụ thường chậm, khó đảm bảo tối ưu toàn cục và đòi hỏi cơ chế phối hợp giữa các nút để tránh tình trạng lợi ích cục bộ làm suy giảm hiệu năng toàn hệ thống.

Trong khi đó, [83] đề xuất chiến lược điều khiển công suất dựa theo chuẩn IEEE 802.15.6, trong đó công suất được điều chỉnh dựa trên các chỉ số như chất lượng kênh. Phương pháp này có ưu điểm là đơn giản, dễ tích hợp và phù hợp với tiêu chuẩn hiện hành, nhưng thiếu khả năng thích nghi với kênh truyền biến động nhanh và chưa tối ưu hóa hiệu suất toàn mạng trong điều kiện có nhiều cảm biến.

Từ việc khảo sát các hướng tiếp cận trên có thể thấy rằng: các phương pháp tối ưu hóa tuy hiệu quả về mặt lý thuyết nhưng khó triển khai thực tế; các phương pháp dựa trên lý thuyết trò chơi thiếu tính ổn định và hội tụ; trong khi đó, các thuật toán dựa trên chuẩn IEEE đơn giản nhưng chưa tận dụng được đặc điểm kênh và khả năng thích ứng. Trên cơ sở đó, luận án đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới TTC và TWC. Hai thuật toán này được thiết kế với mục tiêu kiểm soát công suất phát của cảm biến sao cho thông lượng được duy trì ổn định trong mức ngưỡng yêu cầu, đồng thời

tiết kiệm năng lượng. Cụ thể, TTC đảm bảo cực đại hóa số lượng cảm biến đạt thông lượng bằng một ngưỡng định trước, trong khi TWC đảm bảo cực đại hóa số lượng cảm biến đạt thông lượng trong một "cửa sổ" mức ngưỡng, từ đó tiết kiệm năng lượng nhưng vẫn đảm bảo thông lượng truyền tin. Xét theo cơ chế cập nhật công suất, TTC và TWC thuộc nhóm điều khiển công suất động dạng tập trung, trong đó công suất phát của các cảm biến được điều chỉnh lặp theo thông lượng hiện thời của từng cảm biến thay vì được gán cố định như trong các sơ đồ điều khiển tĩnh. Nhờ cơ chế cập nhật này, hai thuật toán có khả năng thích ứng theo thời gian, đáp ứng các mức ngưỡng và "cửa sổ" thông lượng đặt trước và đồng thời hạn chế đáng kể mức tiêu thụ năng lượng của các cảm biến.

Bên cạnh đó, luận án cũng phát triển thuật toán MMC và áp dụng vào WBAN. Đây là một thuật toán nhằm tối đa hóa thông lượng tối thiểu của cảm biến, đảm bảo sự công bằng về thông lượng cho hệ thống, đặc biệt hữu ích trong môi trường kênh truyền không đồng nhất do vị trí cảm biến phân bố không đều trên bề mặt cơ thể người dùng. Thuật toán MMC giúp khắc phục tình trạng suy giảm thông lượng tại các "cảm biến yếu", từ đó nâng cao khả năng duy trì kết nối liên tục cho toàn hệ thống. Dưới góc độ phương pháp, MMC thuộc nhóm điều khiển công suất động tập trung, trong đó mức công suất của các cảm biến được cập nhật theo một tiêu chí chung dựa trên thông lượng nhỏ nhất trong mạng. Cách tiếp cận này cho phép thuật toán điều phối việc điều chỉnh công suất theo hướng đạt tới nghiệm max-min của hệ thống, thay vì để từng cảm biến tự đưa ra quyết định cục bộ. Việc tích hợp MMC vào mô hình WBAN bổ sung thêm một cơ chế kiểm soát công suất hiệu quả, phù hợp với thực tiễn triển khai và góp phần nâng cao hiệu quả hoạt động của hệ thống trong các ứng dụng giám sát sức khỏe thông minh.

1.4.2. Các nghiên cứu trong nước

- Các mô hình WBAN: Bên cạnh các công bố quốc tế, một số công trình nghiên cứu trong nước cũng đã đóng góp những hướng tiếp cận quan trọng trong thiết kế mô hình WBAN, tập trung vào cải thiện hiệu quả truyền tin và kéo dài tuổi thọ hệ thống. PGS.TS Phạm Thanh Hiệp và cộng sự (Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn) đã đề xuất mô hình WBAN phân cụm nhằm giải

quyết bài toán tiêu thụ năng lượng không đồng đều giữa các cảm biến [69]. Trong mô hình này, các cảm biến được chia thành các cụm, mỗi cụm có một nút trưởng cụm đảm nhiệm việc tổng hợp và truyền dữ liệu đến hub trung tâm. Cách tiếp cận phân tầng này giúp giảm số lần truyền và kéo dài tuổi thọ cho toàn hệ thống. Tuy nhiên, mô hình phụ thuộc vào nút trưởng cụm; nếu nút này mất kết nối hoặc hết năng lượng, toàn cụm sẽ bị gián đoạn, ảnh hưởng đến thông lượng. Trong một nghiên cứu khác, nhóm của PGS.TS Hiệp cũng xây dựng mô hình WBAN sao đơn chặng, nơi các cảm biến truyền trực tiếp đến thiết bị cổng mà không qua các lớp trung gian [84]. Mô hình này đơn giản trong triển khai và phù hợp với các ứng dụng giám sát y tế quy mô nhỏ, như theo dõi tại nhà. Tuy nhiên, việc truyền trực tiếp không tối ưu hóa tải năng lượng, dẫn đến hiện tượng tiêu hao nhanh đối với cảm biến ở xa hoặc ở vị trí có kênh truyền yếu. TS Ong Mẫu Dũng (Đại học Công nghiệp TP.HCM) đề xuất mô hình WBAN tích hợp đa giao diện truyền thông không dây, với mục tiêu duy trì liên lạc ổn định giữa bệnh nhân và bác sĩ trong thời gian thực [85]. Mô hình cho phép cảm biến chuyển đổi linh hoạt giữa các chuẩn như Bluetooth, ZigBee và Wi-Fi tùy theo điều kiện môi trường và khoảng cách truyền. Ưu điểm của mô hình là tăng tính sẵn sàng kết nối, tuy nhiên yêu cầu phần cứng phức tạp và thuật toán điều phối giao diện tương đối nặng, làm tăng chi phí triển khai và tiêu hao năng lượng tổng thể. TS Nguyễn Văn Thủy (Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông) tập trung vào bài toán giảm lỗi truyền và tiết kiệm năng lượng thông qua việc tích hợp mã hóa kênh hiệu quả. Cụ thể, nhóm nghiên cứu đã ứng dụng mã LDPC (*Low-Density Parity-Check*) trong WBAN để tăng khả năng sửa lỗi tại bộ thu [86]. Kết quả cho thấy BER giảm đáng kể, đồng thời giúp cảm biến tiết kiệm năng lượng do không cần lặp lại truyền nhiều lần. Tuy nhiên, thuật toán giải mã LDPC có độ phức tạp tính toán cao, đòi hỏi xử lý mạnh tại thiết bị thu, không phù hợp cho thiết bị đeo có năng lực xử lý thấp. Tiến sĩ Nguyễn Như Thắng thuộc trường Đại học Thông tin liên lạc cũng đã đề xuất phương pháp chia tầng cho mô hình WBAN phân cụm để tránh ảnh hưởng 2 lần bởi việc truyền một gói tin, vì thế có thể tăng thông lượng của hệ thống [84]. Tuy nhiên, phương pháp chia tầng cho WBAN phân cụm chỉ áp dụng cho mô hình WBAN có sử dụng hub nên không áp dụng được cho

mô hình WBAN luận án đề xuất.

- Một số thuật toán điều khiển công suất cho WBAN: Trong bối cảnh WBAN đòi hỏi hiệu suất truyền thông cao, tiêu thụ năng lượng thấp và khả năng duy trì kết nối ổn định trong điều kiện kênh truyền không đồng nhất, nhiều công trình trong nước đã tập trung nghiên cứu các thuật toán điều khiển công suất nhằm giải quyết đồng thời các yêu cầu trên. Tiêu biểu, PGS.TS Phạm Thanh Hiệp và cộng sự đã phát triển một thuật toán điều khiển công suất cho mô hình WBAN đa chặng, với mục tiêu duy trì cân bằng thông lượng và cải thiện hiệu quả năng lượng cho các cảm biến [87]. Thuật toán này thực hiện điều chỉnh công suất phát tại từng nút dựa trên thông tin về trạng thái năng lượng, chất lượng kênh truyền. Nhờ đó, hệ thống đạt được sự phân phối dữ liệu đồng đều, hạn chế tình trạng một số cảm biến bị quá tải hoặc tiêu thụ năng lượng nhanh hơn so với phần còn lại của mạng. Các kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán góp phần nâng cao hiệu suất toàn mạng, kéo dài thời gian hoạt động và đảm bảo chất lượng dịch vụ trong môi trường có nhiều cảm biến hoạt động đồng thời. Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm nêu trên, thuật toán này vẫn tồn tại một số hạn chế đáng kể. Cụ thể, việc yêu cầu thông tin định tuyến đầy đủ và cập nhật trạng thái năng lượng liên tục khiến thuật toán phụ thuộc mạnh vào cơ chế điều phối tập trung, khó thích ứng với các kiến trúc phân tán hoặc điều kiện mạng thay đổi động. Đồng thời, tính chất tuyến truyền cố định trong mô hình đa chặng cũng làm giảm tính linh hoạt của hệ thống khi cảm biến thay đổi vị trí hoặc khi xảy ra lỗi tại một nút trung gian.

1.4.3. Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về mô hình tổ chức mạng và kỹ thuật điều khiển công suất cho WBAN, các giải pháp hiện tại vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định. Các mô hình WBAN truyền thống như cổng [59], phân cụm [60], cây [61], chuyển tiếp [62] và phân tán [64–66] phần lớn được xây dựng dựa trên kiến trúc tập trung hoặc bán tập trung, với sự phụ thuộc vào một hub trung tâm trong quá trình truyền và nhận dữ liệu. Cấu trúc này tiềm ẩn các vấn đề liên quan đến khả năng mở rộng, vùng phủ sóng và tính chịu lỗi của hệ thống. Khi số lượng cảm biến tăng lên hoặc hệ thống hoạt động trong các

khu vực có vùng phủ hạn chế, hiện tượng tắc nghẽn tại hub trung tâm và nhiễu giữa các cảm biến có thể làm suy giảm đáng kể hiệu quả truyền tin.

Hơn nữa, trong phạm vi các công trình được khảo sát, việc khai thác ý tưởng tổ chức mạng SC [28] và CF [28] cho bài toán truyền thông WBAN off-body một chặng trong môi trường trong nhà/ICU vẫn còn hạn chế, đặc biệt khi xét đồng thời các yêu cầu về thông lượng cảm biến, công bằng giữa cảm biến và tiết kiệm năng lượng thông qua điều khiển công suất. Đối với mô hình SC, ý tưởng cơ bản là triển khai nhiều trạm truy cập công suất thấp trong một khu vực phục vụ nhỏ, trong đó mỗi người dùng thường được gán kết nối với một trạm truy cập có điều kiện kênh thuận lợi nhất. Ưu điểm của mô hình SC là cấu trúc kết nối đơn giản, giảm khoảng cách truyền dẫn, cải thiện vùng phủ cục bộ, tăng khả năng tái sử dụng tài nguyên vô tuyến và giảm độ phức tạp xử lý so với các mô hình phối hợp nhiều AP. Khi kế thừa ý tưởng này vào truyền thông WBAN, các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể có thể được gán đến AP phù hợp nhất trong môi trường xung quanh, thay vì phải phụ thuộc vào một hub trung tâm đặt trên cơ thể người dùng. Cách tiếp cận này giúp giảm sự phụ thuộc vào hub, đơn giản hóa quá trình lựa chọn liên kết cảm biến-AP và phù hợp với các kịch bản WBAN quy mô nhỏ trong nhà, chẳng hạn phòng bệnh hoặc khu hồi sức tích cực. Tuy nhiên, mô hình SC cũng tồn tại một số hạn chế. Do mỗi người dùng hoặc cảm biến thường chỉ được phục vụ bởi một AP tại một thời điểm, chất lượng truyền tin phụ thuộc mạnh vào liên kết được lựa chọn. Khi cảm biến nằm ở vị trí bất lợi, bị che khuất hoặc AP phục vụ gặp sự cố, thông lượng của cảm biến có thể suy giảm đáng kể. Bên cạnh đó, mô hình SC chưa khai thác đầy đủ độ lợi phân tập không gian từ nhiều AP phân tán như trong mô hình CF. Vì vậy, việc áp dụng ý tưởng SC vào WBAN phù hợp với mục tiêu xây dựng mô hình truyền thông đơn kết nối có cấu trúc đơn giản, trong khi các hạn chế còn lại là cơ sở để luận án tiếp tục xem xét mô hình truyền thông đa kết nối dựa trên ý tưởng CF. Trong khi mô hình SC phù hợp với cách tổ chức đơn kết nối và có ưu điểm về độ đơn giản, mô hình CF lại hướng đến khai thác khả năng phối hợp của nhiều AP phân tán để cải thiện chất lượng kết nối.

Trong mô hình CF, các AP được bố trí phân tán và toàn mạng không còn được chia thành các “*tế bào*” cố định như trong mô hình SC. Tất cả các AP

được kết nối về một bộ xử lý trung tâm (CPU: *Central Processing Unit*) và phối hợp đồng thời phục vụ tất cả người dùng dựa trên điều kiện kênh tức thời. Cách tổ chức này giảm đáng kể hiện tượng “*cell-edge*”, xảy ra khi người dùng nằm ở ranh giới giữa hai “*tế bào*” và thường phải chịu chất lượng kết nối kém [28]. Mô hình CF mang lại nhiều ưu điểm nổi bật như: (i) loại bỏ khái niệm ranh giới tế bào, qua đó nâng cao tính công bằng giữa các người dùng; (ii) tận dụng được phân tập không gian nhờ nhiều AP phân tán, giúp kênh truyền ổn định hơn; (iii) tăng khả năng chịu lỗi vì khi một AP gặp sự cố, người dùng vẫn có thể được phục vụ bởi các AP khác; và (iv) mở rộng vùng phủ sóng nhờ khả năng bố trí linh hoạt các AP trong không gian. Tuy nhiên, mô hình CF cũng tồn tại những hạn chế nhất định như: (i) yêu cầu đường truyền hữu tuyến tốc độ cao (*backhaul*) để kết nối tất cả các AP với CPU, làm gia tăng độ phức tạp triển khai [31,32]; (ii) đòi hỏi đồng bộ chặt chẽ về thời gian và tần số; và (iii) vẫn chịu ảnh hưởng của hiện tượng nhiễu giữa các chuỗi pilot (*pilot contamination*) (xảy ra khi số lượng người dùng lớn hơn số chuỗi pilot trực giao khả dụng, buộc nhiều người dùng phải dùng lại cùng một pilot, dẫn đến quá trình ước lượng kênh bị sai lệch do nhiễu). Việc áp dụng ý tưởng tổ chức mạng của mô hình CF vào mô hình truyền thông WBAN cho phép triển khai nhiều AP phục vụ các cảm biến. Cách tiếp cận này mang lại một số lợi ích rõ rệt, bao gồm: Mở rộng vùng phủ sóng nhờ bố trí linh hoạt nhiều AP; tăng số lượng cảm biến có thể phục vụ đồng thời; giảm thiểu nguy cơ tắc nghẽn bằng cách duy trì kết nối ổn định ngay cả khi một hoặc vài AP gặp sự cố phần cứng; cải thiện chất lượng kết nối và đảm bảo thông lượng ổn định cho các cảm biến. Tuy nhiên, việc áp dụng ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC và CF vào mô hình truyền thông WBAN vẫn còn khá mới mẻ, với số lượng công trình nghiên cứu hiện tại còn rất hạn chế.

Để bảo đảm tính trực giao hoàn toàn giữa các chuỗi pilot trong pha huấn luyện đường lên, điều kiện cần là độ dài chuỗi pilot phải lớn hơn hoặc bằng số lượng cảm biến phát pilot đồng thời. Khi đó, mỗi cảm biến có thể được gán một chuỗi pilot trực giao riêng, thỏa mãn tích vô hướng giữa hai chuỗi pilot khác nhau bằng không. Cần lưu ý rằng trong mô hình đề xuất, chuỗi pilot được gán cho cảm biến, còn các AP chỉ là các nút thu đồng thời quan sát các chuỗi pilot này để thực hiện ước lượng kênh. Do đó, điều kiện trực giao không phụ thuộc trực tiếp vào số lượng AP. Chỉ khi số cảm biến phát pilot đồng thời vượt quá độ dài pilot khả dụng, hệ thống mới phải tái sử dụng pilot, từ đó dẫn đến hiện tượng pilot contamination và làm giảm độ chính xác của ước lượng kênh. Trong thực tế, các bộ chuỗi trực giao thường được xây dựng từ ma trận Walsh-Hadamard hoặc từ các cột trực giao của ma trận DFT. Ma trận DFT là ma trận biến đổi Fourier rời rạc, trong đó các cột trực giao với nhau sau khi chuẩn hóa. Do đó, các cột của ma trận DFT có thể được sử dụng làm các chuỗi pilot trực giao trong pha huấn luyện kênh. Trong mô hình đề xuất, mỗi cảm biến được gán một cột của ma trận DFT làm chuỗi pilot; điều kiện để bảo đảm trực giao hoàn toàn là số cảm biến phát pilot đồng thời không vượt quá độ dài pilot.

Bên cạnh đó, các thuật toán điều khiển công suất hiện nay [77–82] chủ yếu hướng đến tối ưu hóa cục bộ hoặc cân bằng thông lượng trên từng liên kết riêng lẻ, trong khi việc phối hợp phân bổ công suất nhằm đồng thời đảm bảo thông lượng truyền tin cho từng cảm biến và tiết kiệm năng lượng hệ thống vẫn còn chưa được nghiên cứu một cách đầy đủ và toàn diện. Các hướng tiếp cận tối ưu hoá gần đây [77–79] đạt hiệu năng cao nhờ giải bài toán cực tiểu hóa công suất phát hoặc cực đại hóa thông lượng dưới các ràng buộc chặt chẽ. Tuy nhiên, các phương pháp này thường yêu cầu CSI đầy đủ và chính xác, kèm theo độ phức tạp tính toán lớn, khó phù hợp với cảm biến WBAN vốn có năng lực xử lý và bộ nhớ hạn chế. Trên cơ sở kế thừa ý tưởng tối ưu hóa toàn mạng của các công trình này, luận án đề xuất áp dụng, phát triển thuật toán MMC, tập trung vào việc cực đại hóa thông lượng tối thiểu của các cảm biến. Cách tiếp cận này vừa đảm bảo công bằng cho toàn hệ thống, vừa phù hợp với đặc thù hoạt động của WBAN.

Đối với các nghiên cứu dựa trên lý thuyết trò chơi [80–82], ưu điểm là mỗi cảm biến tự điều chỉnh công suất phát dựa trên thông tin cục bộ và tương tác với các cảm biến khác mà không cần điều phối tập trung. Tuy nhiên, khi số lượng cảm biến tăng, các thuật toán dạng này khó đảm bảo hội tụ đến trạng thái cân bằng có tính công bằng toàn cục và hiệu quả năng lượng có thể không ổn định. Xuất phát từ thực tế đó, luận án đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất là TTC và TWC. Khác với cách tiếp cận dựa trên tối ưu hóa toàn mạng hoặc lý thuyết trò chơi, TTC và TWC hướng đến mục tiêu đơn giản và khả thi hơn: duy trì thông lượng của mỗi cảm biến đạt một ngưỡng (TTC) hoặc trong một khoảng “*cửa sổ*” (TWC) định trước. Nhờ đó, hệ thống vừa bảo đảm thông lượng truyền tin, vừa tránh phát công suất dư thừa, qua đó cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng.

Các nghiên cứu tuân theo chuẩn IEEE 802.15.6 [83] có ưu điểm đơn giản và khả năng tích hợp dễ dàng với các hệ thống hiện hành, nhưng thường thiếu khả năng thích nghi khi mật độ cảm biến cao và kênh truyền biến động nhanh. Luận án mở rộng hướng tiếp cận này bằng cách áp dụng đồng thời các thuật toán MMC, TTC và TWC trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Cách tiếp cận đề xuất giữ sự đơn giản ở phía cảm biến (chỉ cần điều chỉnh công suất theo phản hồi), đồng thời nâng cao hiệu năng toàn hệ thống

thông qua điều khiển công suất phối hợp tại hạ tầng (AP/CPU).

Tóm lại, các thuật toán điều khiển công suất do luận án đề xuất không chỉ đảm bảo tính khả thi về mặt tính toán, phù hợp với cảm biến trong WBAN, mà còn trực tiếp khắc phục những hạn chế đặc thù của từng nhóm công trình đã công bố. Nhờ đó, luận án đóng góp thiết thực cả về lý thuyết lẫn ứng dụng, đồng thời khẳng định tính mới và giá trị khoa học của các đề xuất.

1.4.4. Nội dung nghiên cứu của luận án

a. Đề xuất mô hình truyền thông đơn kết nối cho WBAN

Luận án đề xuất mô hình truyền thông đơn kết nối cho WBAN, được phát triển dựa trên ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC [28]. Trong mô hình truyền thông đề xuất, các cảm biến được gắn trên bề mặt cơ thể người dùng, truyền dữ liệu đến các AP gắn trên tường trong một căn phòng. Xét về mặt định tính, mô hình truyền thông WBAN luận án đề xuất có một số đặc điểm mới, đồng thời có thể khắc phục được một số hạn chế của các mô hình truyền thông WBAN theo chuẩn IEEE 802.15.6. Cụ thể như sau:

- **Tổ chức lại kết nối giữa các cảm biến và các AP:** Trong các mô hình truyền thông WBAN theo chuẩn IEEE 802.15.6, mỗi cảm biến thường được gán cố định theo kiểu một-một với một hub trung tâm hoặc một AP, tạo thành các liên kết cứng (*hard association*). Phương thức kết nối này làm giảm tính linh hoạt, dễ dẫn đến mất tín hiệu khi cảm biến trong vùng phủ sóng bị che khuất hoặc gặp điều kiện kênh truyền bất lợi. Trong mô hình truyền thông WBAN đề xuất, các cảm biến được phép kết nối "động" với các AP trong vùng phủ sóng, theo cơ chế lựa chọn AP động (*soft association*). Không còn tồn tại ràng buộc liên kết cố định một-một; thay vào đó, kết nối được thiết lập linh hoạt, dựa trên điều kiện kênh truyền và khả năng xử lý của các AP. Cách tổ chức kết nối này kế thừa ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC [28] nhưng được điều chỉnh phù hợp với quy mô và đặc thù của WBAN. Phương pháp này góp phần giảm thiểu nguy cơ mất kết nối, đồng thời cho phép khai thác hiệu quả cơ sở hạ tầng sẵn có, đặc biệt khi số lượng cảm biến hoạt động đồng thời tăng lên.
- **Linh hoạt trong kết nối:** Hub chỉ có khả năng thu nhận dữ liệu từ

các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể của một người dùng duy nhất [88]. Trong khi đó, mô hình truyền thông WBAN luận án đề xuất cho phép các AP thu nhận dữ liệu từ các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể của nhiều người dùng đồng thời.

- **Tăng cường liên kết đường truyền:** Do các cảm biến có thể linh hoạt thiết lập kết nối với các AP gắn trên tường tại nhiều vị trí khác nhau (phía trước hoặc sau lưng người dùng). Điều này giúp tăng khả năng hình thành các liên kết tầm nhìn thẳng (LoS: *Line-of-Sight*), đồng thời giảm xác suất xuất hiện các liên kết NLoS.

b. Đề xuất kết hợp thuật toán MMC cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối

Thuật toán MMC [42] là một phương pháp điều khiển công suất theo tiêu chí cải thiện thông lượng tối thiểu giữa các cảm biến trong hệ thống. Ý tưởng chính của thuật toán này là điều chỉnh công suất phát sao cho cảm biến có thông lượng thấp nhất được cải thiện, qua đó hạn chế sự chênh lệch thông lượng quá lớn giữa các cảm biến. Thuật toán MMC phù hợp để sử dụng làm phương pháp đối chứng trong môi trường truyền thông WBAN, nơi các cảm biến được gắn tại nhiều vị trí khác nhau trên bề mặt cơ thể và chịu tác động của các điều kiện kênh truyền không đồng đều. Các cảm biến ở vị trí bất lợi có thể chịu suy hao kênh lớn hơn, dẫn đến thông lượng thấp hơn so với các cảm biến còn lại. Bằng cách chú trọng đến cảm biến có thông lượng thấp nhất, MMC có thể góp phần cải thiện thông lượng của các cảm biến yếu hơn. Tuy nhiên, để đánh giá đầy đủ và chính xác hiệu quả của thuật toán MMC khi kết hợp với mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, cần thực hiện các phân tích định lượng và mô phỏng chi tiết. Những nội dung này sẽ được trình bày trong Chương 2 của luận án.

c. Đề xuất thuật toán điều khiển công suất cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

Luận án đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất là TTC và TWC nhằm tiết kiệm năng lượng, đồng thời duy trì thông lượng cảm biến ở mức đáp ứng yêu cầu truyền tin cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Thuật toán TTC hướng đến tăng số lượng cảm biến đạt một mức thông lượng

nhất định, qua đó đảm bảo khả năng truyền tin nhưng vẫn tiết kiệm năng lượng. Trong khi đó, thuật toán TWC hướng tới tăng số lượng cảm biến có thông lượng nằm trong một khoảng "cửa sổ" cho phép, giúp hệ thống linh hoạt điều chỉnh công suất phát để duy trì thông lượng ổn định và tiết kiệm năng lượng. Để đánh giá chính xác hiệu quả của hai thuật toán TTC, TWC, cũng như so sánh với trường hợp không điều khiển công suất (NPC: *Non Power Control*) và thuật toán MMC, cần có các phân tích và mô phỏng chi tiết, nội dung này sẽ được trình bày trong Chương 3 của luận án.

Trong các mô hình truyền thông WBAN và thuật toán điều khiển công suất luận án phát triển, áp dụng, đề xuất, độ phức tạp chủ yếu được xử lý tại CPU và các AP, trong khi cảm biến vẫn giữ nguyên tắc hoạt động đơn giản, tiêu thụ năng lượng thấp. Cụ thể, cảm biến chỉ cần thực hiện điều chỉnh công suất theo tín hiệu phản hồi từ CPU, thay vì phải tự tính toán phức tạp. Việc này hoàn toàn phù hợp với đặc thù của cảm biến trong dịch vụ chăm sóc y tế, vốn yêu cầu giá thành rẻ, kích thước nhỏ, và thời gian hoạt động lâu dài. Như vậy, độ phức tạp không đặt nặng lên cảm biến mà được chuyển sang phía hạ tầng mạng (AP/CPU), bảo đảm tính khả thi và khả năng ứng dụng thực tế trong các ứng dụng theo dõi sức khỏe. Về năng lượng, mặc dù cảm biến cần thực hiện điều chỉnh công suất, nhưng nhờ cơ chế điều khiển, cảm biến không phải duy trì mức công suất phát cực đại kéo dài như trong trường hợp NPC. Kết quả là công suất phát trung bình giảm đáng kể, giúp tiết kiệm năng lượng và kéo dài tuổi thọ pin.

So với mô hình WBAN sử dụng hub đặt trên cơ thể người bệnh, mô hình truyền thông WBAN được đề xuất trong luận án cho phép cảm biến truyền trực tiếp đến các AP cố định. Xét với cùng ngưỡng QoS hoặc ngưỡng thông lượng mục tiêu, công suất phát yêu cầu của cảm biến phụ thuộc trực tiếp vào suy hao đường truyền. Do khoảng cách từ cảm biến đến AP thường lớn hơn khoảng cách từ cảm biến đến hub, nên về nguyên tắc, công suất phát tối thiểu cần thiết để duy trì liên lạc trong mô hình truyền trực tiếp đến AP không thấp hơn mô hình WBAN dùng hub. Vì vậy, mô hình đề xuất không được xem là có ưu thế tự nhiên về giảm công suất phát tức thời của cảm biến so với mô hình WBAN sử dụng hub.

Trong bối cảnh đó, ý nghĩa của các thuật toán điều khiển công suất trong

luận án không nằm ở việc làm cho công suất phát của cảm biến luôn thấp hơn mô hình có hub, mà ở khả năng điều chỉnh công suất phát về mức cần thiết theo trạng thái kênh và ràng buộc thông lượng. Hiệu quả của các thuật toán MMC, TTC và TWC được đánh giá thông qua các chỉ tiêu cụ thể như công suất tiêu thụ của các cảm biến, thông lượng trung bình của tất cả các cảm biến, hiệu quả sử dụng năng lượng của các cảm biến. Theo cách tiếp cận này, các thuật toán đề xuất góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong chính kiến trúc WBAN có các cảm biến truyền trực tiếp đến AP mà luận án nghiên cứu.

Vì mô hình truyền thông WBAN luận án đề xuất có xu hướng yêu cầu công suất phát cao hơn so với mô hình WBAN sử dụng hub, nên việc xây dựng, phát triển, đề xuất và đánh giá các thuật toán điều khiển công suất trở nên đặc biệt cần thiết và có ý nghĩa. Các thuật toán này không chỉ giúp bảo đảm thông lượng mục tiêu trong những điều kiện kênh truyền khác nhau, mà còn góp phần quản lý mức tiêu thụ năng lượng của cảm biến và duy trì hiệu quả hoạt động tổng thể của hệ thống WBAN theo hướng tiếp cận được đề xuất trong luận án.

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 mô hình WBAN và các kỹ thuật điều khiển công suất. Đồng thời, các tham số đánh giá chất lượng hệ thống cũng đã được giới thiệu, làm cơ sở cho các phân tích và tính toán trong các Chương tiếp theo.

Chương 2

ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH TRUYỀN THÔNG ĐƠN KẾT NỐI CHO WBAN

Tiếp nối những phân tích tổng quan và so sánh trong Chương 1, Chương 2 tập trung vào việc nghiên cứu, đề xuất mô hình truyền thông đơn kết nối cho WBAN. Mục tiêu của Chương là cải thiện hiệu quả truyền tin, đơn giản hóa cấu trúc mạng, đồng thời bảo đảm tính gọn nhẹ và sự thoải mái cho người sử dụng trong các ứng dụng y tế. Mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối được xây dựng dựa trên phương thức truyền tin điểm-điểm và kế thừa ý tưởng tổ chức mạng từ mô hình SC [28], nhưng được điều chỉnh phù hợp với đặc thù của WBAN. Trong mô hình này, khái niệm “*đơn kết nối*” được hiểu là: tại mỗi thời điểm trong một khe thời gian, mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến duy nhất; tuy nhiên, ở các khe thời gian kế tiếp, các AP hoàn toàn có thể phục vụ các cảm biến khác nhau.

Tên cơ sở đó, luận án áp dụng phương pháp phân tích giải tích để xây dựng các biểu thức tường minh cho tốc độ truyền dữ liệu khả thi và thông lượng của cảm biến. Đồng thời, thuật toán điều khiển công suất MMC [42] được áp dụng, phát triển trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, nhằm nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu và cải thiện thông lượng cảm biến.

*Nội dung của Chương 2 được công bố trong các công trình **J1**, **J5** và **C1**.*

2.1. Động lực nghiên cứu

Trong các ứng dụng y tế, WBAN yêu cầu cơ chế truyền tin phải đơn giản, tiêu thụ năng lượng thấp và duy trì thông lượng ổn định trong điều kiện kênh truyền chịu ảnh hưởng mạnh bởi các yếu tố môi trường. Tuy nhiên, trong thực tế triển khai WBAN, các liên kết vô tuyến giữa cảm biến và AP thường không đồng nhất do kênh truyền chịu tác động mạnh từ vị trí đặt cảm biến và tư thế cơ thể người dùng.

Nhằm cải thiện hiệu năng truyền dữ liệu trong điều kiện kênh truyền thay đổi, luận án đề xuất mô hình truyền thông đơn kết nối cho WBAN, được hình thành dựa trên kế thừa có chọn lọc ý tưởng tổ chức mạng của mô hình SC. Trong mô hình SC, mỗi người dùng được gán tới AP có chất lượng kênh trung bình tốt nhất, góp phần mở rộng vùng phủ sóng hiệu dụng và giảm sự suy giảm cục bộ của tín hiệu. Nguyên lý “*một người dùng - một AP được chọn*” này phù hợp với mô hình truyền thông WBAN, vì cho phép gán động cảm biến-AP theo chất lượng kênh tốt nhất, từ đó cải thiện điều kiện truyền dẫn và hỗ trợ nâng cao thông lượng trong môi trường kênh biến thiên mạnh. Cách tiếp cận này phù hợp với mục tiêu của luận án là đánh giá hiệu năng hệ thống WBAN theo các chỉ tiêu thông lượng và hiệu quả năng lượng.

Trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, nguyên lý này được điều chỉnh thông qua việc chia khung truyền thành các khe thời gian liên tiếp, trong đó mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến duy nhất tại mỗi khe. Nhờ cơ chế lập lịch theo khe thời gian, cảm biến luôn có thể được gán tới AP có liên kết thuận lợi nhất tại thời điểm đó, đồng thời tránh được nhiễu giao thoa giữa các cảm biến. Cách tổ chức này duy trì cấu trúc mạng gọn nhẹ, giảm yêu cầu xử lý tín hiệu, và phù hợp với các tín hiệu sinh học có tốc độ dữ liệu thấp, trong đó yêu cầu quan trọng là bảo đảm thông lượng cần thiết trong khi vẫn hạn chế tiêu thụ năng lượng của cảm biến.

Có nhiều tiêu chí khác nhau để lựa chọn một AP ghép đôi với một cảm biến như dựa trên khoảng cách giữa AP và cảm biến, dựa trên công suất nhận được... Trong một số nghiên cứu, AP được lựa chọn nhằm đảm bảo sao cho cảm biến có được công suất trung bình tín hiệu hữu ích cao nhất [28]. Điều đó tương ứng với lựa chọn AP có điều kiện kênh tốt nhất hay hệ số pha-đỉnh diện rộng lớn nhất khi xét đến giá trị trung bình. AP như vậy được gọi là AP phục vụ chính của cảm biến.

Bên cạnh đó, thuật toán điều khiển công suất MMC [42] đã chứng minh hiệu quả trong việc cực đại hóa tốc độ truyền dữ liệu của người dùng có tốc độ thấp nhất, qua đó cải thiện sự đồng đều về tốc độ truyền dữ liệu cho tất cả người dùng trong hệ thống. Trên cơ sở đó, luận án phát triển và áp dụng thuật toán MMC cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, đồng thời phân tích ảnh hưởng của số lượng cảm biến và số lượng AP đến thông lượng

hệ thống. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình đề xuất kết hợp với thuật toán MMC giúp nâng mức thông lượng của cảm biến có điều kiện truyền tin bất lợi nhất lên cao nhất có thể trong miền khả thi.

Hiệu quả của mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối được đánh giá thông qua đối sánh với mô hình tham chiếu (*baseline*) không điều khiển công suất và mô hình WBAN sử dụng TDMA [89, 90] được xây dựng trên cơ sở nguyên lý đa truy cập phân chia theo thời gian, nhằm khẳng định tính ưu việt của phương pháp đề xuất trong các kịch bản mô phỏng.

2.2. Mô hình WBAN và các đặc trưng kênh truyền

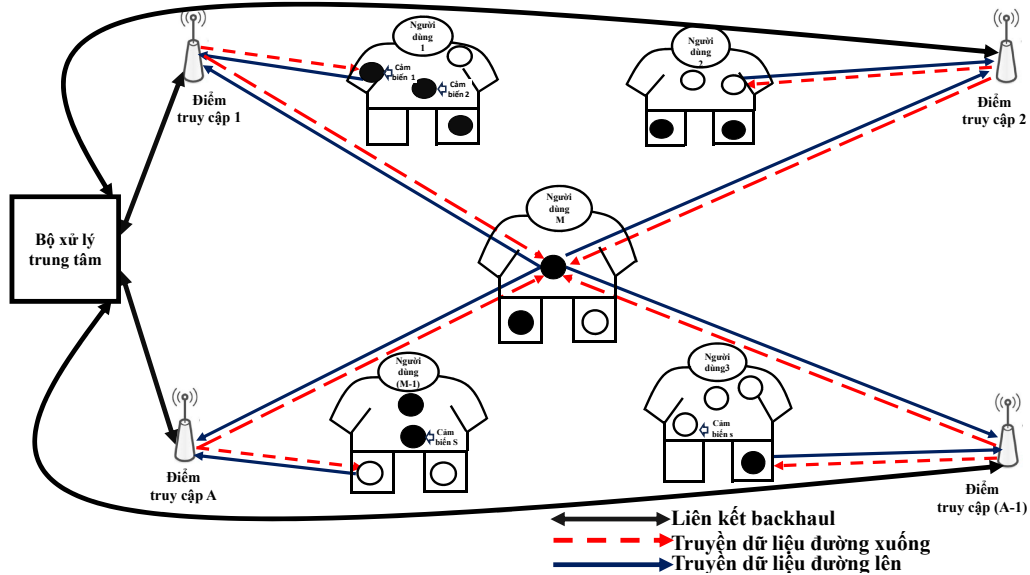
2.2.1. Mô hình hệ thống

Hình 2.1 minh họa mô hình tổng quát của mạng WBAN được triển khai trong một phòng điều trị tại bệnh viện. Trong mô hình này, có tổng cộng S cảm biến được gắn trên bề mặt cơ thể của một hoặc nhiều bệnh nhân, nhằm thu thập và truyền dữ liệu sinh học tới A AP gắn trên tường thông qua kết nối không dây. Tuy nhiên trong thực tế các AP có thể gắn ở đầu giường bệnh để dễ dàng thu thập dữ liệu. Các cảm biến và AP đều được trang bị một ăng-ten, các AP được kết nối với CPU thông qua mạng hữu tuyến tốc độ cao (*back haul*). Các AP được đồng bộ hóa thời gian bằng giao thức đồng bộ thời gian qua mạng (NTP: *Network Time Protocol*) hoặc giao thức đồng bộ thời gian chính xác cao (PTP: *Precision Time Protocol*) để duy trì hoạt động theo lịch trình.

Trong kịch bản phòng bệnh được xem xét trong luận án, các AP và CPU được bố trí cố định và được giả định kết nối với nhau bằng đường truyền có dây. Backhaul có nhiệm vụ chuyển thông tin trạng thái kênh, dữ liệu thu nhận tại các AP và thông tin điều khiển giữa AP với CPU.

So với liên kết vô tuyến cảm biến–AP, kết nối backhaul có dây thường có dung lượng, độ ổn định cao hơn, đồng thời ít chịu ảnh hưởng của chuyển động cơ thể, che khuất, pha-đỉnh và giới hạn năng lượng của cảm biến. Vì vậy, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, backhaul được giả định là lý tưởng, tức là không giới hạn băng thông, không xét độ trễ và không xét lỗi truyền dẫn, nhằm tập trung phân tích ảnh hưởng của các thuật toán điều khiển công suất trên liên kết vô tuyến cảm biến–AP.

Giả định này không hàm ý rằng mọi kết nối backhaul có dây trong thực tế đều hoàn toàn lý tưởng. Các kết quả của luận án được xem xét trong điều kiện backhaul có dây đủ năng lực đáp ứng việc trao đổi dữ liệu và thông tin giữa các AP với CPU.



Hình 2.1: Mô hình tổng quát của mạng WBAN.

