

ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐIỆN - ĐIỆN TỬ



ĐỒ ÁN II
THIẾT KẾ TÍCH HỢP HỆ THỐNG NHÚNG THU THẬP
DỮ LIỆU NHỊP TIM KHÔNG DÂY VÀ XÂY DỰNG
KHOẢNG GIAO TIẾP PHẦN CỨNG CHUẨN BLE

Người hướng dẫn: PGS.TS. Nguyễn Thúy Anh

Nhóm sinh viên thực hiện:

Vũ Lâm Huy	20224438
Nguyễn Quang Phú	20224451

Hà Nội, 01/2026

LỜI MỞ ĐẦU

Hiện nay, nhu cầu theo dõi sức khỏe tại nhà đang tăng cao, đặc biệt là việc giám sát liên tục các chỉ số tim mạch. Các thiết bị IoT y tế đang dần thay thế các máy đo công kênh truyền thống. Xu hướng chuyển dịch từ mô hình chăm sóc sức khỏe tập trung tại bệnh viện sang mô hình giám sát liên tục tại nhà (Home-monitoring) thông qua các thiết bị đeo thông minh (Wearable devices) đang trở thành một nhu cầu cấp thiết. Trong đó, việc giám sát các chỉ số sinh tồn như nhịp tim (Heart Rate) và biến thiên nhịp tim (HRV) theo thời gian thực đóng vai trò quan trọng trong việc phát hiện sớm các bất thường về tim mạch cũng như hỗ trợ tối ưu hóa quá trình tập luyện thể thao. Để xây dựng được một hệ thống giám sát sức khỏe tin cậy, bên cạnh việc sở hữu các cảm biến đo lường chính xác, một thách thức lớn đặt ra cho các kỹ sư hệ thống nhúng là vấn đề Tích hợp hệ thống (System Integration) và Truyền thông dữ liệu (Data Communication). Làm thế nào để thu thập dữ liệu liên tục với độ trễ thấp nhất? Làm thế nào để giải mã các gói tin nhị phân từ phần cứng chuyên dụng? Làm thế nào để tối ưu hóa năng lượng cho thiết bị trong mạng không dây?

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn và thách thức kỹ thuật đó, em đã lựa chọn thực hiện đề án với đề tài: "Thiết kế tích hợp hệ thống nhúng thu thập dữ liệu nhịp tim không dây và xây dựng khối giao tiếp phần cứng chuẩn BLE". Trọng tâm của đề án không đi sâu vào việc gia công lại các mạch cảm biến quang học cơ bản (vốn thường gặp vấn đề về nhiễu động và độ an toàn điện), mà tập trung vào việc nghiên cứu kiến trúc phần cứng của các module cảm biến chuẩn công nghiệp và thiết kế khối giao diện phần mềm mức thấp (Hardware Interface/Driver). Đề án ứng dụng công nghệ Bluetooth Low Energy (BLE) – chuẩn giao tiếp xương sống của các thiết bị IoT hiện đại – để xây dựng một kênh truyền dữ liệu thời gian thực, ổn định và tiết kiệm năng lượng.

Nội dung báo cáo sẽ trình bày chi tiết quy trình từ việc phân tích kiến trúc phần cứng thiết bị, thiết kế giao thức truyền nhận dữ liệu, đến việc hiện thực hóa Driver điều khiển để trích xuất và xử lý dữ liệu thô (Raw Data). Kết quả của đề án là một nền tảng hệ thống nhúng hoàn chỉnh, sẵn sàng cung cấp dữ liệu y sinh chính xác cho các ứng dụng phân tích chuyên sâu.

Trong quá trình thực hiện, mặc dù đã rất nỗ lực nghiên cứu và tìm hiểu, song do giới hạn về thời gian và kiến thức, đề án khó tránh khỏi những thiếu sót. Em rất mong nhận được sự đóng góp ý kiến quý báu của cô để đề tài được hoàn thiện hơn.

Em xin chân thành cảm ơn!

MỤC LỤC

LỜI MỞ ĐẦU	2
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	6
DANH MỤC BẢNG BIỂU	8
CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT	9
1.1. Tổng quan về giám sát sinh trắc học không dây.....	9
1.1.1. Sự chuyển dịch mô hình chăm sóc sức khỏe trong kỷ nguyên IoT.....	9
1.1.2. Mạng diện thân không dây (WBAN).....	9
1.1.3. Vai trò của giám sát nhịp tim thời gian thực	10
1.2. Các phương pháp đo nhịp tim.....	11
1.2.1. Phương pháp Điện tâm đồ (Electrocardiography - ECG)	11
1.2.2. Phương pháp Quang phổ kế (Photoplethysmography - PPG).....	12
1.3. Công nghệ giao tiếp tầm ngắn trong thiết bị nhúng.....	13
1.3.1. Tổng quan về Bluetooth Low Energy (BLE)	14
1.3.2. Cấu trúc mạng BLE: Central và Peripheral	16
1.3.3. Kiến trúc GATT (Generic Attribute Profile)	18
1.3.4. Cấu trúc bản tin Heart Rate Profile (Chuẩn Bluetooth SIG)	21
CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH THIẾT KẾ HỆ THỐNG	24
2.1. Yêu cầu hệ thống	24
2.1.1. Yêu cầu chức năng.....	24
2.1.2. Yêu cầu phi chức năng.....	25
2.2. Thiết kế phần cứng thử nghiệm	25
2.2.1. Lựa chọn linh kiện	25
2.2.2. Sơ đồ kết nối	26
2.2.3 Đánh giá thử nghiệm và Chuyển đổi giải pháp	27
2.3. Thiết kế hệ thống hoàn thiện.....	28
2.3.1. Sơ đồ tổng quát	29

2.3.2. Kiến trúc chức năng tổng quát của Node cảm biến	29
2.4. Phân tích đặc tả kỹ thuật Node cảm biến Polar	30
2.4.1. Sơ đồ khối chức năng của Node cảm biến (Polar Device)	30
2.4.2. Phân tích chi tiết Khối cảm biến quang học và Front-end Analog (AFE)	31
2.4.3. Phân tích chi tiết Vi điều khiển và khối thu phát sóng (MCU & RF Transceiver)	33
2.5. Thiết kế giao thức giao tiếp (Communication Protocol Design)	34
2.5.1. Quy trình bắt tay (Handshaking) và ghép nối (Pairing)	35
2.5.2. Định nghĩa bản tin dữ liệu (Data Payload Definition)	36
2.5.3. Cơ chế thông báo (Notification) và ngắt (Interrupt)	37
CHƯƠNG 3: XÂY DỰNG KHỐI GIAO DIỆN PHẦN CỨNG (DRIVER)	39
3.1. Lưu đồ thuật toán điều khiển	39
3.1.1. Lưu đồ quét và phát hiện thiết bị	39
3.1.2. Lưu đồ xử lý ngắt	41
3.2. Xây dựng Driver giao tiếp	44
3.2.1. Khởi tạo Stack Bluetooth và Định nghĩa UUID	44
3.2.2. Giải mã dữ liệu thô	45
3.2.3. Xử lý sự kiện mất kết nối và tái kết nối tự động	47
CHƯƠNG 4: THỬ NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ	50
4.1. Thiết lập môi trường thử nghiệm	50
4.2. Kết quả thiết lập kết nối	50
4.2.1. Trên mạch Prototype MAX30105	50
4.2.2. Trên thiết bị Polar H10	50
4.3. Kết quả phân tích gói tin dữ liệu (Packet Analysis)	52
4.4. Kết quả đo thực nghiệm theo thời gian thực	53
4.4.1. Kết quả với mạch MAX30105	53
4.4.2. Kết quả với Polar Verity Sense	54
4.5. Đánh giá sai số hệ thống	54