Về nguyên lý vật lý, mô hình WBAN bao gồm ba thành phần chính: cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể, AP gắn trên tường và CPU. Các cảm biến sinh học gắn trên bề mặt cơ thể phát tín hiệu với công suất thấp, thu thập thông tin về nhịp tim, huyết áp,... Đặc thù của cảm biến là có nguồn năng lượng hạn chế, do đó cần chiến lược truyền tin đơn giản, tiết kiệm năng lượng, chỉ thực hiện phát theo công suất được CPU chỉ định. Các AP có nhiệm vụ thu tín hiệu từ cảm biến, xử lý sơ bộ và truyền đến CPU. CPU được thiết kế có dung lượng lớn, đóng vai trò là trung tâm xử lý tín hiệu, tối ưu hóa hiệu suất dựa trên các tham số khác nhau, phân phối tín hiệu, điều khiển công suất phát hiệu quả cho các AP và cảm biến, tích hợp dữ liệu và bảo mật thông tin. CPU chịu trách nhiệm cho việc mã hóa, giải mã và nâng cao chất lượng kết nối, quản lý công suất phát và các tham số mạng khác nhau để đảm bảo mọi cảm biến đều có thể truy cập mạng một cách công bằng và hiệu quả. CPU phân tích dữ liệu nhận được từ AP và sử dụng các thuật toán đã được cài đặt để đưa ra các quyết định, ví dụ như phát cảnh báo khi phát hiện các vấn đề sức khỏe bất thường. Dựa vào kết quả phân tích, CPU thực hiện các

thuật toán điều khiển công suất rồi truyền đến AP, AP nhận kết quả, xử lý sơ bộ rồi chuyển tiếp đến cảm biến để cảm biến thu thập dữ liệu hoặc điều chỉnh công suất phát.

Trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối được đề xuất trong luận án, 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 TDD [91], [92]. Bên cạnh đó, kỹ thuật TDMA được tích hợp nhằm tổ chức truy cập hiệu quả cho nhiều cảm biến trong từng pha truyền dẫn.

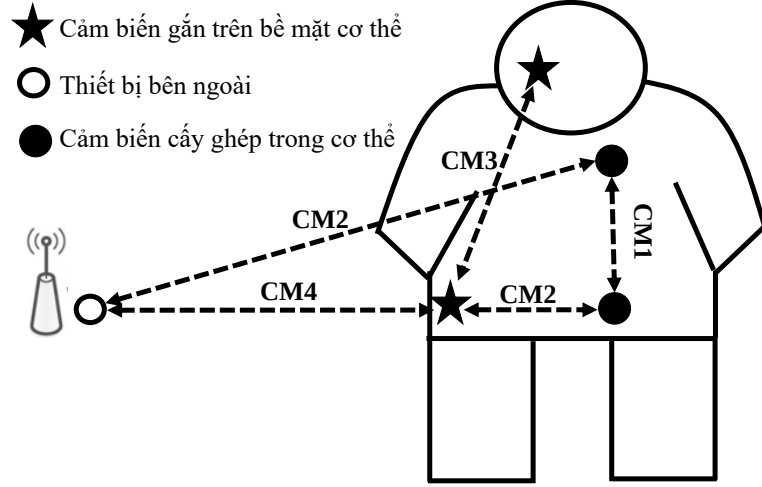
2.2.2. Hệ số kênh truyền

Cơ thể con người bao gồm các loại mô phức tạp với các hằng số điện môi, điện dẫn và trở kháng khác nhau, không phải là môi trường lý tưởng cho truyền sóng vô tuyến. Do đó, việc truyền sóng thường gặp phải các hiện tượng như phản xạ, nhiễu xạ, che khuất và đa đường, cùng với hiện tượng pha-đỉnh và hấp thụ năng lượng bởi môi trường xung quanh cơ thể. Vì vậy, mô hình kênh của WBAN mang nhiều đặc điểm khác biệt so với môi trường truyền sóng thông thường.

Bảng 2.1: Các kịch bản mô hình kênh của WBAN.

Kịch bản	Mô tả	Dải tần số	Mô hình kênh
S1	Cây ghép đến cây ghép	Từ 402 MHz đến 405 MHz	CM1
S2	Cây ghép đến bề mặt cơ thể	Từ 402 MHz đến 405 MHz	CM2
S3	Cây ghép đến thiết bị bên ngoài	Từ 402 MHz đến 405 MHz	CM2
S4	Bề mặt cơ thể đến bề mặt cơ thể (LoS)	(13,5; 50; 400; 600; 900) MHz 2,4 GHz, từ 3,1 GHz đến 10,6 GHz	CM3
S5	Bề mặt cơ thể đến bề mặt cơ thể (NLoS)	(13,5; 50; 400; 600; 900) MHz 2,4 GHz, từ 3,1 GHz đến 10,6 GHz	CM3
S6	Bề mặt cơ thể đến thiết bị bên ngoài (LoS)	900 MHz 2,4 GHz, từ 3,1 GHz đến 10,6 GHz	CM4
S7	Bề mặt cơ thể đến thiết bị bên ngoài (NLoS)	900 MHz 2,4 GHz, từ 3,1 GHz đến 10,6 GHz	CM4

Cụ thể, các kênh vô tuyến trong WBAN chủ yếu bị ảnh hưởng bởi hai hiệu ứng chính là pha-đỉnh diện hẹp và pha-đỉnh diện rộng. Pha-đỉnh diện hẹp xảy ra do sự thay đổi nhỏ về vị trí của các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể hoặc vị trí/tư thế của cơ thể, trong khi pha-đỉnh diện rộng chủ yếu xảy ra do sự chuyển động mạnh của cơ thể và có sự thay đổi đáng kể trong vị trí/tư thế của cơ thể.



Hình 2.2: Các đường liên kết trong mô hình kênh WBAN.

Các kịch bản mô hình kênh của WBAN được đề xuất theo [93], [94] và được mô tả trong Bảng 2.1. Các đường liên kết trong mô hình kênh WBAN được minh họa trong Hình 2.2.

Trong mô hình WBAN, các cảm biến được gắn trên bề mặt cơ thể người dùng và thực hiện truyền nhận dữ liệu trực tiếp với các AP gắn trên tường trong một căn phòng. 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) [93], [94] như được trình bày trong Bảng 2.1, và sử dụng tần số 4,5 GHz phù hợp với môi trường trong nhà.

Hệ số kênh 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 thể hiện mối quan hệ này được cho bởi [28]:

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

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, 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 pha-đỉnh diện rộng β_{as} được tính toán theo biểu thức:

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

trong đó, PL_{as} là thành phần suy hao đường truyền sử dụng mô hình điểm cắt động sẽ được phân tích chi tiết trong Mục 2.2.3.

2.2.3. 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 là mô hình điểm cắt động (FI: *Floating-Intercept*) được phân tích trong nghiên cứu [3] và biểu diễn dưới dạng sau:

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

trong đó, γ biểu diễn cho hệ số cắt, ∂ 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 . AP sử dụng ăng-ten phân cực đứng để phù hợp với phân cực của các cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể, từ đó nâng cao hiệu suất truyền dẫn và giảm tổn hao do mất phối hợp phân cực. Đối với môi trường trong nhà, tín hiệu có thể bị suy hao do hiện tượng phản xạ từ tường, sàn và trần nhà. Tuy nhiên, việc duy trì cùng kiểu phân cực giữa cảm biến và AP giúp tăng cường độ tín hiệu trên đường truyền trực tiếp. Hơn nữa, trong điều kiện thực tế, việc thiết lập hợp lý vị trí các AP giúp giảm thiểu tổn hao do phản xạ, qua đó đảm bảo chất lượng tín hiệu và giảm độ trễ trong quá trình truyền dữ liệu. Bảng 2.2 cung cấp thông tin chi tiết về từng kịch bản được xét, trong đó cấu hình V-V dùng cho trường hợp ăng-ten của cảm biến và ăng-ten của AP đều phân cực đứng, cấu hình V-Omni dùng cho trường hợp cảm biến sử dụng ăng-ten phân cực đứng, AP sử dụng ăng-ten đẳng hướng.

Bảng 2.2: Tham số mô hình suy hao đường truyền điểm cắt động [3].

Tần số	Phân cực ăng-ten	LoS			NLoS		
		Hệ số γ	Hệ số ∂	Hệ số σ	Hệ số γ	Hệ số ∂	Hệ số σ
4,5 GHz	V-V	41,45	1,32	1,79	16,22	4,85	3,91
	V-Omni	71,09	0,88	1,79	40,48	4,55	2,84

Kịch bản ứng dụng được xem xét trong luận án là giám sát bệnh nhân trong phòng bệnh ICU, trong đó người bệnh chủ yếu ở trạng thái nghỉ, nằm,

ngồi hoặc di chuyển với tốc độ thấp trong phạm vi hẹp. Do đó, so với các ứng dụng WBAN trong thể thao, quân sự hoặc các môi trường có mức độ vận động cao, ảnh hưởng của Doppler và sự biến đổi nhanh của kênh trong kịch bản nghiên cứu không đáng kể.

Trong phạm vi một khoảng kết hợp, kênh truyền được giả định gần như không đổi để thực hiện ước lượng kênh, điều khiển công suất và truyền dữ liệu. Kênh có thể thay đổi giữa các khoảng kết hợp do thay đổi tư thế, vị trí cơ thể hoặc hiện tượng che khuất. Trên cơ sở đó, luận án sử dụng mô hình CM4 kết hợp với mô hình suy hao điểm cắt động FI, trong đó thành phần pha-đỉnh diện hẹp được giả định có phân bố Gauss phức. Giả định này phù hợp với phạm vi ứng dụng và mục tiêu nghiên cứu của luận án.

2.3. Mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA

2.3.1. Mô hình hệ thống

Trước tiên, TDMA được lựa chọn nghiên cứu vì đây là phương pháp phân bổ tài nguyên thời gian, với đặc điểm phân chia khe thời gian cố định cho từng thiết bị, cho phép xác định chính xác thời điểm truyền của mỗi cảm biến. TDMA giúp loại bỏ nhiễu đa truy nhập, đồng thời góp phần tiết kiệm năng lượng bằng cách giới hạn thời gian hoạt động của cảm biến. Việc nghiên cứu mô hình TDMA tạo nền tảng vững chắc cho việc đánh giá hiệu năng cơ bản của hệ thống và làm cơ sở so sánh cho các mô hình cải tiến về sau. Trong mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA (TDMA WBAN) kết hợp 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. Trong mỗi một pha lại chia thành các khe thời gian và mỗi một khe thời gian được dành cho việc truyền tin của từng cảm biến như mô tả trong Hình 2.3. 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, và $\tau^c = S \times \tau_u^{hl} + \tau_u + \tau_d$.

Pha huấn luyện đường lên $S \times \tau_u^{hl}$				Truyền dữ liệu đường lên τ_u				Truyền dữ liệu đường xuống 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 2.3: Kết hợp phương thức TDD và kỹ thuật TDMA trong mô hình TDMA WBAN.

2.3.2. Pha huấn luyện đường lên

Trong pha huấn luyện đường lên, mỗi cảm biến phát chuỗi tín hiệu dẫn đường (*pilot*) đến tất cả các AP để phục vụ quá trình ước lượng kênh giữa cảm biến và các AP. Trong mô hình TDMA WBAN, mặc dù tại mỗi thời điểm chỉ một cảm biến được phép truyền dữ liệu, pha huấn luyện đường lên vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo các AP có thể thu thập chính xác thông tin kênh. Đây là cơ sở quan trọng cho việc thiết kế thuật toán truyền dữ liệu hiệu quả, góp phần nâng cao hiệu suất của hệ thống.

Ký hiệu $\phi_s \in \mathbb{C}^{\tau_u^{hl} \times 1}$ là chuỗi pilot được sử dụng để ước lượng kênh trong pha huấn luyện đường lên. Chuỗi này được chuẩn hóa theo điều kiện $\|\phi_s\|^2 = 1$, nhằm đảm bảo năng lượng trung bình của tín hiệu pilot là không đổi, giúp chuẩn hóa SNR trong quá trình ước lượng kênh. Trong quá trình truyền thực tế, chuỗi pilot được nhân với hệ số $\sqrt{\tau_u^{hl}}$, sao cho tổng năng lượng truyền của toàn chuỗi đạt τ_u^{hl} , tương ứng với công suất trung bình mỗi ký hiệu bằng 1. Việc chuẩn hóa này tạo điều kiện thuận lợi cho phân tích lý thuyết và cho phép tính toán chính xác SNR tại các thiết bị thu. Trong pha huấn luyện đường lên, mỗi cảm biến truyền chuỗi pilot trong các khe thời gian riêng biệt, nhằm cho phép AP ước lượng kênh chính xác và giảm thiểu nhiễu xuyên kênh. Khi đó, vec-tơ tín hiệu nhận được tại AP thứ a có thể được biểu diễn dưới dạng [28]:

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

trong đó, $\mathbf{w}_a$ là vec-tơ nhiễu tạp tại AP thứ a , với kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1, ρ^p là SNR đã được chuẩn hóa của mỗi ký hiệu pilot. Dựa trên tín hiệu pilot thu được $\mathbf{y}_a^p$, 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 $\check{y}_{as}^p$, được tính như sau:

$$\check{y}_{as}^p = \boldsymbol{\phi}_s^H \mathbf{y}_a^p = \boldsymbol{\phi}_s^H (\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} \boldsymbol{\phi}_s + \mathbf{w}_a) = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} + \boldsymbol{\phi}_s^H \mathbf{w}_a. \quad (2.5)$$

Việc sử dụng các chuỗi pilot trực giao giúp đạt được ước lượng kênh tối ưu, trong khi sử dụng các chuỗi pilot ngẫu nhiên có thể dẫn đến các ước lượng không tối ưu do nhiễu chéo giữa các chuỗi pilot. Để cải thiện độ chính xác của quá trình ước lượng, phương pháp ước lượng sai số bình phương trung bình tối thiểu (MMSE: *Minimum Mean Square Error*) được áp dụng. Ước lượng MMSE của hệ số kênh g_{as} được biểu diễn như sau [28]:

$$\hat{g}_{as} = \mathbb{E} \{g_{as} \check{y}_{as}^{p*}\} \mathbb{E} \{|\check{y}_{as}^p|^2\}^{-1} \check{y}_{as}^p = c_{as} \check{y}_{as}^p, \quad (2.6)$$

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 dưới dạng kỳ vọng toán học như sau:

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

2.3.3. Truyền dữ liệu đường lên

Trong pha truyền dữ liệu đường lên, một cảm biến đồng thời truyền dữ liệu đến nhiều AP. Mỗi cảm biến được cấp phát một khe thời gian riêng biệt nhằm tránh hiện tượng nhiễu đa truy nhập giữa các cảm biến. Các tín hiệu thu được tại nhiều AP sẽ được chuyển về CPU. CPU tiến hành kết hợp tín hiệu để tận dụng tăng ích phân tập, từ đó cải thiện chất lượng tín hiệu thu được và giảm BER. 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 là α_s , thỏa mãn điều kiện $0 < \alpha_s \leq 1$. Theo lý thuyết điều chế số, hệ số α_s đóng vai trò điều chỉnh mức công suất phát nhằm nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu mà không ảnh hưởng đến tính toàn vẹn của thông tin. Tuy nhiên, trong mô hình TDMA WBAN hệ số này thường được đặt $\alpha_s=1$, tương ứng với việc cảm biến truyền với công suất tối đa. Tín hiệu

nhận được tại AP thứ a được mô tả theo biểu thức:

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

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

Để tách tín hiệu dữ liệu $q_{u,s}$ gửi từ cảm biến thứ s , AP thứ a thực hiện nhân tín hiệu nhận được y_a^u với liên hợp ước lượng kênh $\hat{g}_{as}$. Sau đó, kết quả thu được, $\hat{g}_{as}^* y_a^u$, được chuyển tiếp đến CPU thông qua mạng hữu tuyến tốc độ cao. Tín hiệu tổng hợp tại CPU được biểu diễn dưới dạng [95]:

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

Tốc độ truyền dữ liệu đường lên từ cảm biến thứ s trong mô hình TDMA WBAN được biểu diễn bởi:

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

Trong biểu thức (2.11), $\rho^u \sum_{a=1}^A \chi_{as}$ là SNR hiệu dụng sau kết hợp tại CPU. Do cơ chế TDMA chỉ cho phép một cảm biến truyền trong mỗi khe thời gian, hệ thống không phát sinh can nhiễu đa người dùng; ảnh hưởng của sai số ước lượng kênh được phản ánh gián tiếp thông qua χ_{as} .

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

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

Trong mô hình TDMA WBAN, mỗi cảm biến chỉ được phép truyền dữ liệu trong một khe thời gian duy nhất trên tổng số S khe trong một chu kỳ truyền. Do đó, mỗi cảm biến chỉ sử dụng $\frac{1}{S}$ phần thời gian cho truyền dữ liệu. Vì vậy, công thức thông lượng (2.12) cần nhân thêm hệ số $\frac{1}{S}$ để phản ánh đúng tỷ lệ thời gian truyền thực tế của từng cảm biến.

2.3.4. Truyền dữ liệu đường xuống

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

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

trong đó, ρ^d là SNR đường xuống đã được chuẩn hóa, $q_{d,s}$ là ký hiệu dữ liệu truyền đến cảm biến thứ s với giả thiết $\mathbb{E}\{|q_{d,s}|^2\} = 1$, và $\alpha_{d,s}, s=1, \dots, S$, là hệ số điều khiển công suất, được xác định theo chiến lược phân bổ công suất đã lựa chọn. Tuy nhiên, trong mô hình TDMA WBAN, hệ số $\alpha_{d,s}=1$ tương ứng với trường hợp AP truyền với công suất tối đa.

Tín hiệu thu được tại cảm biến thứ s được biểu diễn như sau:

$$r_d^s = \sum_{a=1}^A g_{as} x_a + w_s = \sqrt{\rho^d} \sum_{a=1}^A g_{as} \hat{g}_{as}^* q_{d,s} + w_s, \quad (2.14)$$

trong đó, w_s là nhiễu AWGN tại cảm biến thứ s , được mô hình hóa là biến Gauss phức với kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1. Tín hiệu dữ liệu $q_{d,s}$ sau đó sẽ được tách ra từ tín hiệu thu r_d^s tại cảm biến thứ s . Tương tự như đường lên, tốc độ truyền dữ liệu đạt được trong quá trình truyền dữ liệu đường xuống của cảm biến thứ s được xác định bởi:

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

Trong biểu thức (2.15), tử số biểu diễn công suất tín hiệu mong muốn thu được tại cảm biến s sau khi các AP thực hiện phát chùm liên hợp (*conjugate beamforming*) dựa trên ước lượng kênh $\hat{g}_{as}$, trong đó thành phần $\sum_{a=1}^A \chi_{as}$ phản ánh tăng ích phân tập thu được từ nhiều AP. Thành phần $\rho^d \sum_{a=1}^A \chi_{as} \beta_{as}$ trong mẫu số không phải là can nhiễu đa người dùng, do trong mô hình TDMA mỗi khe thời gian chỉ có một cảm biến được phục vụ, mà đại diện cho nhiễu do bất định chùm tia (*beamforming uncertainty*) gây ra bởi sai số ước lượng kênh giữa g_{as} và $\hat{g}_{as}$. Ngoài ra, hạng tử 1 trong mẫu số tương ứng với tạp âm Gauss đã được chuẩn hóa tại cảm biến thu. Do đó, (2.15) phản ánh đúng hiệu năng truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình TDMA WBAN có xét đến ảnh hưởng của sai số ước lượng kênh.

Thông lượng đường xuống của cảm biến thứ s , có xét đến chi phí ước lượng kênh, trong mô hình TDMA WBAN được biểu diễn bởi:

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

2.3.5. Nhận xét về mô hình TDMA WBAN

Mô hình truyền thông WBAN sử dụng TDMA, với thiết kế pha huấn luyện đường lên và pha truyền dữ liệu được phân chia theo các khe thời gian riêng biệt, đã được trình bày chi tiết. Mô hình này đảm bảo tính trực giao theo thời gian, giúp ước lượng kênh chính xác và giảm thiểu nhiễu xuyên kênh giữa các cảm biến. Tuy nhiên, theo công thức tính thông lượng (2.12) và (2.16), 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.

2.4. Mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối

2.4.1. Khái niệm WBAN đơn kết nối

Trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, nguyên tắc kết nối “một–một” được thực hiện thông qua cơ chế gán cặp (*association*) giữa cảm biến và AP. Cụ thể, tại mỗi khe thời gian, mỗi cảm biến được gán tới tối đa một AP phục vụ, đồng thời mỗi AP chỉ phục vụ tối đa một cảm biến. Việc gán cặp cảm biến–AP được thực hiện tại CPU dựa trên thông tin kênh thu được trong pha huấn luyện, chẳng hạn hệ số suy hao diện rộng, cường độ tín hiệu thu hoặc khoảng cách giữa cảm biến và AP.

Về mặt kỹ thuật, các chuỗi pilot hoặc định danh riêng của cảm biến có vai trò hỗ trợ AP/CPU ước lượng kênh, nhận dạng cảm biến và thiết lập ánh xạ cảm biến–AP. Tuy nhiên, cần phân biệt giữa cơ chế gán kết nối và cơ chế tách tín hiệu ở lớp vật lý. Pilot không đồng nghĩa với việc AP có thể khử hoàn toàn tín hiệu của các cảm biến khác trong pha truyền dữ liệu. Nếu nhiều cảm biến cùng phát trên cùng tài nguyên thời gian–tần số, tín hiệu thu tại AP vẫn là tổng chồng chập của tín hiệu từ các cảm biến và tạp âm. Khi

đó, AP xử lý tín hiệu của cảm biến được gán, còn các tín hiệu không mong muốn được xem là thành phần can nhiễu còn dư hoặc được hạn chế thông qua cơ chế lập lịch/trực giao hóa tài nguyên truyền dẫn.

Khi số lượng cảm biến S không vượt quá số lượng AP A , mỗi cảm biến có thể được gán cho một AP theo tiêu chí kênh truyền thuận lợi nhất, chẳng hạn AP gần nhất hoặc AP có cường độ tín hiệu thu lớn nhất. Ngược lại, khi $S > A$, hệ thống chia quá trình truyền thành $\delta = \lceil S/A \rceil$ khe thời gian liên tiếp. Trong mỗi khe, tối đa A cảm biến được phục vụ; mỗi cảm biến trong nhóm này được gán cho một AP duy nhất theo nguyên tắc kết nối một-một, trong khi các cảm biến còn lại sẽ được phục vụ ở các khe tiếp theo. Cơ chế này được điều phối tại tầng điều khiển truy cập môi trường, nhằm bảo đảm rằng tại mỗi khe thời gian, mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến mục tiêu.

Việc gán AP phục vụ cảm biến được thực hiện tập trung tại CPU, không phải tại cảm biến. Trong pha huấn luyện hoặc quảng bá điều khiển, các AP có thể phát beacon/pilot kèm định danh riêng, được thiết kế trực giao theo thời gian, tần số hoặc mã, để hỗ trợ cảm biến và CPU nhận biết nguồn tín hiệu. Các báo cáo đo lường từ AP được chuyển tiếp về CPU để xác định chất lượng liên kết của từng cặp cảm biến-AP. Trên cơ sở đó, CPU thực hiện quy tắc gán và phát thông tin ánh xạ cảm biến-AP cho toàn hệ thống. Như vậy, cảm biến không tự lựa chọn AP phục vụ; toàn bộ quyết định gán kết nối và điều phối truyền dẫn được thực hiện tại CPU.

Trong 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 được minh họa trong 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

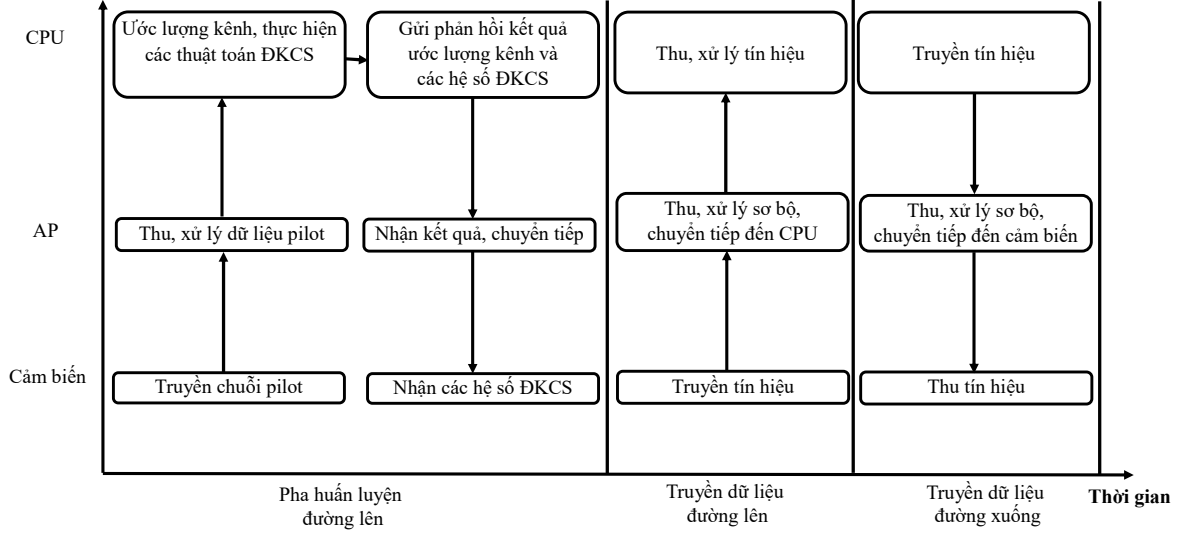
Hình 2.4: Phương thức TDD trong trường hợp kênh truyền ổn định.

Trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, pha huấn luyện đường lên không chia thành S khe, mà chỉ sử dụng khoảng thời gian τ_u^{hl} , pha truyền dữ liệu đường lên và đường xuống cũng chỉ gồm δ khe thời gian.

Giản đồ thời gian hoạt động của mô hình truyền thông WBAN luận án đề

xuất trong trường hợp kênh truyền ổn định được mô tả trên Hình 2.5.

Thành phần



Hình 2.5: Giải đồ thời gian trong trường hợp kênh truyền ổn định.

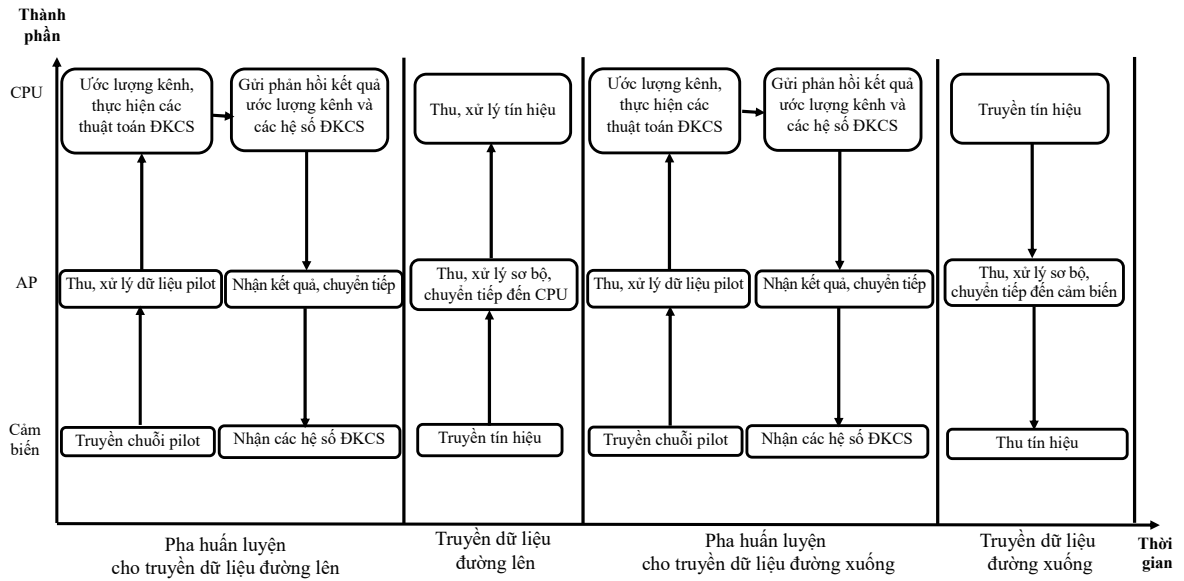
Trong trường hợp kênh truyền biến đổi nhanh, hiện tượng thuần hóa kênh (*channel hardening*) không còn tồn tại, và tính đối xứng kênh trong TDD không còn đảm bảo. Khi đó, hệ thống buộc phải thu thập thông tin trạng thái kênh (CSI: *Channel State Information*) cho cả đường lên và đường xuống. Quá trình truyền dẫn theo phương thức TDD khi đó được thiết kế lại như minh họa trong Hình 2.6. Pha huấn luyện đường xuống được thực hiện tương tự pha huấn luyện đường lên, với τ_d^{hl} là khoảng thời gian dành cho pha huấn luyện đường xuống. Trường hợp có pha huấn luyện đường xuống tương ứng với khi kênh truyền biến đổi nhanh rất hiếm khi xảy ra nhưng vẫn được xét để đảm bảo tính tổng quát, tương thích chuẩn, và có phương án dự phòng/giới hạn thiết kế khi kênh truyền biến đổi nhanh.

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 2.6: Phương thức TDD trong trường hợp kênh truyền biến đổi nhanh.

Giải đồ thời gian hoạt động của mô hình truyền thông WBAN luận án đề xuất trong trường hợp kênh biến đổi nhanh được mô tả trên Hình 2.7.

Để làm rõ hơn vị trí của mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối được



Hình 2.7: Giảm đồ thời gian trong trường hợp kênh biến đổi nhanh.

đề xuất trong luận án, có thể so sánh mô hình này với một số kiến trúc liên quan như distributed WBAN, CF và SC. So với distributed WBAN, mô hình đơn kết nối vẫn sử dụng nhiều AP hỗ trợ thu nhận tín hiệu từ các cảm biến, nhưng quá trình gán cảm biến-AP và điều khiển công suất được thực hiện tập trung tại CPU. Do đó, mô hình đơn kết nối không hoàn toàn phân tán, mà có cơ chế điều phối trung tâm nhằm phục vụ đánh giá thông lượng và hiệu quả năng lượng.

So với kiến trúc CF, trong đó một thiết bị có thể được nhiều AP đồng thời phục vụ và xử lý phối hợp, mô hình luận án đề xuất được đơn giản hóa theo hướng đơn kết nối. Cụ thể, trong mỗi khe thời gian, mỗi cảm biến chỉ được gán với một AP phục vụ duy nhất. Cách tổ chức này giúp giảm yêu cầu phối hợp đồng thời giữa nhiều AP, giảm độ phức tạp xử lý tín hiệu và phù hợp hơn với đặc điểm của cảm biến WBAN có công suất phát thấp, năng lượng hạn chế và phạm vi truyền ngắn.

So với kiến trúc SC, mô hình đề xuất không tập trung vào bài toán chia vùng phủ “cell” hoặc chuyển giao giữa các “cell” như trong mạng di động tế bào. Thay vào đó, các AP được bố trí trong phạm vi gần cơ thể người để hỗ trợ thu nhận tín hiệu từ các cảm biến WBAN. Vì vậy, trọng tâm của mô hình là gán cảm biến-AP, tổ chức truyền theo khe thời gian và điều khiển công suất nhằm cải thiện thông lượng và hiệu quả năng lượng.

Như vậy, điểm khác biệt của mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối luận án đề xuất nằm ở việc đặc thù hóa mô hình đa AP có điều phối trung tâm cho môi trường WBAN, trong đó mỗi cảm biến được gán với một AP phục vụ trong từng khe thời gian, kết hợp với cơ chế truy nhập TDMA/TDD và điều khiển công suất theo yêu cầu thông lượng. Mô hình này không nhằm thay thế hoàn toàn các kiến trúc distributed WBAN, CF hoặc SC đã có, mà được sử dụng như một biến thể phù hợp với bối cảnh WBAN có cảm biến công suất thấp, phạm vi truyền ngắn và yêu cầu tiết kiệm năng lượng.

2.4.2. Pha huấn luyện kênh

Trong khe thời gian thứ k ($k = 1, \dots, \delta$), cảm biến thứ s thuộc tập Γ_k truyền chuỗi pilot ϕ_s đến AP được gán tương ứng, với Γ_k là tập hợp cảm biến được phục vụ trong khe k . Biểu thức toán học cho tín hiệu nhận được tại AP thứ a_s (là AP phục vụ cảm biến s) được biểu diễn dưới dạng:

$$\mathbf{y}_{a_s}^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s \in \Gamma_k} g_{a_s s} \phi_s + \mathbf{w}_{a_s}. \quad (2.17)$$

Chiều tín hiệu nhận được $\mathbf{y}_{a_s}^p$ lên chuỗi pilot của cảm biến thứ s thông qua chuyển vị liên hợp phức ϕ_s^H , ta thu được biểu thức sau [96]:

$$\tilde{y}_{a_s s}^p = \phi_s^H \mathbf{y}_{a_s}^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{a_s s} + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} g_{a_s s'} \phi_s^H \phi_{s'} + \phi_s^H \mathbf{w}_{a_s}. \quad (2.18)$$

Tiếp theo, AP thứ a_s thực hiện ước lượng kênh truyền bằng phương pháp MMSE [28]. Do đó, 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,

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

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:

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

Tuy nhiên, ước lượng kênh trong pha huấn luyện đường lên tại phía thu vẫn tiềm ẩn sai số do ảnh hưởng của các yếu tố như: nhiễu nền, giới hạn độ dài chuỗi pilot, và đặc biệt là hiện tượng nhiễu giữa các chuỗi pilot (*pilot contamination*) xảy ra khi các chuỗi pilot không hoàn toàn trực giao. Với ước lượng MMSE, kênh thực $g_{a,s}$ được tách thành hai thành phần [97]:

$$g_{a,s} = \hat{g}_{a,s} + \varepsilon_{a,s}, \quad (2.22)$$

trong đó, $\hat{g}_{a,s}$ là ước lượng MMSE và $\varepsilon_{a,s}$ là sai số ước lượng, được giả định là một biến ngẫu nhiên Gauss phức, độc lập với $\hat{g}_{a,s}$, có kỳ vọng bằng 0 và phương sai được xác định như sau: Trong phương pháp ước lượng MMSE, cơ sở toán học là: năng lượng trung bình của kênh thực bằng đúng hệ số suy hao diện rộng $\beta_{a,s}$, tức là: $\mathbb{E}[|g_{a,s}|^2] = \beta_{a,s}$. Do $\hat{g}_{a,s}$ và $\varepsilon_{a,s}$ độc lập và có kỳ vọng bằng 0, ta có: $\mathbb{E}[|g_{a,s}|^2] = \mathbb{E}[|\hat{g}_{a,s}|^2] + \mathbb{E}[|\varepsilon_{a,s}|^2]$. Trong đó, $\mathbb{E}[|\hat{g}_{a,s}|^2] = \chi_{a,s}^u$ biểu diễn phần năng lượng kênh mà ước lượng khai thác được, phụ thuộc vào công suất pilot, độ dài chuỗi pilot và nhiễu. Còn $\mathbb{E}[|\varepsilon_{a,s}|^2]$ chính là phần năng lượng còn lại, tức là phần sai số ước lượng kênh. Do đó, theo nguyên lý bảo toàn năng lượng trung bình, ta có: $\mathbb{E}[|\varepsilon_{a,s}|^2] = \beta_{a,s} - \chi_{a,s}^u$.

Hệ số β_{as} được hiểu là pha-đỉnh diện rộng giữa AP thứ a và cảm biến thứ s , phản ánh suy hao trung bình của kênh truyền do khoảng cách và che khuất môi trường. Khác với pha-đỉnh diện hẹp, là thành phần biến thiên nhanh theo thời gian do đa đường và hiệu ứng Doppler, pha-đỉnh diện rộng biến đổi chậm theo thời gian và có thể coi là gần như không đổi trong một chu kỳ phân bổ tài nguyên.

Luận án không giả định cảm biến hay CPU biết trước giá trị β_{as} . Thay vào đó, β_{as} được ước lượng gián tiếp thông qua pha huấn luyện đường lên. Cụ thể, trong pha huấn luyện, mỗi cảm biến phát chuỗi pilot với công suất đã chuẩn hóa; AP thứ a thu tín hiệu pilot từ cảm biến s và đo công suất trung bình tín hiệu nhận được. Bằng cách lấy trung bình theo thời gian hoặc tần số đủ dài, ảnh hưởng của pha-đỉnh diện hẹp được làm phẳng, từ đó AP có thể ước lượng hệ số suy hao diện rộng β_{as} .

Sau khi ước lượng, các AP gửi giá trị β_{as} tương ứng về CPU thông qua đường truyền hữu tuyến tốc độ cao. CPU tổng hợp thông tin này để thực hiện các tác vụ điều phối ở mức mạng, như gán cặp AP-cảm biến và điều

hiển công suất. Cảm biến không cần và cũng không trực tiếp biết giá trị β_{as} ; thay vào đó, cảm biến chỉ tuân theo các tham số điều khiển do CPU phát hành. Cách tiếp cận này giúp giảm overhead báo hiệu và phù hợp với đặc thù năng lượng hạn chế của hệ thống WBAN.

2.4.3. Truyền dữ liệu đường lên

Cảm biến truyền tín hiệu, AP thu, xử lý sơ bộ, chuyển tiếp đến CPU. CPU ước lượng hệ số suy hao diện rộng β_{as} cho từng cặp cảm biến–AP bằng cách lấy trung bình tín hiệu thu trong một khoảng thời gian của pha huấn luyện. Trên cơ sở đó, CPU thực hiện gán “một–một” và lựa chọn AP có chất lượng kênh truyền thuận lợi nhất cho mỗi cảm biến. Quy tắc gán được mô tả bởi công thức:

$$a_s \triangleq \arg \max_{a \in \mathcal{A}_{\text{avail}}} \beta_{as}, \quad (2.23)$$

trong đó, $\mathcal{A}_{\text{avail}}$ là tập các AP chưa được gán trong khe thời gian hiện tại.

Để đảm bảo tính logic và khả thi khi triển khai, quá trình lựa chọn và gán AP được thực hiện theo trình tự thời gian như sau:

(1) Pha huấn luyện kênh: Trong mỗi chu kỳ truyền, các cảm biến phát chuỗi pilot. Mỗi AP thu tín hiệu pilot từ các cảm biến và thực hiện xử lý sơ bộ, đồng thời ước lượng hệ số suy hao diện rộng β_{as} bằng cách lấy trung bình công suất tín hiệu pilot thu trên một cửa sổ quan sát đủ để triệt tiêu dao động nhanh của pha-đỉnh diện hẹp nhưng vẫn theo kịp biến thiên chậm của pha-đỉnh diện rộng.

(2) Thu thập thông tin suy hao diện rộng: Các AP gửi các giá trị β_{as} (hoặc các thống kê tương đương) về CPU thông qua liên kết backhaul. CPU tổng hợp thông tin này để hình thành ma trận suy hao diện rộng giữa các cảm biến và các AP.

(3) Lập lịch theo khe (khi $S > A$): Nếu số cảm biến lớn hơn số AP, CPU chia các cảm biến thành $\delta = \lceil S/A \rceil$ nhóm và gán mỗi nhóm vào một khe thời gian k .

(4) Gán “một–một” trong từng khe: Với mỗi khe k , CPU khởi tạo tập AP còn khả dụng $\mathcal{A}_{\text{avail}} = \{1, \dots, A\}$ và lần lượt gán cho từng cảm biến $s \in \Gamma_k$ theo quy tắc (2.23). Sau mỗi lần gán, AP đã chọn được loại khỏi $\mathcal{A}_{\text{avail}}$ để đảm bảo rằng buộc mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến trong khe đó. Quá

trình kết thúc khi mọi cảm biến trong Γ_k đều được gán hoặc khi không còn AP khả dụng.

(5) Phát hành và thực thi lịch truyền dữ liệu: CPU phát hành bảng ánh xạ AP–cảm biến kèm theo tài nguyên truyền dẫn tương ứng cho từng cặp được gán trong khe thời gian đang xét. Cụ thể, đối với mỗi cặp cảm biến–AP, CPU chỉ định rõ cảm biến phục vụ, AP phục vụ, khe thời gian/tài nguyên truy nhập và các tham số điều khiển cần thiết như hệ số công suất phát. Thông tin này được gửi tới các AP liên quan và được thông báo cho cảm biến thông qua kênh điều khiển hoặc phần mào đầu của khung truyền.