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	58
5.1. Kết luận chung	58
5.2. Các vấn đề tồn tại.....	58
5.3. Hướng phát triển	59
TÀI LIỆU THAM KHẢO	61

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1. 1 Mô hình mạng diện thân không dây (WBAN) với các nút cảm biến sinh trắc học	10
Hình 1. 2 Dạng sóng điện tâm đồ (ECG)	11
Hình 1. 3 Hình minh họa rõ ràng nhất về nguyên lý PPG phản xạ.....	12
Hình 1. 4 Hình minh họa rõ ràng nhất về sự phân tách AC và DC trong tín hiệu PPG	13
Hình 1. 5 Sơ đồ phân bố kênh tần số của BLE so với Bluetooth Classic và Wi-Fi	15
Hình 1. 6 Mô hình kết nối hình sao (Star Topology) giữa thiết bị Central (PC) và Peripheral (Polar)	16
Hình 1. 7 Cấu trúc phân tầng dữ liệu trong kiến trúc GATT	19
Hình 2. 1 Bo mạch ESP32.....	28
Hình 2. 2 Module cảm biến MAX30105	26
Hình 2. 3 Sơ đồ kết nối mạch MAX30105	27
Hình 2. 4 Mạch thực tế.....	27
Hình 2. 5 Thiết bị Polar Varsity Sense (cảm biến đo nhịp tim).....	28
Hình 2. 6 Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống.....	28
Hình 2. 7 Sơ đồ khối chức năng phần cứng	31
Hình 2. 8 Sơ đồ chuyển đổi trạng thái.....	35
Hình 3. 1 Lưu đồ thuật toán quét và kết nối.....	39
Hình 3. 2 Lưu đồ thuật toán xử lý dữ liệu bất đồng bộ.....	41
Hình 3. 3 Sơ đồ tuần tự quá trình thu thập dữ liệu.....	42
Hình 3. 4 Code khởi tạo	45
Hình 3. 5 Lưu đồ thuật toán giải mã gói tin	46
Hình 3. 6 Code giải mã.....	46
Hình 3. 7 Máy trạng thái quản lý kết nối	47

Hình 3. 8	Code tái kết nối	47
Hình 4. 1	Cấu trúc bảng dịch vụ (GATT Table) đọc được từ thiết bị	50
Hình 4. 2	Cấu trúc bảng dịch vụ (GATT Table) đọc được từ thiết bị	50
Hình 4. 3	Nhật ký giải mã gói tin dữ liệu thô	51
Hình 4. 4	Biểu đồ sóng nhiều, méo mó của MAX30105 khi đang vận động	52
Hình 4. 5	Đồ thị đáp ứng nhịp tim theo thời gian thực	53

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1. 1 So sánh đặc tả kỹ thuật giữa Bluetooth Classic và Bluetooth Low Energy	15
Bảng 1. 2 So sánh vai trò của thiết bị Central và Peripheral trong hệ thống	17
Bảng 1. 3 Danh sách các UUIDs chuẩn trong Profile đo nhịp tim	20
Bảng 1. 4 Cấu trúc trường dữ liệu của gói tin Heart Rate Measurement.....	22
Bảng 2. 1 Bảng chi tiết cấu trúc gói tin (Packet Structure Table)	35
Bảng 3. 1 Các UUID sử dụng trong hệ thống	43
Bảng 4. 1 Bảng so sánh kết quả đo.....	54

CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

1.1. Tổng quan về giám sát sinh trắc học không dây

1.1.1. Sự chuyển dịch mô hình chăm sóc sức khỏe trong kỷ nguyên IoT

Trong những năm gần đây, cùng với sự bùng nổ của cuộc Cách mạng Công nghiệp 4.0, lĩnh vực y tế đang trải qua một sự chuyển dịch mạnh mẽ từ mô hình "chăm sóc tập trung tại bệnh viện" (Hospital-centric) sang mô hình "chăm sóc lấy bệnh nhân làm trung tâm" (Patient-centric) và giám sát tại nhà (Home-monitoring). Internet vạn vật trong y tế (IoMT - Internet of Medical Things) là động lực chính của xu hướng này. IoMT là hệ thống các thiết bị y tế và ứng dụng được kết nối với nhau qua mạng, cho phép thu thập, truyền tải và lưu trữ dữ liệu sinh trắc học của bệnh nhân một cách tự động mà không cần sự can thiệp thủ công liên tục của nhân viên y tế.

Giám sát sinh trắc học không dây (Wireless Biometric Monitoring) là thành phần cốt lõi của IoMT. Công nghệ này loại bỏ sự phụ thuộc vào các thiết bị đo cồng kềnh, dây dẫn phức tạp, mang lại sự thoải mái cho người dùng và khả năng giám sát liên tục 24/7. Điều này đặc biệt quan trọng đối với người cao tuổi, bệnh nhân tim mạch hoặc các vận động viên cần theo dõi chỉ số sinh tồn trong quá trình vận động mạnh.

1.1.2. Mạng diện thân không dây (WBAN)

Để thực hiện việc giám sát sinh trắc học, các kỹ sư hệ thống nhúng sử dụng mô hình Mạng diện thân không dây (WBAN - Wireless Body Area Network). WBAN là một tập hợp các nút cảm biến (Sensor Nodes) năng lượng thấp được gắn trên cơ thể hoặc cấy ghép bên trong cơ thể người.

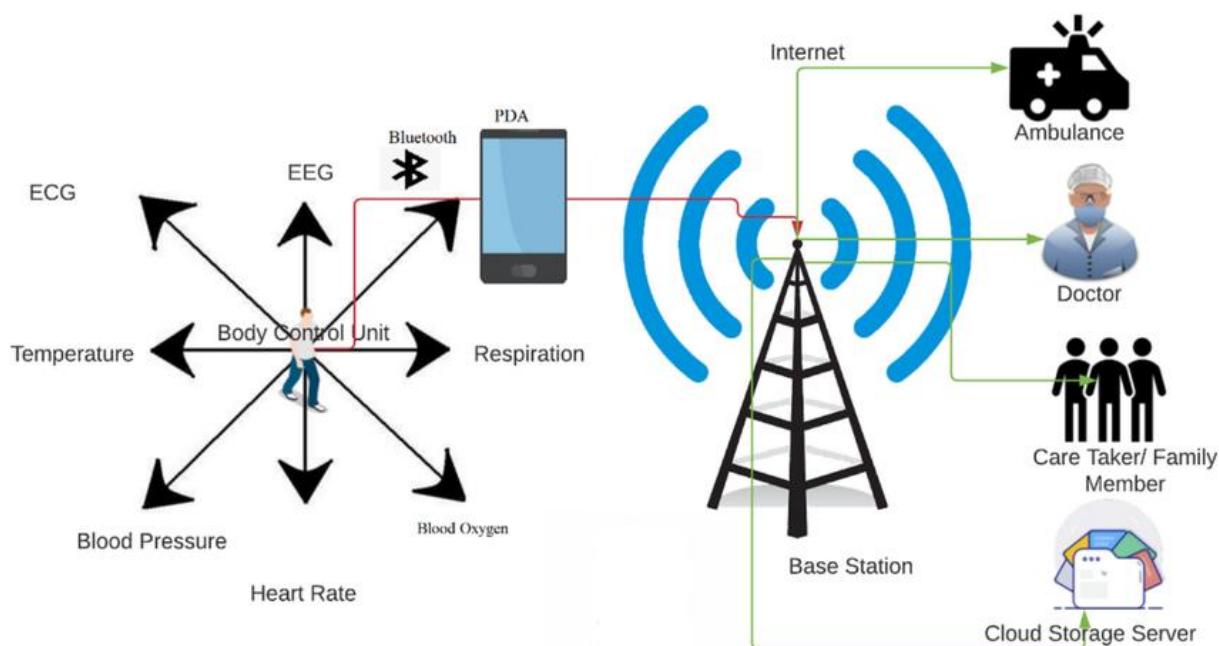
Một hệ thống WBAN điển hình bao gồm ba tầng chính:

1. Tầng cảm biến (Sensing Tier): Gồm các thiết bị nhúng thu thập tín hiệu sinh lý như điện tâm đồ (ECG), nhịp tim (PPG), nồng độ oxy trong máu (SpO2), nhiệt độ cơ thể và gia tốc chuyển động. Các thiết bị này yêu cầu kích thước nhỏ gọn và tiêu thụ năng lượng cực thấp (Ultra-low power).

2. Tầng giao tiếp (Communication Tier): Chịu trách nhiệm truyền dữ liệu từ cảm biến đến thiết bị thu thập trung tâm (Gateway) như điện thoại thông minh hoặc máy tính cá nhân. Các giao thức phổ biến được sử dụng bao gồm Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, hoặc ANT+.

3. Tầng ứng dụng (Application Tier): Nơi dữ liệu được xử lý, hiển thị và đưa ra cảnh báo.

Trong khuôn khổ đề án này, hệ thống được thiết kế tập trung vào tăng cảm biến và tăng giao tiếp, cụ thể là việc tích hợp thiết bị đo nhịp tim quang học vào mạng lưới giám sát thông qua chuẩn giao tiếp BLE.



Hình 1. 1 Mô hình mạng điện thân không dây (WBAN) với các nút cảm biến sinh trắc học

(Trích: Research Gate)

1.1.3. Vai trò của giám sát nhịp tim thời gian thực

Trong các chỉ số sinh tồn, nhịp tim (Heart Rate - HR) và biến thiên nhịp tim (Heart Rate Variability - HRV) là những thông số quan trọng nhất phản ánh tình trạng sức khỏe của hệ tim mạch và hệ thần kinh tự chủ.

Việc giám sát nhịp tim không dây theo thời gian thực (Real-time monitoring) đặt ra những thách thức lớn về mặt kỹ thuật thiết kế thiết bị nhúng:

- **Độ trễ:** Dữ liệu phải được truyền đi ngay lập tức để phát hiện các bất thường (như rung nhĩ, nhịp tim nhanh kịch phát) kịp thời.

- **Độ tin cậy:** Kết nối không dây phải ổn định trong môi trường nhiễu nhiều sóng và khi người dùng di chuyển liên tục.

- **Tiết kiệm năng lượng:** Thiết bị phải hoạt động được trong thời gian dài chỉ với nguồn pin dung lượng nhỏ.

Do đó, việc thiết kế một hệ thống tích hợp đáp ứng được các yêu cầu khắt khe này đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về cả phần cứng cảm biến và giao thức truyền thông mức thấp, là mục tiêu chính mà đồ án hướng tới.

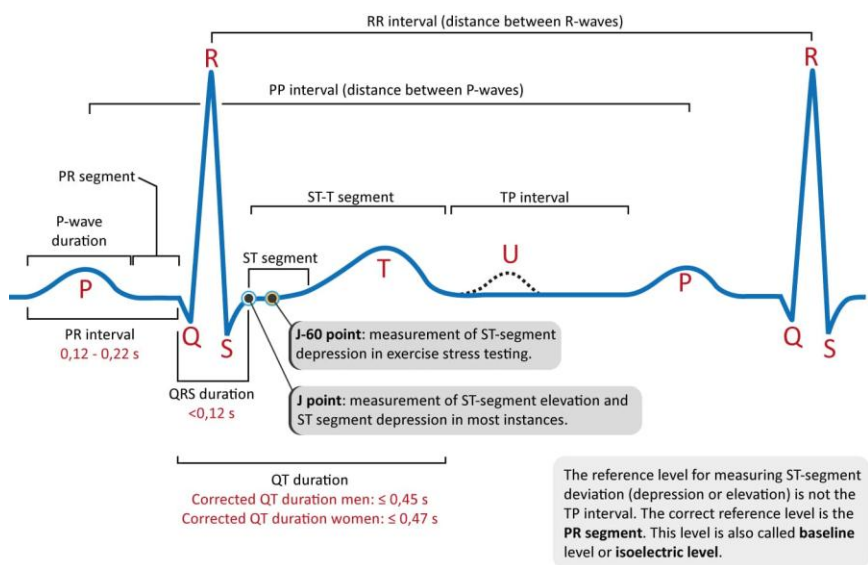
1.2. Các phương pháp đo nhịp tim

Trong y sinh điện tử, việc xác định nhịp tim (Heart Rate) dựa trên việc thu thập và xử lý các tín hiệu sinh học thay đổi theo chu kỳ hoạt động của tim. Hiện nay, có hai phương pháp không xâm lấn (non-invasive) phổ biến nhất được ứng dụng trong các thiết bị nhúng và thiết bị đeo thông minh là Điện tâm đồ (ECG) và Quang phổ kế (PPG).

1.2.1. Phương pháp Điện tâm đồ (Electrocardiography - ECG)

Điện tâm đồ là phương pháp ghi lại hoạt động điện sinh học của tim. Đây được coi là "tiêu chuẩn vàng" trong chẩn đoán y khoa và được sử dụng trong các dòng thiết bị đeo ngực chuyên dụng.

a) Nguyên lý hoạt động: Tim hoạt động như một máy bơm cơ học được điều khiển bởi hệ thống dẫn truyền điện. Nút xoang nhĩ (SA node) phát ra xung điện lan truyền khắp cơ tim, gây ra hiện tượng khử cực (depolarization) và tái cực (repolarization) của các tế bào cơ tim. Dòng điện ion này lan truyền qua các mô dẫn điện của cơ thể đến bề mặt da, tạo ra các điện thế vi mô (cỡ mV).



Hình 1. 2 Dạng sóng điện tâm đồ (ECG)

(Trích: <https://ecgwaves.com/topic/ecg-normal-p-wave-qrs-complex-st-segment-t-wave-j-point/>)

b) Đặc điểm tín hiệu: Một chu kỳ ECG điển hình bao gồm các thành phần sóng P, phức bộ QRS và sóng T. Trong đó:

Sóng R: Là đỉnh nhọn có biên độ lớn nhất, đại diện cho quá trình khử cực của tâm thất.

Khoảng RR (RR-Interval): Là khoảng thời gian giữa hai đỉnh R liên tiếp. Nhịp tim (BPM) được tính toán nghịch đảo từ khoảng RR này.

c) Yêu cầu phần cứng: Để đo được ECG, hệ thống những cần:

- Các điện cực tiếp xúc tốt với da để giảm trở kháng.
- Mạch khuếch đại thuật toán (Instrumentation Amplifier) với chỉ số CMRR cao để loại bỏ nhiễu đồng pha.
- Các bộ lọc thông dải (Band-pass filter) để loại bỏ nhiễu điện lưới (50/60Hz) và nhiễu dao động cơ học.

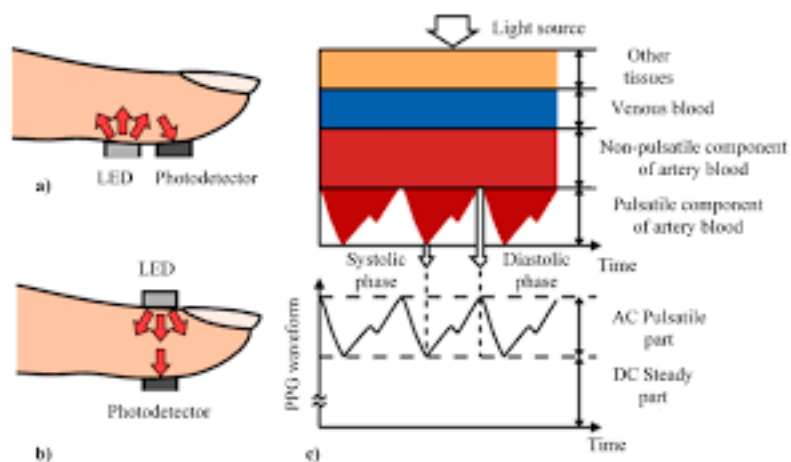
1.2.2. Phương pháp Quang phổ kế (Photoplethysmography - PPG)

Quang phổ kế (PPG) là phương pháp quang học được sử dụng rộng rãi trong các thiết bị đeo tay và băng đeo bắp tay (như Polar Verity Sense, OH1). Phương pháp này dựa trên tính chất hấp thụ ánh sáng của máu.

a) Nguyên lý hoạt động:

PPG hoạt động dựa trên định luật Beer-Lambert về sự hấp thụ ánh sáng. Cảm biến bao gồm một nguồn phát sáng (LED) và một bộ thu quang (Photodetector - PD).

Khi tim đập (tâm thu), áp lực máu tăng lên làm giãn nở các mao mạch dưới da, lượng máu tăng dẫn đến hấp thụ nhiều ánh sáng hơn → cường độ ánh sáng phản xạ về PD giảm đi. Ngược lại, khi tim nghỉ (tâm trương), lượng máu giảm → ánh sáng phản xạ tăng lên.



Hình 1. 3 Hình minh họa rõ ràng nhất về nguyên lý PPG phản xạ

(Trích: ResearchGate)

b) Phân loại kỹ thuật đo:

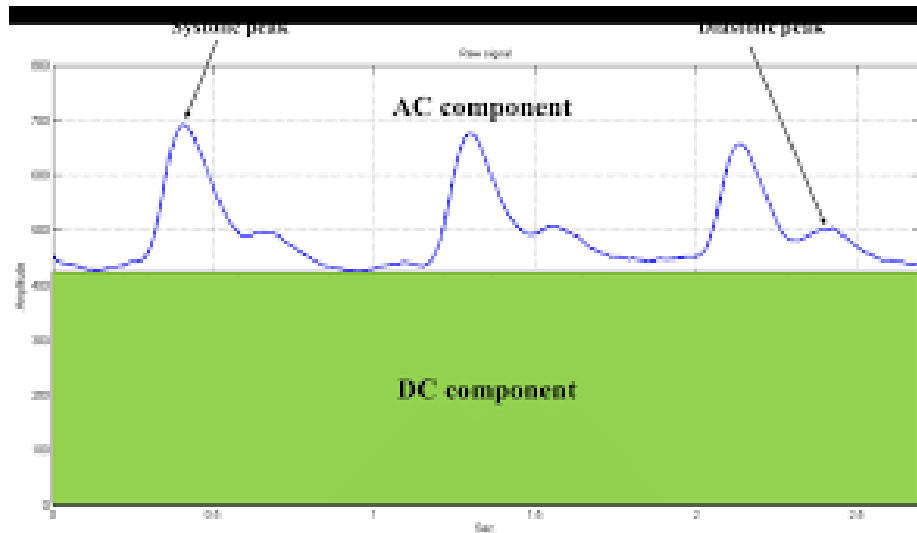
- **Đo xuyên thấu (Transmissive):** Nguồn sáng và cảm biến đặt đối diện nhau (thường dùng kẹp ngón tay). Tín hiệu tốt nhưng bất tiện khi vận động.

- **Đo phản xạ (Reflective):** Nguồn sáng và cảm biến đặt cùng một phía (dùng cho cổ tay, bắp tay). Đây là kỹ thuật phức tạp hơn do tín hiệu phản xạ yếu, nhưng phù hợp cho thiết bị thể thao.

c) **Đặc điểm tín hiệu và lựa chọn bước sóng:** Tín hiệu PPG bao gồm hai thành phần:

- **Thành phần một chiều (DC Component):** Tín hiệu nền do sự hấp thụ ánh sáng của da, xương, mỡ và máu tĩnh mạch. Thành phần này ít thay đổi.

- **Thành phần xoay chiều (AC Component):** Tín hiệu dao động đồng bộ với nhịp tim, do sự thay đổi thể tích máu động mạch. Đây là phần tín hiệu cần trích xuất.



Hình 1. 4 Hình minh họa rõ ràng nhất về sự phân tách AC và DC trong tín hiệu PPG

(Trích: ResearchGate)

Trong thiết kế phần cứng các thiết bị đo nhịp tim vận động (như thiết bị trong đồ án sử dụng), ánh sáng xanh lá cây (Green Light - bước sóng ~525nm) thường được sử dụng thay vì ánh sáng đỏ. Lý do là ánh sáng xanh có khả năng chống nhiễu chuyển động (Motion Artifacts) tốt hơn và ít bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi nhiệt độ bề mặt da so với ánh sáng hồng ngoại.

1.3. Công nghệ giao tiếp tầm ngắn trong thiết bị nhúng

Trong thiết kế hệ thống nhúng hiện đại, đặc biệt là các thiết bị thuộc mạng diện thân (WBAN - Wireless Body Area Network), việc lựa chọn công nghệ giao tiếp đóng vai trò

then chốt quyết định hiệu năng của toàn bộ hệ thống. Khác với các thiết bị mạng thông thường, các node cảm biến y sinh nhúng đặt ra những ràng buộc khắt khe về phần cứng:

1. Tiêu thụ năng lượng (Power Consumption): Đây là yếu tố quan trọng nhất. Thiết bị thường hoạt động bằng pin cúc áo (Coin-cell) hoặc pin Li-Po dung lượng nhỏ, yêu cầu thời gian hoạt động kéo dài từ vài tháng đến vài năm mà không cần sạc lại.

2. Kích thước và giá thành: Module giao tiếp phải nhỏ gọn để tích hợp vào PCB diện tích hẹp và chi phí thấp để sản xuất đại trà.