(6) Cập nhật định kỳ: Do β_{as} biến thiên chậm theo thời gian (so với pha-định diện hẹp), quá trình ước lượng và gán AP không cần thực hiện ở mọi ký hiệu mà chỉ cần cập nhật định kỳ theo từng chu kỳ huấn luyện hoặc khi có thay đổi đáng kể về vị trí/tư thế, do đó phù hợp với ràng buộc bảo hiệu và năng lượng của WBAN.

Trong mỗi khe thời gian, cảm biến thứ s phát tín hiệu dữ liệu $q_{u,s}$ đã được điều chỉnh theo hệ số điều khiển công suất α_s . Quá trình này diễn ra cụ thể theo các bước như sau:

Bước 1 (Thu tín hiệu tại AP): Tại AP a_s , tín hiệu thu được là tổng của thành phần tín hiệu mong muốn phát từ cảm biến s , nhiễu từ các cảm biến khác trong tập Γ_k , cùng với nhiễu Gauss:

$$y_{a_s}^u = \sqrt{\rho^u} \sum_{s \in \Gamma_k} g_{a_s s} \sqrt{\alpha_s} q_{u,s} + w_{a_s}^u. \quad (2.24)$$

Bước 2 (Xử lý sơ bộ tại AP): Để tách riêng tín hiệu dữ liệu $q_{u,s}$ từ cảm biến s , AP a_s nhân tín hiệu thu được với liên hợp của ước lượng kênh $\hat{g}_{a_s s}^*$. Khi đó, tín hiệu sau xử lý tại AP a_s được biểu diễn như sau:

$$r_u^s = \hat{g}_{a_s s}^* y_{a_s}^u = \sqrt{\rho^u} \hat{g}_{a_s s}^* g_{a_s s} \sqrt{\alpha_s} q_{u,s} + \sqrt{\rho^u} \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \hat{g}_{a_s s}^* g_{a_s s'} \sqrt{\alpha_{s'}} q_{u,s'} + \hat{g}_{a_s s}^* w_{a_s}^u. \quad (2.25)$$

Xét đến sai số ước lượng kênh: Nếu tách $g_{a_s s} = \hat{g}_{a_s s} + \varepsilon_{a_s s}$, trong đó $\varepsilon_{a_s s}$ là sai số ước lượng, biểu thức (2.25) được viết lại:

$$r_u^s = \sqrt{\rho^u \alpha_s} \hat{g}_{a_s s}^* \hat{g}_{a_s s} q_{u,s} + \sqrt{\rho^u \alpha_s} \hat{g}_{a_s s}^* \varepsilon_{a_s s} q_{u,s} + \sqrt{\rho^u} \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \sqrt{\alpha_{s'}} \hat{g}_{a_s s}^* g_{a_s s'} q_{u,s'} + \hat{g}_{a_s s}^* w_{a_s}^u. \quad (2.26)$$

Bước 3 (CPU thu, xử lý tín hiệu): CPU thu thập các tín hiệu sau xử lý từ tất cả các AP, và thay vì biết chính xác kênh, CPU sử dụng kỳ vọng các thành phần thống kê để xác định SINR hiệu dụng. SINR hiệu dụng tại cảm biến s được tính như sau:

$$\bar{\zeta}_{a_{ss}} = \frac{\rho^u \alpha_s |\mathbb{E}[\hat{g}_{a_{ss}}^* \hat{g}_{a_{ss}}]|^2}{\rho^u \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{s'} \mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}^* g_{a_{ss}'}|^2] + \rho^u \alpha_s \mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}^* \varepsilon_{a_{ss}}|^2] + \mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}^*|^2]}. \quad (2.27)$$

Như vậy, quá trình truyền dữ liệu đường lên diễn ra theo thứ tự sau: cảm biến truyền dữ liệu, AP thu và xử lý sơ bộ rồi chuyển đến CPU. CPU thu, xử lý tín hiệu, phân tích và giải mã theo ước lượng kênh hiện có, tính SINR hiệu dụng, đảm bảo tách riêng thành phần tín hiệu mong muốn của từng cảm biến.

Áp dụng các tính chất thống kê trong ước lượng MMSE, ta có:

- Kỳ vọng của tích liên hợp giữa ước lượng kênh và kênh thực:

$$\mathbb{E}[\hat{g}_{a_{ss}}^* \hat{g}_{a_{ss}}] = \mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}|^2] = \chi_{a_{ss}}^u.$$

- Phương sai của ước lượng kênh:

$$\mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}|^2] = \mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}^*|^2] = \chi_{a_{ss}}^u.$$

- Do $\hat{g}_{a_{ss}}$ và $g_{a_{ss}'}$ là độc lập với $s' \neq s \in \Gamma_k$, ta có:

$$\mathbb{E}[|\hat{g}_{a_{ss}}^* g_{a_{ss}'}|^2] = \chi_{a_{ss}}^u \beta_{a_{ss}'}.$$

Thay vào biểu thức (2.27) ta thu được:

$$\bar{\zeta}_{a_{ss}} = \frac{\rho^u \alpha_s (\chi_{a_{ss}}^u)^2}{\rho^u \alpha_s \chi_{a_{ss}}^u (\beta_{a_{ss}} - \chi_{a_{ss}}^u) + \rho^u \chi_{a_{ss}}^u \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{s'} \beta_{a_{ss}'} + \chi_{a_{ss}}^u}. \quad (2.28)$$

Rút gọn biểu thức (2.28) bằng cách chia cả tử và mẫu cho $\chi_{a_{ss}}^u$, ta được:

$$\bar{\zeta}_{a_{ss}} = \frac{\rho^u \alpha_s \chi_{a_{ss}}^u}{\rho^u \alpha_s (\beta_{a_{ss}} - \chi_{a_{ss}}^u) + \rho^u \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{s'} \beta_{a_{ss}'} + 1}. \quad (2.29)$$

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

$$R_u^s = \mathbb{E} [\log_2 (1 + \bar{\zeta}_{a_{ss}})]. \quad (2.30)$$

Do $\bar{\zeta}_{a_{ss}}$ tuân theo phân phối mũ, công thức tính tốc độ truyền dữ liệu R_u^s có thể biểu diễn dưới dạng giải tích bằng hàm tích phân mũ $\text{Ei}(\cdot)$ [98, công thức (8.211.1)] theo biểu thức dưới đây:

$$R_u^s = -(\log_2 e) e^{1/\bar{\zeta}_{a_{ss}}} \text{Ei} \left(-\frac{1}{\bar{\zeta}_{a_{ss}}} \right). \quad (2.31)$$

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

$$T_{u,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c}}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_u^s, \quad (2.32)$$

trong đó, $\min(A, S)$ là số lượng kết nối đồng thời tối đa có thể thiết lập trong mỗi khe thời gian.

Trong trường hợp kênh biến đổi nhanh, biểu thức tính thông lượng của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường lên của hệ thống thay đổi thành:

$$T_{u,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl} + \tau_d^{hl}}{\tau^c}}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_u^s. \quad (2.33)$$

Trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, việc tách tín hiệu của các cảm biến được đảm bảo trước hết ở tầng truy nhập môi trường thông qua cơ chế TDMA kết hợp với quy tắc gán “một–một”, sao cho trong mỗi khe thời gian, mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến và mỗi cảm biến chỉ truyền/nhận dữ liệu với một AP duy nhất. Trên đường lên, tín hiệu được tách tại AP bằng lọc phối hợp dựa trên ước lượng kênh, sau đó CPU sử dụng các thống kê kênh để xác định SINR hiệu dụng, trong đó các thành phần nhiễu do cảm biến khác, sai số ước lượng kênh và nhiễu Gauss đều được lượng hóa rõ ràng trong biểu thức SINR. Tại đường xuống, việc tách tín hiệu được thực hiện thông qua định dạng búp sóng liên hợp tại AP kết hợp với lập lịch TDMA, nhờ đó cảm biến chỉ thu tín hiệu dành riêng cho mình và không cần thực hiện các kỹ thuật khử nhiễu đa người dùng phức tạp. Cách tiếp cận này đảm bảo tính logic, đơn giản trong xử lý và phù hợp với mô hình truyền thông WBAN.

2.4.4. Truyền dữ liệu đường xuống

Trong pha truyền dữ liệu đường xuống, CPU truyền tín hiệu đến các AP qua đường truyền hữu tuyến tốc độ cao. AP thu, xử lý sơ bộ rồi chuyển tiếp

đến cảm biến. Trong một khe thời gian, mỗi AP chỉ truyền dữ liệu tới một cảm biến đã được gán, với công suất được điều chỉnh bởi hệ số $\alpha_{d,s}$.

Khi tín hiệu truyền từ AP tới cảm biến, do ảnh hưởng của pha-đỉnh, hiện tượng che khuất và sai số ước lượng kênh, ngoài tín hiệu mong muốn còn xuất hiện các thành phần nhiễu. Do đó, tại cảm biến s , tín hiệu thu được có thể biểu diễn thành tổng của bốn thành phần: tín hiệu mong muốn, nhiễu do sai số ước lượng kênh, nhiễu từ các cảm biến khác, và nhiễu Gauss trắng cộng tính. Biểu thức toán học của tín hiệu thu tại cảm biến s được cho bởi:

$$\begin{aligned} r_d^s &= \sqrt{\rho^d} \sum_{s' \in \Gamma_k} g_{a_{s'}s} \sqrt{\alpha_{d,s'}} q_{d,s'} + w_s, \\ &= \sqrt{\rho^d} \hat{g}_{a_{ss}} \sqrt{\alpha_{d,s}} q_{d,s} + \sqrt{\rho^d} \varepsilon_{a_{ss}} \sqrt{\alpha_{d,s}} q_{d,s} + \sqrt{\rho^d} \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} g_{a_{s'}s} \sqrt{\alpha_{d,s'}} q_{d,s'} + w_s. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Không làm mất đi tính tổng quát của mô hình, ba thành phần cuối trong biểu thức (2.34) có thể được xem như tổng nhiễu không tương quan đối với từng thành phần còn lại. 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 theo các biểu thức dưới đây:

$$\bar{\mu}_{a_{ss}} \triangleq \frac{\rho^d \alpha_{d,s} \chi_{a_{ss}}^u}{\rho^d \alpha_{d,s} (\beta_{a_{ss}} - \chi_{a_{ss}}^u) + \rho^d \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{d,s'} \beta_{a_{s's}} + 1}, \quad (2.35)$$

$$R_d^s = -(\log_2 e) e^{1/\bar{\mu}_{a_{ss}}} \text{Ei} \left(-\frac{1}{\bar{\mu}_{a_{ss}}} \right). \quad (2.36)$$

Cơ chế tách tín hiệu đường xuống được thực hiện nhờ CPU chỉ định mỗi AP phục vụ duy nhất một cảm biến trong một khe thời gian, đảm bảo nguyên tắc một-một. Do đó, thành phần tín hiệu mong muốn được khôi phục chính xác, trong khi các thành phần khác, bao gồm nhiễu từ những cảm biến khác và nhiễu Gauss, chỉ đóng vai trò là nhiễu trong mẫu số SINR hiệu dụng. Cơ chế này bảo đảm khả năng tách riêng tín hiệu và xác định rõ ràng SINR cho từng cảm biến trong mỗi khe thời gian.

Trong trường hợp kênh truyền ổn định, thông lượng khi truyền dữ liệu đường xuống của cảm biến thứ s đã tính toán đến chi phí ước lượng kênh được luận án đề xuất theo công thức sau:

$$T_{d,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c} \min(A, S)}{2} \frac{1}{S} R_d^s. \quad (2.37)$$

Trong trường hợp kênh biến đổi nhanh, công thức tính thông lượng của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường xuống của hệ thống thay đổi thành:

$$T_{d,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl} + \tau_d^{hl}}{\tau^c}}{2} \frac{\min(A, S)}{S} R_d^s. \quad (2.38)$$

Mặc dù mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối được đề xuất trong luận án có những nét tương đồng nhất định với kiến trúc SC được trình bày trong [28], song cần lưu ý rằng hai mô hình này được xây dựng với bối cảnh và mục tiêu khác nhau. Để làm rõ tính hợp lý và sự khác biệt của mô hình truyền thông đề xuất, luận án tiến hành so sánh đối chiếu giữa mô hình SC [28] và mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối. Bảng 3.2 trong Phụ lục **P5** trình bày song song định nghĩa cấu trúc hệ thống, phương pháp giải tích và các công thức chính của hai hướng tiếp cận. Qua đó, có thể nhận thấy rằng, mặc dù chia sẻ một số nguyên lý chung, mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối đã có những sự điều chỉnh cho phù hợp với truyền thông WBAN, đặc biệt là việc chia khe thời gian và các công thức tính thông lượng, tạo nên những đóng góp khác biệt hoàn toàn so với mô hình SC truyền thống.

2.4.5. Điều khiển công suất tối đa hóa mức tối thiểu

Trong kết nối giữa cảm biến và AP, việc tối ưu hóa công suất phát trở nên thiết yếu nhằm nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu, cải thiện chất lượng liên kết và đảm bảo tín hiệu ổn định. Quá trình điều khiển này không chỉ góp phần tăng hiệu suất và kéo dài tuổi thọ của hệ thống, mà còn giúp tiết kiệm năng lượng, mang lại lợi ích thiết thực cho cả nhà cung cấp và người dùng. Trong luận án, phương pháp được áp dụng là thuật toán điều khiển công suất MMC. Mục tiêu của thuật toán là cực đại hóa tốc độ truyền dữ liệu của cảm biến có thông lượng nhỏ nhất trong toàn hệ thống [42]. Tuy nhiên, do các cảm biến cùng chia sẻ tài nguyên truyền dẫn, nên việc tăng công suất phát cho cảm biến “*yếu nhất*” không chỉ làm tăng tín hiệu thu hữu ích của cảm biến này mà còn đồng thời làm tăng mức nhiễu mà cảm biến đó gây ra cho các cảm biến khác. Vì vậy, khi thông lượng của cảm biến yếu nhất được cải thiện, thông lượng của một số cảm biến còn lại có thể giảm do SINR của chúng bị suy giảm. Nói cách khác, MMC thực hiện một sự đánh đổi: chấp nhận giảm một phần thông lượng của các cảm biến đang có điều kiện thuận

lợi hơn để nâng thông lượng của cảm biến yếu nhất lên mức cao nhất có thể trong miền khả thi của hệ thống. Kết quả là thông lượng tối thiểu của hệ thống được cải thiện, trong khi mức chênh lệch quá lớn giữa cảm biến yếu nhất và các cảm biến còn lại được thu hẹp. Trường hợp một cảm biến có kênh quá xấu, ngay cả khi phát ở công suất cực đại vẫn không đạt mức thông lượng tối thiểu yêu cầu, thì điều khiển công suất không thể cải thiện thêm thông lượng của cảm biến đó; khi đó cảm biến rơi vào trạng thái gián đoạn, mất liên lạc (*outage*).

Quá trình điều khiển công suất được thực hiện như sau: CPU thu nhận thông tin kênh từ các AP và tính tốc độ truyền dữ liệu của từng cảm biến. Cảm biến có thông lượng thấp nhất được xác định, và phân bổ công suất được điều chỉnh bằng cách tăng công suất cho cảm biến yếu và giảm cho cảm biến mạnh. Quá trình này lặp lại liên tục, mỗi vòng đều cập nhật lại cảm biến yếu nhất cho tới khi thuật toán hội tụ, tức là khi tất cả cảm biến đạt cùng mức thông lượng – tương ứng với nghiệm tối ưu max-min. Toàn bộ bước tối ưu được thực hiện đồng thời trên toàn mạng, không tập trung vào từng cảm biến riêng lẻ. Mô hình toán học của bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất đường xuống được mô tả cụ thể như sau [42]:

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha_{d,s}\}} \min_{s=1,\dots,S} R_d^s \\ & \text{ràng buộc: } 0 < \alpha_{d,s} \leq 1, \quad s = 1, \dots, S. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Tuy nhiên, do R_d^s là hàm đơn điệu tăng theo $\bar{\mu}_{a_s s}$, bài toán tối ưu (2.39) có thể được biến đổi sang một dạng như sau [28]:

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha_{d,s}\}} \min_{s=1,\dots,S} \bar{\mu}_{a_s s} \\ & \text{ràng buộc: } 0 < \alpha_{d,s} \leq 1, \quad s = 1, \dots, S. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Bài toán (2.40) nói chung là không lồi, khó giải trực tiếp bằng các phương pháp gradient hoặc công thức dạng đóng. Để giải bài toán tối ưu Max-Min nêu trên, luận án sử dụng thuật toán tìm kiếm nhị phân (*bisection*) [99] trên một ngưỡng SINR mục tiêu chung. Ý tưởng chính là chuyển bài toán tối ưu ban đầu thành một chuỗi các bài toán kiểm tra khả thi: tại mỗi vòng lặp, thuật toán kiểm tra xem có tồn tại một tập hệ số điều khiển công suất thỏa mãn ràng buộc hệ thống để tất cả các cảm biến đều đạt ít nhất một ngưỡng

SINR cho trước hay không. Cụ thể, thuật toán được triển khai tập trung tại CPU và thực hiện theo trình tự sau:

- **Khởi tạo miền tìm kiếm** $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$, trong đó:

$$\nu_{\min} = 0, \quad \nu_{\max} = \nu_{\text{init}} = \min_{s \in \{1, \dots, S\}} \bar{\mu}_{a_s s}^{\max},$$

với $\bar{\mu}_{a_s s}^{\max}$ là SINR hiệu dụng cực đại của cảm biến s khi $\alpha_{d,s} = 1$.

- **Thiết lập sai số hội tụ** $\varepsilon = 10^{-3}$.

- **Tại mỗi vòng lặp**, tính giá trị trung gian:

$$\nu = \frac{\nu_{\min} + \nu_{\max}}{2}.$$

- **Kiểm tra khả thi**: Xác định xem có tồn tại một tập $\{\alpha_{d,s}\}$ sao cho:

$$\bar{\mu}_{a_s s} \geq \nu, \quad \forall s.$$

- **Cập nhật miền tìm kiếm**:

- Nếu khả thi, cập nhật $\nu_{\min} = \nu$.
- Nếu không khả thi, cập nhật $\nu_{\max} = \nu$.

- **Lặp lại** cho đến khi

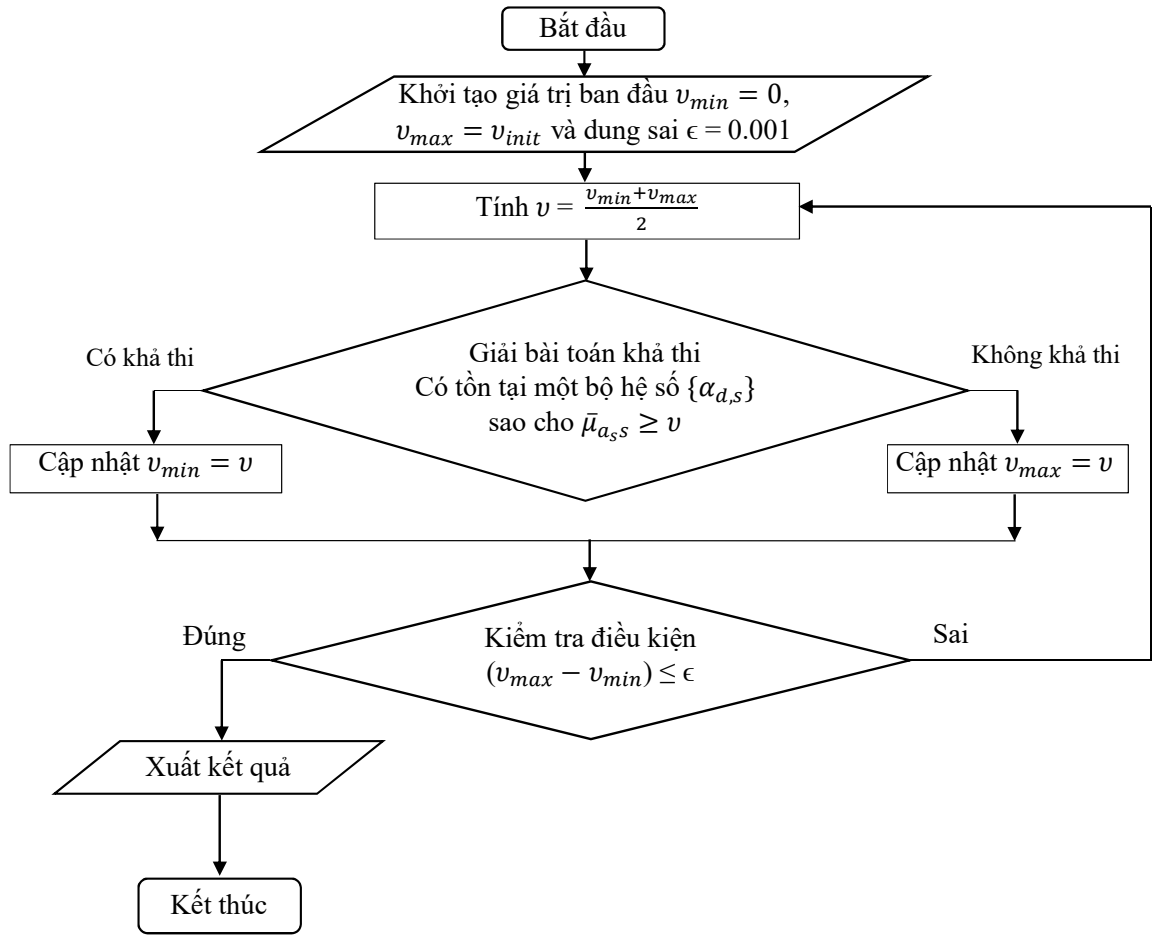
$$\nu_{\max} - \nu_{\min} \leq \varepsilon.$$

Khi thuật toán hội tụ, giá trị $\nu^* = \nu_{\min}$ được xem là SINR hiệu dụng tối ưu theo tiêu chuẩn Max–Min, đồng thời các hệ số điều khiển công suất tương ứng $\{\alpha_{d,s}\}$ đảm bảo công bằng thông lượng trong toàn hệ thống.

Để làm rõ trình tự xử lý, điều kiện rẽ nhánh và cơ chế hội tụ của thuật toán, lưu đồ thuật toán điều khiển công suất MMC theo tiêu chuẩn Max–Min sử dụng tìm kiếm nhị phân, triển khai tập trung tại CPU, được minh họa trong Hình 2.8.

Đối với pha truyền dữ liệu đường lên, bài toán điều khiển công suất theo tiêu chuẩn Max–Min được xây dựng tương tự, với biến tối ưu là các hệ số điều khiển công suất α_s . Cụ thể:

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha_s\}} \min_{s=1, \dots, S} \bar{\zeta}_{a_s s} \\ & \text{ràng buộc: } 0 < \alpha_s \leq 1, s = 1, \dots, S. \end{aligned} \quad (2.41)$$



Hình 2.8: Lưu đồ thuật toán MMC sử dụng tìm kiếm nhị phân.

Do cấu trúc bài toán (2.41) tương tự bài toán đường xuống, thuật toán MMC sử dụng tìm kiếm nhị phân được áp dụng theo cùng một quy trình, với SINR hiệu dụng đường lên $\bar{\zeta}_{a,s}$ đóng vai trò là hàm mục tiêu. Việc sử dụng chung một cơ chế giải cho cả đường lên và đường xuống giúp đơn giản hóa quá trình triển khai và phù hợp với đặc thù xử lý tập trung tại CPU.

2.5. Kết quả mô phỏng và thảo luận

2.5.1. Kích bản mô phỏng

Luận án tiến hành mô phỏng nhằm đánh giá hiệu quả của mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, dựa trên tiêu chí thông lượng đạt được của cảm biến. Các kết quả mô phỏng được xây dựng trên cơ sở thông lượng của toàn bộ các cảm biến trong hệ thống. Cụ thể, trong mỗi lần gieo ngẫu nhiên vị trí AP và cảm biến, thông lượng của từng cảm biến được tính theo biểu thức

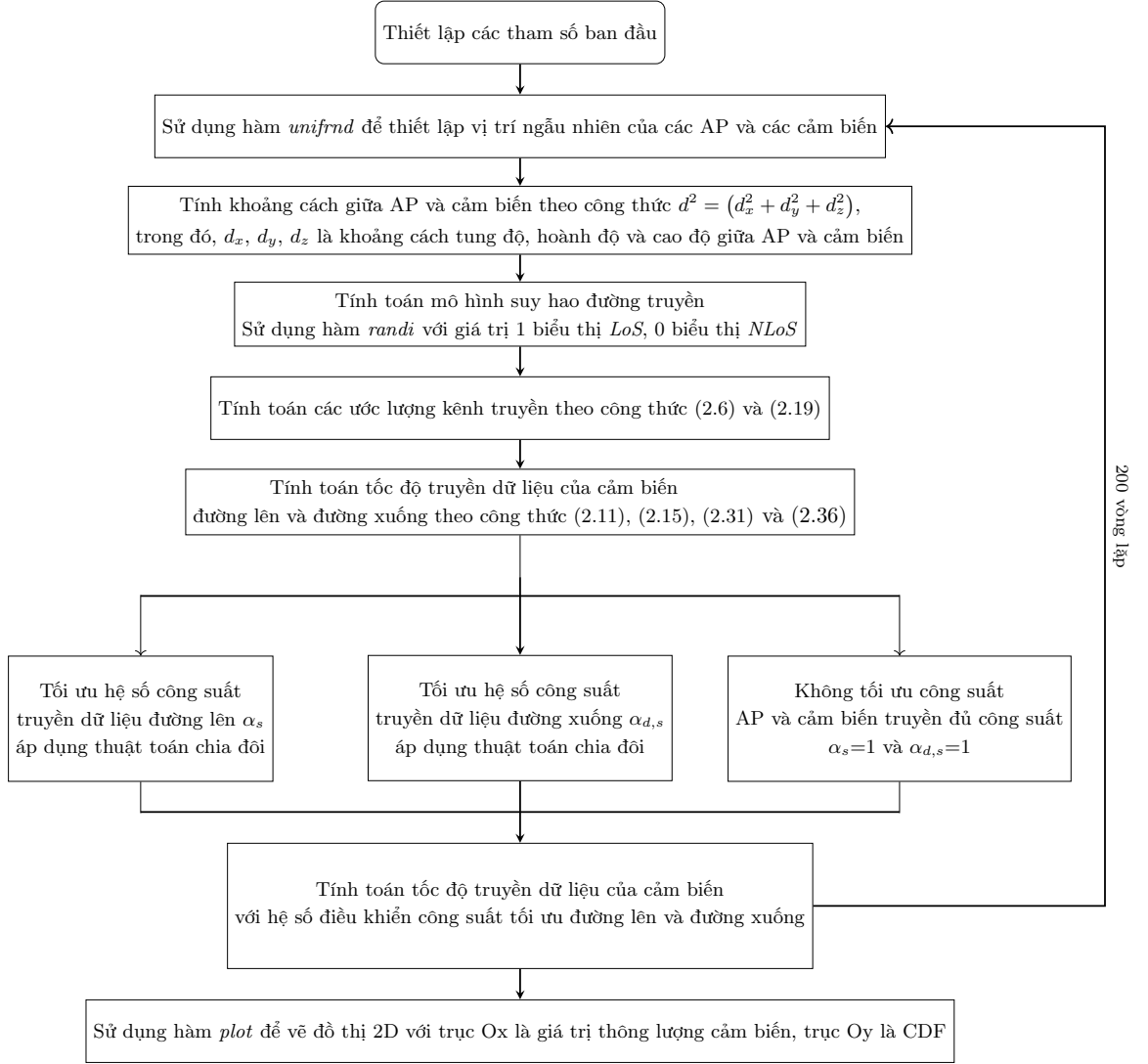
(2.32), (2.37). Tập hợp các giá trị thông lượng thu được từ tất cả các cảm biến qua nhiều lần gieo ngẫu nhiên được dùng để xây dựng phân phối tích lũy thực nghiệm. Vì vậy, đồ thị CDF phản ánh đặc trưng thống kê của thông lượng cảm biến trong toàn hệ thống, thay vì mô tả cho một cảm biến xác định. Cách biểu diễn này cho phép đánh giá tổng quát đặc trưng thống kê của thông lượng cảm biến toàn hệ thống trong các điều kiện mô phỏng đã xét. Các phân tích cũng được mở rộng để xem xét các trường hợp khác nhau khi số lượng AP lớn hơn hoặc nhỏ hơn so với số lượng cảm biến. Ngoài ra, luận án khảo sát thêm sự thay đổi của thông lượng cảm biến theo số lượng AP và số lượng cảm biến. Các tham số thiết lập mô phỏng được trình bày trong Bảng 2.3.

Bảng 2.3: Tham số mô phỏng cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối.

Tham số	Giá trị
Tần số (f); Băng thông (B)	4,5 GHz; 10 MHz
Số lượng cảm biến (S)	$4 \leq S \leq 8$
Số lượng AP (A) trong kịch bản cơ bản	$4 \leq A \leq 8$
Số lượng AP (A) trong kịch bản mở rộng	10, 20, 30
Hệ số γ ; ∂ ; σ (LoS)	41,45; 1,32; 1,79
Hệ số γ ; ∂ ; σ ($NLoS$)	16,22; 4,85; 3,91
Độ cao của AP gắn trên tường (H_b)	2,5 m
Độ cao của cảm biến gắn trên cơ thể người dùng (H_m)	$0,2 \text{ m} \leq H_m \leq 1,7 \text{ m}$
Kích thước căn phòng (dài $\times$ rộng $\times$ cao)	10 m $\times$ 10 m $\times$ 3 m

Trong mô phỏng hệ thống, các tham số được lựa chọn nhằm bảo đảm phù hợp với điều kiện triển khai thực tế và các tiêu chuẩn kỹ thuật phổ biến hiện nay. Trên thực tế, có nhiều chỉ số được sử dụng để đánh giá hiệu năng của WBAN như SNR, SINR, BER, xác suất dừng (OP: *Outage Probability*),... Tuy nhiên, trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối, luận án tập trung vào bài toán điều khiển công suất với mục tiêu cải thiện thông lượng cảm biến. Do đó, thay vì đánh giá theo các chỉ số SNR hay BER, luận án sử dụng CDF của thông lượng để phân tích hiệu năng của từng cảm biến, tương tự phương pháp được áp dụng trong các nghiên cứu trước đây như [100], [101]. Các bước tiến hành mô phỏng được thực hiện theo sơ đồ trên Hình 2.9.

Trong các hình mô phỏng, CDF của thông lượng thực chất bắt nguồn từ phân bố của SNR. Theo công thức Shannon, thông lượng tức thời là hàm



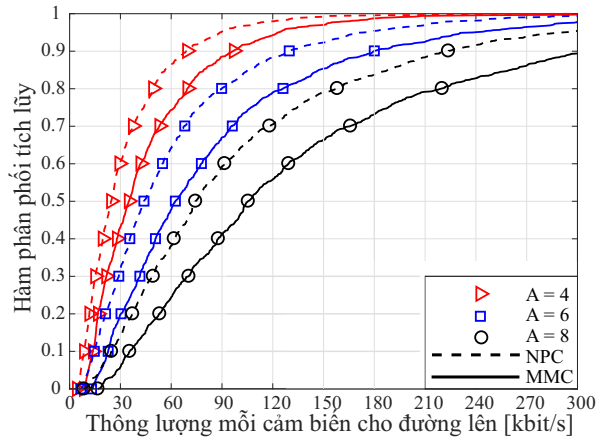
Hình 2.9: Sơ đồ thể hiện các bước mô phỏng để tối ưu hệ số điều khiển công suất cho mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối.

logarit của SNR. Do đó, khi công suất phát của cảm biến tăng, SNR tăng tuyến tính, kéo theo thông lượng tăng theo dạng logarit và đường cong CDF của thông lượng dịch sang phải. Ngược lại, khi công suất phát giảm, phân bố SNR dịch sang trái, dẫn đến thông lượng suy giảm, và CDF phản ánh điều này thông qua xác suất đạt được một mức thông lượng cho trước. Như vậy, đồ thị CDF là công cụ trực quan để thể hiện ảnh hưởng trực tiếp của công suất phát và SNR lên phân bố thông lượng của cảm biến.

2.5.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

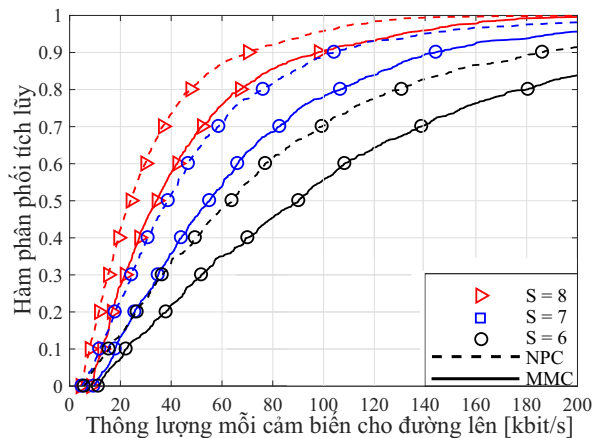
a. Truyền dữ liệu đường lên

- Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến: Hình 2.10 hiển thị kết quả mô phỏng CDF thông lượng cảm biến trong trường hợp $S = 8$ và A lần lượt là 4, 6 và 8. Khi A tăng từ 4 đến 8, các cảm biến có nhiều lựa chọn AP hơn trong quá trình truyền dữ liệu, dẫn đến cải thiện đáng kể về chất lượng kết nối của mỗi cảm biến, giúp tăng thông lượng.



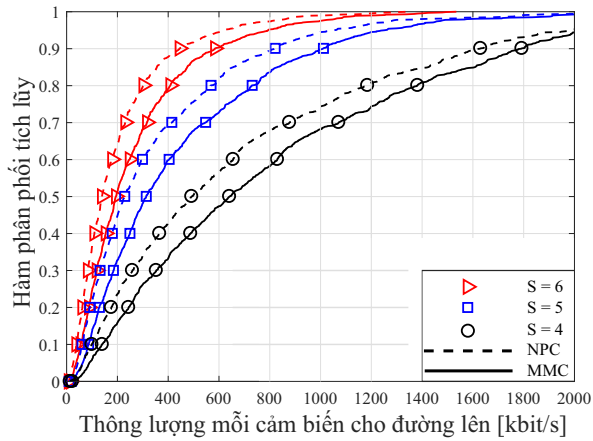
Hình 2.10: Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$.

- Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng cảm biến: Hình 2.11 hiển thị CDF thông lượng cảm biến trong trường hợp $A = 4$ và S được thiết lập các giá trị lần lượt là 6, 7 và 8. Khi S giảm thì mỗi cảm biến có thể sử dụng nhiều tài nguyên thời gian hơn, từ đó cải thiện thông lượng.



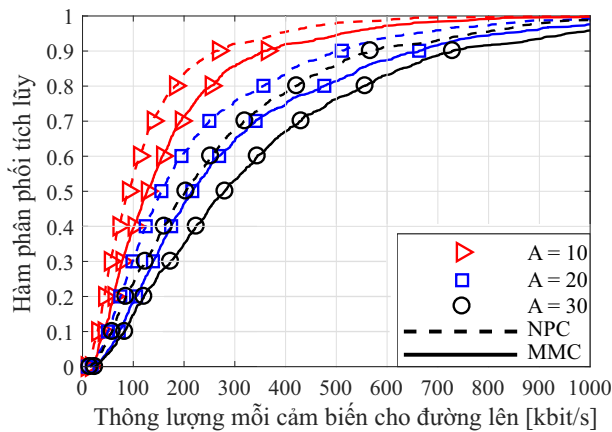
Hình 2.11: Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 4$.

- Hình 2.12 hiển thị CDF thông lượng cảm biến với $A = 6$ và S lần lượt là 4, 5 và 6. Kết quả mô phỏng cho thấy, thuật toán MMC hoạt động hiệu quả ngay cả khi A lớn hơn S . Triển khai nhiều AP giúp nâng cao hiệu suất truyền tải, đảm bảo dữ liệu chính xác, ổn định.



Hình 2.12: Trường hợp số lượng AP lớn hơn số lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 6$.

- Hình 2.13 hiển thị CDF thông lượng cảm biến với $S = 8$ và A lần lượt là 10, 20 và 30. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán MMC có khả năng thích ứng tốt khi số AP lớn hơn rất nhiều số cảm biến, đồng thời việc triển khai nhiều AP mang lại mức thông lượng cao hơn và ổn định hơn cho hệ thống.

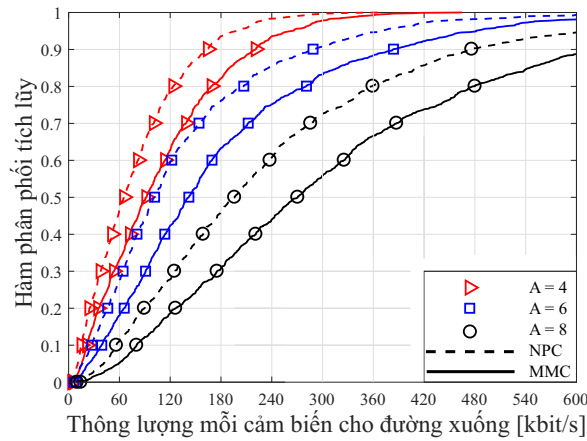


Hình 2.13: Kích bản tăng dần số AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$.

b. Truyền dữ liệu đường xuống

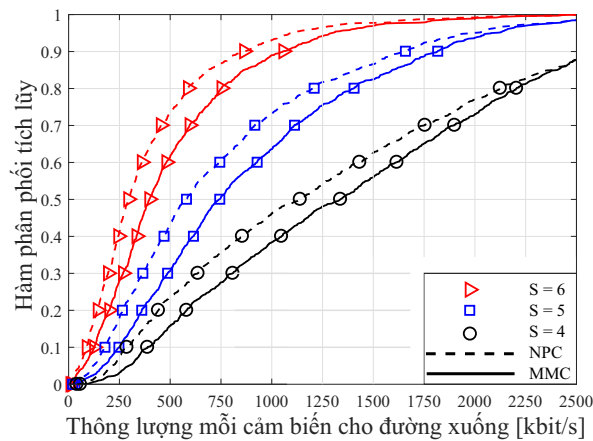
- Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến: Hình 2.14 hiển

thị kết quả mô phỏng CDF thông lượng cảm biến trong trường hợp $S = 8$ và $A = 4, 6$ và 8 . Trong trường hợp $A < S$, do tài nguyên bị giới hạn, các AP phải chia sẻ thời gian phục vụ cho nhiều cảm biến. Điều này dẫn đến việc một số cảm biến phải chờ lâu hơn để được phục vụ, từ đó làm giảm thông lượng. Khi tăng A , số cảm biến được phục vụ đồng thời tăng lên, làm tăng thông lượng.



Hình 2.14: Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$.

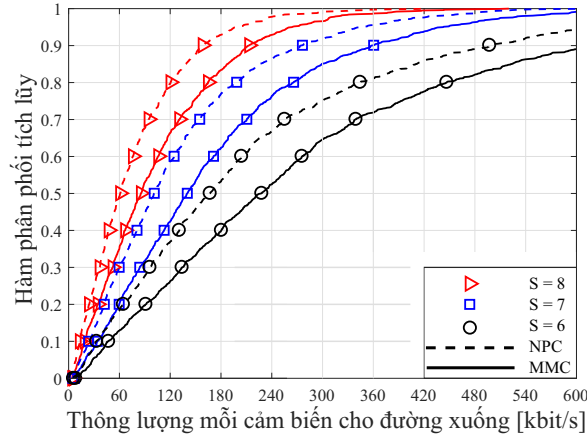
- Hình 2.15 cũng cho kết quả tương tự như khi truyền dữ liệu đường lên, cho thấy MMC duy trì hiệu quả ngay cả khi số AP vượt quá số cảm biến.



Hình 2.15: Trường hợp số lượng AP lớn hơn số lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 6$.