3. Độ trễ và băng thông: Đối với dữ liệu sinh trắc học như nhịp tim, băng thông không cần quá lớn (chỉ vài chục Bytes/s) nhưng độ trễ phải thấp để đảm bảo tính thời gian thực (Real-time).

Các chuẩn giao tiếp tầm ngắn phổ biến hiện nay bao gồm Zigbee (IEEE 802.15.4), Wi-Fi (IEEE 802.11) và Bluetooth. Tuy nhiên, Wi-Fi tiêu tốn quá nhiều năng lượng, Zigbee lại yêu cầu Gateway chuyên dụng. Do đó, Bluetooth Low Energy (BLE) nổi lên là giải pháp tối ưu nhất, cân bằng giữa khả năng tương thích với các thiết bị di động (Smartphone/Laptop) và khả năng tiết kiệm năng lượng tối đa.

1.3.1. Tổng quan về Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE), hay còn gọi là Bluetooth Smart, được Bluetooth SIG (Special Interest Group) giới thiệu lần đầu trong phiên bản Bluetooth 4.0. Đây không phải là bản nâng cấp đơn thuần của Bluetooth cổ điển (Bluetooth Classic - BR/EDR) mà là một nhánh công nghệ hoàn toàn mới, được thiết kế lại từ đầu cho các ứng dụng Internet vạn vật (IoT).

a) Đặc điểm kỹ thuật lớp Vật lý (PHY Layer): Để hiểu sâu về thiết kế phần cứng, cần phân tích các thông số lớp vật lý của BLE:

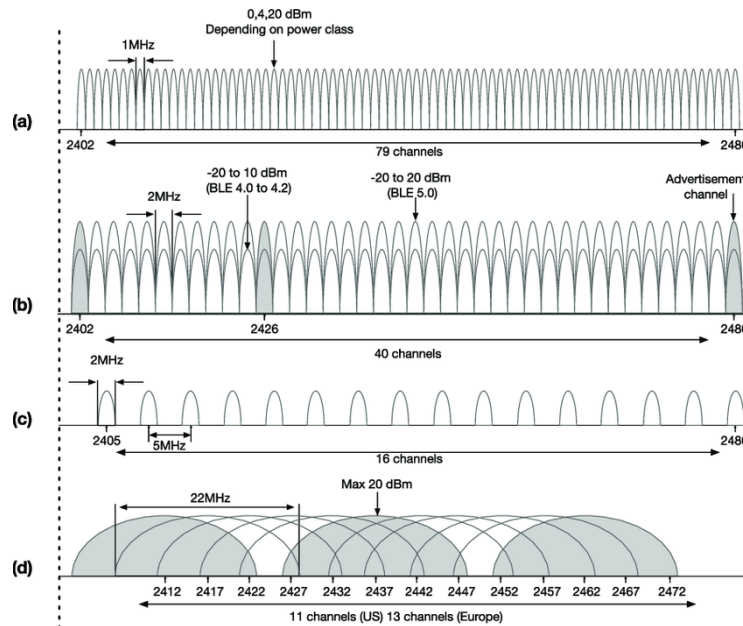
- **Băng tần hoạt động:** BLE hoạt động trong băng tần ISM (Industrial, Scientific, and Medical) không cấp phép tại tần số 2.4 GHz (cụ thể từ 2400 MHz đến 2483.5 MHz).

- **Kỹ thuật điều chế:** BLE sử dụng kỹ thuật điều chế GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Đây là một dạng điều chế FSK nhưng có thêm bộ lọc Gaussian để làm mượt xung trước khi điều chế, giúp giảm nhiễu sang các kênh lân cận và tăng hiệu quả phổ tần. Chỉ số điều chế (Modulation Index) được thiết lập ở mức 0.5, cho phép bộ thu phát sóng (RF Transceiver) tiêu thụ ít năng lượng hơn so với Bluetooth Classic.

- **Tốc độ dữ liệu:** Ở chuẩn BLE 4.x (thường dùng trong các cảm biến nhịp tim như Polar), tốc độ vật lý là 1 Mbps. Tuy nhiên, tốc độ truyền dữ liệu ứng dụng thực tế (Throughput) thường thấp hơn, khoảng vài kbit/s, đủ đáp ứng cho việc truyền gói tin nhịp tim.

Bảng 1. 1 So sánh đặc tả kỹ thuật giữa Bluetooth Classic và Bluetooth Low Energy

Đặc điểm kỹ thuật	Bluetooth Classic (BR/EDR)	Bluetooth Low Energy (BLE)
Ứng dụng chính	Truyền âm thanh, dữ liệu lớn (Headset, Loa)	Cảm biến, Điều khiển, IoT (Đo nhịp tim, Smart home)
Tiêu thụ năng lượng	Cao (1W tham chiếu)	Cực thấp (0.01 - 0.5 W tham chiếu)
Dòng điện đỉnh	< 30 mA	< 15 mA (thường là < 10mA)
Khoảng cách các kênh	1 MHz	2 MHz
Số lượng kênh	79 kênh	40 kênh (3 quảng bá, 37 dữ liệu)
Độ trễ kết nối	~ 100 ms	< 6 ms (Kết nối tức thời)
Topo mạng	Piconet (Tối đa 7 slaves)	Star (Không giới hạn số lượng slaves lý thuyết)



Hình 1. 5 Sơ đồ phân bố kênh tần số của BLE so với Bluetooth Classic và Wi-Fi

(Trích: Research Gate)

b) Cấu trúc kênh truyền: Khác với Bluetooth Classic chia băng tần thành 79 kênh (mỗi kênh 1 MHz), BLE chia thành 40 kênh, mỗi kênh rộng 2 MHz. Sự phân chia này giúp giảm chi phí phần cứng của bộ lọc RF. 40 kênh này được chia làm hai nhóm chức năng:

3 Kênh Quảng bá (Advertising Channels): Kênh 37, 38, và 39. Các kênh này được đặt chiến lược ở các tần số tránh trùng lặp với các kênh Wi-Fi phổ biến (như kênh 1, 6, 11 của Wi-Fi), giúp thiết bị nhúng thiết lập kết nối nhanh và tin cậy ngay cả trong môi trường nhiễu sóng.

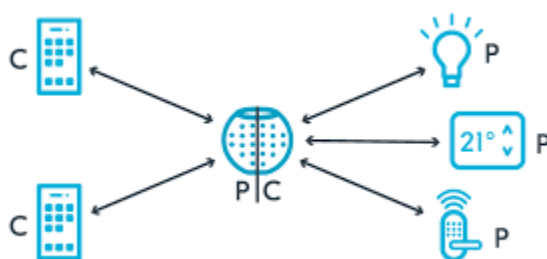
37 Kênh Dữ liệu (Data Channels): Kênh 0-36. Dùng để truyền tải dữ liệu (Payload) sau khi đã kết nối. BLE sử dụng thuật toán Nhảy tần thích ứng (AFH - Adaptive Frequency Hopping) để tự động tránh các kênh bị nhiễu.

c) So sánh năng lượng: Đặc điểm "Low Energy" đạt được nhờ cơ chế ngủ (Sleep Mode) tích cực. Một thiết bị BLE dành phần lớn thời gian (99%) ở trạng thái ngủ sâu (Deep Sleep) với dòng tiêu thụ chỉ vài μA . Nó chỉ thức dậy trong vài mili-giây để gửi một gói tin nhỏ rồi lại ngủ tiếp. Điều này trái ngược với Bluetooth Classic vốn duy trì kết nối liên tục để truyền luồng dữ liệu (như âm thanh).

1.3.2. Cấu trúc mạng BLE: Central và Peripheral

Trong kiến trúc giao thức của Bluetooth Low Energy, lớp GAP (Generic Access Profile) định nghĩa vai trò của các thiết bị trong quá trình thiết lập kết nối và quản lý liên kết. Khác với các mạng lưới phức tạp (Mesh Network), mô hình kết nối cơ bản của BLE là Topo mạng hình sao (Star Topology).

Trong mô hình này, mạng lưới bao gồm một thiết bị trung tâm đóng vai trò điều phối và một hoặc nhiều thiết bị ngoại vi đóng vai trò cung cấp dữ liệu.



Hình 1. 6 Mô hình kết nối hình sao (Star Topology) giữa thiết bị Central (PC) và Peripheral (Polar)

(Trích: Academy Nordicsemi)

a) Thiết bị Ngoại vi (Peripheral Role): Trong ngữ cảnh của đề án thiết kế thiết bị nhúng, Cảm biến nhịp tim Polar đóng vai trò là một thiết bị Peripheral.

- **Đặc điểm kỹ thuật:** Peripheral thường là các nút cảm biến (Sensor Nodes) nhỏ gọn, bị giới hạn về tài nguyên xử lý và dung lượng pin. Chúng được thiết kế để hoạt động ở chế độ ngủ (Sleep mode) trong phần lớn thời gian.

- **Cơ chế hoạt động:**

+ Ở trạng thái chờ kết nối, Peripheral sẽ định kỳ phát đi các Gói tin quảng bá (Advertising Packets) trên 3 kênh tần số chuyên biệt (37, 38, 39).

+ Gói tin này chứa các thông tin định danh như Địa chỉ MAC, Tên thiết bị (Local Name), và danh sách các Dịch vụ (Service UUIDs) mà nó hỗ trợ (ví dụ: Dịch vụ nhịp tim).

+ Sau khi phát gói tin quảng bá, Peripheral sẽ chuyển sang trạng thái lắng nghe trong một khoảng thời gian ngắn để chờ yêu cầu kết nối từ Central.

b) Thiết bị Trung tâm (Central Role): Trong đồ án này, máy tính chạy phần mềm Driver đóng vai trò là thiết bị Central.

- **Đặc điểm kỹ thuật:** Central thường là các thiết bị có khả năng xử lý mạnh (Smartphone, Laptop, Tablet) và nguồn năng lượng dồi dào hơn.

- **Cơ chế hoạt động:**

+ Central thực hiện quá trình Quét (Scanning) trên các kênh quảng bá để tìm kiếm sự hiện diện của Peripheral.

+ Khi phát hiện đúng thiết bị mong muốn (dựa trên địa chỉ MAC hoặc UUID), Central sẽ gửi một yêu cầu kết nối (CONNECT_REQ).

+ Sau khi kết nối được thiết lập, Central sẽ nắm quyền kiểm soát thời gian (Timing) của liên kết, quyết định các tham số như Chu kỳ kết nối (Connection Interval) và Độ trễ (Slave Latency).

c) Quá trình thiết lập kết nối (Connection Establishment): Để chuyển từ trạng thái quảng bá sang trạng thái kết nối dữ liệu, hai thiết bị phải tuân theo một quy trình bắt tay (Handshaking) nghiêm ngặt tại lớp Link Layer:

1. Quảng bá (Advertising): Peripheral phát tín hiệu "Tôi ở đây và tôi có dữ liệu nhịp tim".

2. Khởi tạo (Initiating): Central nhận tín hiệu và gửi yêu cầu kết nối. Gói tin yêu cầu này chứa các tham số quan trọng để đồng bộ hóa việc nhảy tần số (Frequency Hopping).

3. Kết nối (Connection): Sau khi bắt tay thành công, cả hai thiết bị chuyển sang sử dụng 37 kênh dữ liệu (Data Channels). Lúc này, Peripheral ngừng quảng bá và chỉ giao tiếp độc quyền với Central.

d) Phân biệt vai trò GAP và GATT (Quan trọng): Một điểm dễ gây nhầm lẫn trong thiết kế hệ thống BLE là sự khác biệt giữa vai trò kết nối (GAP) và vai trò trao đổi dữ liệu (GATT).

- Theo GAP (Kết nối): PC là Central, Polar là Peripheral.

- Theo GATT (Dữ liệu):

+ Polar là **GATT Server**: Nơi chứa cơ sở dữ liệu (Giá trị nhịp tim).

+ PC là **GATT Client**: Thiết bị gửi yêu cầu đọc hoặc đăng ký nhận thông báo từ Server.

Bảng 1. 2 So sánh vai trò của thiết bị Central và Peripheral trong hệ thống

Đặc điểm	Thiết bị Ngoại vi (Peripheral)	Thiết bị Trung tâm (Central)
Thiết bị thực tế	Cảm biến nhịp tim Polar	Máy tính/Laptop (Gateway)
Nguồn năng lượng	Pin cúc áo (Hạn chế)	Pin lớn/Nguồn lưới (Dồi dào)
Nhiệm vụ chính	Thu thập dữ liệu và Quảng bá	Quét, Kết nối và Xử lý dữ liệu
Khởi tạo kết nối	Không (Chỉ chấp nhận kết nối)	Có (Chủ động gửi yêu cầu)
Xử lý đa kết nối	Thường chỉ kết nối với 1 Central	Có thể kết nối nhiều Peripheral
Vai trò GATT	Server (Cung cấp dữ liệu)	Client (Tiêu thụ dữ liệu)

1.3.3. Kiến trúc GATT (Generic Attribute Profile)

Sau khi kết nối vật lý được thiết lập thông qua giao thức GAP, việc trao đổi dữ liệu thực tế giữa thiết bị Central và Peripheral được quản lý bởi kiến trúc GATT (Generic Attribute Profile). GATT được xây dựng dựa trên Giao thức Thuộc tính (ATT - Attribute Protocol), định nghĩa cách thức tổ chức, lưu trữ và truy xuất dữ liệu trong một thiết bị BLE.

Có thể hình dung GATT giống như một cơ sở dữ liệu thu nhỏ nằm bên trong thiết bị nhúng, nơi dữ liệu được sắp xếp theo cấu trúc phân cấp hình cây (Hierarchical Structure).

a) Mô hình Client - Server trong GATT

Khác với vai trò Central/Peripheral ở lớp liên kết, vai trò trong GATT được định nghĩa dựa trên việc ai là người nắm giữ dữ liệu:

1. GATT Server (Máy chủ):

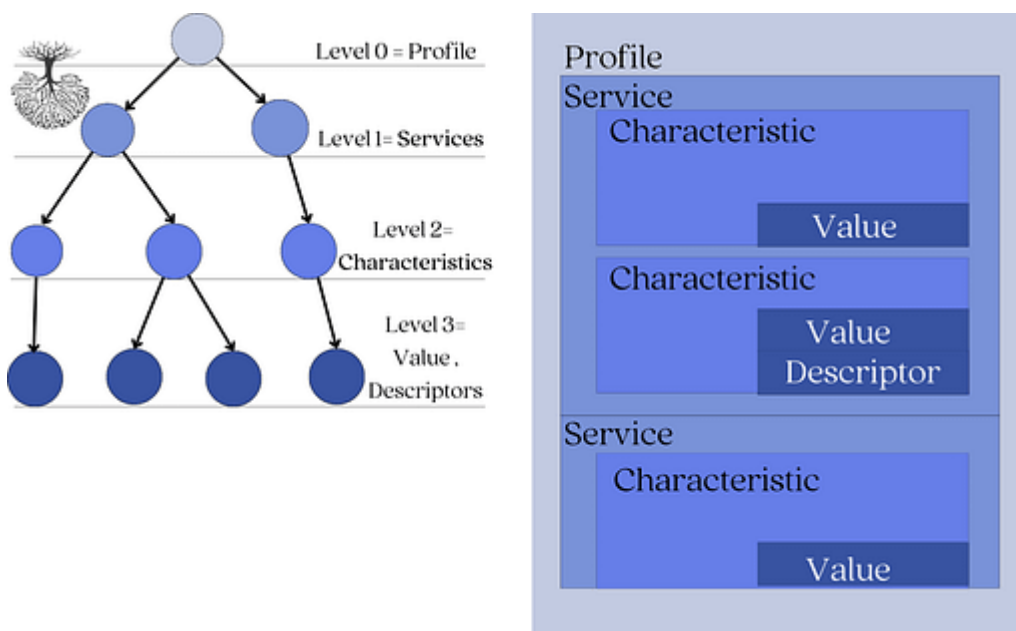
- Là thiết bị chứa dữ liệu và định nghĩa cấu trúc dữ liệu.
- Trong đồ án này, Cảm biến Polar đóng vai trò là GATT Server. Nó lưu trữ giá trị nhịp tim, mức pin, tên thiết bị.

2. GATT Client (Máy khách):

- Là thiết bị gửi yêu cầu đọc/ghi dữ liệu hoặc nhận thông báo từ Server.
- Trong đồ án này, Máy tính đóng vai trò là GATT Client.

b) Cấu trúc phân cấp dữ liệu

Dữ liệu trong GATT Server được tổ chức thành 3 cấp độ chính: Profile, Service và Characteristic.



Hình 1. 7 Cấu trúc phân tầng dữ liệu trong kiến trúc GATT

(Trích: Novelbits)

1. Profile (Hồ sơ):

- Là tập hợp các Services được quy chuẩn hóa bởi Bluetooth SIG cho một ứng dụng cụ thể. Ví dụ: Heart Rate Profile (HRP) dùng cho các thiết bị đo tim mạch.
- Profile không thực sự tồn tại trên thiết bị mà chỉ là bản quy ước thiết kế.

2. Service (Dịch vụ):

- Là một thùng chứa (Container) logic để nhóm các dữ liệu có liên quan đến một chức năng cụ thể.

- Mỗi Service được định danh bằng một mã UUID (Universally Unique Identifier).

- Ví dụ: Dịch vụ Nhịp tim (Heart Rate Service) có UUID chuẩn 16-bit là 0x180D. Dịch vụ Thông tin thiết bị (Device Information Service) có UUID là 0x180A.

3. Characteristic (Đặc tính):

- Đây là đơn vị dữ liệu nhỏ nhất và quan trọng nhất. Nó chứa giá trị thực tế (Value) mà chúng ta cần đo đạc.

- Một Characteristic bao gồm 3 phần:

- + **Declaration:** Khai báo các thuộc tính (Read, Write, Notify).

- + **Value:** Giá trị dữ liệu (ví dụ: con số nhịp tim 80 BPM).

- + **Descriptor:** Thông tin mô tả thêm (ví dụ: Cấu hình thông báo - CCCD).

- Ví dụ: Đặc tính Đo nhịp tim (Heart Rate Measurement) có UUID chuẩn là 0x2A37. Đặc tính Vị trí cảm biến (Body Sensor Location) có UUID là 0x2A38.

c) Định danh UUID (Universally Unique Identifier)

Trong hệ thống nhúng BLE, để tìm đúng dữ liệu cần thiết, ta phải biết "địa chỉ" của nó, chính là UUID.

- **UUID 16-bit:** Dành cho các dịch vụ chuẩn quốc tế (Standard Services) do Bluetooth SIG quy định (như 0x180D, 0x2A37). Giúp tiết kiệm bộ nhớ và băng thông truyền tải.

- **UUID 128-bit:** Dành cho các dịch vụ tùy chỉnh (Custom Services) do nhà sản xuất tự định nghĩa (ví dụ các tính năng riêng của Polar mà không theo chuẩn chung).

d) Các phương thức truy xuất dữ liệu (Operations)

GATT định nghĩa các cách thức để Client lấy dữ liệu từ Server. Việc lựa chọn phương thức ảnh hưởng trực tiếp đến độ trễ và năng lượng tiêu thụ của thiết bị nhúng:

- **Read (Đọc):** Client gửi yêu cầu, Server trả lời giá trị. (Tốn thời gian, không phù hợp với dữ liệu thay đổi liên tục).

- **Write (Ghi):** Client gửi dữ liệu xuống Server (ví dụ: cấu hình lại cảm biến).

- **Notify (Thông báo - Quan trọng nhất):** Server tự động đẩy (push) dữ liệu mới sang Client ngay khi có thay đổi mà không cần Client yêu cầu và không cần xác nhận (ACK).

+ *Ưu điểm:* Tiết kiệm năng lượng tối đa và độ trễ thấp nhất.

+ *Ứng dụng:* Đây là phương thức được sử dụng trong đồ án để thu thập nhịp tim thời gian thực.

- **Indicate (Chỉ thị):** Tương tự Notify nhưng yêu cầu Client xác nhận đã nhận được (ACK). Tin cậy hơn nhưng chậm hơn.

Bảng 1. 3 Danh sách các UUIDs chuẩn trong Profile đo nhịp tim

Loại (Type)	Tên gọi (Name)	UUID (Hex)	Chức năng trong đồ án
Service	Heart Rate Service	0x180D	Nhóm các chức năng liên quan đến đo nhịp tim.
Characteristic	Heart Rate Measurement	0x2A37	Chứa giá trị nhịp tim thời gian thực và khoảng RR. Hỗ trợ Notify.
Characteristic	Body Sensor Location	0x2A38	Cho biết vị trí đeo cảm biến (Ví dụ: Cổ tay, Ngực). Hỗ trợ Read.
Service	Battery Service	0x180F	Nhóm chức năng giám sát pin.
Characteristic	Battery Level	0x2A19	Chứa phần trăm pin hiện tại của cảm biến. Hỗ trợ Read/Notify.

1.3.4. Cấu trúc bản tin Heart Rate Profile (Chuẩn Bluetooth SIG)

Để đảm bảo tính tương thích giữa các thiết bị từ nhiều nhà sản xuất khác nhau (ví dụ: cảm biến Polar kết nối với máy tính, đồng hồ Garmin, hay điện thoại iPhone), tổ chức Bluetooth SIG đã quy định một chuẩn chung gọi là Heart Rate Profile (HRP). Trong đó, đặc tính quan trọng nhất mang dữ liệu đo đạc là Heart Rate Measurement Characteristic (UUID: 0x2A37).