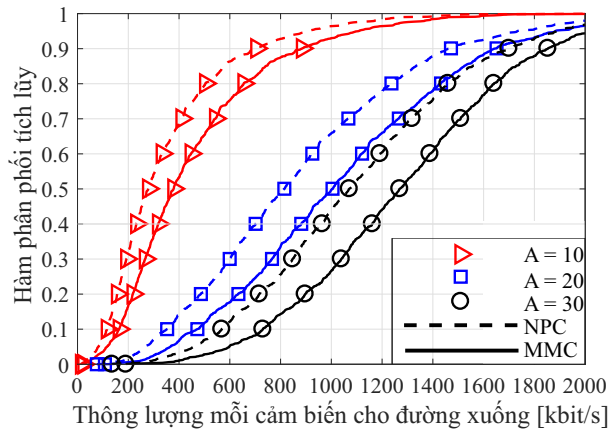
- Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng cảm biến: Hình 2.16 thể hiện kết quả mô phỏng CDF của thông lượng cảm biến trong trường hợp

$A = 4$ và S lần lượt là 6, 7 và 8. Khi S giảm, thông lượng cảm biến có xu hướng được cải thiện tương tự đường lên.



Hình 2.16: Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $A = 4$.

- Hình 2.17 thể hiện kết quả mô phỏng CDF của thông lượng cảm biến trong trường hợp $S = 8$ và A lần lượt là 10, 20 và 30. Khi A lớn hơn rất nhiều S , thuật toán MMC vẫn duy trì hiệu quả nhờ khả năng phân bổ tài nguyên hợp lý và khai thác đa dạng kênh từ nhiều AP, qua đó cải thiện thông lượng cảm biến và nâng cao tính ổn định của hệ thống.



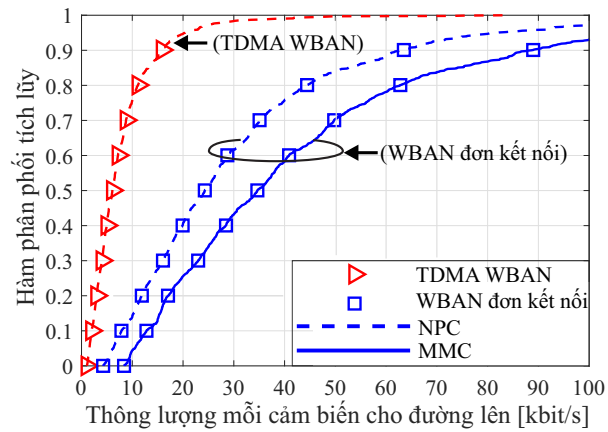
Hình 2.17: Kịch bản tăng dần số lượng AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với $S = 8$.

Ngoài ra, kết quả mô phỏng từ Hình 2.10 đến Hình 2.17 cũng cho thấy thông lượng cảm biến trong trường hợp áp dụng thuật toán điều khiển công suất MMC luôn cao hơn so với NPC. Nguyên nhân là do khi NPC các cảm

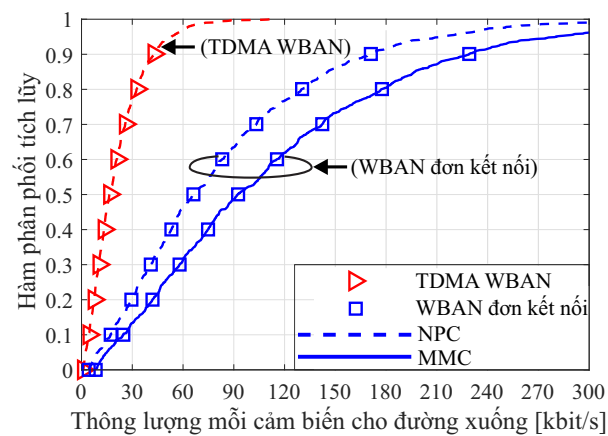
biến cùng duy trì một mức công suất phát cực đại, dẫn đến sự lãng phí công suất tại các cảm biến có điều kiện kênh tốt. Trong khi đó, MMC phân bổ công suất theo tiêu chí tối đa hóa mức tối thiểu, giúp nâng mức thông lượng đạt được của các cảm biến, đặc biệt đối với các cảm biến có điều kiện truyền tin bất lợi.

c. So sánh mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với mô hình truyền thông TDMA WBAN

Hình 2.18 và Hình 2.19 hiển thị CDF thông lượng cảm biến trong quá trình truyền dữ liệu đường lên và đường xuống giữa hai mô hình truyền thông TDMA WBAN và WBAN đơn kết nối với trường hợp $A = 4$, $S = 8$.



Hình 2.18: So sánh thông lượng cảm biến giữa mô hình truyền thông TDMA WBAN và WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường lên với $A = 4$, $S = 8$.

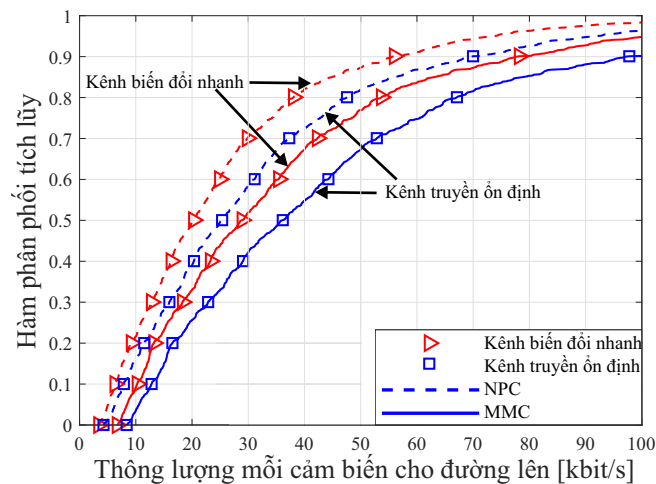


Hình 2.19: So sánh thông lượng cảm biến giữa mô hình truyền thông TDMA WBAN và WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường xuống với $A = 4$, $S = 8$.

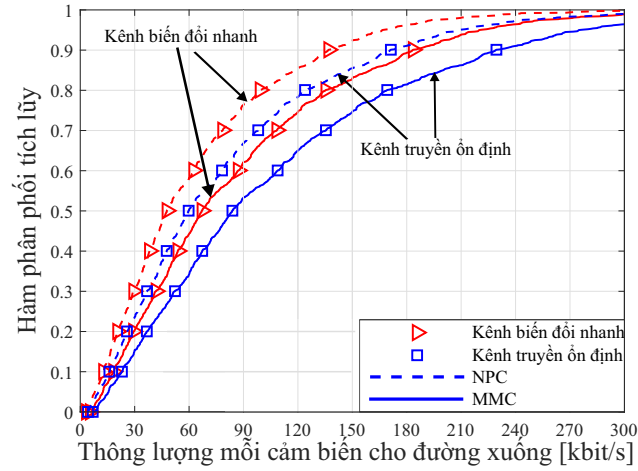
Trong mô hình truyền thông TDMA WBAN, mỗi cảm biến chỉ được cấp một khe thời gian duy nhất trong tổng số S khe của mỗi chu kỳ truyền. Vì vậy, thông lượng của mỗi cảm biến bị giảm tỷ lệ thuận với $\frac{1}{S}$ như trong các biểu thức (2.12) và (2.16). Nói cách khác, dù kênh truyền thuận lợi, mỗi cảm biến 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 được xác định theo biểu thức (2.32) và (2.37), không bị chia cho $\frac{1}{S}$ như TDMA. Nhờ vậy, cảm biến có thể truyền dữ liệu với tốc độ cao hơn. Hơn nữa, áp dụng thuật toán điều khiển công suất MMC giúp phân bổ công suất hợp lý giữa các cảm biến, tối đa hóa thông lượng tối thiểu và cải thiện tính công bằng. Kết quả là, trong các kịch bản mô phỏng đã xét, mô hình đề xuất cho thông lượng cao hơn so với mô hình TDMA tham chiếu.

d. So sánh kênh truyền ổn định và kênh biến đổi nhanh

Kết quả mô phỏng trên Hình 2.20 và Hình 2.21 cho thấy, thông lượng trên mỗi cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên và đường xuống trong trường hợp kênh truyền ổn định luôn tốt hơn so với trường hợp kênh biến đổi nhanh, cả khi NPC và khi áp dụng MMC.



Hình 2.20: So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường lên với $A = 4$, $S = 8$.



Hình 2.21: So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối khi truyền dữ liệu đường xuống với $A=4$, $S=8$.

Khi kênh biến thiên chậm trong khoảng kết hợp, hệ thống có thể khai thác tính thuận nghịch kênh của TDD (công thức (2.32), (2.37)) để sử dụng CSI đường lên cho quá trình truyền đường xuống. Khi đó, chi phí huấn luyện giảm và thông lượng hiệu dụng tăng. Ngược lại, trong trường hợp kênh biến đổi nhanh, CSI đường lên không còn đại diện chính xác cho kênh đường xuống, nên hệ thống cần bổ sung pha huấn luyện đường xuống (công thức (2.33), (2.38)), làm tăng overhead và giảm thông lượng hiệu dụng.

2.6. Kết luận Chương 2

Chương 2 đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp áp dụng thuật toán MMC để điều khiển công suất cảm biến cho cả đường lên và đường xuống. Hiệu quả của mô hình truyền thông 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 truyền thông WBAN đơn kết nối cho thông lượng cảm biến tốt hơn mô hình truyền thông TDMA WBAN trong các kịch bản đã xét. Kết quả nghiên cứu của Chương đã được công bố trong các công trình **J1**, **J5** và **C1**. Mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối phù hợp với các hệ thống yêu cầu kết nối đơn giản và không đòi hỏi thông lượng cao. Tuy nhiên, đối với những hệ thống yêu cầu thông lượng lớn, tiết kiệm năng lượng, mô hình truyền thông

WBAN đơn kết nối chưa đạt hiệu quả cao. Vì vậy, luận án tiếp tục đề xuất áp dụng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, dựa trên ý tưởng tổ chức mạng của mô hình CF [28]. Bên cạnh đó, khi áp dụng thuật toán MMC, công suất phát của mỗi cảm biến luôn nhân với hệ số điều khiển công suất nên bao giờ cảm biến cũng phát với công suất không lớn hơn trường hợp NPC, qua đó thể hiện mức tiết kiệm năng lượng gián tiếp so với phát ở công suất tối đa. Do Chương 2 mới dừng ở đánh giá thông lượng, vì vậy Chương 3 luận án sẽ đề xuất các thuật toán điều khiển công suất không những đảm bảo thông lượng truyền tin mà còn đáp ứng yêu cầu tiết kiệm năng lượng cho cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

Chương 3

ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT CHO WBAN

Chương 3 luận án đề xuất áp dụng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, đồng thời đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới, gồm: thuật toán "*Điều khiển công suất dựa trên ngưỡng thông lượng*" (TTC: *Throughput Threshold - based Power Control*) và thuật toán "*Điều khiển công suất dựa trên cửa sổ thông lượng*" (TWC: *Throughput Window - based Power Control*). Điểm mới nổi bật trong Chương 3 là đưa ra cơ chế điều khiển công suất có khả năng vừa đảm bảo thông lượng truyền tin, vừa đáp ứng hiệu quả năng lượng trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, một hướng nghiên cứu chưa được đề cập trong các công trình được khảo sát. Việc lựa chọn hai thuật toán này nhằm đạt được sự cân bằng giữa tính đơn giản trong triển khai (TTC) và tính linh hoạt, thích ứng với điều kiện kênh thay đổi (TWC). Nhờ đó, luận án có thể đánh giá toàn diện hiệu quả của các thuật toán điều khiển công suất. Các kết quả mô phỏng được so sánh trong bốn trường hợp: NPC, MMC, TTC và TWC. Các tiêu chí đánh giá bao gồm thông lượng mỗi cảm biến, thông lượng trung bình tất cả các cảm biến, hiệu quả năng lượng và công suất tiêu thụ trung bình. Qua đó, Chương 3 làm rõ những ưu điểm của các thuật toán TTC và TWC, đồng thời chứng minh được tính hợp lý và hiệu quả của mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

*Nội dung của Chương 3 được công bố trong các công trình **J2, J3, J4, J6, C2** và **C3**.*

3.1. Động lực nghiên cứu

Trên cơ sở kết quả đạt được trong Chương 2, mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp với thuật toán điều khiển công suất MMC đã chứng minh được hiệu quả trong việc nâng cao thông lượng cho cảm biến yếu nhất và đảm

bảo thông lượng đồng đều giữa các cảm biến. Mô hình này đặc biệt phù hợp với các hệ thống yêu cầu kết nối đơn giản và mức thông lượng trung bình. Tuy nhiên, để đáp ứng tốt hơn yêu cầu thông lượng cao của các cảm biến trong những ứng dụng giám sát y tế thời gian thực và các thể hệ WBAN hiện đại, luận án tiếp tục đề xuất áp dụng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, dựa trên ý tưởng tổ chức mạng của mô hình CF [28].

Mô hình CF [28] đã được nghiên cứu rộng rãi trong các hệ thống mạng vĩ mô, với nhiều ưu điểm như cải thiện đáng kể tốc độ truyền dữ liệu, hiệu quả trong triển khai thực tế, cung cấp dịch vụ tốt đồng đều cho tất cả người dùng trong vùng phủ sóng [102,103]. Bên cạnh đó, thuật toán điều khiển công suất MMC [42] đã chứng minh hiệu quả trong việc cực đại hóa tốc độ truyền dữ liệu của người dùng có tốc độ thấp nhất, qua đó cải thiện sự đồng đều về tốc độ truyền dữ liệu cho tất cả người dùng trong hệ thống.

Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trên được phát triển trong bối cảnh mạng quy mô lớn, nơi điều kiện kênh truyền có xu hướng ổn định, và yêu cầu về năng lượng không phải là ràng buộc nghiêm ngặt. Ngược lại, WBAN lại có những đặc thù riêng biệt như quy mô nhỏ, mật độ cảm biến cao, giới hạn nghiêm ngặt về năng lượng và yêu cầu tốc độ truyền tin ổn định. Mô hình CF sử dụng trong luận án là mô hình đã được công bố trong tài liệu [28] và nhiều công trình nghiên cứu liên quan khác, trong đó nhiều AP phân tán cùng phục vụ các thiết bị trên cùng tài nguyên thời gian-tần số thông qua pha huấn luyện, ước lượng kênh và cơ chế kết hợp/điều phối tại CPU. Luận án kế thừa có chọn lọc ý tưởng AP phân tán và xử lý phối hợp của CF như một nền tảng hệ thống để xây dựng bài toán truyền thông WBAN. Vì vậy, luận án không nhận mô hình CF là đóng góp mới. Trên cơ sở mô hình CF đã có, đóng góp của luận án tập trung vào việc đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới là TTC và TWC nhằm phù hợp hơn với đặc thù của cảm biến WBAN về giới hạn năng lượng và yêu cầu thông lượng tối thiểu.

Điểm khác biệt chính của mô hình truyền thông WBAN đa kết nối so với mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối là: tại một thời điểm, tất cả cảm biến đồng thời được phục vụ bởi nhiều AP, khai thác khả năng hợp tác của các AP để tăng cường hiệu quả phân tập không gian và nâng cao hiệu suất truyền dữ liệu. Tuy nhiên, đặc điểm này cũng kéo theo một số thách thức,

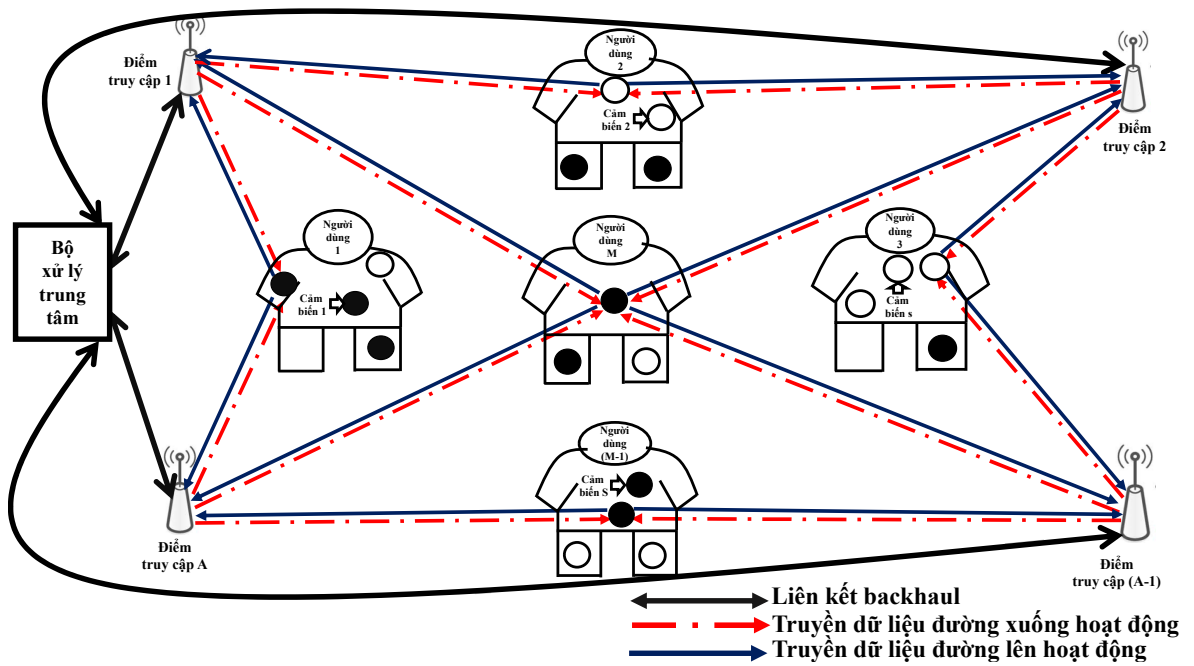
bao gồm: gia tăng tiêu thụ năng lượng do cảm biến cần duy trì nhiều liên kết đồng thời; sự dao động mạnh về thông lượng do ảnh hưởng của pha-đỉnh không đồng bộ giữa các đường truyền; và việc các thuật toán điều khiển công suất truyền thống gặp khó khăn trong việc thích ứng với môi trường mạng có tính biến động cao. Để giải quyết những thách thức trên, luận án đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới có tên là TTC và TWC, nhằm hướng đến mục tiêu tiết kiệm năng lượng nhưng vẫn đảm bảo thông lượng truyền tin ổn định cho cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Cụ thể, thuật toán TTC điều chỉnh công suất nhằm tăng số lượng cảm biến có thông lượng đạt một ngưỡng xác định trước, trong khi thuật toán TWC điều chỉnh công suất sao cho tăng số lượng cảm biến có thông lượng nằm trong một khoảng "*cửa sổ*" xác định. Việc kết hợp cả hai thuật toán này giúp đạt được sự cân bằng giữa hai mục tiêu: tiết kiệm năng lượng và đảm bảo thông lượng cho cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

3.2. Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

3.2.1. Mô hình hệ thống

Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối (Hình 3.1) được xây dựng dựa trên cấu trúc tổng thể từ mô hình truyền thông đơn kết nối. Tuy nhiên, điểm khác biệt cốt lõi nằm ở 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. Một điểm khác biệt nữa so với mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối là: Mô hình truyền thông WBAN đa kết nối không chia khe thời gian, tất cả cảm biến có thể phát đồng thời, và mỗi cảm biến có thể được phục vụ bởi nhiều AP cùng lúc. Tín hiệu truyền từ các cảm biến đến các AP, sau đó AP thu, xử lý sơ bộ rồi chuyển đến CPU. CPU thu nhận, xử lý, phân tích và tổng hợp, khai thác phân tập không gian để giảm ảnh hưởng của pha-đỉnh/shadowing cục bộ, bảo đảm hệ thống vận hành ổn định và hiệu quả. Quá trình ước lượng kênh trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối vẫn tuân theo nguyên tắc tương tự như trong mô hình truyền thông đơn kết nối và được trình bày chi tiết tại Phụ lục **P1**.

Trong các hệ thống vô tuyến hiện đại như WBAN, nhiễu do truy cập đa người dùng (MAI: *Multiple Access Interference*) là hiện tượng không thể loại



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

bỏ hoàn toàn do đặc điểm chia sẻ tài nguyên phổ giữa nhiều thiết bị. Trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, hệ thống không sử dụng các kỹ thuật đa truy cập phân tách tài nguyên truyền thông như TDMA, đa truy cập phân chia theo tần số trực giao (OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) hoặc đa truy cập phân chia theo mã (CDMA: *Code Division Multiple Access*), mà cho phép các cảm biến và AP đồng thời truyền và nhận dữ liệu trên cùng miền thời gian tần số. Do đó, MAI là thành phần nhiều yếu tố trong hệ thống. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, hệ thống không đặt mục tiêu triệt tiêu hoàn toàn MAI, mà tập trung vào việc kiểm soát ảnh hưởng của MAI thông qua các thuật toán điều khiển công suất. Tính hợp lý của cách tiếp cận này được xem xét thông qua các chỉ tiêu SINR, tốc độ truyền dữ liệu và thông lượng cảm biến trong điều kiện MAI vẫn tồn tại. Cần lưu ý rằng SINR và thông lượng chỉ phản ánh ảnh hưởng của MAI ở mức hiệu năng truyền tin, chưa đánh giá trực tiếp độ tin cậy dữ liệu theo nghĩa lỗi bit hoặc lỗi gói. Trong phạm vi luận án, tác động của MAI còn dư được xem xét gián tiếp thông qua biểu thức SINR và các kết quả CDF thông lượng; luận án chưa tách riêng thành chỉ tiêu định lượng độc lập về công suất MAI. Để đánh giá trực tiếp hơn độ tin cậy dữ liệu trong các ứng dụng WBAN

theo dõi sức khỏe, BER là một chỉ tiêu cần thiết. Tuy nhiên, việc đánh giá BER phụ thuộc vào nhiều yếu tố bổ sung như sơ đồ điều chế, mã hóa kênh, phương pháp giải mã, cơ chế phát lại và cấu trúc gói tin. Vì vậy, trong phạm vi nghiên cứu hiện tại, luận án chưa thực hiện đánh giá BER mà xác định nội dung này là một hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm lượng hóa đầy đủ hơn ảnh hưởng của MAI còn dư đến độ tin cậy dữ liệu của mô hình truyền thông WBAN đề xuất.

Các biểu thức mô hình tín hiệu và công thức đánh giá tốc độ trong tiểu mục này được kế thừa từ khuôn khổ phân tích CF trong [28]. Luận án sử dụng các biểu thức này như cơ sở lý thuyết nền tảng để xây dựng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với các giả thiết, ký hiệu và cơ chế điều phối phù hợp với hệ thống cảm biến gắn trên bề mặt cơ thể. Vì vậy, luận án không xem phần mô hình phân tích cơ sở này là đóng góp mới; đóng góp của luận án tập trung ở việc xây dựng bài toán phù hợp với bối cảnh WBAN và phát triển các thuật toán điều khiển công suất ở các mục tiếp theo.

a. Truyền dữ liệu đường lên

Trong pha đường lên, nhiều cảm biến có thể đồng thời truyền dữ liệu trên cùng tài nguyên thời gian–tần số. Khi đó, mỗi AP phân tán thu một tín hiệu tổng hợp từ các cảm biến và nhiễu Gauss. Dựa trên CSI ước lượng trong pha huấn luyện, mỗi AP áp dụng bộ kết hợp tuyến tính theo hướng kênh (*matched filtering/conjugate combining*) để xử lý sơ bộ tín hiệu thu và tạo các thống kê đủ dùng tương ứng với từng cảm biến. Các thống kê này sau đó được chuyển về CPU thông qua liên kết backhaul. Tại CPU, việc đánh giá SINR và tốc độ truyền dữ liệu được thực hiện theo phương pháp sử dụng rồi bỏ qua ước lượng kênh (*use-and-then-forget*), trong đó ước lượng kênh chỉ được sử dụng để thiết kế bộ kết hợp tại AP, còn khi tính toán hiệu năng, CPU không giả định biết kênh tức thời chính xác mà chỉ khai thác các đặc trưng thống kê của kênh. Cách tiếp cận này cho phép thu được cận dưới chặt của hiệu năng hệ thống trong khi vẫn phù hợp với điều kiện triển khai thực tế của WBAN, nơi việc nắm giữ CSI tức thời hoàn hảo tại CPU là không khả thi.

Trước khi truyền, cảm biến s nhân ký hiệu dữ liệu $q_{u,s}$ (với $\mathbb{E}\{|q_{u,s}|^2\} = 1$) bởi hệ số điều khiển công suất $\sqrt{\alpha_s}$, $0 < \alpha_s \leq 1$. Tín hiệu nhận được tại AP

thứ a được cho bởi:

$$y_u^a = \sqrt{\rho^u} \sum_{s=1}^S g_{as} \sqrt{\alpha_s} q_{u,s} + w_u^a. \quad (3.1)$$

Từ tín hiệu thu, AP tạo thống kê tương ứng với cảm biến s bằng phép nhân liên hợp với $\hat{g}_{as}$ và chuyển về CPU; khi tổng hợp đóng góp từ A AP, CPU thu được tín hiệu quan sát r_u^s như sau:

$$r_u^s = \sum_{s'=1}^S \sum_{a=1}^A \sqrt{\rho^u} \alpha_{s'}^{1/2} \hat{g}_{as}^* g_{as'} q_{u,s'} + \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* w_u^a. \quad (3.2)$$

Để thiết lập biểu thức tốc độ dưới giả thiết CPU chỉ khai thác CSI thống kê, tín hiệu r_u^s được phân rã thành các nhóm thành phần đại diện cho: (i) phần tín hiệu hữu ích trung bình, (ii) nhiễu do sai số ước lượng kênh, (iii) can nhiễu từ các cảm biến còn lại, và (iv) nhiễu Gauss sau kết hợp. Cụ thể, các thành phần này được mô tả như sau:

$$r_u^s = \text{DD}_{u,s} \cdot q_{u,s} + \text{BB}_{u,s} \cdot q_{u,s} + \sum_{s' \neq s}^S \text{UU}_{u,s'} + \text{NN}_{u,s}, \quad (3.3)$$

trong đó,

$$\text{DD}_{u,s} \triangleq \sqrt{\rho^u \alpha_s} \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* g_{as} \right\}, \quad (3.4)$$

$$\text{BB}_{u,s} \triangleq \sqrt{\rho^u \alpha_s} \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* g_{as} - \text{DD}_{u,s}, \quad (3.5)$$

$$\text{UU}_{u,s'} \triangleq \sqrt{\rho^u \alpha_{s'}} \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as'}^* g_{as'}, \quad (3.6)$$

$$\text{NN}_{u,s} \triangleq \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* w_u^a. \quad (3.7)$$

Từ đó, tốc độ đường lên của cảm biến s được xác định theo (3.8) và đưa về dạng tường minh (3.9); các bước biến đổi chi tiết được trình bày tại Phụ lục **P2**.

$$R_u^s = \log_2 \left(1 + \frac{|\text{DD}_{u,s}|^2}{\mathbb{E}\{|\text{BB}_{u,s}|^2\} + \sum_{s' \neq s}^S \mathbb{E}\{|\text{UU}_{u,s'}|^2\} + \mathbb{E}\{|\text{NN}_{u,s}|^2\}} \right). \quad (3.8)$$

$$R_u^s = \log_2 \left(1 + \frac{\rho^u \alpha_s \left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \right)^2}{\rho^u \sum_{s' \neq s}^S \alpha_{s'} \left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \frac{\beta_{as'}}{\beta_{as}} \right)^2 + |\phi_s^H \phi_{s'}|^2 + \rho^u \sum_{s'=1}^S \alpha_{s'} \sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \beta_{as'} + \sum_{a=1}^A \chi_{m,as}} \right). \quad (3.9)$$

Trường hợp kênh truyền ổn định, thông lượng của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường lên được tính toán thông qua biểu thức sau [28]:

$$T_{u,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c}}{2} R_u^s. \quad (3.10)$$

Trường hợp kênh biến đổi nhanh, công thức tính thông lượng của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường lên của hệ thống thay đổi thành [28]:

$$T_{u,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl} + \tau_d^{hl}}{\tau^c}}{2} R_u^s. \quad (3.11)$$

b. Truyền dữ liệu đường xuống

Trong pha đường xuống, CPU phân phối các ký hiệu dữ liệu tới các AP qua backhaul; các AP phát xuống các cảm biến dựa trên CSI ước lượng. Để giảm độ phức tạp tại AP, luận án sử dụng định dạng bó sóng liên hợp (CB: *Conjugate Beamforming*), theo đó mỗi AP nhân ký hiệu dữ liệu với liên hợp của ước lượng kênh tương ứng. Do CSI chỉ là ước lượng và hệ thống phát đa người dùng, tín hiệu thu tại mỗi cảm biến bao gồm thành phần mong muốn, phần nhiễu do bất định chùm tia (sai số ước lượng kênh), phần can nhiễu do các luồng dành cho cảm biến khác và nhiễu Gauss.

Tín hiệu phát tại AP a được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{x}_a = \sqrt{\rho^d} \sum_{s=1}^S \alpha_{as}^{1/2} \hat{g}_{as}^* q_{d,s}. \quad (3.12)$$

Điều kiện ràng buộc công suất tại mỗi AP được mô tả bởi biểu thức [28]:

$$\mathbb{E}\{|\mathbf{x}_a|^2\} \leq \rho^d. \quad (3.13)$$

Điều kiện (3.13) có thể được thể hiện dưới dạng biểu thức sau:

$$\sum_{s=1}^S \alpha_{as} \chi_{m,as} \leq 1, \text{ đối với mọi } a. \quad (3.14)$$

Tín hiệu thu tại cảm biến s được xác định bởi:

$$r_d^s = \sum_{a=1}^A g_{as} x_a + w_d^s = \sqrt{\rho^d} \sum_{a=1}^A \sum_{s'=1}^S \alpha_{as'}^{1/2} g_{as} \hat{g}_{as'}^* q_{d,s'} + w_d^s. \quad (3.15)$$

Dựa trên phương pháp đánh giá hiệu năng theo CSI thống kê (*use-and-then-forget*), tốc độ truyền dữ liệu đường xuống của cảm biến s được dẫn xuất dưới dạng đóng như trong (3.16); các bước biến đổi toán học chi tiết được trình bày tại Phụ lục **P3**.

$$R_d^s = \log_2 \left(1 + \frac{\rho^d \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} \chi_{m,as} \right)^2}{\rho^d \sum_{s' \neq s}^S \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as}}{\beta_{as'}} \right)^2 |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 + \rho^d \sum_{s'=1}^S \sum_{a=1}^A \alpha_{as'} \chi_{m,as'} \beta_{as} + 1} \right). \quad (3.16)$$

Trường hợp kênh truyền ổn định, thông lượng của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường xuống được tính toán thông qua biểu thức sau [28]:

$$T_{d,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl}}{\tau^c}}{2} R_d^s. \quad (3.17)$$

Trường hợp kênh biến đổi nhanh, công thức tính thông lượng của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường xuống của hệ thống thay đổi thành [28]:

$$T_{d,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{hl} + \tau_d^{hl}}{\tau^c}}{2} R_d^s. \quad (3.18)$$

c. Điều khiển công suất cân bằng thông lượng

Trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, việc duy trì kết nối ổn định giữa các cảm biến và các AP là một thách thức lớn do ảnh hưởng của nhiễu giữa các cảm biến. Nhằm giải quyết vấn đề này, luận án áp dụng thuật toán điều khiển công suất với mục tiêu tăng cường tín hiệu hữu ích đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu, qua đó duy trì thông lượng đồng đều cho tất cả các cảm biến. Trọng tâm của thuật toán điều khiển công suất được áp dụng là dựa trên nguyên lý của thuật toán MMC [28], với mục tiêu tối đa hóa giá trị tối thiểu của SINR trong toàn hệ thống. Cách tiếp cận này đảm bảo rằng tất cả các cảm biến và tất cả các AP đều đạt được mức SINR đồng

đều, qua đó thông lượng được phân phối công bằng. Trên cơ sở đó, mô hình truyền thông WBAN đa kết nối kết hợp với thuật toán MMC được phát triển dưới tên gọi "*Điều khiển công suất cân bằng thông lượng*" (TEC: *Throughput Equalization Power Control*). Mô hình TEC được thiết kế như một phiên bản mở rộng của thuật toán MMC, trong đó vẫn duy trì nguyên lý cốt lõi là tối đa hóa giá trị tối thiểu của SINR, nhưng được điều chỉnh nhằm tăng cường khả năng cân bằng thông lượng giữa các cảm biến.

- Điều khiển công suất đường xuống:

Trong giai đoạn truyền dữ liệu đường xuống, mục tiêu của mô hình TEC là xác định giá trị tối ưu cho các hệ số điều khiển công suất α_{as} , nhằm đảm bảo tốc độ truyền dữ liệu đồng đều cho tất cả các cảm biến, đồng thời vẫn thỏa mãn các ràng buộc về công suất được định nghĩa trong biểu thức (3.14). Tại nghiệm tối ưu của bài toán, mỗi cảm biến sẽ đạt được tốc độ truyền dữ liệu như nhau. Mô hình toán học chi tiết được trình bày như sau [28]:

$$\begin{aligned} \max_{\{\alpha_{as}\}} \min_{s=1,\dots,S} R_d^s \\ \text{ràng buộc: } \sum_{s=1}^S \alpha_{as} \chi_{m,as} \leq 1, \quad a = 1, \dots, A, \\ \alpha_{as} > 0, \quad s = 1, \dots, S, \quad a = 1, \dots, A, \end{aligned} \quad (3.19)$$

trong đó, R_d^s được xác định theo biểu thức (3.16). Các bước mô phỏng mô hình TEC được thực hiện tương tự như quy trình trong Hình 2.9 (Mục 2.5.1) và hệ số điều khiển công suất được xác định theo Phụ lục **P4**.

- Điều khiển công suất đường lên:

Mô hình toán học của bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất đường lên được trình bày cụ thể như sau [28]:

$$\begin{aligned} \max_{\{\alpha_s\}} \min_{s=1,\dots,S} R_u^s \\ \text{ràng buộc: } 0 < \alpha_s \leq 1, \quad s = 1, \dots, S, \end{aligned} \quad (3.20)$$

trong đó, R_u^s được xác định theo biểu thức (3.9) và mô hình TEC đường lên có thể được giải quyết tương tự như đường xuống.

Trong phạm vi cấu hình mô phỏng được sử dụng trong luận án, cần lưu ý rằng mô hình truyền thông đang xét được sử dụng như một cấu hình nhiều AP phân tán phù hợp để khảo sát bài toán WBAN đa kết nối. Mặc dù quy

mô hệ thống còn hạn chế, cấu hình này vẫn khác về bản chất với phương án một hub nhiều ăng-ten do các điểm thu được phân tán trong không gian thay vì đồng vị trí. Trong luận án, cấu hình này được sử dụng làm nền cho bài toán điều khiển công suất và phân tích thông lượng của hệ thống trong kiến trúc thu phân tán.

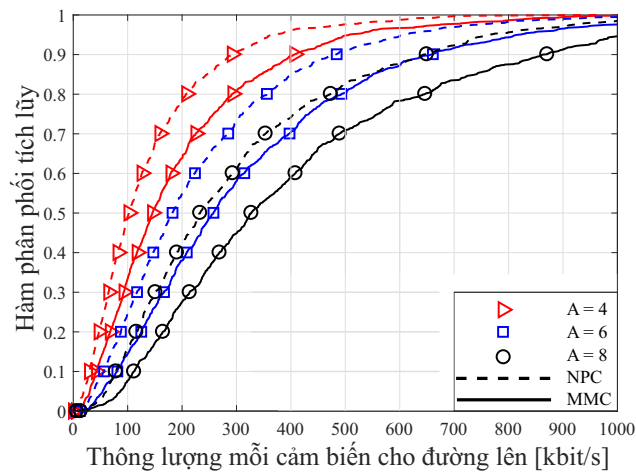
3.2.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Luận án tiến hành mô phỏng nhằm đánh giá hiệu quả của mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, dựa trên tiêu chí thông lượng của mỗi cảm biến. Các tham số thiết lập mô phỏng được trình bày chi tiết trong Bảng 2.3. Do TEC là phiên bản phát triển của MMC, vẫn kế thừa nguyên lý tối đa hóa giá trị tối thiểu của SINR, nên để đảm bảo tính nhất quán trong so sánh và biểu diễn kết quả, các kết quả mô phỏng vẫn được ký hiệu là MMC.

a. Thông lượng mỗi cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

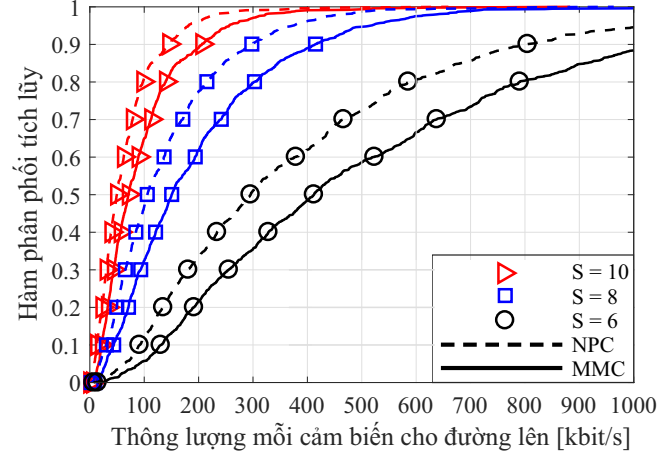
- Truyền dữ liệu đường lên:

+ Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến: Hình 3.2 hiển thị CDF thông lượng cảm biến trong trường hợp $S = 8$ và A là 4, 6, và 8. Khi A tăng, cường độ tín hiệu nhận được ($DD_{u,s}$ trong (3.4)) cũng tăng theo. Kết quả là tốc độ truyền dữ liệu của cảm biến (R_u^s trong (3.9)) được cải thiện, kéo theo sự gia tăng rõ rệt thông lượng cảm biến $T_{u,s}$.



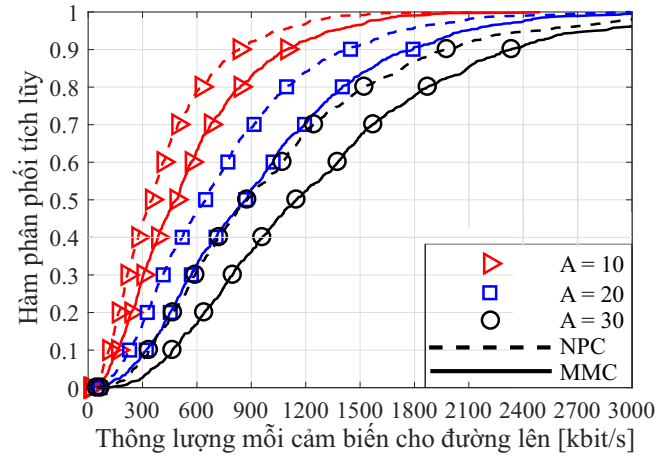
Hình 3.2: Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$.

+ Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng cảm biến: Hình 3.3 hiển thị CDF thông lượng cảm biến trong trường hợp $A = 4$ và S lần lượt là 6, 8, và 10. Khi S giảm, nhiều giữa các cảm biến ($UU_{u,s'}$ trong (3.6)) cũng giảm, từ đó góp phần nâng cao thông lượng của cảm biến.



Hình 3.3: Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $A = 4$.

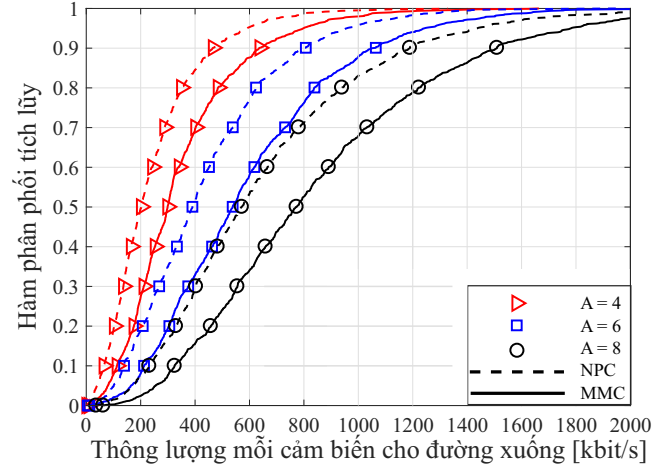
+ Trường hợp tăng dần số lượng AP lên đến mức lớn hơn rất nhiều so với số lượng cảm biến ($A \gg S$): Hình 3.4 hiển thị CDF thông lượng cảm biến trong trường hợp $S = 8$ và A lần lượt là 10, 20, và 30. Ngay cả khi $A \gg S$, thuật toán MMC tiếp tục phát huy hiệu quả, làm cải thiện đáng kể thông lượng cảm biến.



Hình 3.4: Kịch bản tăng dần số AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường lên trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$.

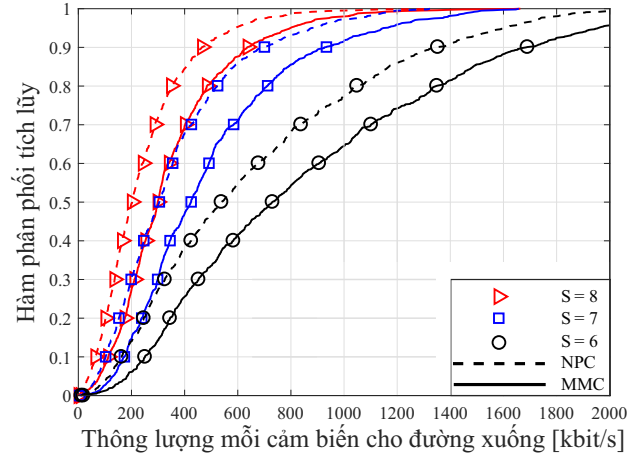
- Truyền dữ liệu đường xuống:

+ Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến: Hình 3.5 hiển thị CDF thông lượng cảm biến khi $S = 8$ và A là 4, 6 và 8. Khi A tăng, $DD_{d,s}$ tăng dẫn đến tăng R_d^s , góp phần nâng cao thông lượng cảm biến.



Hình 3.5: Ảnh hưởng của số lượng AP đến thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$.

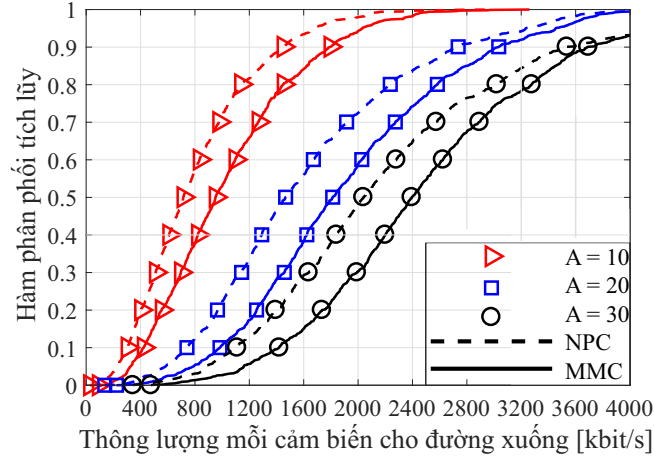
+ Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng cảm biến: Hình 3.6 hiển thị CDF thông lượng cảm biến khi $A = 4$ và S lần lượt là 6, 7, và 8. Giảm S giúp giảm nhiễu giữa các cảm biến góp phần cải thiện thông lượng.



Hình 3.6: Ảnh hưởng của số lượng cảm biến đến thông lượng khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $A = 4$.

+ Trường hợp tăng dần số AP lên đến mức lớn hơn rất nhiều so với số cảm biến ($A \gg S$): Hình 3.7 hiển thị CDF thông lượng cảm biến trong trường

hợp $S = 8$ và A lần lượt là 10, 20, và 30. Tương tự đường lên, khi $A \gg S$, MMC vẫn tốt hơn NPC.

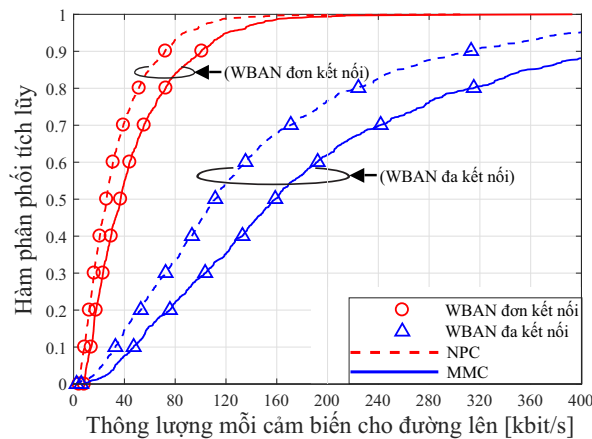


Hình 3.7: Kịch bản tăng dần số AP từ $A > S$ đến $A \gg S$ khi truyền dữ liệu đường xuống trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối với $S = 8$.

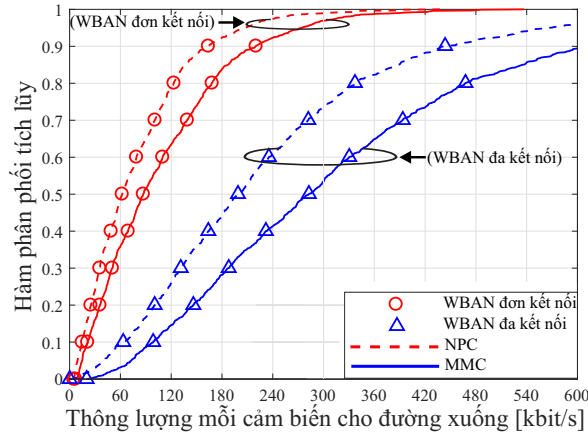
Kết quả mô phỏng từ Hình 3.2 đến Hình 3.7 cũng cho thấy thông lượng cảm biến trong trường hợp áp dụng thuật toán điều khiển công suất MMC luôn cao hơn so với trường hợp NPC.

b. So sánh WBAN đa kết nối với WBAN đơn kết nối

- Hình 3.8 và Hình 3.9 hiển thị CDF thông lượng cảm biến của hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối, với $A = 4$, $S = 8$ trong cả hai kịch bản truyền dữ liệu đường lên và đường xuống.



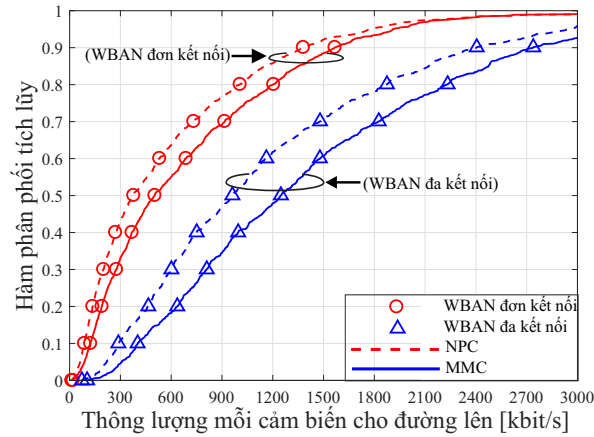
Hình 3.8: So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 4$, $S = 8$.



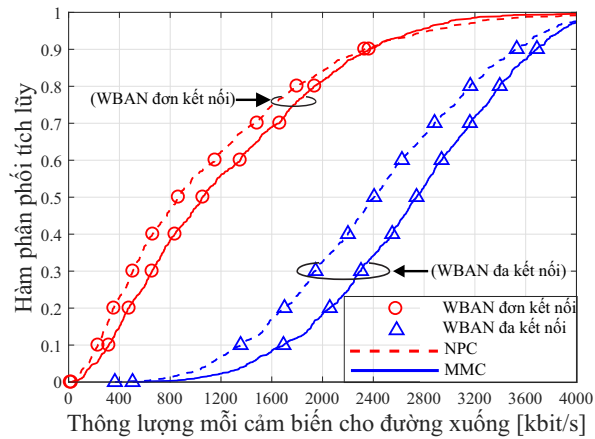
Hình 3.9: So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 4$, $S = 8$.

Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình truyền thông WBAN đa kết nối đạt thông lượng cảm biến cao hơn đáng kể so với mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối trong cả hai trường hợp có và không điều khiển công suất. Trong khi mô hình 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 cải thiện độ ổn định liên kết nhờ khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa các AP.

- Hình 3.10 và Hình 3.11 hiển thị CDF thông lượng cảm biến với $A = 5$ và $S = 4$ trong cả hai kịch bản truyền dữ liệu đường lên và đường xuống.



Hình 3.10: So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 5$, $S = 4$.

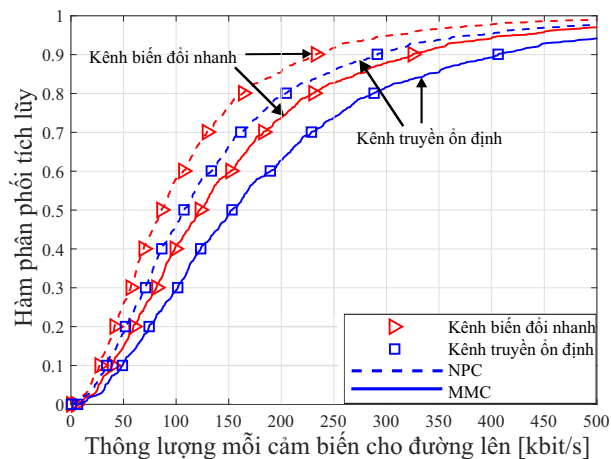


Hình 3.11: So sánh thông lượng cảm biến khi truyền dữ liệu đường xuống giữa hai mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và đa kết nối với $A = 5, S = 4$.

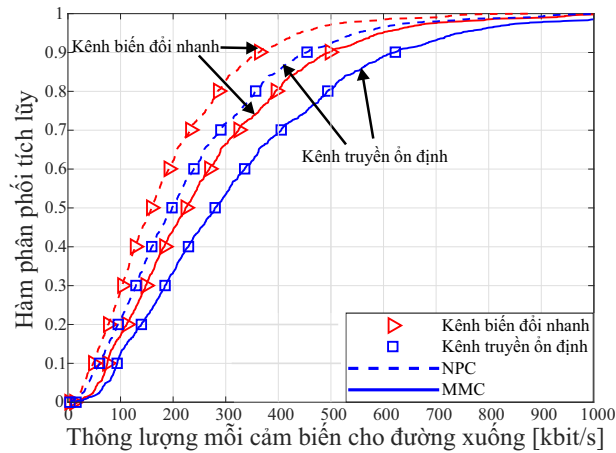
Khi số lượng AP nhiều hơn số lượng cảm biến, mỗi cảm biến có thể kết nối với nhiều AP cùng lúc, giúp cải thiện thông lượng. Nếu một vài AP gặp sự cố, các cảm biến vẫn có thể truyền dữ liệu đến các AP khác, tránh gián đoạn trong quá trình hoạt động.

c. So sánh hai trường hợp kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh

Kết quả mô phỏng trên Hình 3.12 và Hình 3.13 cho thấy, thông lượng trên mỗi cảm biến khi truyền dữ liệu đường lên và đường xuống trong trường hợp kênh truyền ổn định luôn tốt hơn trường hợp kênh biến đổi nhanh cả khi NPC và khi áp dụng MMC.



Hình 3.12: So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh mô hình truyền thông WBAN đa kết nối khi truyền dữ liệu đường lên với $A = 4, S = 8$.



Hình 3.13: So sánh kênh truyền ổn định và biến đổi nhanh mô hình truyền thông WBAN đa kết nối khi truyền dữ liệu đường xuống với $A = 4$, $S = 8$.

3.2.3. Kết luận Vấn đề nghiên cứu 3.2

Luận án đề xuất áp dụng mô hình truyền thông WBAN đa kết nối kết hợp thuật toán MMC và tiến hành so sánh thông lượng cảm biến giữa hai mô hình truyền thông đa kết nối và đơn kết nối. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình truyền thông đa kết nối đạt thông lượng truyền tin cao hơn mô hình truyền thông đơn kết nối. Đặc biệt, việc áp dụng thuật toán MMC đã cải thiện đáng kể thông lượng của cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, so với trường hợp NPC. Tuy nhiên, trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối khi triển khai đồng thời nhiều AP để phục vụ nhiều cảm biến đặt ra những thách thức đáng kể về tải trọng hệ thống và năng lượng tiêu thụ. Điều này khiến một số cảm biến tiêu tốn nhiều năng lượng trong quá trình truyền dữ liệu, làm giảm đáng kể tuổi thọ của chúng và ảnh hưởng đến thời gian hoạt động tổng thể của hệ thống. Vì vậy, cần tập trung nghiên cứu và phát triển các thuật toán điều khiển công suất tiên tiến nhằm tiết kiệm năng lượng cho cảm biến. Các giải pháp này sẽ giúp kéo dài tuổi thọ cảm biến, đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định trong thời gian dài, đồng thời đảm bảo thông lượng cần thiết cho các ứng dụng quan trọng. Thuật toán điều khiển công suất luận án đề xuất tập trung vào tiết kiệm năng lượng trong khi vẫn đảm bảo thông lượng, khác biệt hoàn toàn so với các thuật toán khác chỉ đơn thuần nâng cao thông lượng. Vấn đề này sẽ được tiếp tục được phân tích, làm rõ và giải quyết trong Mục 3.3.

3.3. Đề xuất thuật toán điều khiển công suất

3.3.1. Động lực nghiên cứu

Hai thuật toán TTC và TWC được luận án đề xuất nhằm giải quyết bài toán điều khiển công suất trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối, xuất phát từ đặc thù của cảm biến có nguồn năng lượng phụ thuộc vào pin, khả năng tính toán hạn chế và khó thu nhận chính xác CSI. Khác với các phương pháp truyền thống như thuật toán MMC trong [42], vốn yêu cầu giải bài toán tối ưu lời toàn cục và phụ thuộc vào CSI chính xác, dẫn đến phức tạp tính toán cho thiết bị đầu cuối, hoặc thuật toán điều khiển công suất theo nguyên lý phân bổ nước thích nghi (WF: *Water-Filling*) [104], chỉ phù hợp trong môi trường kênh ổn định với điều khiển tập trung và do đó không phù hợp với đặc điểm mô hình truyền thông WBAN đa kết nối. Hai thuật toán TTC và TWC sở hữu ưu điểm nổi bật là không đòi hỏi CSI tức thời hoặc chính xác tuyệt đối trong quá trình hoạt động. Thay vì dựa vào CSI, cả hai thuật toán đều khai thác cơ chế phản hồi dựa trên thông lượng, với yêu cầu phản hồi đơn giản, chỉ bao gồm việc xác định trạng thái đạt ngưỡng thông lượng hoặc nằm trong "*cửa sổ*" thông lượng định trước. Cách tiếp cận này không chỉ giúp giảm thiểu gánh nặng xử lý và chi phí truyền tin hai chiều, mà còn đặc biệt phù hợp với các cảm biến trong WBAN vốn có năng lực xử lý và dung lượng pin hạn chế. Việc không phụ thuộc vào CSI giúp TTC và TWC duy trì hiệu quả điều khiển công suất trong điều kiện kênh biến động, góp phần nâng cao tính ổn định và hiệu quả năng lượng cho hệ thống.

Tuy nhiên, các thuật toán TTC và TWC được đề xuất trong luận án không nhằm mục đích thay thế hoàn toàn thuật toán MMC, mà đóng vai trò là giải pháp có tính khả thi cao. Trong thực tế, TTC và TWC hoạt động theo nguyên lý thích nghi: chỉ tăng công suất khi thông lượng thấp hơn ngưỡng và giảm công suất khi thông lượng vượt ngưỡng, qua đó hướng tới tăng số lượng cảm biến có thông lượng đạt mức ngưỡng hoặc nằm trong "*cửa sổ*" ngưỡng. Ngoài ra, cả hai thuật toán được thiết kế theo hướng đơn giản, phù hợp với yêu cầu thực tế của WBAN.

3.3.2. 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 WBAN, 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:

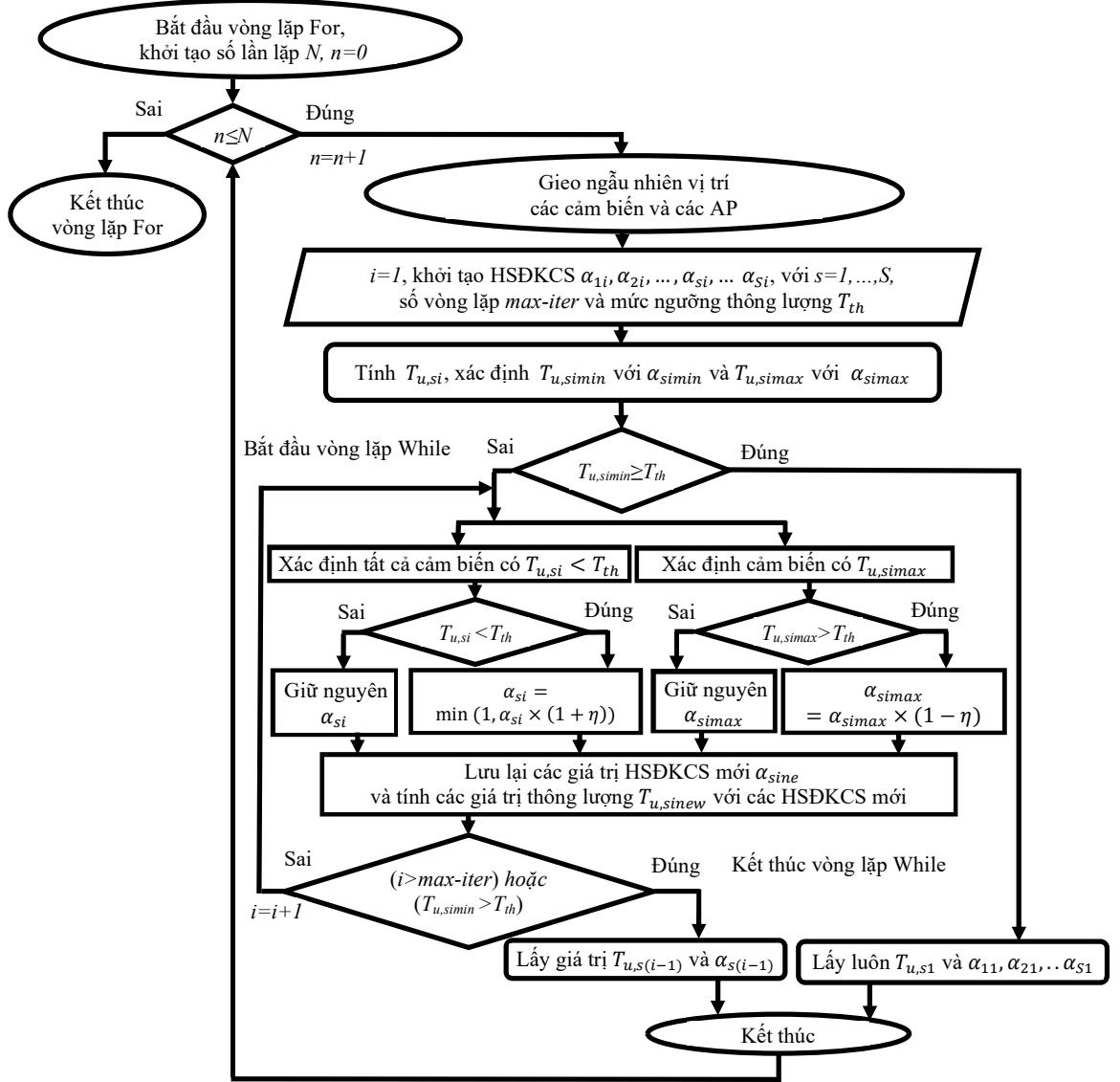
$$T_{u,s} \geq T_{threshold}, \quad (3.21)$$

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. Trong phạm vi luận án này, các mức ngưỡng thông lượng được chọn là các hằng số, phản ánh các yêu cầu phổ biến trong thực tế ứng dụng y tế.

Nguyên lý cốt lõi của thuật toán TTC là duy trì thông lượng của cảm biến ở mức đủ để đảm bảo hiệu suất truyền tin, trong khi vẫn tiết kiệm năng lượng. Để đạt được mục tiêu trên, thuật toán TTC điều chỉnh công suất phát của từng cảm biến theo quy tắc sau: Các cảm biến có thông lượng thấp hơn mức ngưỡng yêu cầu sẽ được tăng công suất phát thêm một lượng η , trong khi các cảm biến có thông lượng vượt ngưỡng sẽ được giảm công suất phát một lượng η . Quá trình điều chỉnh này được lặp lại cho đến khi tất cả cảm biến đạt ngưỡng thông lượng yêu cầu $T_{threshold}$ hoặc số vòng lặp đạt tới giới hạn định trước. Các bước thực hiện thuật toán TTC được trình bày trong lưu đồ trên Hình 3.14.

Thuật toán TTC khởi đầu bằng việc thiết lập số lần lặp N cho vòng lặp For, tương ứng với số lần gieo ngẫu nhiên vị trí của các cảm biến và AP. Trong mỗi một lần lặp của vòng For, vòng lặp While được thực thi để điều chỉnh công suất phát của cảm biến. Tại bước khởi tạo, các hệ số điều khiển công suất (HSDKCS) α_{si} , $s=1, \dots, S$, được khởi tạo ngẫu nhiên với điều kiện $0 < \alpha_{si} \leq 1$. Các tham số quan trọng khác bao gồm số lần lặp tối đa (*max-iter*) của vòng While nhằm tránh lặp vô hạn, và mức ngưỡng thông lượng $T_{threshold}$ (T_{th}) cũng được thiết lập từ đầu.

Trong mỗi lần lặp của vòng While, thuật toán tính toán thông lượng của tất cả cảm biến và xác định tập các cảm biến không đạt mức ngưỡng $\mathcal{V}_{TTC} = \{s \mid T_{u,s} < T_{th}\}$. Nếu $\mathcal{V}_{TTC} = \emptyset$ (tức là tất cả cảm biến đều đạt hoặc vượt ngưỡng yêu cầu) hoặc số vòng lặp đạt giới hạn *max-iter*, vòng While sẽ dừng



Hình 3.14: Lưu đồ thuật toán TTC.

và chuyển sang lần gieo vị trí ngẫu nhiên cảm biến và AP tiếp theo trong vòng For. Ngược lại, nếu $\mathcal{V}_{TTC} \neq \emptyset$, thuật toán lựa chọn cảm biến “tệ nhất”, tức là cảm biến có thông lượng thấp nhất so với mức ngưỡng, ký hiệu là s^* , thỏa mãn $s^* = \arg \min_{s \in \mathcal{V}_{TTC}} \frac{T_{u,s}}{T_{th}}$. Công suất phát của cảm biến s^* được điều chỉnh theo bước η , đồng thời thông lượng của toàn hệ thống được cập nhật và tính toán lại. Quá trình này được lặp lại cho đến khi tất cả cảm biến đạt ngưỡng thông lượng yêu cầu hoặc số vòng lặp đạt $max\text{-}iter$. Nếu sau $max\text{-}iter$ vẫn tồn tại cảm biến không đạt T_{th} thuật toán trả về bộ hệ số điều khiển công suất tốt nhất đạt được trong giới hạn lặp, và trường hợp đó được xem

là không khả thi với bộ tham số hiện tại. Khi vòng While kết thúc, hệ thống thu được bộ HSDKCS và thông lượng tương ứng cho từng cảm biến. Sau khi vòng For hoàn tất, các giá trị này được lấy trung bình qua N lần phân bố ngẫu nhiên vị trí của cảm biến và AP, làm cơ sở đánh giá hiệu suất tổng thể và độ ổn định của thuật toán TTC.

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

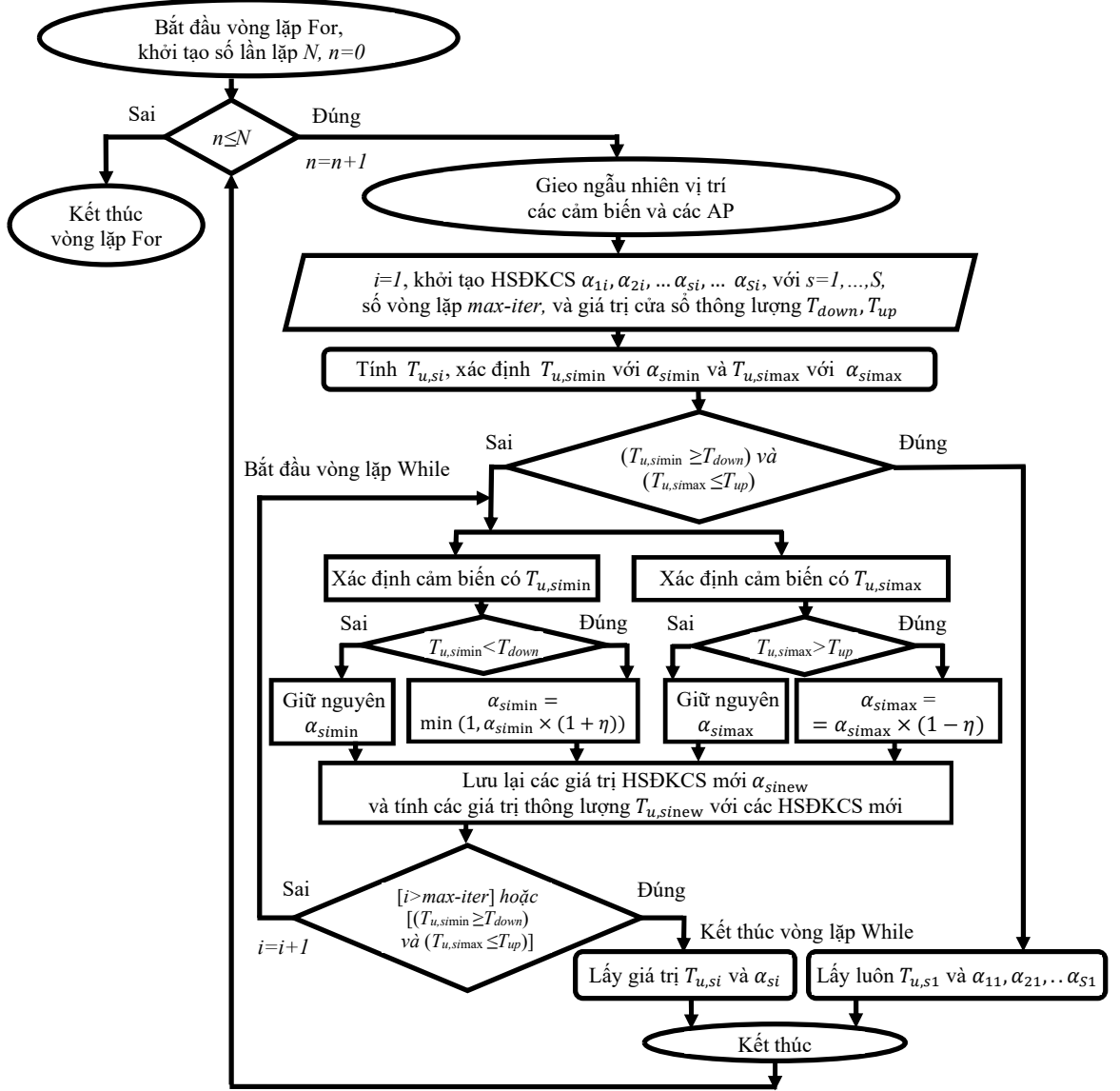
Thuật toán TWC điều chỉnh công suất phát của các cảm biến nhằm cực đại hóa số lượng cảm biến có thông lượng nằm trong một khoảng "cửa sổ" thông lượng được xác định trước. Cách tiếp cận này giúp giới hạn thông lượng ở mức đủ đáp ứng yêu cầu truyền dữ liệu, đồng thời tránh tiêu tốn năng lượng không cần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

$$T_{down} \leq T_{u,s} \leq T_{up}, \quad (3.22)$$

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

Trong thuật toán TWC, cảm biến có thông lượng nhỏ nhất và thấp hơn mức ngưỡng dưới T_{down} sẽ được tăng công suất phát thêm một lượng η . Ngược lại, cảm biến có thông lượng lớn nhất và vượt mức ngưỡng trên T_{up} sẽ bị giảm công suất phát một lượng η . Quá trình điều chỉnh công suất này được lặp lại cho đến khi tất cả các cảm biến đạt thông lượng nằm trong khoảng từ mức ngưỡng dưới đến mức ngưỡng trên hoặc khi số vòng lặp đạt giới hạn tối đa. Để hiện thực hóa nguyên tắc điều khiển trên, thuật toán TWC được triển khai thông qua các bước cụ thể mô tả trong lưu đồ trên Hình 3.15.

Tương tự như thuật toán TTC, thuật toán TWC cũng khởi đầu bằng việc thiết lập số lần lặp N cho vòng lặp For, tương ứng với số lần gieo ngẫu nhiên vị trí của các cảm biến và AP. Trong mỗi một lần lặp của vòng For, vòng lặp While được thực thi để điều chỉnh công suất phát của cảm biến. Tại bước khởi tạo, các hệ số điều khiển công suất (HSDKCS) α_{si} , $s=1, \dots, S$, được khởi tạo ngẫu nhiên với điều kiện $0 < \alpha_{si} \leq 1$. Các tham số quan trọng khác bao gồm số lần lặp tối đa (*max-iter*) của vòng While nhằm tránh lặp vô hạn, và cửa sổ thông lượng $[T_{down}, T_{up}]$ cũng được thiết lập từ đầu. Trong mỗi lần lặp của vòng While, thuật toán tính toán thông lượng của tất cả các cảm



Hình 3.15: Lưu đồ thuật toán TWC.

biến và xác định tập các cảm biến không nằm trong khoảng "cửa sổ" thông lượng: $\mathcal{V}_{TWC} = \{s \mid T_{u,s} < T_{\text{down}} \text{ hoặc } T_{u,s} > T_{\text{up}}\}$. Nếu $\mathcal{V}_{TWC} = \emptyset$ (tức là tất cả cảm biến đều có thông lượng nằm trong khoảng "cửa sổ" $[T_{\text{down}}, T_{\text{up}}]$) hoặc số vòng lặp đạt đến giới hạn max-iter , vòng While dừng và chuyển sang lần gieo vị trí ngẫu nhiên cảm biến và AP tiếp theo trong vòng For. Ngược lại, khi $\mathcal{V}_{TWC} \neq \emptyset$, thuật toán lựa chọn cảm biến có thông lượng thấp hơn mức ngưỡng dưới nhiều nhất hoặc vượt mức ngưỡng trên nhiều nhất, ký hiệu là s^* , thỏa mãn $s^* = \arg \min_{s \in \mathcal{V}_{TWC}} \left\{ \frac{T_{u,s}}{T_{\text{down}}}, \frac{T_{\text{up}}}{T_{u,s}} \right\}$. Sau đó, hệ thống cập nhật công suất phát cho cảm biến s^* : nếu $T_{u,s^*} < T_{\text{down}}$ thì tăng công suất thêm

một bước η ; ngược lại, nếu $T_{u,s^*} > T_{up}$ thì giảm công suất một lượng η . Các giá trị thông lượng được tính toán lại và vòng While tiếp tục cho đến khi điều kiện dừng thỏa mãn. Nếu sau *max-iter* vẫn tồn tại cảm biến không nằm trong "cửa sổ" thông lượng, thuật toán trả về bộ hệ số điều khiển công suất tốt nhất đạt được trong giới hạn lặp, và trường hợp đó được xem là không khả thi với bộ tham số hiện tại

Khi vòng While kết thúc, hệ thống thu được bộ hệ số điều khiển công suất sau quá trình cập nhật lặp. Sau khi hoàn tất vòng lặp For, kết quả được lấy trung bình qua N lần phân bố ngẫu nhiên vị trí cảm biến và AP, cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá hiệu suất và độ ổn định của thuật toán TWC.

Về mặt triển khai thực tế, các thuật toán điều khiển công suất như MMC, TTC và TWC không được thực hiện trực tiếp tại các cảm biến do hạn chế về khả năng tính toán và năng lượng. Thay vào đó, quá trình xử lý tín hiệu và tính toán hệ số điều khiển công suất được thực hiện tại CPU. Các cảm biến chỉ cần cập nhật công suất phát theo hệ số điều khiển được chỉ định, tức là thực hiện một phép nhân đơn giản với giá trị công suất chuẩn. Điều này hoàn toàn phù hợp với năng lực của cảm biến WBAN hiện nay và tương thích với các chuẩn truyền thông y tế phổ biến như IEEE 802.15.6, Bluetooth năng lượng thấp (BLE: *Bluetooth Low Energy*). Như vậy, mức độ phức tạp của các mô hình và thuật toán đề xuất đối với cảm biến là tối thiểu, đảm bảo tính khả thi và đáp ứng yêu cầu thực tiễn trong các ứng dụng theo dõi sức khỏe.

3.3.4. Phân tích một số đặc tính của thuật toán TTC và TWC

a. Điều kiện dừng và xử lý trường hợp không khả thi

Đối với các thuật toán TTC và TWC, số vòng lặp tối đa (*max-iter*) được thiết lập nhằm tránh hiện tượng lặp vô hạn trong quá trình cập nhật hệ số điều khiển công suất. Thuật toán dừng khi thỏa mãn một trong hai điều kiện: các cảm biến đáp ứng điều kiện thông lượng đặt ra hoặc số vòng lặp đạt *max-iter*.

Với TTC, điều kiện dừng khả thi đạt được khi tất cả cảm biến có thông lượng không nhỏ hơn ngưỡng $T_{threshold}$. Khi đó, tập cảm biến chưa đạt ngưỡng thỏa mãn: $\mathcal{V}_{TTC} = \emptyset$.

Với TWC, điều kiện dừng khả thi đạt được khi tất cả cảm biến có thông lượng nằm trong "cửa sổ" $[T_{down}, T_{up}]$. Khi đó, tập cảm biến nằm ngoài "cửa

số" thỏa mãn: $\mathcal{V}_{TWC} = \emptyset$.

Nếu thuật toán đạt *max-iter* vòng lặp nhưng vẫn còn cảm biến chưa thỏa mãn điều kiện thông lượng, thuật toán dừng và trạng thái này được xem là chưa khả thi trong giới hạn vòng lặp cho phép. Trong trường hợp này, bộ hệ số điều khiển công suất tại thời điểm dừng và số lượng cảm biến thỏa mãn điều kiện được ghi nhận để phục vụ đánh giá hiệu năng.

Như vậy, TTC và TWC có điều kiện dừng rõ ràng và không bị lặp vô hạn. Luận án không khẳng định hai thuật toán luôn tìm được nghiệm khả thi trong mọi cấu hình mạng. Thay vào đó, kết quả của thuật toán được hiểu là bộ hệ số điều khiển công suất thu được tại thời điểm dừng, tương ứng với quy tắc cập nhật, miền giá trị của hệ số điều khiển công suất và giới hạn số vòng lặp đã thiết lập.

Pseudo-code bổ sung cho điều kiện dừng và trường hợp không khả thi:

Thuật toán TTC:

- Khởi tạo: $0 < \alpha_{si} \leq 1, \eta, T_{th}, max-iter, i = 1$.
- Trong khi $i < max-iter$:
 - + Tính thông lượng $T_{u,s}$ của tất cả cảm biến;
 - + Xác định tập $\mathcal{V}_{TTC} = \{s \mid T_{u,s} < T_{th}\}$;
 - + Nếu $\mathcal{V}_{TTC} = \emptyset$, dừng thuật toán và ghi nhận trạng thái khả thi;
 - + Nếu $\mathcal{V}_{TTC} \neq \emptyset$, chọn cảm biến cần điều chỉnh công suất theo quy tắc của TTC;
 - + Cập nhật hệ số điều khiển công suất theo bước η , bảo đảm $0 < \alpha_{si} \leq 1$;
 - + Đặt $i = i + 1$;
- Nếu $i = max-iter$ và $\mathcal{V}_{TTC} \neq \emptyset$, dừng thuật toán và ghi nhận trạng thái chưa khả thi trong giới hạn vòng lặp.

Thuật toán TWC:

- Khởi tạo: $0 < \alpha_{si} \leq 1, \eta, [T_{down}, T_{up}], max-iter, i = 1$.
- Trong khi $i < max-iter$:
 - + Tính thông lượng $T_{u,s}$ của tất cả cảm biến;
 - + Xác định tập $\mathcal{V}_{TWC} = \{s \mid T_{u,s} < T_{down} \text{ hoặc } T_{u,s} > T_{up}\}$;
 - + Nếu $\mathcal{V}_{TWC} = \emptyset$, dừng thuật toán và ghi nhận trạng thái khả thi;
 - + Nếu $\mathcal{V}_{TWC} \neq \emptyset$, chọn cảm biến cần điều chỉnh công suất theo quy tắc của TWC;

- + Cập nhật hệ số điều khiển công suất theo bước η , bảo đảm $0 < \alpha_{si} \leq 1$;
- + Đặt $i = i + 1$;
- Nếu $i = \text{max-iter}$ và $\mathcal{V}_{\text{TWC}} \neq \emptyset$, dừng thuật toán và ghi nhận trạng thái chưa khả thi trong giới hạn vòng lặp.

b. Điều kiện hội tụ, dừng hữu hạn và độ phức tạp tính toán

Về bản chất, TTC và TWC là các thuật toán điều khiển công suất dạng lặp, trong đó hệ số điều khiển công suất của cảm biến được cập nhật theo bước η , dựa trên ngưỡng thông lượng đối với TTC hoặc "cửa sổ" thông lượng đối với TWC. Vì vậy, cần làm rõ tính đơn điệu của quá trình cập nhật, điều kiện hội tụ, điều kiện dừng hữu hạn và độ phức tạp của hai thuật toán.

Gọi S là số lượng cảm biến, N là số lần gieo ngẫu nhiên vị trí cảm biến và AP, max-iter là số vòng lặp tối đa trong vòng While. Hệ số điều khiển công suất của cảm biến thứ s tại vòng lặp thứ i được ký hiệu là α_{si} , thỏa mãn: $0 < \alpha_{si} \leq 1, s = 1, 2, \dots, S$.

Hệ số điều khiển công suất được giới hạn trong miền $0 < \alpha_{si} \leq 1$, bước cập nhật η được xác định trước và số vòng lặp tối đa max-iter được thiết lập. Trong đó, miền công suất bị chặn bảo đảm các hệ số cập nhật luôn nằm trong giới hạn cho phép, còn max-iter bảo đảm TTC và TWC kết thúc sau một số vòng lặp hữu hạn. Thuật toán có thể dừng ở trạng thái hội tụ khả thi, khi tất cả cảm biến thỏa mãn yêu cầu thông lượng, hoặc dừng tại max-iter khi vẫn còn cảm biến chưa đáp ứng yêu cầu. Trường hợp thứ hai có thể do số vòng lặp chưa đủ để thuật toán đạt điểm hội tụ hoặc do yêu cầu thông lượng vượt quá khả năng đáp ứng trong miền công suất cho phép.

Cần nhấn mạnh rằng hội tụ trong phạm vi luận án được hiểu theo nghĩa thuật toán đạt trạng thái dừng hữu hạn, không phải hội tụ đơn điệu đến nghiệm tối ưu toàn cục. TTC và TWC là các thuật toán điều khiển công suất dạng lặp heuristic theo ngưỡng hoặc "cửa sổ" thông lượng. Do việc cập nhật công suất của một cảm biến có thể ảnh hưởng đến thông lượng của các cảm biến khác, luận án chưa khẳng định tính đơn điệu của quá trình cập nhật công suất trong mọi cấu hình mạng. Đặc biệt, đối với TWC, quá trình cập nhật có thể diễn ra theo hai hướng: tăng công suất khi thông lượng thấp hơn T_{down} hoặc giảm công suất khi thông lượng vượt quá T_{up} .

Vì vậy, luận án không khẳng định TTC và TWC luôn hội tụ đến nghiệm

tối ưu hoặc nghiệm khả thi đối với mọi cấu hình mạng. Trong trường hợp đạt max-iter vòng lặp nhưng vẫn còn cảm biến chưa thỏa mãn điều kiện, bộ hệ số điều khiển công suất thu được được xem là kết quả tốt nhất trong phạm vi quy tắc cập nhật và số vòng lặp cho phép.

Về độ phức tạp tính toán, tại mỗi vòng lặp While, cả TTC và TWC đều cần tính thông lượng của toàn bộ S cảm biến, xác định tập cảm biến chưa thỏa mãn điều kiện thông lượng và lựa chọn cảm biến cần cập nhật công suất. Các thao tác này có độ phức tạp tuyến tính theo số cảm biến S . Do đó, nếu gọi I_{TTC} và I_{TWC} lần lượt là số vòng lặp While trung bình của TTC và TWC trong một lần gieo vị trí, độ phức tạp tính toán của hai thuật toán trong một lần gieo vị trí được đánh giá xấp xỉ là: $\mathcal{O}(I_{TTC}S)$ đối với TTC, và $\mathcal{O}(I_{TWC}S)$ đối với TWC.

Do quá trình đánh giá được thực hiện qua N lần gieo ngẫu nhiên vị trí cảm biến và AP, độ phức tạp tổng thể của TTC và TWC lần lượt là: $\mathcal{O}(NI_{TTC}S)$ và $\mathcal{O}(NI_{TWC}S)$.

Như vậy, độ phức tạp tính toán của TTC và TWC tăng tuyến tính theo số cảm biến, số vòng lặp cập nhật công suất và số lần gieo ngẫu nhiên vị trí. Hai thuật toán này không yêu cầu giải bài toán tối ưu lồi tại mỗi vòng lặp, không cần huấn luyện mô hình học máy và không cần lưu trữ không gian trạng thái lớn. Do đó, cấu trúc tính toán của TTC và TWC tương đối đơn giản, phù hợp với mục tiêu điều khiển công suất trong hệ thống WBAN.

Về mặt triển khai, quá trình tính toán thông lượng, xác định cảm biến cần điều chỉnh và cập nhật HSDKCS được thực hiện tại CPU. Các cảm biến không cần thực hiện quá trình tối ưu hoặc tính toán lặp phức tạp, mà chỉ cập nhật công suất phát theo hệ số điều khiển được CPU chỉ định. Vì vậy, độ phức tạp tính toán đặt lên cảm biến là thấp, phù hợp với đặc điểm của các thiết bị WBAN có tài nguyên năng lượng và khả năng xử lý hạn chế.

Cần lưu ý rằng phân tích trên đánh giá độ phức tạp ở mức bậc thuật toán và làm rõ điều kiện dừng hữu hạn của TTC và TWC. Việc đo số vòng lặp trung bình trên nhiều cấu hình mạng, thời gian chạy thực nghiệm và chi phí triển khai phần cứng cụ thể sẽ được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo.

c. Ảnh hưởng của ngưỡng thông lượng

Trong các thuật toán TTC và TWC, ngưỡng thông lượng là tham số đầu

vào biểu diễn yêu cầu chất lượng dịch vụ của ứng dụng, không phải là hằng số cố định thuộc cấu trúc thuật toán. Giá trị ngưỡng là dữ liệu cấu hình, không phải tham số được mã hóa cố định trong thuật toán. Trong từng kịch bản mô phỏng của luận án, các giá trị ngưỡng được giữ cố định nhằm bảo đảm cơ sở thống nhất khi đánh giá và so sánh các thuật toán.

Các giá trị ngưỡng được lựa chọn trên cơ sở tham khảo các mức tốc độ dữ liệu và nhóm ứng dụng được đề cập trong IEEE 802.15.6, kết hợp với yêu cầu của một số ứng dụng WBAN điển hình. Những giá trị này chỉ là các trường hợp khảo sát minh họa, không phải ngưỡng bắt buộc hoặc duy nhất đối với mọi mô hình WBAN.

Về nguyên lý, TTC có thể hoạt động với các giá trị T_{th} khác nhau, còn TWC có thể hoạt động với các “*cửa sổ*” $[T_{down}, T_{up}]$ khác nhau. Khi thay đổi các mức ngưỡng, cấu trúc và trình tự thực hiện của thuật toán không thay đổi; thuật toán vẫn tính toán thông lượng đạt được, so sánh với giá trị ngưỡng đã cấu hình và điều chỉnh công suất phát theo quy tắc tương ứng.

Trong triển khai thực tế, các giá trị ngưỡng sẽ được cụ thể hóa theo loại cảm biến, loại dữ liệu y tế, chu kỳ cập nhật, mức độ ưu tiên và yêu cầu chất lượng dịch vụ. Việc cấu hình có thể được thực hiện bởi nhà sản xuất thiết bị hoặc đơn vị vận hành hệ thống. Vì vậy, các thuật toán TTC và TWC hoàn toàn có thể áp dụng với các ngưỡng khác nhau tùy theo từng thiết bị và ứng dụng cụ thể.

Trong phạm vi luận án, NCS mới thực hiện phân tích định tính ảnh hưởng của ngưỡng đến thông lượng, công suất phát và hiệu quả năng lượng; chưa thực hiện phân tích độ nhạy định lượng bằng cách quét một tập lớn các giá trị ngưỡng. Việc xây dựng cơ chế điều chỉnh ngưỡng động theo trạng thái bệnh nhân, điều kiện kênh truyền, mức năng lượng còn lại hoặc mức ưu tiên dữ liệu được xác định là hướng nghiên cứu tiếp theo.

3.4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

3.4.1. Kịch bản mô phỏng

Trong kịch bản mô phỏng, A AP và S cảm biến được bố trí ngẫu nhiên trong một phòng điều trị có diện tích D m². Quá trình mô phỏng 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, vòng While thực hiện tối 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. Các tham số thiết lập chi tiết cho quá trình mô phỏng được trình bày trong Bảng 3.1.

Bảng 3.1: Tham số mô phỏng cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

Tham số	Giá trị
Tần số (f); Băng thông (B)	4,5 GHz; 10 MHz
Số lượng AP (A); Số lượng cảm biến (S)	3, 4, 5; 8, 10, 12
Công suất phát tối đa của cảm biến ($P_{\max}$)	1 mW
Tỷ lệ điều chỉnh HSDKCS (η)	1%, 5%, 10%
TTC: $T_{threshold}$ [kbit/s]	10, 30, 50
TWC: T_{down}, T_{up} [kbit/s]	10, 20; 30, 45; 50, 75
Độ cao của AP (H_b)	2,5 m
Độ cao cảm biến (H_m)	$0,2 \text{ m} \leq H_m \leq 1,7 \text{ m}$
Diện tích của căn phòng (D)	$50 \text{ m}^2, 100 \text{ m}^2, 200 \text{ m}^2$

Để làm rõ sự khác biệt về hiệu quả giữa các thuật toán điều khiển công suất, ngoài việc sử dụng biểu đồ CDF để phân tích thông lượng từng cảm biến, luận án còn sử dụng biểu đồ cột để trực quan hóa hiệu quả sử dụng năng lượng và mức công suất tiêu thụ của các cảm biến. Hiệu quả sử dụng năng lượng được định nghĩa là tỷ lệ giữa thông lượng đạt được và công suất tiêu thụ, phản ánh mức độ hiệu quả của hệ thống trong việc sử dụng năng lượng để truyền tin. Công suất tiêu thụ tại mỗi cảm biến bao gồm hai thành phần chính là công suất phát và công suất tiêu thụ trên mạch. Trong phạm vi luận án, công suất mạch được giả thiết là hằng số và giống nhau giữa các thuật toán so sánh. Do đó, để làm nổi bật tác động của điều khiển công suất, luận án tập trung đánh giá thành phần công suất phát trung bình của cảm biến. Vì vậy, chỉ tiêu EE trong mô phỏng được hiểu là hiệu quả sử dụng năng lượng tương đối theo thành phần công suất phát, không phải đánh giá đầy đủ toàn bộ công suất phần cứng của thiết bị.

Việc lựa chọn các mức ngưỡng thông lượng trong kịch bản mô phỏng được thiết lập dựa trên cơ sở: Theo chuẩn IEEE 802.15.6, các cảm biến trong WBAN thường yêu cầu thông lượng truyền dữ liệu nằm trong khoảng từ 10

kbit/s đến 100 kbit/s, trong đó mức thông lượng phổ biến từ 10 kbit/s đến 70 kbit/s cho các ứng dụng y tế cơ bản. Dải ứng dụng của WBAN rất rộng, bao gồm cả lĩnh vực y tế và phi y tế. Trong lĩnh vực y tế, các ứng dụng điển hình bao gồm: theo dõi điện tâm đồ, điện cơ đồ, điện não đồ, huyết áp, mức đường huyết, nội soi viên nang và hỗ trợ thị lực với võng mạc nhân tạo. Trong lĩnh vực phi y tế, các ứng dụng tiêu biểu gồm: theo dõi hoạt động thể chất, các hệ thống trò chơi tương tác, mạng xã hội, và các ứng dụng truyền thông đa phương tiện. Thông lượng yêu cầu cho từng ứng dụng rất khác nhau. Một số ứng dụng chỉ cần thông lượng rất thấp, ví dụ: theo dõi thân nhiệt (2,4 bit/s), nhịp tim (48 bit/s) hoặc tần số thở (240 bit/s) [36]. Ngược lại, các ứng dụng yêu cầu thông lượng trung bình hoặc cao hơn như: điện não đồ (6 kbit/s), cảm biến chuyển động (4,8 kbit/s), giọng nói (100 kbit/s) [36], điện tâm đồ (12 kbit/s) [105], điện cơ đồ (320 kbit/s) [106].

Các mức thông lượng 10, 30 và 50 kbit/s được lựa chọn trên cơ sở khảo sát yêu cầu tốc độ dữ liệu của các cảm biến và ứng dụng y tế trong WBAN tại [36, 105, 106]. Theo đó, yêu cầu dữ liệu dao động từ vài bit/s đối với cảm biến thân nhiệt, nhịp tim, nhịp thở đến hàng trăm kbit/s đối với tín hiệu giọng nói và điện cơ đồ. Trong miền yêu cầu thực tế này, mức 10 kbit/s gần với nhóm cảm biến chuyển động, điện não đồ và điện tâm đồ; các mức 30 và 50 kbit/s là những điểm khảo sát trung gian, đại diện cho yêu cầu thông lượng tăng dần. Việc lựa chọn các mức trên nhằm đánh giá ảnh hưởng của yêu cầu thông lượng đến khả năng đáp ứng ngưỡng, công suất phát và hiệu quả năng lượng của TTC và TWC, không hàm ý mỗi mức tương ứng cố định với một loại cảm biến cụ thể.

Tỷ lệ điều chỉnh hệ số điều khiển công suất, ký hiệu là η , được lựa chọn dựa trên nguyên tắc cân bằng độ giữa tốc độ đưa thông lượng đến miền yêu cầu và độ ổn định của quá trình cập nhật. Nếu η quá nhỏ, thuật toán có thể cần nhiều vòng lặp hơn để đưa thông lượng của cảm biến về ngưỡng hoặc "cửa sổ" yêu cầu. Ngược lại, nếu η quá lớn, hệ số điều khiển công suất có thể thay đổi mạnh sau mỗi vòng lặp, làm tăng khả năng dao động quanh ngưỡng thông lượng đối với TTC hoặc quanh "cửa sổ" thông lượng đối với TWC.

Trong luận án, ảnh hưởng của η được khảo sát thông qua ba giá trị đại diện: $\eta=1\%$, $\eta=5\%$ và $\eta=10\%$. Trong đó, $\eta=1\%$ đại diện cho bước cập nhật

nhỏ, có xu hướng ổn định hơn nhưng cần nhiều vòng lặp hơn; $\eta=5\%$ đại diện cho mức cập nhật trung gian; và $\eta=10\%$ đại diện cho bước cập nhật lớn hơn, có thể rút ngắn quá trình cập nhật nhưng làm tăng nguy cơ dao động quanh ngưỡng hoặc "cửa sổ" thông lượng. Việc khảo sát ba mức η này nhằm đánh giá ảnh hưởng của hệ số điều chỉnh công suất đến thông lượng, hiệu quả năng lượng và sự cập nhật của các thuật toán TTC và TWC.

Công suất phát tối đa của cảm biến, ký hiệu là $P_{\max}$, được giả định là 1 mW. Lựa chọn này dựa trên hai cơ sở chính: Thứ nhất, xét về tính thực tiễn, theo chuẩn IEEE 802.15.6, công suất phát của cảm biến thường nằm trong khoảng từ 0 dBm đến 10 dBm (tương đương 1 mW đến 10 mW), trong đó mức 1 mW là phổ biến đối với các cảm biến có công suất thấp nhằm tiết kiệm năng lượng và giảm thiểu tác động sinh học [36]. Thứ hai, xét về tính thận trọng trong thiết kế, việc lựa chọn mức 1 mW cho phép đánh giá hiệu quả của thuật toán trong điều kiện công suất bị giới hạn, phù hợp với yêu cầu an toàn cao của các ứng dụng cảm biến sinh học.

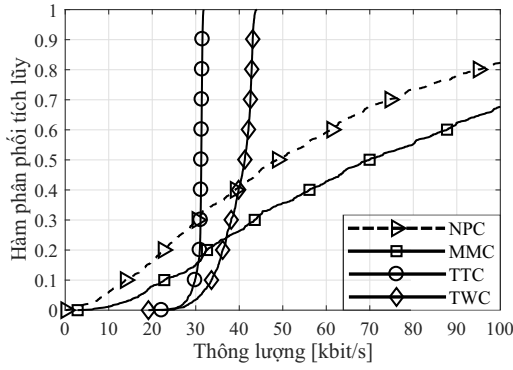
3.4.2. Đánh giá kết quả mô phỏng

a. Thiết lập giá trị ban đầu của A , S , D , $T_{\text{threshold}}$, T_{down} , T_{up} và η .

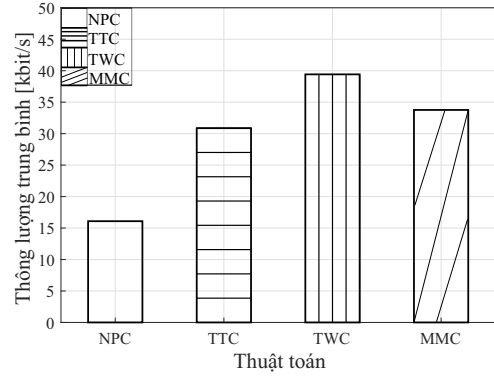
Trước tiên, luận án khảo sát trường hợp số lượng AP là $A = 4$, số lượng cảm biến là $S = 10$, diện tích căn phòng là $D = 100 \text{ m}^2$, mức ngưỡng thông lượng theo thuật toán TTC là $T_{\text{threshold}} = 30 \text{ kbit/s}$, "cửa sổ" thông lượng theo thuật toán TWC là $T_{\text{down}} = 30 \text{ kbit/s}$ và $T_{\text{up}} = 45 \text{ kbit/s}$, tỷ lệ điều chỉnh HSDKCS là $\eta = 5\%$. Các kịch bản được so sánh bao gồm: trường hợp NPC và ba trường hợp điều khiển công suất theo các thuật toán TTC, TWC và MMC. Kết quả mô phỏng thể hiện trên Hình 3.16 gồm bốn biểu đồ minh họa bốn khía cạnh đánh giá chính, bao gồm: biểu đồ CDF thông lượng trung bình trên mỗi cảm biến, và ba biểu đồ còn lại là biểu đồ cột, lần lượt thể hiện: thông lượng trung bình của tất cả các cảm biến, công suất tiêu thụ và hiệu quả năng lượng của các cảm biến.

- Thông lượng trung bình trên mỗi cảm biến (Biểu đồ (a) Hình 3.16):

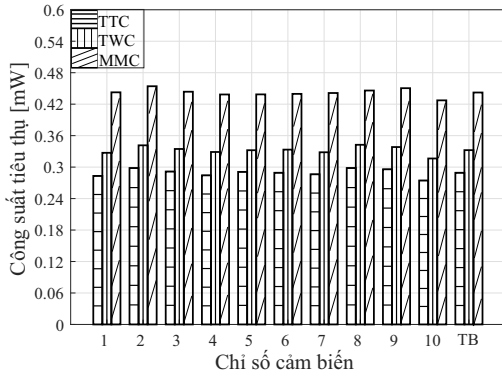
+ Trường hợp NPC, tại ngưỡng 30 kbit/s, giá trị CDF xấp xỉ 0,3, tức là khoảng 30% cảm biến có thông lượng thấp hơn ngưỡng yêu cầu. Khi áp dụng các thuật toán điều khiển công suất, đường CDF có xu hướng dịch sang phải, cho thấy tỷ lệ cảm biến đạt ngưỡng thông lượng được cải thiện trong kịch



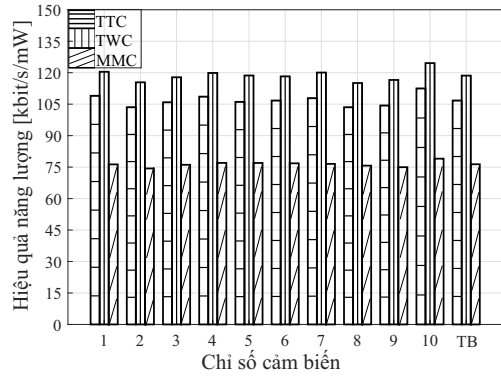
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ của các cảm biến



(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng của các cảm biến

Hình 3.16: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{\text{threshold}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{down}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{up}} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$.

bản mô phỏng đang xét. Tuy nhiên, để khẳng định chính xác nguyên nhân gây suy giảm thông lượng, cần có thêm các khảo sát định lượng về SINR, công suất can nhiễu, sai số ước lượng kênh hoặc BER. Vì vậy, trong luận án, kết quả này được diễn giải chủ yếu dựa trên phân bố thông lượng thể hiện trên đồ thị CDF, thay vì kết luận trực tiếp về nguyên nhân vật lý chi tiết.

+ Đối với thuật toán MMC, khoảng 15% cảm biến có thông lượng dưới ngưỡng 30 kbit/s, trong khi 85% còn lại đạt được thông lượng vượt mức này. Thuật toán MMC điều chỉnh công suất phát nhằm tối đa hóa thông lượng tối thiểu, qua đó giảm chênh lệch thông lượng giữa các cảm biến. Không giống với các thuật toán TTC và TWC, MMC không áp dụng giới hạn ngưỡng thông lượng, mà ưu tiên cải thiện hiệu suất của cảm biến có thông lượng thấp nhất trong hệ thống.

+ Đối với thuật toán TTC, khoảng 90% cảm biến đạt được thông lượng trên 30 kbit/s. Tuy nhiên, khoảng 10% cảm biến còn lại không duy trì được mức thông lượng này. Nguyên nhân chủ yếu là do suy hao kênh nghiêm trọng, xuất phát từ phân bố của cảm biến và AP trong 1000 lần gieo ngẫu nhiên. Một số trường hợp gieo ngẫu nhiên, cảm biến nằm tại rìa vùng phủ sóng, nơi tín hiệu bị suy giảm mạnh do khoảng cách xa AP hoặc do hiện tượng che khuất, dẫn đến hiệu suất truyền tin thấp.

+ Đối với thuật toán TWC, khoảng 97% cảm biến đạt được thông lượng nằm trong khoảng từ 30 kbit/s đến 45 kbit/s. Đáng chú ý, không có cảm biến nào vượt quá ngưỡng trên 45 kbit/s. Tuy nhiên, khoảng 3% cảm biến còn lại có thông lượng dưới 30 kbit/s, chủ yếu do suy giảm tín hiệu tại các vị trí bất lợi trong quá trình gieo ngẫu nhiên, chẳng hạn như khi cảm biến bị che khuất hoặc nằm ở rìa vùng phủ sóng, chất lượng kênh truyền xuống mức kém.

- Thông lượng trung bình của tất cả cảm biến (Biểu đồ (b) Hình 3.16):

Trong trường hợp NPC, hệ thống đạt thông lượng trung bình thấp nhất, khoảng 15 kbit/s. Nguyên nhân là do không áp dụng cơ chế điều khiển công suất, dẫn đến nhiễu giữa các cảm biến cao, làm suy giảm hiệu suất truyền dữ liệu, đặc biệt đối với các cảm biến có điều kiện kênh kém. Thuật toán TTC cải thiện rõ rệt thông lượng trung bình, đạt khoảng 30 kbit/s, cao gấp đôi so với NPC nhờ cơ chế điều chỉnh công suất đảm bảo phần lớn cảm biến vượt mức ngưỡng thông lượng yêu cầu. Thuật toán TWC đạt thông lượng trung bình cao nhất, khoảng 40 kbit/s, cao hơn 2,7 lần so với NPC. Đối với thuật toán MMC, thông lượng trung bình đạt khoảng 33 kbit/s, cao hơn NPC và TTC, nhưng vẫn thấp hơn so với TWC.

Thứ tự thông lượng trung bình được quan sát là TWC đạt giá trị cao nhất, tiếp đến là MMC, sau đó đến TTC và thấp nhất là NPC. Nguyên nhân xuất phát từ mục tiêu của từng thuật toán. Với MMC, tiêu chí là cực đại hoá thông lượng tối thiểu cảm biến trên toàn hệ thống. Do công suất phát được ưu tiên phân bổ cho các cảm biến có điều kiện kênh bất lợi, trong khi không áp đặt giới hạn trên đối với các cảm biến có điều kiện kênh thuận lợi, nên ngoài việc nâng mức tối thiểu, thông lượng trung bình vẫn được duy trì ở mức tương đối cao. Đối với TTC, việc áp dụng một ngưỡng cố định $T_{threshold}$ kèm cơ chế giảm công suất khi thông lượng vượt ngưỡng nhằm tiết

kiệm năng lượng khiến nhiều cảm biến có kênh tốt bị giới hạn thông lượng quanh ngưỡng, từ đó làm giảm thông lượng trung bình của hệ thống. Trong khi đó, TWC vận hành theo "cửa sổ" mục tiêu $[T_{down}, T_{up}]$, trong đó các cảm biến có thông lượng thấp hơn ngưỡng dưới được tăng công suất phát để đạt lớn hơn hoặc bằng T_{down} , các cảm biến vượt ngưỡng trên T_{up} mới bị giảm công suất, còn các cảm biến có thông lượng nằm trong khoảng "cửa sổ" được giữ nguyên mức công suất. Cơ chế này đồng thời cải thiện các cảm biến có thông lượng yếu và tránh điều chỉnh không cần thiết đối với các cảm biến có thông lượng tốt, nhờ vậy bảo toàn mức thông lượng cao và dẫn tới thông lượng trung bình lớn nhất trong ba thuật toán.

- Công suất tiêu thụ của các cảm biến (Biểu đồ (c) Hình 3.16):

+ Thuật toán MMC có mức công suất tiêu thụ cao nhất do cơ chế điều khiển của thuật toán MMC ưu tiên tối đa hóa thông lượng tối thiểu, nhằm đảm bảo sự cân bằng thông lượng giữa tất cả các cảm biến. Để đạt được mục tiêu này, MMC buộc phải tăng công suất phát cho những cảm biến có chất lượng kênh kém, dẫn đến trường hợp một số cảm biến phải sử dụng công suất phát cao hơn mức cần thiết, làm tăng mức công suất tiêu thụ của hệ thống.

+ Thuật toán TWC có mức công suất tiêu thụ thấp hơn MMC nhưng cao hơn TTC. Nguyên nhân là do TWC yêu cầu các cảm biến duy trì thông lượng trong một khoảng $[T_{down}, T_{up}]$. Việc liên tục điều chỉnh công suất phát để giữ thông lượng trong "cửa sổ" này khiến tổng công suất tiêu thụ của hệ thống tăng lên so với TTC. Ngược lại, thuật toán TTC có mức công suất tiêu thụ thấp nhất trong tất cả các phương pháp. Điều này là do cơ chế điều khiển công suất của TTC chỉ yêu cầu các cảm biến đạt ngưỡng thông lượng $T_{threshold}$. Khi đạt ngưỡng này, thuật toán TTC dừng tăng công suất, tránh phát thừa công suất không cần thiết.

+ Công suất tiêu thụ trung bình của các cảm biến thể hiện xu hướng rõ rệt: Thuật toán MMC có công suất tiêu thụ cao nhất, tiếp theo là thuật toán TWC, trong khi thuật toán TTC đạt mức thấp nhất.

- Hiệu quả sử dụng năng lượng của các cảm biến (Biểu đồ (d) Hình 3.16):

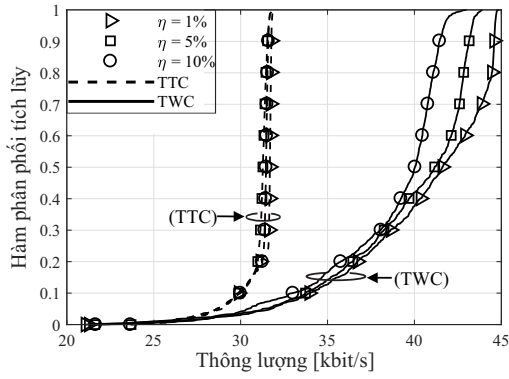
+ Thuật toán TWC đạt hiệu quả sử dụng năng lượng cao nhất, với giá trị dao động từ 115 kbit/s/mW đến 125 kbit/s/mW. Thuật toán TTC đạt hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình khoảng 105 kbit/s/mW, cao hơn so với

MMC nhưng thấp hơn TWC, cho thấy sự cải thiện đáng kể về hiệu quả năng lượng so với thuật toán MMC. Thuật toán MMC cho hiệu quả sử dụng năng lượng thấp nhất, với giá trị dao động quanh 75 kbit/s/mW.

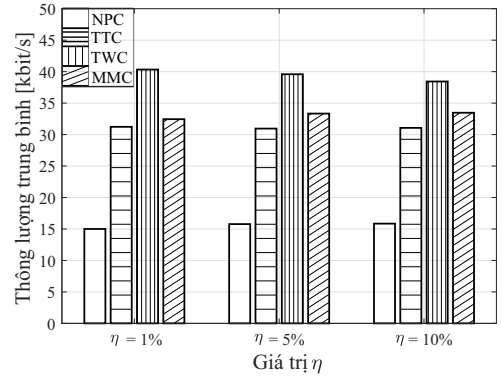
+ Hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình của các cảm biến thể hiện xu hướng rõ rệt: Thuật toán TWC đạt hiệu quả cao nhất, tiếp theo là thuật toán TTC, trong khi thuật toán MMC có hiệu quả thấp nhất.

b. Cố định A , S , D , $T_{threshold}$, T_{down} , T_{up} , thay đổi η .

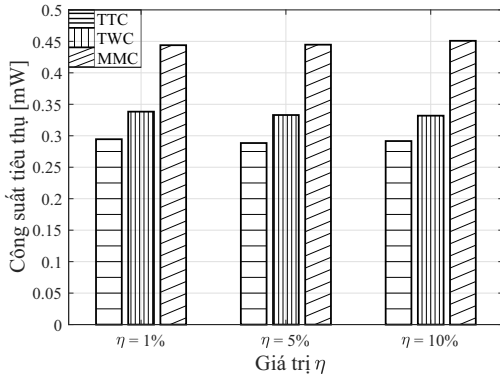
Hình 3.17 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số A , S , D , $T_{threshold}$, T_{down} , T_{up} được thiết lập như phần a. Trong khi đó, tỷ lệ điều chỉnh HSDKCS thay đổi theo ba mức khác nhau ($\eta = 1\%$, 5% và 10%).



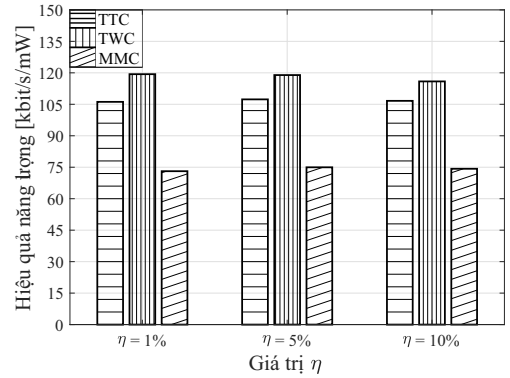
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ trung bình của các cảm biến



(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình các cảm biến

Hình 3.17: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 1\%$, 5% và 10% .

Khi η tăng, thông lượng trung bình trên mỗi cảm biến trong trường hợp TWC có xu hướng giảm, trong khi TTC gần như không thay đổi. Nguyên

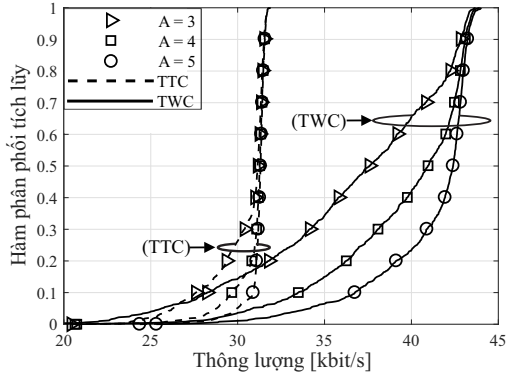
nhân xuất phát từ cơ chế điều khiển công suất đặc thù của từng thuật toán. Thuật toán TWC duy trì thông lượng trong khoảng $[T_{\text{down}}, T_{\text{up}}]$. Khi η tăng, các bước điều chỉnh công suất trở nên lớn hơn, có thể gây dao động vượt ra ngoài khoảng "cửa sổ". Điều này làm giảm khả năng duy trì thông lượng ổn định, từ đó có thể dẫn đến sự suy giảm thông lượng trung bình trên mỗi cảm biến. Ngược lại, thuật toán TTC đảm bảo thông lượng vượt trên mức ngưỡng $T_{\text{threshold}}$, do đó thông lượng trung bình trên mỗi cảm biến gần như không đổi. Bên cạnh đó, khi η tăng, thông lượng trung bình trong các trường hợp NPC và MMC vẫn giữ nguyên do NPC và MMC không phụ thuộc vào tỷ lệ điều chỉnh HSDKCS. Với TTC và TWC, giá trị này chỉ dao động nhẹ, cho thấy cả hai thuật toán đều ổn định trước sự thay đổi của η .

Khi η thay đổi, về công suất tiêu thụ, TTC duy trì mức thấp nhất, tiếp đến là TWC, còn MMC có mức tiêu thụ lớn nhất. Xét về hiệu quả sử dụng năng lượng, thuật toán TWC luôn đạt giá trị cao nhất, tiếp theo là TTC, trong khi MMC thấp nhất. Do mục tiêu điều khiển và cơ chế điều chỉnh công suất của mỗi thuật toán không thay đổi theo η , nên mức công suất tiêu thụ và hiệu quả năng lượng của các cảm biến nhìn chung vẫn giữ ổn định.

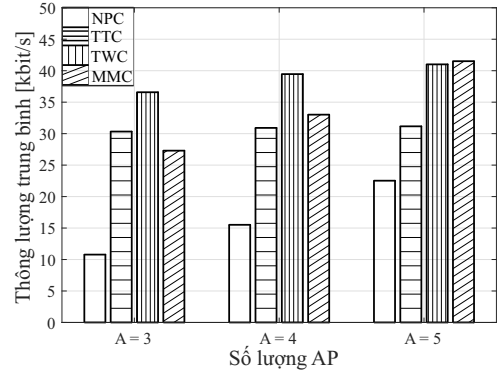
c. Cố định S , D , $T_{\text{threshold}}$, T_{down} , T_{up} , η , thay đổi A .

Hình 3.18 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số S , D , $T_{\text{threshold}}$, T_{down} , T_{up} , η được thiết lập như phần a. Trong khi đó, số lượng AP được thay đổi theo ba mức ($A = 3, 4$ và 5).

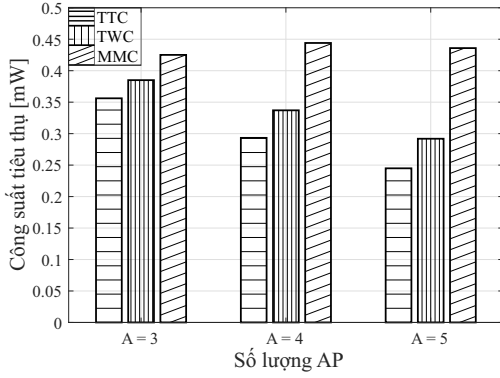
Khi A tăng, mật độ AP trong vùng phủ sóng tăng, góp phần cải thiện độ bao phủ hiệu quả và giảm xác suất các cảm biến có vị trí ở rìa vùng phủ sóng với chất lượng kênh yếu. Nhờ đó, số lượng cảm biến có thông lượng đạt ngưỡng đối với thuật toán TTC và nằm trong khoảng "cửa sổ" đối với thuật toán TWC tăng 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 thuật toán chỉ yêu cầu thông lượng mỗi cảm biến đạt ngưỡng $T_{\text{threshold}}$, không khai thác thêm tiềm năng cải thiện thông lượng từ việc tăng A . Khi A tăng, mỗi cảm biến có nhiều lựa chọn kết nối hơn và dễ dàng kết nối với AP gần nhất. Nhờ đó, khoảng cách truyền trung bình giảm, kéo theo công suất phát cần thiết cũng giảm, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong cả



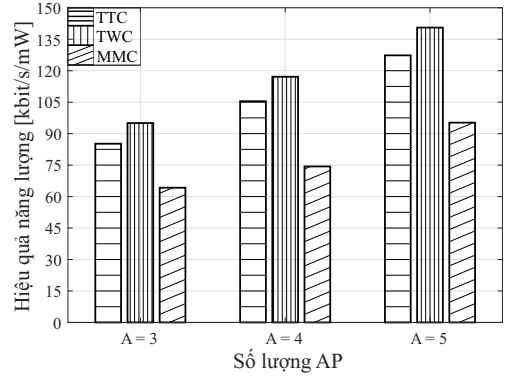
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ trung bình của các cảm biến



(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình các cảm biến

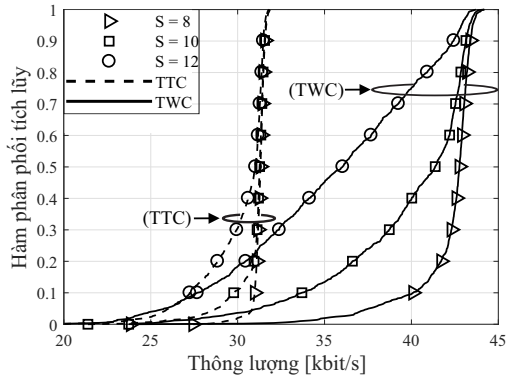
Hình 3.18: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{\text{threshold}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{down}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{up}} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, $A = 3, 4$ và 5 .

ba thuật toán TTC, TWC và MMC. Tuy nhiên, mức giảm công suất tiêu thụ chỉ rõ rệt đối với TTC và TWC, do hai thuật toán này chủ động điều chỉnh công suất theo điều kiện kênh. Trong khi đó, MMC vẫn duy trì mức công suất tiêu thụ gần như không đổi do tối đa hóa mức thông lượng tối thiểu, buộc nhiều cảm biến phải phát với công suất cao.

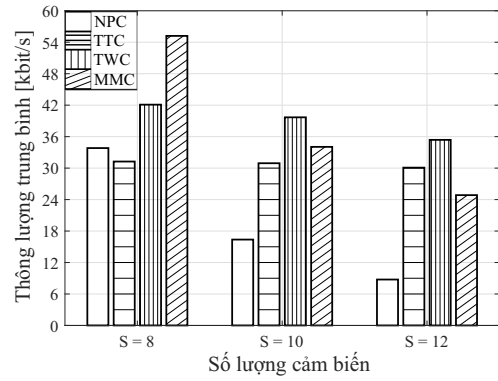
d. Cố định A , D , $T_{\text{threshold}}$, T_{down} , T_{up} , η , thay đổi S .

Hình 3.19 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số A , D , $T_{\text{threshold}}$, T_{down} , T_{up} , η được thiết lập như phần a. Trong khi đó, số lượng cảm biến được thay đổi theo ba mức ($S = 8, 10$ và 12).

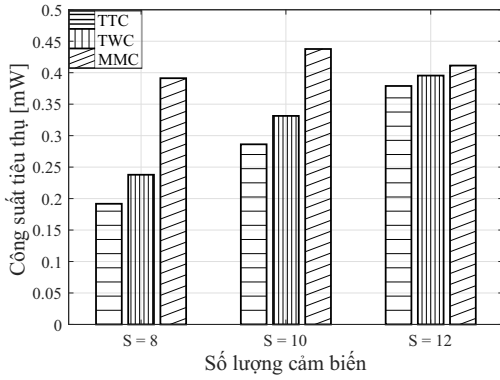
Khi S tăng, nhiễu giữa các cảm biến tăng dẫn đến suy giảm chất lượng truyền dữ liệu. Hệ quả là, trong thuật toán TTC, số cảm biến có thông lượng thấp hơn ngưỡng $T_{\text{threshold}}$ tăng và trong thuật toán TWC, số cảm biến không



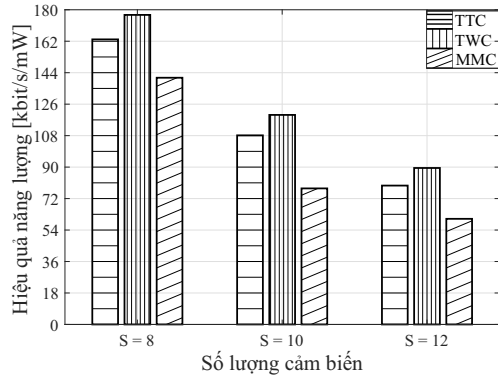
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả các cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ trung bình của các cảm biến



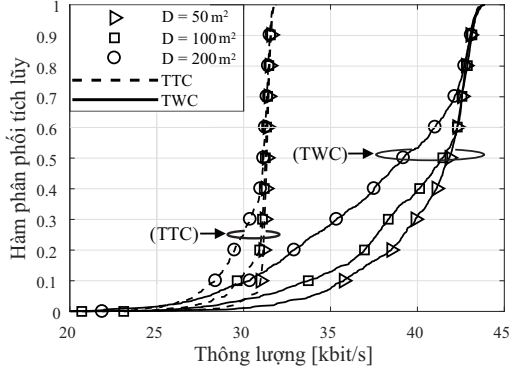
(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình các cảm biến

Hình 3.19: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{\text{threshold}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{down}} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{up}} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, $S = 8, 10$ và 12 .

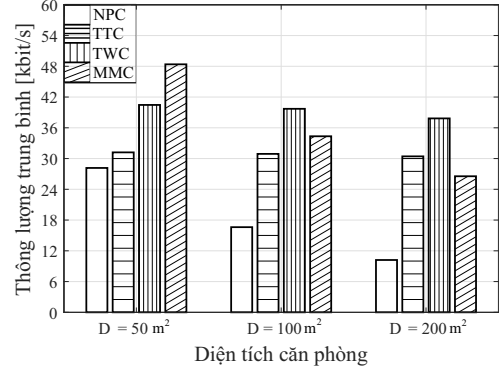
duy trì được thông lượng trong khoảng “cửa sổ” $[T_{\text{down}}, T_{\text{up}}]$ cũng tăng. Bên cạnh đó, thông lượng trung bình trong các trường hợp NPC, TWC và MMC có xu hướng giảm rõ rệt. Tuy nhiên, riêng với thuật toán TTC, thông lượng trung bình của các cảm biến vẫn duy trì ổn định ở mức khoảng 30 kbit/s. Do đó, hiệu quả sử dụng năng lượng của cả ba thuật toán TTC, TWC và MMC đều giảm khi số lượng cảm biến tăng. Trong điều kiện này, công suất tiêu thụ trung bình của TTC và TWC tăng đáng kể do yêu cầu duy trì thông lượng đạt ngưỡng (với TTC) hoặc duy trì thông lượng trong khoảng “cửa sổ” (với TWC) khi nhiều giữa các cảm biến tăng lên. Ngược lại, với thuật toán MMC, do chỉ tập trung điều chỉnh công suất phát của các cảm biến yếu nhất, còn các cảm biến có điều kiện kênh tốt không được tăng công suất, nên công suất tiêu thụ trung bình của hệ thống hầu như không thay đổi đáng kể.

e. Cố định A , S , $T_{threshold}$, T_{down} , T_{up} , η , thay đổi D .

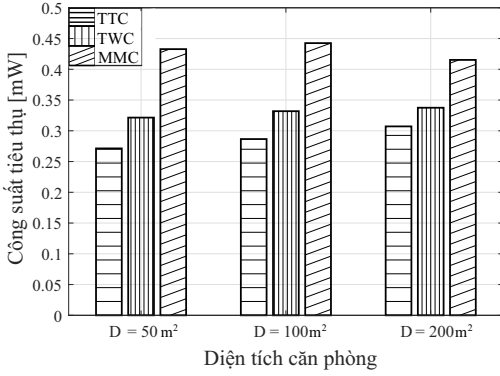
Hình 3.20 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số A , S , $T_{threshold}$, T_{down} , T_{up} , η được thiết lập như phần **a**. Trong khi đó, diện tích căn phòng được thay đổi theo ba mức ($D = 50 \text{ m}^2$, 100 m^2 và 200 m^2).



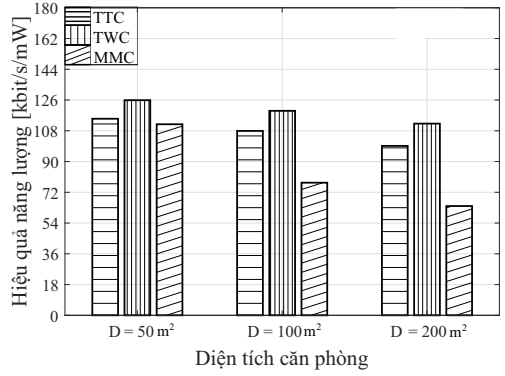
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả các cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ trung bình của các cảm biến



(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình các cảm biến

Hình 3.20: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $T_{threshold} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{down} = 30 \text{ kbit/s}$, $T_{up} = 45 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, $D = 50 \text{ m}^2$, 100 m^2 và 200 m^2 .

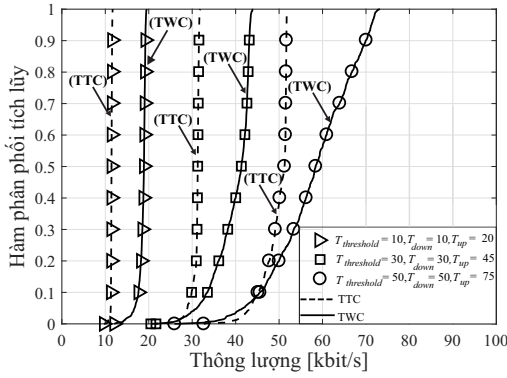
Khi D giảm, các cảm biến và các AP được phân bố ngẫu nhiên trong một không gian nhỏ hơn, dẫn đến khoảng cách trung bình giữa mỗi cảm biến và các AP lân cận có xu hướng giảm. Điều này góp phần cải thiện chất lượng kênh truyền, giảm suy hao đường truyền và giảm công suất phát cần thiết để duy trì kết nối hiệu quả. Nhờ đó, cả hai thuật toán TTC và TWC đều ghi nhận số lượng cảm biến có thông lượng đạt yêu cầu tăng lên. Xét trên góc độ tổng thể, khi D giảm, thông lượng trung bình của hệ thống trong các trường hợp TWC, MMC và NPC đều tăng nhờ chất lượng liên kết được cải thiện.

Trong khi đó, riêng với thuật toán TTC, do cơ chế chỉ yêu cầu đảm bảo đạt ngưỡng, nên thông lượng trung bình của hệ thống vẫn duy trì ổn định quanh mức ngưỡng 30 kbit/s.

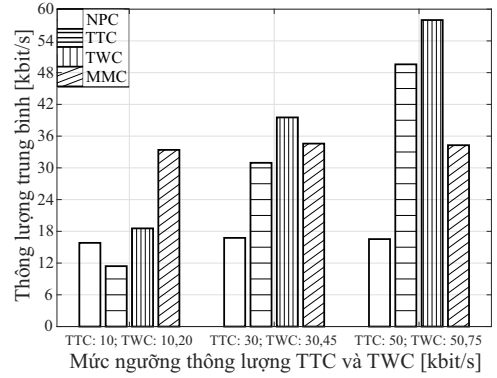
Khi D tăng, công suất tiêu thụ trung bình của TTC và TWC có xu hướng tăng nhẹ, còn MMC duy trì ở mức cao nhất. Đồng thời, hiệu quả sử dụng năng lượng của TTC và TWC giảm nhẹ, trong khi MMC suy giảm rõ rệt.

f. Cố định A , S , D , η , thay đổi $T_{threshold}$, T_{down} , T_{up} .

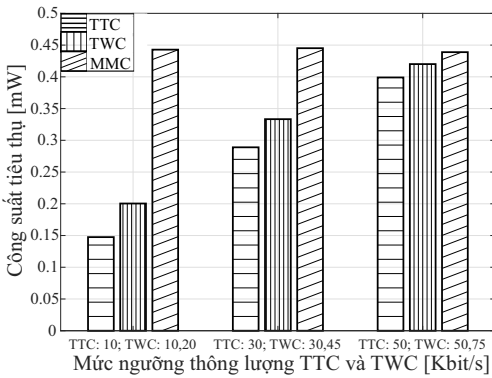
Hình 3.21 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số A , S , D , η được thiết lập như phần a. Trong khi đó, mức ngưỡng thông lượng thay đổi (TTC: $T_{threshold} = 10$ kbit/s; TWC: $T_{down} = 10$ kbit/s, $T_{up} = 20$ kbit/s; TTC: $T_{threshold} = 30$ kbit/s; TWC: $T_{down} = 30$ kbit/s, $T_{up} = 45$ kbit/s; TTC: $T_{threshold} = 50$ kbit/s; TWC: $T_{down} = 50$ kbit/s, $T_{up} = 75$ kbit/s).



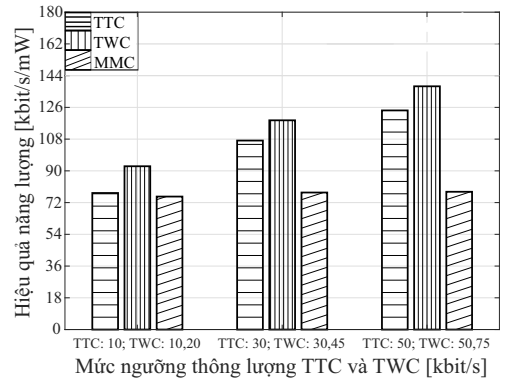
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả các cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ trung bình của các cảm biến



(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng trung bình các cảm biến

Hình 3.21: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $\eta = 5\%$, các mức ngưỡng $T_{threshold}$, T_{down} và T_{up} thay đổi.

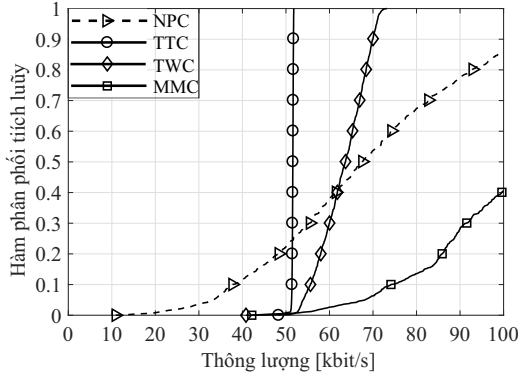
Khi mức ngưỡng thông lượng giảm, yêu cầu về chất lượng kênh và công suất phát thấp hơn, giúp các cảm biến dễ đạt được thông lượng mong muốn. Với TTC, ngưỡng $T_{threshold}$ càng thấp thì xác suất cảm biến vượt ngưỡng càng cao. Tương tự, với thuật toán TWC, khi giá trị ngưỡng dưới T_{down} giảm, khoảng thông lượng "cửa sổ" trở nên rộng hơn, khiến nhiều cảm biến có thể duy trì thông lượng nằm trong khoảng yêu cầu. Trong khi đó, NPC và MMC không phụ thuộc ngưỡng thiết lập, nên thông lượng trung bình không thay đổi. TTC có xu hướng hội tụ về ngưỡng $T_{threshold}$, còn TWC dao động trong khoảng $[T_{down}, T_{up}]$, phản ánh đúng cơ chế điều khiển của từng thuật toán.

Khi ngưỡng thông lượng của TTC và TWC tăng, hiệu quả năng lượng của hai thuật toán này cũng tăng. Nguyên nhân là tại mức ngưỡng cao hơn, các cảm biến truyền được nhiều dữ liệu hơn trên mỗi đơn vị năng lượng tiêu thụ, dù công suất phát có thể tăng nhẹ. Đồng thời, công suất tiêu thụ trung bình cũng tăng do cảm biến cần phát mạnh hơn để đạt mức thông lượng cao hơn. Ngược lại, công suất tiêu thụ trung bình và hiệu quả năng lượng của MMC gần như không đổi, do MMC không dựa trên ngưỡng cố định, mà chỉ điều chỉnh công suất theo cơ chế cân bằng thông lượng giữa các cảm biến.

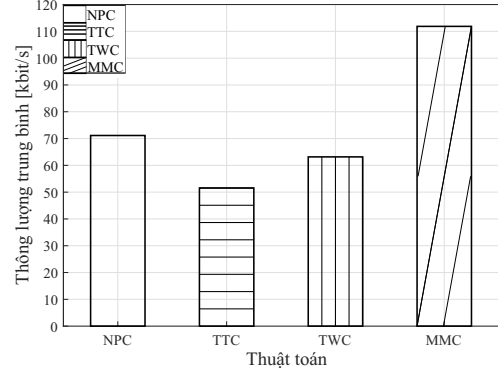
g. Trường hợp mỗi cảm biến có ít nhất một liên kết LoS đến AP với $T_{threshold} = 50$ kbit/s, $T_{down} = 50$ kbit/s, $T_{up} = 75$ kbit/s, cảm biến phát với công suất tối đa $P_{max} = 100$ mW.

Hình 3.22 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp các tham số A , S , D , η được thiết lập như phần a. Trong khi đó, $T_{threshold} = 50$ kbit/s, $T_{down} = 50$ kbit/s, $T_{up} = 75$ kbit/s, mỗi cảm biến có ít nhất một liên kết LoS đến AP và cảm biến phát với công suất tối đa $P_{max} = 100$ mW, nhằm khảo sát giới hạn hiệu năng trong điều kiện liên kết LoS thuận lợi. Kịch bản này không đại diện cho cấu hình công suất thấp mặc định của WBAN trong Bảng 3.1, mà chỉ đóng vai trò kiểm tra xu hướng khi ràng buộc công suất được nới lỏng.

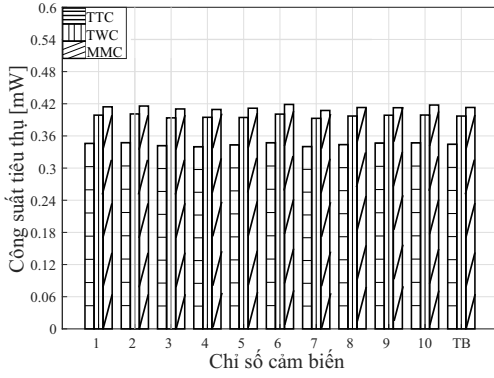
Biểu đồ (a) thể hiện CDF của thông lượng từng cảm biến, trong đó trường hợp NPC cho kết quả kém nhất, với khoảng 20% cảm biến có thông lượng dưới 50 kbit/s. Ngược lại, thuật toán TTC và TWC đảm bảo 100% cảm biến đạt thông lượng trên mức ngưỡng $T_{threshold} = 50$ kbit/s và nằm trong "cửa sổ" $[T_{down} = 50$ kbit/s, $T_{up} = 75$ kbit/s]. Bên cạnh đó, thuật toán MMC cũng giúp tất cả cảm biến đạt thông lượng tối thiểu 50 kbit/s.



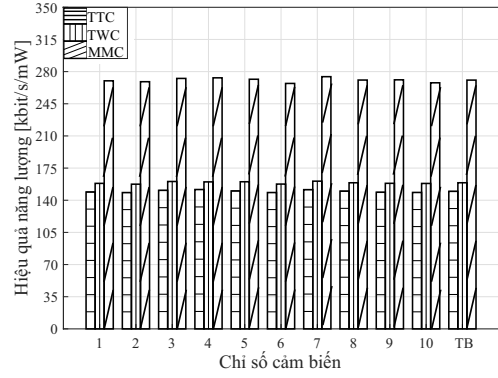
(a) CDF của thông lượng mỗi cảm biến



(b) Thông lượng trung bình của tất cả cảm biến



(c) Công suất tiêu thụ của các cảm biến



(d) Hiệu quả sử dụng năng lượng của các cảm biến

Hình 3.22: Khảo sát thông lượng và hiệu quả năng lượng của các thuật toán điều khiển công suất, $A = 4$, $S = 10$, $D = 100 \text{ m}^2$, $T_{\text{threshold}} = 50 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{down}} = 50 \text{ kbit/s}$, $T_{\text{up}} = 75 \text{ kbit/s}$, $\eta = 5\%$, mỗi cảm biến có ít nhất một liên kết LoS đến AP.

Biểu đồ (b) cho thấy thứ tự thông lượng trung bình tăng dần theo: TTC, TWC, NPC và MMC. Mặc dù TTC và TWC là các thuật toán điều khiển công suất, nhưng thông lượng trung bình lại thấp hơn NPC do mục tiêu thiết kế khác biệt. Cụ thể, TTC chỉ cấp công suất đủ để đạt ngưỡng thông lượng $T_{\text{threshold}}$ nên giới hạn mức công suất phát của các cảm biến. TWC linh hoạt hơn nhưng vẫn duy trì thông lượng trong một khoảng "cửa sổ". Trong khi đó, với NPC, các cảm biến gần AP có thể truyền với kênh truyền ổn định, góp phần đưa thông lượng trung bình của toàn mạng tăng. Thuật toán MMC đạt thông lượng trung bình cao nhất nhờ cơ chế ưu tiên nâng cao thông lượng của cảm biến yếu nhất, kết hợp với việc khai thác hiệu quả các liên kết LoS, kể cả tại các cảm biến ở vị trí xa.

Về công suất tiêu thụ, biểu đồ (c) cho thấy, TTC tiêu thụ thấp nhất trong khi MMC có mức tiêu thụ cao nhất. Về hiệu quả sử dụng năng lượng, biểu đồ (d) cho thấy TTC có hiệu quả thấp nhất, TWC đạt hiệu quả cao hơn TTC một chút trong khi MMC đạt hiệu quả vượt trội. Tóm lại, trong điều kiện thuận lợi khi mỗi cảm biến có ít nhất một liên kết LoS đến AP và phát với công suất tối đa $P_{\max} = 100$ mW, thuật toán MMC thể hiện ưu thế rõ rệt: không những cải thiện thông lượng của cảm biến yếu nhất mà còn cân bằng thông lượng giữa các cảm biến, đồng thời đạt hiệu quả sử dụng năng lượng cao, mặc dù mức công suất tiêu thụ trung bình là lớn nhất.

3.5. 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 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. Kết quả cho thấy, cả hai thuật toán đề xuất đều đảm bảo thông lượng cảm biến đạt mức ngưỡng và "*cửa sổ*" yêu cầu, đạt hiệu quả năng lượng cao và mức công suất tiêu thụ thấp. Trong đó, TWC đạt hiệu quả năng lượng cao nhất, còn TTC có mức công suất tiêu thụ thấp nhất.

Để đảm bảo tính khả thi của bài toán điều khiển công suất, các ngưỡng và "*cửa sổ*" thông lượng được lựa chọn dựa trên khảo sát thực nghiệm và khuyến nghị của chuẩn IEEE 802.15.6. Các giá trị này nằm trong phạm vi phù hợp với yêu cầu phổ biến của các ứng dụng y tế cơ bản, đồng thời nhỏ hơn đáng kể so với mức thông lượng cực đại mà hệ thống có thể đáp ứng. Tuy nhiên, việc chưa tích hợp cơ chế kiểm tra khả thi trước khi thiết lập ngưỡng, hoặc không điều chỉnh động ngưỡng theo điều kiện hệ thống tại thời điểm truyền tin, là một hạn chế trong phương pháp tiếp cận hiện tại. Đây là một hướng nghiên cứu tiềm năng, nhằm nâng cao tính khả thi và cải thiện độ linh hoạt trong triển khai thực tế của các thuật toán được đề xuất.

Các kết quả nổi bật của Chương 3 đã được trình bày trong công trình nghiên cứu **J2, J3, J4, J5, C2, C3**.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Dựa trên quá trình phân tích và đánh giá tổng quan các công trình liên quan đến WBAN, luận án đã xây dựng và đề xuất một số giải pháp nhằm cải thiện thông lượng và tiết kiệm năng lượng cho cảm biến trong WBAN. Các giải pháp này bao gồm: (i) đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối kết hợp phát triển thuật toán điều khiển công suất MMC; và (ii) đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất TTC và TWC cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

Thông qua phương pháp giải tích và mô phỏng, luận án đã tiến hành đánh giá hiệu năng của các mô hình truyền thông WBAN, kết hợp áp dụng và phát triển các thuật toán điều khiển công suất. Những kết quả chính và hướng phát triển tiếp theo của luận án sẽ được trình bày tóm tắt dưới đây.

A. 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.

Luận án đã đề xuất mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối và phát triển thuật toán điều khiển công suất MMC nhằm cải thiện hiệu quả truyền dữ liệu. Trên cơ sở đó, các công thức tính toán thông lượng cảm biến được xây dựng để đánh giá định lượng hiệu quả của mô hình thông qua quá trình truyền dữ liệu đường lên và đường xuống, trong điều kiện thay đổi các tham số hệ thống và so sánh với mô hình truyền thông TDMA WBAN. Kết quả mô phỏng cho thấy cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối đạt thông lượng cao hơn so với mô hình TDMA WBAN. Đặc biệt, khi áp dụng thuật toán MMC, thông lượng của cảm biến trong mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối được cải thiện rõ rệt, góp phần nâng cao hiệu quả toàn hệ thống. Các kết quả nghiên cứu liên quan đã được công bố trong các công trình [J1, J5, C1].

2. Đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất TTC và TWC cho mô hình truyền thông WBAN đa kết nối.

Luận án đã đề xuất hai thuật toán điều khiển công suất mới, bao gồm TTC và TWC được thiết kế riêng cho mô hình truyền thông WBAN

đa kết nối. Mục tiêu của hai thuật toán là tiết kiệm năng lượng trong khi vẫn đảm bảo thông lượng truyền tin cho các cảm biến. Kết quả mô phỏng cho thấy, trong phần lớn các kịch bản khảo sát với cấu hình công suất thấp và ngưỡng thông lượng đặt trước, TTC và TWC giúp giảm công suất tiêu thụ trung bình và cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng so với MMC. Các kết quả nghiên cứu liên quan đã được công bố trong các công trình [J2, J3, J4, J6, C2, C3].

B. Hướng phát triển của luận án

Để mở rộng và phát triển hơn nữa hướng nghiên cứu này, dựa trên các công trình khoa học hiện có, việc tiếp tục khảo sát các vấn đề liên quan và đề xuất các giải pháp mới là cần thiết. Cụ thể, các hướng nghiên cứu tiếp theo bao gồm:

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 các thuật toán điều khiển công suất thích nghi theo trạng thái kênh, mức ưu tiên dữ liệu cảm biến và yêu cầu QoS của từng ứng dụng WBAN. Nghiên cứu cơ chế quản lý và tái sử dụng pilot thích nghi với số lượng cảm biến, yêu cầu chất lượng dịch vụ và trạng thái hoạt động của hệ thống WBAN nhằm hạn chế ảnh hưởng của nhiễu pilot đến chất lượng ước lượng kênh.
3. Tiếp tục mở rộng phân tích độ phức tạp tính toán, thời gian hội tụ và yêu cầu triển khai phần cứng của các thuật toán TTC, TWC và MMC trong các kịch bản thực tế. Triển khai trên cùng một mô hình truyền thông WBAN các phương pháp điều khiển công suất hiện đại để đối sánh với TTC, TWC và MMC; lấy MMC làm mốc tham chiếu về thông lượng tối thiểu và tính công bằng, đồng thời đánh giá sự đánh đổi về hiệu quả năng lượng, độ phức tạp và đặc tính hội tụ.
4. Nghiên cứu các mô hình WBAN có xét cảm biến cấy ghép bên trong cơ thể, ảnh hưởng của mô sinh học, lệch phân cực anten và sự thay đổi tư thế người dùng đến đặc tính kênh truyền.

5. Mở rộng mô hình đánh giá ở mức gói tin, bao gồm BER trong điều kiện độ dài khối hữu hạn, độ trễ đầu cuối có xét đến hàng đợi, truy nhập và truyền lại, xác suất dừng, tỷ lệ chuyển phát gói tin thành công, độ tin cậy, tuổi thọ pin và hiệu quả năng lượng toàn phần có xét đến công suất mạch.
6. Đánh giá định lượng tính công bằng thông lượng của TEC bằng chỉ số Jain và đối sánh với các thuật toán điều khiển công suất khác trong các điều kiện kênh và tải hệ thống khác nhau.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

A. Các công trình sử dụng trong luận án

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, pages 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 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**).

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 NAFOS-TED 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**).

B. Các công trình liên quan đến luận án

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.

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.

PHỤ LỤC

P1. Ước lượng MMSE của hệ số kênh g_{as} trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

Trong pha huấn luyện, tất cả S người dùng đồng thời truyền các chuỗi pilot đến các AP. Giả định $\sqrt{\tau_u^{hl}} \phi_s \in \mathbb{C}^{\tau_u^{hl} \times 1}$, với $\|\phi_s\|^2 = 1$, là chuỗi pilot được người dùng thứ s sử dụng, $s = 1, 2, \dots, S$. Khi đó, véc-tơ tín hiệu pilot thu được tại AP thứ a có kích thước $\tau_u^{hl} \times 1$ được biểu diễn bởi:

$$\mathbf{y}_a^p = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s=1}^S g_{as} \phi_s + \mathbf{w}_a. \quad (3.23)$$

Dựa vào tín hiệu pilot nhận được $\mathbf{y}_a^p$, AP thứ a thực hiện ước lượng kênh truyền g_{as} , từ cảm biến thứ s đến AP thứ a . Việc ước lượng chính xác các kênh truyền là rất quan trọng để AP có thể giải mã chính xác tín hiệu nhận được từ cảm biến. Ký hiệu $\tilde{y}_{as}^p$ là hình chiếu của $\mathbf{y}_a^p$ lên ϕ_s^H , là liên hợp Hermitian (phức liên hợp và chuyển vị) của chuỗi pilot ϕ_s . Phép chiếu này giúp AP loại bỏ các thành phần nhiễu không mong muốn và trích xuất thông tin về kênh truyền của cảm biến, được biểu diễn như sau [28]:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{as}^p &= \phi_s^H \mathbf{y}_a^p = \phi_s^H \left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s=1}^S g_{as} \phi_s + \mathbf{w}_a \right), \\ &= \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} \phi_s^H \phi_s + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'} \phi_{s'}^H \phi_s + \phi_s^H \mathbf{w}_a, \\ &= \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'} \phi_{s'}^H \phi_s + \phi_s^H \mathbf{w}_a. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Trong biểu thức (3.24), thành phần thứ nhất đại diện cho tín hiệu mong muốn thu được, thành phần thứ hai là nhiễu phát sinh từ các cảm biến khác, và thành phần thứ ba là nhiễu tạp. Với các chuỗi pilot bất kỳ, $\tilde{y}_{as}^p$ không phải là thống kê đủ để ước lượng g_{as} , tuy nhiên, vẫn có thể sử dụng $\tilde{y}_{as}^p$ để thu được một ước lượng gần tối ưu của g_{as} . Trong trường hợp đặc biệt khi các chuỗi pilot bất kỳ là đồng nhất hoặc trực giao thì $\tilde{y}_{as}^p$ trở thành một thống kê đủ và các ước lượng dựa trên nó là tối ưu. Ước lượng MMSE của g_{as} , ký

hiệu là $\hat{g}_{as}$, được xác định bởi biểu thức sau [28]:

$$\hat{g}_{as} = \frac{\mathbb{E}\{\tilde{y}_{as}^{p*} g_{as}\}}{\mathbb{E}\{|\tilde{y}_{as}^p|^2\}} \tilde{y}_{as}^p, \quad (3.25)$$

trong đó,

$$\mathbb{E}\{|\tilde{y}_{as}^p|^2\} = \mathbb{E}\left\{\left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as}\right)^2\right\} + \mathbb{E}\left\{\left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'} \phi_{s'}^H \phi_s\right)^2\right\} + \mathbb{E}\left\{\left(\phi_s^H \mathbf{w}_a\right)^2\right\}. \quad (3.26)$$

Triển khai cụ thể (3.26), ta có:

$$\mathbb{E}\left\{\left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as}\right)^2\right\} = \tau_u^{hl} \rho^p \beta_{as}, \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} & \mathbb{E}\left\{\left|\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'} \phi_{s'}^H \phi_s\right|^2\right\} \\ &= \tau_u^{hl} \rho^p \mathbb{E}\left\{\left|\sum_{s' \neq s}^S g_{as'} c_{s'}\right|^2\right\}, \quad c_{s'} \triangleq \phi_s^H \phi_{s'}, \\ &= \tau_u^{hl} \rho^p \mathbb{E}\left\{\left(\sum_{s' \neq s}^S g_{as'} c_{s'}\right) \left(\sum_{t' \neq s}^S g_{at'} c_{t'}\right)^*\right\}, \\ &= \tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s' \neq s}^S \sum_{t' \neq s}^S c_{s'} c_{t'}^* \mathbb{E}\{g_{as'} g_{at'}^*\}, \\ &= \tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s' \neq s}^S |c_{s'}|^2 \mathbb{E}\{|g_{as'}|^2\}, \quad (\text{do } \mathbb{E}\{g_{as'} g_{at'}^*\} = 0 \text{ khi } s' \neq t') \\ &= \tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s' \neq s}^S |c_{s'}|^2 \beta_{as'}, \quad (\text{vì } \mathbb{E}\{|g_{as'}|^2\} = \beta_{as'}) \\ &= \tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s' \neq s}^S \beta_{as'} \left|\phi_s^H \phi_{s'}\right|^2. \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\mathbb{E}\left\{\left(\phi_s^H \mathbf{w}_a\right)^2\right\} = 1. \quad (3.29)$$

Thay (3.27), (3.28), (3.29) vào (3.26), ta có:

$$\mathbb{E} \left\{ |\tilde{y}_{as}^p|^2 \right\} = \tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s'=1}^S \beta_{as'} \left| \boldsymbol{\phi}_s^H \boldsymbol{\phi}_{s'} \right|^2 + 1. \quad (3.30)$$

Phân tích thành phần tử số của (3.25), ta có:

$$\tilde{y}_{as}^{p*} = \left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as}^* + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'}^* \boldsymbol{\phi}_{s'}^H \boldsymbol{\phi}_s + \boldsymbol{\phi}_s^H \mathbf{w}_a^* \right). \quad (3.31)$$

$$\tilde{y}_{as}^{p*} g_{as} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} |g_{as}|^2 + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} g_{as} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'}^* \boldsymbol{\phi}_{s'}^H \boldsymbol{\phi}_s + g_{as} \boldsymbol{\phi}_s^H \mathbf{w}_a^*. \quad (3.32)$$

$$\mathbb{E} \{ \tilde{y}_{as}^{p*} g_{as} \} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \mathbb{E} \{ |g_{as}|^2 \} + \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \mathbb{E} \left\{ g_{as} \sum_{s' \neq s}^S g_{as'}^* \boldsymbol{\phi}_{s'}^H \boldsymbol{\phi}_s \right\} + \mathbb{E} \{ g_{as} \boldsymbol{\phi}_s^H \mathbf{w}_a^* \}. \quad (3.33)$$

Vì $\mathbf{w}_a^*$ là các biến ngẫu nhiên Gauss phức độc lập và phân phối đồng nhất với kỳ vọng bằng 0 và phương sai bằng 1, nên thành phần thứ ba của biểu thức (3.33) bằng 0. Do các chuỗi pilot $\boldsymbol{\phi}_s$ và $\boldsymbol{\phi}_{s'}$ là trực giao với nhau nên $\mathbb{E} \{ \boldsymbol{\phi}_{s'}^H \boldsymbol{\phi}_s \} = 0$ trong trường hợp $s' \neq s$, cho nên thành phần thứ hai trong biểu thức (3.33) cũng có giá trị bằng 0. Ta có (3.33) tương đương với:

$$\mathbb{E} \{ \tilde{y}_{as}^{p*} g_{as} \} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \mathbb{E} \{ |g_{as}|^2 \} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as}. \quad (3.34)$$

Thay (3.30) và (3.34) vào (3.25), ta có:

$$\hat{g}_{as} = \frac{\mathbb{E} \{ \tilde{y}_{as}^{p*} g_{as} \}}{\mathbb{E} \{ |\tilde{y}_{as}^p|^2 \}} \tilde{y}_{as}^p = c_{m,as} \tilde{y}_{as}^p, \quad (3.35)$$

trong đó,

$$c_{m,as} \triangleq \frac{\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as}}{\tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s'=1}^S \beta_{as'} \left| \boldsymbol{\phi}_s^H \boldsymbol{\phi}_{s'} \right|^2 + 1}. \quad (3.36)$$

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

$$\chi_{m,as} \triangleq \mathbb{E} \{ |\hat{g}_{as}|^2 \} = \sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \beta_{as} c_{m,as} = \frac{\tau_u^{hl} \rho^p \beta_{as}^2}{\tau_u^{hl} \rho^p \sum_{s'=1}^S \beta_{as'} \left| \boldsymbol{\phi}_s^H \boldsymbol{\phi}_{s'} \right|^2 + 1}. \quad (3.37)$$

Ảnh hưởng của nhiễu pilot đến chất lượng ước lượng kênh:

Trong phạm vi luận án, ảnh hưởng của tái sử dụng pilot được phản ánh trong mô hình ước lượng kênh MMSE thông qua tập các cảm biến sử dụng chung pilot. Khi chất lượng ước lượng kênh suy giảm, các đại lượng liên quan đến SINR cũng bị ảnh hưởng, từ đó tác động đến thông lượng và hiệu quả năng lượng của hệ thống. Vì vậy, việc mô tả cơ chế tái sử dụng pilot có ý nghĩa quan trọng trong việc làm rõ giới hạn của mô hình đánh giá hiệu năng mô hình WBAN đa kết nối.

Mô hình đã đưa nhiễu pilot vào như một đặc điểm của mô hình CF truyền thống, và tất cả phân tích, đề xuất phía sau đều dựa trên việc tồn tại của nhiễu pilot, nhưng mục tiêu của luận án không tập trung giảm nhiễu pilot mà nâng cao thông lượng bằng mô hình CF kết hợp điều khiển công suất.

Để hạn chế ảnh hưởng của nhiễu pilot, có thể xem xét các giải pháp như quản lý và tái sử dụng pilot theo chất lượng kênh, vị trí cảm biến và mức độ gây nhiễu; điều chỉnh số chuỗi pilot trực giao phù hợp với thời gian kết hợp của kênh; phối hợp các phương pháp phân bổ tài nguyên pilot đã được đề xuất trong các hệ thống CF. Tuy nhiên, luận án không tập trung xây dựng một thuật toán giảm nhiễu pilot độc lập mà chỉ phản ánh ảnh hưởng của hiện tượng này trong mô hình ước lượng kênh và đánh giá hiệu năng hệ thống.

P2. Tốc độ truyền dữ liệu đạt được của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường lên mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

Phân tích cụ thể từng thành phần trong biểu thức (3.8) ta có:

$$|DD_{u,s}|^2 = DD_{u,s} \cdot DD_{u,s}^* = (\sqrt{\rho^u \alpha_s})^2 \left| \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* g_{as} \right|^2 = \rho^u \alpha_s \left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \right)^2. \quad (3.38)$$

$$\mathbb{E} \left\{ |BB_{u,s}|^2 \right\} = \rho^u \alpha_s \mathbb{E} \left\{ \left(\sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* g_{as} - \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \hat{g}_{as}^* g_{as} \right\} \right)^2 \right\} = \rho^u \sum_{a=1}^A \alpha_s \chi_{m,as} \beta_{as}. \quad (3.39)$$

$$\mathbb{E} \left\{ |UU_{u,s'}|^2 \right\} = \rho^u \left| \phi_{s'}^H \phi_s \right|^2 \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{s'}^{1/2} \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as}}{\beta_{as'}} \right)^2 + \rho^u \sum_{a=1}^A \alpha_{s'} \chi_{m,as'} \beta_{as}. \quad (3.40)$$

$$\mathbb{E} \left\{ |\text{NN}_{u,s}|^2 \right\} = \sum_{a=1}^A \mathbb{E} \left\{ |\hat{g}_{as}^* \mathbf{w}_u^a|^2 \right\} = \sum_{a=1}^A \mathbb{E} \left\{ |\hat{g}_{as}|^2 \right\} \mathbb{E} \left\{ |\mathbf{w}_u^a|^2 \right\} = \sum_{a=1}^A \chi_{m,as}. \quad (3.41)$$

P3. Tốc độ truyền dữ liệu đạt được của cảm biến thứ s khi truyền dữ liệu đường xuống mô hình truyền thông WBAN đa kết nối

Tín hiệu r_d^s trong (3.15) có thể được biểu diễn như sau [28]:

$$r_d^s = \text{DD}_{d,s} \cdot q_{d,s} + \text{BB}_{d,s} \cdot q_{d,s} + \sum_{s' \neq s}^S \text{UU}_{d,s'} \cdot q_{d,s'} + \mathbf{w}_d^s, \quad (3.42)$$

trong đó,

$$\text{DD}_{d,s} \triangleq \sqrt{\rho^d} \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} g_{as} \hat{g}_{as}^* \right\}, \quad (3.43)$$

$$\text{BB}_{d,s} \triangleq \sqrt{\rho^d} \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} g_{as} \hat{g}_{as}^* - \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} g_{as} \hat{g}_{as}^* \right\} \right), \quad (3.44)$$

$$\text{UU}_{d,s'} \triangleq \sqrt{\rho^d} \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} g_{as} \hat{g}_{as}^*. \quad (3.45)$$

cụ thể, $\text{DD}_{d,s}$ đại diện cho cường độ tín hiệu mong muốn, $\text{BB}_{d,s}$ là nhiễu do sai số ước lượng kênh và $\text{UU}_{d,s'}$ là nhiễu giữa các cảm biến. Có thể xem tổng của ba thành phần thứ hai, thứ ba và thứ tư trong biểu thức (3.42) như là "ảnh hưởng tạp âm". Vì $q_{d,s}$ độc lập với cả $\text{DD}_{d,s}$ và $\text{BB}_{d,s}$, ta có theo [28]:

$$\mathbb{E} \left\{ \text{DD}_{d,s} \cdot q_{d,s} \times (\text{BB}_{d,s} \cdot q_{d,s})^* \right\} = \mathbb{E} \left\{ \text{DD}_{d,s} \times \text{BB}_{d,s}^* \right\} \mathbb{E} \{ |q_{d,s}|^2 \} = 0.$$

Điều này cho thấy rằng thành phần thứ nhất và thứ hai trong biểu thức (3.42) không tương quan với nhau. Phân tích tương tự cho thấy các thành phần thứ ba và thứ tư trong (3.42) cũng không tương quan với thành phần thứ nhất của biểu thức này, làm cho nhiễu hiệu dụng và tín hiệu mong muốn không tương quan nhau. Thực tế, trong các hệ thống truyền thông, nhiễu Gauss không tương quan đại diện cho trường hợp xấu nhất. Do đó, tốc độ truyền dữ liệu khả thi của cảm biến thứ s có thể được biểu diễn như sau:

$$R_d^s = \log_2 \left(1 + \frac{|\text{DD}_{d,s}|^2}{\mathbb{E} \{ |\text{BB}_{d,s}|^2 \} + \sum_{s' \neq s}^S \mathbb{E} \{ |\text{UU}_{d,s'}|^2 \} + 1} \right). \quad (3.46)$$

Để suy ra biểu thức dạng tường minh cho tốc độ truyền dữ liệu khả thi của cảm biến thứ s trong biểu thức (3.46), cần phải tính toán $\text{DD}_{d,s}$, $\mathbb{E}\{|\text{BB}_{d,s}|^2\}$ và $\mathbb{E}\{|\text{UU}_{d,s'}|^2\}$ theo các bước sau:

P3.1. Tính toán $\text{DD}_{d,s}$ [28]

Trước hết, thành phần $\text{DD}_{d,s}$ được xác định như sau: Ký hiệu $\varepsilon_{as} \triangleq g_{as} - \hat{g}_{as}$ là lỗi ước lượng kênh. Theo tính chất của ước lượng MMSE, ta biết rằng ε_{as} và $\hat{g}_{as}$ là hai biến ngẫu nhiên độc lập. Do đó, ta có:

$$\begin{aligned} \text{DD}_{d,s} &= \sqrt{\rho^d} \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} (\hat{g}_{as} + \varepsilon_{as}) \hat{g}_{as}^* \right\} = \sqrt{\rho^d} \sum_{a=1}^A \alpha_{as}^{1/2} \mathbb{E} \{ (\hat{g}_{as} + \varepsilon_{as}) \hat{g}_{as}^* \}, \\ &= \sqrt{\rho^d} \alpha_{as}^{1/2} \sum_{a=1}^A (\mathbb{E} \{ \hat{g}_{as} \hat{g}_{as}^* \} + \mathbb{E} \{ \varepsilon_{as} \hat{g}_{as}^* \}), \\ &= \sqrt{\rho^d} \alpha_{as}^{1/2} \sum_{a=1}^A \mathbb{E} \{ \hat{g}_{as} \hat{g}_{as}^* \} = \sqrt{\rho^d} \alpha_{as}^{1/2} \sum_{a=1}^A \chi_{m,as}. \end{aligned} \quad (3.47)$$

P3.2. Tính toán $\mathbb{E}\{|\text{BB}_{d,s}|^2\}$ [28]

Vì phương sai của tổng các biến ngẫu nhiên độc lập bằng tổng các phương sai của từng biến thành phần, nên ta có:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{|\text{BB}_{d,s}|^2\} &= \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as} \mathbb{E}\{|g_{as} \hat{g}_{as}^* - \mathbb{E}\{g_{as} \hat{g}_{as}^*\}|^2\}, \\ &= \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as} \left(\mathbb{E}\{|g_{as} \hat{g}_{as}^*|^2\} - |\mathbb{E}\{g_{as} \hat{g}_{as}^*\}|^2 \right), \\ &= \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as} \left(\mathbb{E}\{|\varepsilon_{as} \hat{g}_{as}^* + \hat{g}_{as}|^2\} - \chi_{m,as}^2 \right), \\ &\stackrel{(a)}{=} \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as} \left(\mathbb{E}\{|\varepsilon_{as} \hat{g}_{as}^*|^2\} + \mathbb{E}\{|\hat{g}_{as}|^4\} - \chi_{m,as}^2 \right), \\ &\stackrel{(b)}{=} \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as} (\chi_{m,as} (\beta_{as} - \chi_{m,as}) + 2\chi_{m,as}^2 - \chi_{m,as}^2), \\ &= \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as} \chi_{m,as} \beta_{as}, \end{aligned} \quad (3.48)$$

trong đó, (a) tương ứng với trường hợp ε_{as} có giá trị trung bình bằng 0 và độc lập với $\hat{g}_{as}$, trong khi (b) tương ứng với trường hợp $\mathbb{E}\{|\hat{g}_{as}|^4\} = 2\chi_{m,as}^2$

và $\mathbb{E}\{|\varepsilon_{as}|^2\} = \beta_{as} - \chi_{m,as}$.

P3.3. Tính toán $\mathbb{E}\{|\text{UU}_{d,s'}|^2\}$ [28]

Từ (3.35) và (3.45), ta có:

$$\mathbb{E}\{|\text{UU}_{d,s'}|^2\} = \rho^d \mathbb{E} \left\{ \left| \sum_{a=1}^A \sqrt{\alpha_{as'}^{1/2} c_{m,as'}} g_{as} \times \left(\sqrt{\tau_u^{hl} \rho^p} \sum_{l=1}^S g_{al} \phi_{s'}^H \phi_l + \tilde{\mathbf{w}}_{as'} \right)^* \right|^2 \right\}, \quad (3.49)$$

trong đó, $\tilde{\mathbf{w}}_{as'} \triangleq \phi_{s'}^H \mathbf{w}_a \sim \mathcal{CN}(0, 1)$. Vì $\tilde{\mathbf{w}}_{as'}$ độc lập với $g_{a,l}, \forall l, s'$, ta có:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{|\text{UU}_{d,s'}|^2\} &= \rho^d \mathbb{E} \left\{ \left| \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} c_{m,as'} g_{as} \tilde{\mathbf{w}}_{as'}^* \right|^2 \right\} \\ &\quad + \tau_u^{hl} \rho^p \rho^d \mathbb{E} \left\{ \left| \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} c_{m,as'} g_{as} \left(\sum_{l=1}^S g_{al} \phi_{s'}^H \phi_l \right)^* \right|^2 \right\}. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Thực tế là, nếu P và Q là hai biến ngẫu nhiên độc lập và $\mathbb{E}\{P\} = 0$, thì $\mathbb{E}\{|P + Q|^2\} = \mathbb{E}\{|P|^2\} + \mathbb{E}\{|Q|^2\}$, khi đó (3.50) có thể viết lại thành phương trình như sau:

$$\mathbb{E}\{|\text{UU}_{d,s'}|^2\} = \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as'} c_{m,as'}^2 \beta_{as} + \tau_u^{hl} \rho^p \rho^d (\Omega_1 + \Omega_2), \quad (3.51)$$

trong đó,

$$\Omega_1 \triangleq \mathbb{E} \left\{ \left| \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} c_{m,as'} |g_{as}|^2 \phi_{s'}^H \phi_s \right|^2 \right\}. \quad (3.52)$$

$$\Omega_2 \triangleq \mathbb{E} \left\{ \left| \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} c_{m,as'} g_{as} \left(\sum_{l \neq s}^S g_{al} \phi_{s'}^H \phi_l \right)^* \right|^2 \right\}. \quad (3.53)$$

Cụ thể, Ω_1 được tính toán như sau:

$$\begin{aligned}
\Omega_1 &\triangleq |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} \alpha_{bs'}^{1/2} c_{m,as'} c_{m,bs'} |g_{as}|^2 |g_{bs}|^2 \right\}, \\
&= |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^2 c_{m,as'}^2 |g_{as}|^4 \right\} \\
&\quad + |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \mathbb{E} \left\{ \sum_{a=1}^A \sum_{b \neq a}^A \alpha_{as'}^{1/2} \alpha_{bs'}^{1/2} c_{m,as'} c_{m,bs'} |g_{as}|^2 |g_{bs}|^2 \right\}, \\
&= 2 |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^2 c_{m,as'}^2 \beta_{as}^2 \\
&\quad + |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \sum_{a=1}^A \sum_{b \neq a}^A \alpha_{as'}^{1/2} \alpha_{bs'}^{1/2} c_{m,as'} c_{m,bs'} \beta_{as} \beta_{bs}. \tag{3.54}
\end{aligned}$$

Tương tự:

$$\Omega_2 \triangleq \sum_{a=1}^A \sum_{l \neq s}^S \alpha_{as'}^2 c_{m,as'}^2 \beta_{as} \beta_{al} |\phi_{s'}^H \phi_l|^2. \tag{3.55}$$

Thay (3.54) và (3.55) vào (3.51), ta có:

$$\mathbb{E}\{|UU_{ss'}|^2\} = \rho^d |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \left(\sum_{a=1}^A \alpha_{as'}^{1/2} \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as}}{\beta_{as'}} \right)^2 + \rho^d \sum_{a=1}^A \alpha_{as'} \chi_{m,as'} \beta_{as}. \tag{3.56}$$

P4. Thuật toán tìm kiếm chia đôi để xác định hệ số điều khiển công suất trong mô hình truyền thông WBAN đa kết nối [28]

Ký hiệu $\lambda_{as} \triangleq \alpha_{as}^{1/2}$ và $\varkappa_{ss'} \triangleq |\phi_{s'}^H \phi_s|^2$. Từ biểu thức (3.16), có thể suy ra rằng (3.19) tương đương với:

$$\begin{aligned}
&\max_{\{\alpha_{as}\}} \min_{s=1, \dots, S} \frac{\left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \lambda_{as} \right)^2}{\sum_{s' \neq s}^S \varkappa_{ss'} \left(\sum_{a=1}^A \frac{\chi_{m,as'} \beta_{as} \lambda_{as'}}{\beta_{as'}} \right)^2 + \sum_{a=1}^A \beta_{as} \sum_{s'=1}^S \chi_{m,as'} \lambda_{as'}^2 + \frac{1}{\rho^d}} \\
&\text{ràng buộc: } \sum_{s=1}^S \alpha_{as} \chi_{m,as} \leq 1, a = 1, \dots, A, \\
&\alpha_{as} \geq 0, s = 1, \dots, S, a = 1, \dots, A. \tag{3.57}
\end{aligned}$$

Bằng cách thêm các biến bổ sung (*slack variable*) $\kappa_{ss'} = \sum_{a=1}^A \frac{\chi_{m,as'} \beta_{as} \lambda_{as'}}{\beta_{as'}}$ và $\iota_a = \sum_{s'=1}^S \chi_{m,as'}^{1/2} \lambda_{as'}$, (3.57) có thể được chuyển đổi thành dạng tương đương:

$$\begin{aligned} \max_{\{\lambda_{as}, \kappa_{s's}, \iota_a\}} \min_{s=1, \dots, S} & \frac{\left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \lambda_{as} \right)^2}{\sum_{s' \neq s}^S |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \kappa_{s's}^2 + \sum_{a=1}^A \beta_{as} \iota_a^2 + \frac{1}{\rho^d}} \quad (3.58) \\ \text{ràng buộc: } & \sum_{s'=1}^S \chi_{m,as'} \lambda_{as'}^2 \leq \iota_a^2, \quad a = 1, \dots, A, \\ & \sum_{a=1}^A \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as}}{\beta_{as'}} \lambda_{as'} \leq \kappa_{s's}, \quad \forall s' \neq s, \\ & 0 \leq \iota_a \leq 1, \quad a = 1, \dots, A, \\ & \lambda_{as} \geq 0, \quad s = 1, \dots, S, a = 1, \dots, A. \end{aligned}$$

Sự tương đương giữa hai biểu thức (3.57) và (3.58) có thể được suy luận một cách dễ dàng, vì các điều kiện ràng buộc thứ nhất và thứ hai trong (3.58) trùng khớp với (3.57) tại điểm tối ưu. Hàm mục tiêu của (3.58) là một hàm bán lồi, và toàn bộ bài toán được mô tả trong (3.58) là một bài toán tối ưu bán lồi. Điều này được chứng minh như sau: Ký hiệu $\Upsilon \triangleq \{\lambda_{as}, \kappa_{s's}, \iota_a\}$ là tập hợp các biến và $f(\Upsilon)$ là hàm mục tiêu của (3.58), ta có:

$$f(\Upsilon) \triangleq \min_{s=1, \dots, S} \frac{\left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \lambda_{as} \right)^2}{\sum_{s' \neq s}^S |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \kappa_{s's}^2 + \sum_{a=1}^A \beta_{as} \iota_a^2 + \frac{1}{\rho^d}}. \quad (3.59)$$

Biến bổ sung (slack variable) trong toán tối ưu giúp chuyển đổi ràng buộc dạng bất đẳng thức thành phương trình đẳng thức, tạo điều kiện áp dụng phương pháp đơn hình, đồng thời thể hiện phần dư giữa giới hạn và giá trị thực tế của ràng buộc. Sử dụng biến bổ sung làm cho quá trình giải bài toán tối ưu trở nên thuận tiện hơn.

Cho bất kỳ giá trị $\theta \in \mathbb{R}_+$, tập trên cấp của $f(\Upsilon)$ thuộc Υ là:

$$\begin{aligned} U(f, \theta) &= \{\Upsilon : f(\Upsilon) \geq \theta\}, \\ &= \left\{ \Upsilon : \frac{\left(\sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \lambda_{as} \right)^2}{\sum_{s' \neq s}^S |\phi_{s'}^H \phi_s|^2 \kappa_{s's}^2 + \sum_{a=1}^A \beta_{as} \iota_a^2 + \frac{1}{\rho^d}} \geq \theta, \forall s \right\}, \\ &= \left\{ \Upsilon : \|\mathbf{p}_s\| \leq \frac{1}{\sqrt{\theta}} \sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \lambda_{as}, \forall s \right\}, \end{aligned} \quad (3.60)$$

trong đó, $\mathbf{p}_s \triangleq \left[\mathbf{p}_{s1}^T \mathbf{I}_{-s} \mathbf{p}_{s2}^T \frac{1}{\sqrt{\rho^d}} \right]^T$, $\mathbf{p}_{s1} \triangleq \left[\phi_1^H \phi_s \kappa_{1s} \dots \phi_S^H \phi_s \kappa_{Ss} \right]^T$, $\mathbf{I}_{-s}$ là ma trận có kích thước $S \times (S-1)$ nhận được từ ma trận $S \times S$ nhưng bỏ đi cột thứ s và $\mathbf{p}_{s2} \triangleq [\sqrt{\beta_{1s} \iota_1} \dots \sqrt{\beta_{As} \iota_A}]^T$.

Vì tập trên cấp $U(f, \theta)$ có thể được biểu diễn dưới dạng hình nón bậc hai (SOC: *Second-Order Cone*), đây là một loại tập lồi vì khi một tập hợp có thể được biểu diễn dưới dạng SOC, nó được khẳng định là một tập hợp lồi. Vì $U(f, \theta)$ là một tập hợp lồi, theo định nghĩa, hàm $f(\Upsilon)$ được gọi là hàm bán lồi (*quasi-concave*). Hàm bán lồi là hàm số mà tập trên cấp của nó là một tập lồi. Bài toán tối ưu (3.58) được mô tả là một bài toán tối ưu bán lồi vì tập ràng buộc trong bài toán (3.58) cũng là lồi. Bài toán tối ưu có hàm mục tiêu bán lồi và tập ràng buộc lồi thường dễ giải quyết hơn so với các bài toán tối ưu không lồi, vì bất kỳ cực trị địa phương nào cũng là cực trị toàn cục trong trường hợp hàm bán lồi. Phương trình (3.58) có thể được giải quyết một cách hiệu quả bằng phương pháp tìm kiếm chia đôi. Trong khuôn khổ của phương pháp này, một loạt các bài toán lồi khả thi theo [107] được giải quyết ở từng bước cụ thể như sau:

- **Bước 1 (Khởi tạo thuật toán):** Các giá trị ban đầu cho $\nu_{\min}$ và $\nu_{\max}$ được lựa chọn để thiết lập phạm vi giới hạn cho hàm mục tiêu trong (3.58). Đồng thời, cũng cần xác định một giá trị ban đầu cho dung sai ϵ , với yêu cầu ϵ phải là một số thực dương, nhằm đảm bảo độ chính xác mong muốn trong quá trình tính toán.
- **Bước 2 (Tính toán giá trị trung bình):** Gán $\nu := \frac{\nu_{\min} + \nu_{\max}}{2}$. Sau đó, tiến hành giải quyết chương trình lồi khả thi tương ứng.

$$\left\{ \begin{array}{l} \|\mathbf{p}_s\| \leq \frac{1}{\sqrt{\nu}} \sum_{a=1}^A \chi_{m,as} \lambda_{as}, \quad s = 1, \dots, S, \\ \lambda_{as} \geq 0, \quad s = 1, \dots, S, \quad a = 1, \dots, A, \\ \sum_{s'=1}^S \chi_{m,as'} \lambda_{as'}^2 \leq \iota_a^2, \quad a = 1, \dots, A, \\ \sum_{a=1}^A \chi_{m,as'} \frac{\beta_{as}}{\beta_{as'}} \lambda_{as'} \leq \kappa_{s's}, \quad \forall s' \neq s, \\ 0 \leq \iota_a \leq 1, \quad a = 1, \dots, A. \end{array} \right. \quad (3.61)$$

- **Bước 3 (Điều chỉnh giới hạn):** Sau khi giải quyết chương trình lồi khả thi, việc tiếp theo là kiểm tra tính khả thi của phương trình (3.61). Nếu phương trình (3.61) khả thi, giá trị của $\nu_{\min}$ sẽ được cập nhật bằng ν . Ngược lại, nếu phương trình (3.61) không khả thi, giá trị của $\nu_{\max}$ sẽ được cập nhật bằng ν . Quá trình này đảm bảo rằng phạm vi tìm kiếm cho giải pháp tối ưu được thu hẹp một cách hiệu quả.
- **Bước 4 (Kiểm tra điều kiện dừng và lặp lại quá trình):** Kiểm tra khoảng cách giữa $\nu_{\max}$ và $\nu_{\min}$. Nếu khoảng cách này nhỏ hơn giá trị dung sai ϵ , quá trình tìm kiếm sẽ dừng lại. Điều này chỉ ra rằng thuật toán đã đạt được độ chính xác mong muốn. Ngược lại, nếu khoảng cách này lớn hơn hoặc bằng ϵ , quá trình sẽ tiếp tục bằng cách quay lại Bước 2 để thực hiện các điều chỉnh và tính toán tiếp theo. Quy trình này sẽ được lặp lại cho đến khi điều kiện dừng được thỏa mãn.

P5. So sánh mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với mô hình SC.

Bảng 3.2: So sánh mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối với mô hình SC.

<i>Tiêu chí</i>	<i>Mô hình SC [28]</i>	<i>Mô hình truyền thông WBAN đơn kết nối</i>
<i>Định nghĩa</i>	Mỗi người dùng được phục vụ bởi một AP gần nhất.	Chỉ có các cảm biến được phục vụ trong khe thời gian thứ k (cảm biến thuộc tập Γ_k) hoạt động.
	Mỗi người dùng được gán một AP duy nhất, được chọn sao cho công suất trung bình tín hiệu hữu ích thu được là lớn nhất; các AP đã gán bị loại và việc chọn được thực hiện tuần tự theo thứ tự ngẫu nhiên. Ký hiệu m_k là chỉ số của AP được lựa chọn bởi người dùng thứ k , theo quy tắc: $m_k \triangleq \arg \max_{m \in \{\text{available APs}\}} \beta_{mk}. \quad (38)$	Mỗi AP chỉ phục vụ một cảm biến tại một thời điểm. Quá trình truyền dữ liệu được chia thành $\delta = \lceil S/A \rceil$ khe thời gian liên tiếp, trong đó tối đa A cảm biến truyền dữ liệu đồng thời đến tối đa A AP trong mỗi khe. CPU gán AP phục vụ cảm biến theo quy tắc: $a_s \triangleq \arg \max_{a \in A_{\text{avail}}} \beta_{as}. \quad (2.17)$
<i>SINR</i> hiệu dụng - Đường lên	Tính nhiễu của các người dùng đồng thời hoạt động.	Chỉ tính nhiễu của các cảm biến thuộc tập Γ_k .
<i>-Đường xuống</i>	$\bar{\omega}_{m_k,k} = \frac{\rho_u^{\text{sc}} \alpha_{u,k} \omega_{m_k,k}}{\rho_u^{\text{sc}} \alpha_{u,k} (\beta_{m_k,k} - \omega_{m_k,k}) + \rho_u^{\text{sc}} \sum_{k' \neq k}^K \alpha_{u,k'} \beta_{m_k,k'} + 1}. \quad (48)$	$\bar{\zeta}_{a,s,s} = \frac{\rho^u \alpha_s \chi_{a,s}^u}{\rho^u \alpha_s (\beta_{a,s,s} - \chi_{a,s}^u) + \rho^u \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{s'} \beta_{a,s'} + 1}. \quad (2.30)$
	$\bar{\mu}_{m_k,k} = \frac{\rho_d^{\text{sc}} \alpha_{d,k} \mu_{m_k,k}}{\rho_d^{\text{sc}} \alpha_{d,k} (\beta_{m_k,k} - \mu_{m_k,k}) + \rho_d^{\text{sc}} \sum_{k' \neq k}^K \alpha_{d,k'} \beta_{m_k,k'} + 1}. \quad (44)$	$\bar{\mu}_{a,s,s} \triangleq \frac{\rho^d \alpha_{d,s} \chi_{a,s}^d}{\rho^d \alpha_{d,s} (\beta_{a,s,s} - \chi_{a,s}^d) + \rho^d \sum_{s' \neq s \in \Gamma_k} \alpha_{d,s'} \beta_{a,s'} + 1}. \quad (2.36)$
<i>Thông lượng</i> - Đường lên	Thông lượng của mô hình WBAN đơn kết nối tỉ lệ với số lượng kết nối thời tối đa có thể thiết lập được trong mỗi khe thời gian. $S_{u,k}^{\text{sc}} = B \frac{1 - (\tau_d^{\text{sc}} + \tau_u^{\text{sc}}) / \tau_c}{2} R_{u,k}^{\text{sc}}. \quad (57.1)$	Thông lượng kết nối đồng thời tối đa có thể thiết lập $T_{u,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{\text{hl}}}{\tau_c} \min(A, S)}{2} \frac{R_u^s}{S}. \quad (2.33)$
<i>-Đường xuống</i>	$S_{d,k}^{\text{sc}} = B \frac{1 - (\tau_d^{\text{sc}} + \tau_u^{\text{sc}}) / \tau_c}{2} R_{d,k}^{\text{sc}}. \quad (57.2)$	$T_{d,s} = B \frac{1 - \frac{\tau_u^{\text{hl}}}{\tau_c} \min(A, S)}{2} \frac{R_d^s}{S}. \quad (2.38)$

Tài liệu tham khảo

- [1] E. Jovanov, A. Milenkovic, C. Otto, and P. C. de Groen, “A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 2, no. 1, Mar. 2005.
- [2] D. M. G. Preethichandra, L. Piyathilaka, U. Izhar, R. Samarasinghe, and L. C. D. Silva, “Wireless body area networks and their applications a review,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 9202–9220, May. 2023.
- [3] M. B. Majed, T. A. Rahman, O. A. Aziz, M. N. Hindia, and E. Hanafi, “Channel characterization and path loss modeling in indoor environment at 4.5, 28, and 38 GHz for 5g cellular networks,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, pp. 1–14, Sep. 2018.
- [4] P. Shukla, R. Gundlapalle, A. D. R. N, K. Srinija, B. F. Mohammed, and M. Gupta, “Transforming multinational enterprises in a fragmented world the intersection of industry 4.0 technologies and geopolitical dynamics in finance and operations,” in *2025 International Conference on Intelligent Control, Computing and Communications (IC3)*. IEEE, Feb. 2025, pp. 670–676.
- [5] S. Sahoo, S. Kumar, D. Mukherjee, S. Kraus, M. Dabić, and R. V. Mahto, “Internationalization via industry 4.0 technologies: application areas and future roadmap for international business,” *Management Review Quarterly*, Sep. 2024.

- [6] M. Yaghoubi, K. Ahmed, and Y. Miao, “Wireless body area network (WBAN): A survey on architecture, technologies, energy consumption, and security challenges,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 4, p. 67, Oct. 2022.
- [7] H. Taleb, A. Nasser, G. Andrieux, N. Charara, and E. M. Cruz, “Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey,” *Wireless Networks*, vol. 27, no. 8, pp. 5271–5295, Sep. 2021.
- [8] X. Sun and X. Li, “Editorial: Aging and chronic disease: public health challenge and education reform,” *Frontiers in Public Health*, vol. 11, May. 2023.
- [9] M. Sartini, A. Carbone, A. Demartini, L. Giribone, M. Oliva, A. M. Spagnolo, P. Cremonesi, F. Canale, and M. L. Cristina, “Overcrowding in emergency department: Causes, consequences, and solutions a narrative review,” *Healthcare*, vol. 10, no. 9, p. 1625, Aug. 2022.
- [10] I. Batanda, “Prevalence of burnout among healthcare professionals: a survey at fort portal regional referral hospital,” *npj Mental Health Research*, vol. 3, no. 1, May. 2024.
- [11] S. Majumder, T. Mondal, and M. Deen, “Wearable sensors for remote health monitoring,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 130, Jan. 2017.
- [12] R. A. Khan and A.-S. K. Pathan, “The state-of-the-art wireless body area sensor networks: A survey,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 14, no. 4, Apr. 2018.
- [13] Olatinwo, Abu-Mahfouz, and Hancke, “A survey on LPWAN technologies in WBAN for remote health-care monitoring,” *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5268, Nov. 2019.

- [14] M. Salayma, A. Al-Dubai, I. Romdhani, and Y. Nasser, “Wireless body area network (WBAN),” *ACM Computing Surveys*, vol. 50, no. 1, pp. 1–38, Mar. 2017.
- [15] S. Sindhu, S. Vashisth, and S. Chakarvarti, “A review on wireless body area network (WBAN) for health monitoring system: Implementation protocols,” *Communications on Applied Electronics*, vol. 4, no. 7, pp. 16–20, Mar. 2016.
- [16] A. K. Teshome, B. Kibret, and D. T. H. Lai, “A review of implant communication technology in WBAN: Progress and challenges,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 12, pp. 88–99, Jun. 2019.
- [17] A. S. Rajasekaran, L. Sowmiya, A. Maria, and R. Kannadasan, “A survey on exploring the challenges and applications of wireless body area networks (wbans),” *Cyber Security and Applications*, vol. 2, p. 100047, Mar. 2024.
- [18] R. Goyal, N. Mittal, L. Gupta, and A. Surana, “Routing protocols in wireless body area networks: Architecture, challenges, and classification,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2023, pp. 1–19, Jan. 2023.
- [19] R. Ben Hamouda and I. Ben Hafaiedh, “Formal modeling and verification of a wireless body area network (wban) protocol: S-tdma protocol,” in *2017 International Conference on Internet of Things, Embedded Systems and Communications (IINTEC)*. IEEE, Oct. 2017, pp. 72–77.
- [20] P. Ganguly, A. Dey, D. Ganguly, C. Saha, and J. Y. Siddiqui, “Wban channel modeling on electromagnetic interaction in biological tissues for estimating path loss characteristics,” in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, Mar. 2020, pp. 1–4.

- [21] B. Youssef and C. Roblin, “Statistical modeling of wban channels in indoor environments based on measurements and ray tracing,” in *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, Mar. 2021, pp. 1–5.
- [22] C. Youssef, “Feasibility study of joint modeling of environmental and morphological effects for wban,” in *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, Mar. 2024, pp. 1–5.
- [23] P. Khan, N. Ullah, M. N. Alam, and K. S. Kwak, “Performance analysis of wban mac protocol under different access periods,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, pp. 1–12, Oct. 2015.
- [24] F. Wang, F. Hu, W. Xiong, and S. Wang, “Lifetime maximization via optimal coordinator deployment for wireless body area network,” in *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. IEEE, Feb. 2016, pp. 1–5.
- [25] A. Choudhary, M. Nizamuddin, and M. Zadoo, “Body node coordinator placement algorithm for WBAN using multi-objective swarm optimization,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 2858–2867, Feb. 2022.
- [26] M. Asam, T. Jamal, M. Adeel, A. Hassan, S. Aziz, A. Ajaz, and M. Gulzar, “Challenges in wireless body area network,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, no. 11, Jan. 2019.
- [27] L. Zhong, S. He, J. Lin, J. Wu, X. Li, Y. Pang, and Z. Li, “Technological requirements and challenges in wireless body area networks for health monitoring: A comprehensive survey,” *Sensors*, vol. 22, no. 9, pp. 3–6, May. 2022.

- [28] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Cell-free massive MIMO versus small cells,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, Mar. 2017.
- [29] M. H. Alsharif and R. Nordin, “Evolution towards fifth generation (5g) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive mimo, and small cells,” *Telecommunication Systems*, vol. 64, no. 4, pp. 617–637, Jul. 2016.
- [30] A. Abrol and R. K. Jha, “Power optimization in 5g networks: A step towards green communication,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1355–1374, 2016.
- [31] M. Bashar, K. Cumanan, A. G. Burr, H. Q. Ngo, and M. Debbah, “Cell-free massive mimo with limited backhaul,” in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, May. 2018, pp. 1–7.
- [32] M. Bashar, H. Q. Ngo, A. G. Burr, D. Maryopi, K. Cumanan, and E. G. Larsson, “On the performance of backhaul constrained cell-free massive mimo with linear receivers,” in *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. IEEE, Oct. 2018, pp. 624–628.
- [33] T. M. Hoang, H. Q. Ngo, T. Q. Duong, H. D. Tuan, and A. Marshall, “Cell-free massive mimo networks: Optimal power control against active eavesdropping,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 10, pp. 4724–4737, Oct. 2018.
- [34] L. Salaun and H. Yang, “Deep learning based power control for cell-free massive mimo with mrt,” in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, Dec. 2021, pp. 01–07.

- [35] A. P. Singh and R. Chopra, "Psa based power control for cell-free massive mimo under los/nlos channels," *Physical Communication*, vol. 64, p. 102360, Jun. 2024.
- [36] M. Alam and E. Hamida, "Surveying wearable human assistive technology for life and safety critical applications: Standards, challenges and opportunities," *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 9153–9209, May. 2014.
- [37] P. T. Hiep and R. Kohno, "Control superframe for high throughput of cluster-based WBAN with CSMA/CA," in *2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*. IEEE, Sep. 2014, pp. 1125–1130.
- [38] C. Chakraborty, B. Gupta, and S. K. Ghosh, "A review on telemedicine-based wban framework for patient monitoring," *Telemedicine and e-Health*, vol. 19, no. 8, pp. 619–626, Aug. 2013.
- [39] G. Chen, Y. Zhan, G. Sheng, L. Xiao, and Y. Wang, "Reinforcement learning-based sensor access control for WBANs," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8483–8494, Jan. 2019.
- [40] G. Newell and G. Vejarano, "Motion-based routing and transmission power control in wireless body area networks," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 444–461, Apr. 2020.
- [41] L. Wang, G. Zhang, J. Li, and G. Lin, "Joint optimization of power control and time slot allocation for wireless body area networks via deep reinforcement learning," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 6, pp. 4507–4516, May. 2020.
- [42] R. G. Dimitri Bertsekas, "Datanetworks," *Prentice-Hall International, Inc*, 1987.

- [43] J. K. J. Fahad Khan, Ateeq Ur Rehman, “Real-time health monitoring system using wireless body area network,” *Journal of Applied and Emerging Sciences*, pp. 26–30, Jun. 2020.
- [44] M. Delgado, G. Rabin, T. Tudor, A. J. Tang, G. Reeves, and E. S. Connolly, “Monitoring risk and preventing ischemic stroke in the very old,” *Expert Review of Neurotherapeutics*, vol. 23, no. 9, pp. 791–801, Aug. 2023.
- [45] S. Al Ani, H. Noman, Q. Al-Maatouk, and T. Atkison, “A survey of ieee 802.15.6: Body area networks,” Jun. 2023.
- [46] S.-T. Chen, S.-S. Lin, C.-W. Lan, and H.-Y. Hsu, “Design and development of a wearable device for heat stroke detection,” *Sensors*, vol. 18, no. 1, p. 17, Dec. 2017.
- [47] L. R and V. P, “Wireless body area network (wban)-based telemedicine for emergency care,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2153, Apr. 2020.
- [48] S. B. H. Youssef, S. Rekhis, and N. Boudriga, “Design and analysis of a wban-based system for firefighters,” in *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, Aug. 2015, pp. 526–531.
- [49] F. Taffoni, D. Rivera, A. L. Camera, A. Nicolò, J. R. Velasco, and C. Massaroni, “A wearable system for real-time continuous monitoring of physical activity,” *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2018, pp. 1–16, Mar. 2018.
- [50] A. Goldsmith, “Wireless communications,” *Cambridge University Press*, 2005.
- [51] J. Li, N. Shroff, and E. Chong, “A static power control scheme for wireless cellular networks,” in *IEEE INFOCOM '99. Conference on Computer*

- Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No.99CH36320)*, vol. 2. IEEE, Aug. 2002, pp. 932–939.
- [52] M. Johansson, E. Bjornemo, and A. Ahlen, “Fixed link margins outperform power control in energy-limited wireless sensor networks,” in *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*. IEEE, Apr. 2007, pp. 513–516.
- [53] P. P. Priyesh and S. K. Bharti, “Dynamic transmission power control in wireless sensor networks using p-i-d feedback control technique,” in *2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*. IEEE, Jan. 2017, pp. 306–313.
- [54] Y. Fu, W. Wen, Z. Zhao, T. Q. S. Quek, S. Jin, and F.-C. Zheng, “Dynamic power control for NOMA transmissions in wireless caching networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 1485–1488, Oct. 2019.
- [55] J. Song, S. Han, A. K. Mok, D. Chen, and M. Nixon, “Centralized control of wireless sensor networks for real-time applications,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, no. 22, pp. 25–32, Nov. 2007.
- [56] A. Dhadiwal, P. Disoja, P. Dawande, T. Patil, and A. H. Palve, “Smart centralized power control for buildings using WSN,” in *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*. IEEE, Oct. 2015, pp. 485–489.
- [57] S. Jagannathan, A. Chronopoulos, and S. Ponipireddy, “Distributed power control in wireless communication systems,” in *Proceedings. Eleventh In-*

- ternational Conference on Computer Communications and Networks*, ser. ICCCN-02. IEEE, Oct. 2002, pp. 493–496.
- [58] R. Aslani and M. Rasti, “A distributed power control algorithm for energy efficiency maximization in wireless cellular networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 1975–1979, Nov. 2020.
- [59] A. R. Akash, M. Hossen, M. R. Hassan, and M. I. Hossain, “Gateway node-based clustering hierarchy for improving energy efficiency of wireless body area networks,” in *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*. IEEE, Sep. 2019, pp. 668–672.
- [60] S. Ayed, L. C. Fourati, and H. Ghazzai, “Cluster-based trust management approach to mitigate attacks in WBAN,” in *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. IEEE, Jun. 2021, pp. 1986–1901.
- [61] L. Liang, Y. Ge, G. Feng, W. Ni, and A. A. P. Wai, “A low overhead tree-based energy-efficient routing scheme for multi-hop wireless body area networks,” *Computer Networks*, vol. 70, pp. 45–58, Sep. 2014.
- [62] A. Vyas, S. Pal, and B. K. Saha, “Relay-based communications in WBANs,” *ACM Computing Surveys*, vol. 54, no. 1, pp. 1–34, Jan. 2021.
- [63] M. Hamalainen, L. Mucchi, M. Girod-Genet, T. Paso, J. Farserotu, H. Tanaka, D. Anzai, L. Pierucci, R. Khan, M. M. Alam, and P. Dallengne, “ETSI SmartBAN architecture: The global vision for smart body area networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 150 611–150 625, Aug. 2020.
- [64] M. O. Rahman, C. S. Hong, S. Lee, and Y.-C. Bang, “Atlas: A traffic load aware sensor mac design for collaborative body area sensor networks,” *Sensors*, vol. 11, no. 12, pp. 11 560–11 580, Dec. 2011.

- [65] S. Hamida, E. Hamida, and B. Ahmed, “A new mhealth communication framework for use in wearable wbans and mobile technologies,” *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 3379–3408, Feb. 2015.
- [66] W. Zang, F. Miao, R. Gravina, F. Sun, G. Fortino, and Y. Li, “Cmdp-based intelligent transmission for wireless body area network in remote health monitoring,” *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 3, pp. 829–837, Jan. 2019.
- [67] C.-C. Wang, C.-Y. Yang, and C.-C. Huang, “Personal gateway design for portable medical devices used in body area networks,” in *2010 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE, Jan. 2010, pp. 189–190.
- [68] C. Yi and J. Cai, “Transmission management of delay-sensitive medical packets in beyond wireless body area networks: A queueing game approach,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 9, pp. 2209–2222, Sep. 2018.
- [69] T. C. Hieu, P. T. Hiep, and H. Dinh, “A study of hierarchical topology and spatial reuse superframe for cluster-based WBAN,” in *2019 6th NAFOS-TED Conference on Information and Computer Science (NICS)*. IEEE, Dec. 2019, pp. 410–415.
- [70] H. M. Khater, F. Sallabi, M. A. Serhani, S. Turaev, and E. Barka, “Efficient hybrid fault-management clustering algorithm (HFMCA) in WBANs based on weighted bipartite graph,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 57 977–57 990, Jun. 2023.
- [71] M. Kathuria and S. Gambhir, “Genetic binary decision tree based packet handling schema for WBAN system,” in *2014 Recent Advances in Engi-*

- neering and Computational Sciences (RAECS)*. IEEE, Mar. 2014, pp. 1–6.
- [72] H. Moun gla, A. Jarray, A. Karmouch, and A. Mehaoua, “Cost-effective reliability-and energy-based intra-WBAN interference mitigation,” in *2014 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, Dec. 2014, pp. 2399–2404.
- [73] A. Vyas and S. Pal, “Optimum placement of relay nodes in WBANs for improving the QoS of indoor RPM system,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 14 434–14 442, Jul. 2021.
- [74] K. Zafar, G. Ahmed, and S. A. Khan, “An energy aware relay based TPC routing strategy for WBAN,” in *2021 Mohammad Ali Jinnah University International Conference on Computing (MAJICC)*. IEEE, Jul. 2021, pp. 1–6.
- [75] E. Wong, L. Ruan, and M. P. I. Dias, “Minimizing latency of periodic monitoring traffic in smart body area networks (SmartBANs),” in *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, Jul. 2016, pp. 1–4.
- [76] M. Gupta, S. Tanwar, A. Rana, and H. Walia, “Smart healthcare monitoring system using wireless body area network,” in *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*. IEEE, Sep. 2021, pp. 1–5.
- [77] H. Moosavi and F. M. Bui, “Optimal beamforming-based power control in wireless body area networks,” in *2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON)*. IEEE, Oct. 2016, pp. 1–5.

- [78] S. Li, F. Hu, J. Yu, and Z. Huang, “Optimal power allocation with a co-operative relay in multi-point WBAN,” in *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. IEEE, Aug. 2019, pp. 919–924.
- [79] Z. Ling, F. Hu, and M. Shao, “The optimal control policy for point-to-point wireless body area network based on simultaneous time-ratio and transmission power allocation,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46 454–46 460, Feb. 2019.
- [80] D. Du, F. Hu, F. Wang, Z. Wang, Y. Du, and L. Wang, “A game theoretic approach for inter-network interference mitigation in wireless body area networks,” *China Communications*, vol. 12, no. 9, pp. 150–161, Sep. 2015.
- [81] Y. Xu, M. Ke, F. Liu, and Q. Zha, “A self-adaptive power control algorithm based on game theory for inter-WBAN interference mitigation,” in *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, Oct. 2016, pp. 2873–2877.
- [82] M. Somasundaram and R. Sivakumar, “Game theory based security in wireless body area network with stackelberg security equilibrium,” *The Scientific World Journal*, vol. 2015, pp. 1–9, Dec. 2015.
- [83] W. Gao, B. Jiao, G. Yang, W. Hu, and J. Liu, “Transmission power control for IEEE 802.15.6 body area networks,” *ETRI Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 313–316, Apr. 2014.
- [84] N. T. L. Nguyễn Huy Hoàng, Nguyễn Như Thắng, “Thông lượng của cấu hình mạng phân theo cụm sử dụng csma/ca của chuẩn ieee 802.15.6,” *Tạp chí Nghiên cứu KH và CN Quân sự*, số 29, Tháng 2 năm 2014.

- [85] D. O. Mau and H. T. Quy, “Multi-wireless interfaces enabling mobility for IoT health care system,” in *2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*. IEEE, Sep. 2019, pp. 52–57.
- [86] H. T. Nguyen and T. V. Nguyen, “Energy-efficient and low complexity channel coding for wireless body area networks,” in *2018 5th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*. IEEE, Nov. 2018, pp. 265–269.
- [87] P. T. Hiep and N. H. Hoang, “On throughput and power consumption of multiple-hop WBANs,” in *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. IEEE, Oct. 2015, pp. 417–422.
- [88] P. T. Hiep, N. H. Hoang, and R. Kohno, “Performance analysis of multiple-hop wireless body area network,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 17, no. 4, pp. 419–427, Aug. 2015.
- [89] I. S. K. N. U. K. S. K. Md Asdaque Hussain; Nasare Alam; Sana UllahUWB Wireless Communication Center, Inha University, “Tdma based directional mac for wban,” *INC2010: 6th International Conference on Networked Computing*, pp. 1–5, June 2010.
- [90] J. F. Herculano, W. de P. Pereira, and A. S. de Sa, “An adaptive TDMA approach for improving reliability and performance in WBAN under heterogeneous traffic and interference,” in *2022 XII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*. IEEE, Nov. 2022, pp. 1–8.
- [91] E. Bjornson, L. Sanguinetti, and M. Kountouris, “Deploying dense networks for maximal energy efficiency: Small cells meet massive MIMO,”

- IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 832–847, Apr. 2016.
- [92] W. Liu, S. Han, and C. Yang, “Energy efficiency comparison of massive MIMO and small cell network,” in *2014 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*. IEEE, Dec. 2014, pp. 617–621.
- [93] K. Y. Yazdandoost and K. Sayrafian-Pour, “Channel model for body area network (BAN),” *IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE P802.15-08-0780-09-0006*, pp. 29–30, Apr. 2009.
- [94] D. B. Smith and L. W. Hanlen, “Channel modeling for wireless body area networks,” in *Integrated Circuits and Systems*. Springer International Publishing, 2015, pp. 25–55.
- [95] T. Ikeda, S. Sampei, and N. Morinaga, “Tdma-based adaptive modulation with dynamic channel assignment for high-capacity communication systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 404–412, Mar. 2000.
- [96] M. Attarifar, A. Abbasfar, and A. Lozano, “Modified conjugate beamforming for cell-free massive mimo,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 616–619, Apr. 2019.
- [97] A. V. Oppenheim and G. C. Verghese, “Signals, systems, and inference,” *Introduction to Communication, Control and Signal Processing Spring 2010*, 2010.
- [98] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, “Table of integrals, series, and products,” *7th ed. San Diego, CA: Academic*, 2007.

- [99] K. Sikorski, “Bisection is optimal,” *Numerische Mathematik*, vol. 40, no. 1, pp. 111–117, Feb. 1982.
- [100] J. Lin and M. A. Weitnauer, “Range extension cooperative mac to attack energy hole in duty-cycled multi-hop wsns,” *Wireless Networks*, vol. 24, no. 5, pp. 1419–1437, Nov. 2016.
- [101] Z. Li, M. Yang, and G. Wang, “Performance analysis of swipt aided integrated remote wireless sensor and satellite network,” in *2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (IS-NCC)*. IEEE, Jul. 2022, pp. 1–6.
- [102] E. Bjornson and L. Sanguinetti, “Making cell-free massive mimo competitive with mmse processing and centralized implementation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 1, pp. 77–90, Jan. 2020.
- [103] S. Elhoushy, M. Ibrahim, and W. Hamouda, “Cell-free massive mimo: A survey,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 492–523, Oct. 2021.
- [104] F. Wang and Z. Liu, “Adaptive water-filling power control for wireless communications networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 737–739, Oct. 2008.
- [105] Y.-Y. Shih, P.-C. Hsiu, and A.-C. Pang, “A data parasitizing scheme for effective health monitoring in wireless body area networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 1, pp. 13–27, Jan. 2019.
- [106] M. Shu, D. Yuan, C. Zhang, Y. Wang, and C. Chen, “A mac protocol for medical monitoring applications of wireless body area networks,” *Sensors*, vol. 15, no. 6, pp. 12 906–12 931, Jun. 2015.

- [107] S. Boyd and L. Vandenberghe, “Convex optimization,” *Cambridge, UK:Cambridge University Press*, 2004.