Việc nắm vững cấu trúc bản tin này là cơ sở để xây dựng thuật toán giải mã (Decoding Algorithm) trong khối giao diện phần cứng ở Chương 3.

a) Cấu trúc tổng quát của gói tin (Packet Structure)

Gói tin dữ liệu của đặc tính 0x2A37 không có độ dài cố định mà thay đổi linh hoạt tùy thuộc vào nội dung nó mang theo. Tuy nhiên, thứ tự của các trường dữ liệu (Fields) được quy định nghiêm ngặt như sau:

Bảng 1. 4 Cấu trúc trường dữ liệu của gói tin Heart Rate Measurement

Thứ tự	1	2	3	4
Thành phần	Flags (Cờ báo hiệu)	Heart Rate Value (Giá trị nhịp tim)	Energy Expended (Năng lượng)	RR-Intervals (Khoảng RR)
Kích thước	1 Byte	1 hoặc 2 Bytes	2 Bytes	N x 2 Bytes
Kiểu dữ liệu	Bitmap	UINT8 / UINT16	UINT16	UINT16

b) Phân tích chi tiết Byte "Flags" (Byte đầu tiên)

Byte đầu tiên của gói tin (Offset 0) luôn là Byte Flags. 8 bits của byte này đóng vai trò như các công tắc điều khiển, báo cho thiết bị nhận biết cách đọc các byte tiếp theo.

- Bit 0 - Định dạng giá trị nhịp tim (Heart Rate Value Format):

+ Giá trị 0: Dữ liệu nhịp tim là UINT8 (8-bit unsigned integer). Byte tiếp theo ngay sau Flags sẽ chứa giá trị nhịp tim (Dải đo: 0 - 255 BPM). Đây là định dạng phổ biến nhất ở con người.

+ Giá trị 1: Dữ liệu nhịp tim là UINT16 (16-bit unsigned integer). Hai byte tiếp theo sẽ chứa giá trị nhịp tim (Dải đo: 0 - 65535 BPM).

- Bit 1 - Trạng thái tiếp xúc cảm biến (Sensor Contact Status):

+ Cho biết cảm biến có đang tiếp xúc tốt với da hay không.

- Bit 3 - Năng lượng tiêu thụ (Energy Expended Status):

+ Giá trị 1: Gói tin có chứa thông tin về Calo đã tiêu thụ.

- Bit 4 - Khoảng RR (RR-Interval bit):

+ Giá trị 1: Gói tin có chứa dữ liệu về khoảng thời gian giữa các nhịp tim. Đây là thông số quan trọng nhất để phân tích chuyên sâu về y sinh.

c) Dữ liệu Nhịp tim (Heart Rate Measurement Value)

Ngay sau Byte Flags là giá trị nhịp tim.

Với cảm biến Polar sử dụng trong đồ án, nhịp tim thường nằm trong khoảng sinh lý con người (40 - 220 BPM), do đó Bit 0 của Flags thường bằng 0 và giá trị nhịp tim chiếm 1 Byte.

Ví dụ: Nếu Byte này là 0x4E, chuyển sang hệ thập phân là 78, tức là nhịp tim hiện tại là 78 BPM.

d) Dữ liệu RR-Intervals (Biến thiên nhịp tim)

Nếu Bit 4 của Flags được bật lên 1, các byte cuối cùng của gói tin sẽ chứa một hoặc nhiều giá trị RR-Interval.

- **Định dạng:** UINT16 (2 Bytes cho mỗi giá trị).

- **Đơn vị:** 1/1024 giây (xấp xỉ mili-giây nhưng chính xác hơn cho xử lý số).

- **Cơ chế truyền:** Do giới hạn kích thước gói tin BLE (MTU size), một gói tin có thể chứa nhiều giá trị RR nếu nhịp tim nhanh, hoặc không có giá trị nào nếu chưa có nhịp tim mới xuất hiện.

Ví dụ: Một giá trị RR là 0x03 0x20.

Do chuẩn Bluetooth sử dụng định dạng Little Endian (Byte thấp trước, Byte cao sau), giá trị thực tế là 0x0320 (Hex) = 800 (Thập phân).

Thời gian thực tế: $t = \frac{800}{1024} \approx 0.781$ giây (hay 781 ms).

CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH THIẾT KẾ HỆ THỐNG

Trước khi đi vào thiết kế chi tiết kiến trúc phần cứng và giao thức, việc xác định rõ các yêu cầu hệ thống là bước tiên quyết để đảm bảo thiết bị hoạt động chính xác, ổn định và đáp ứng được các tiêu chuẩn y tế khắt khe. Hệ thống giám sát nhịp tim không dây được thiết kế dựa trên các nhóm yêu cầu sau:

2.1. Yêu cầu hệ thống

2.1.1. Yêu cầu chức năng

Yêu cầu chức năng định nghĩa các hành vi và tác vụ cụ thể mà hệ thống nhúng phải thực hiện được. Đối với đề tài này, các chức năng cốt lõi bao gồm:

1. Thu thập dữ liệu thời gian thực (Real-time Data Acquisition):

- Hệ thống phải có khả năng thiết lập kết nối không dây với cảm biến đo nhịp tim quang học (Polar) thông qua giao thức Bluetooth Low Energy (BLE).
- Phải đọc được các gói tin dữ liệu thô (Raw Data Packets) từ đặc tính đo lường (Measurement Characteristic) với chu kỳ cập nhật tối thiểu 1Hz (1 lần/giây).
- Hệ thống phải hỗ trợ chế độ "Thông báo" (Notification Mode) để nhận dữ liệu thụ động ngay khi có sự thay đổi từ cảm biến, thay vì phương pháp hỏi vòng (Polling) gây tốn tài nguyên.

2. Giải mã và Xử lý tín hiệu (Decoding & Processing):

- Khối xử lý trung tâm phải phân tích được cấu trúc Byte Flags trong gói tin để xác định định dạng dữ liệu (8-bit hay 16-bit).
- Trích xuất chính xác hai thông số sinh tồn quan trọng:
 - + **Nhịp tim trung bình (BPM):** Dùng để giám sát cường độ vận động.
 - + **Khoảng biến thiên nhịp tim (RR-Intervals):** Dùng để phân tích chuyên sâu về độ ổn định tim mạch, với độ phân giải mili-giây.

3. Cảnh báo và Giám sát trạng thái (Alerting & Status Monitoring):

- Hệ thống phải phát hiện được trạng thái kết nối của cảm biến (Đang kết nối, Mất kết nối, Đang quét).
- Phải có cơ chế tự động tái kết nối (Auto-reconnect) khi thiết bị đi ra khỏi vùng phủ sóng và quay trở lại.
- Cảnh báo khi nhịp tim vượt ngưỡng an toàn (ví dụ: > 160 BPM) để đảm bảo an toàn cho người sử dụng.

2.1.2. Yêu cầu phi chức năng

Yêu cầu phi chức năng định nghĩa các tiêu chí về chất lượng vận hành và các ràng buộc kỹ thuật của hệ thống nhúng.

1. Độ trễ thấp (Low Latency):

- Trong các ứng dụng y sinh thời gian thực, độ trễ là yếu tố sống còn. Hệ thống được thiết kế để đảm bảo tổng độ trễ (từ lúc tìm đập đến lúc hiển thị dữ liệu) phải nhỏ hơn 500ms.

- Driver giao tiếp phải xử lý các gói tin bất đồng bộ (Asynchronous) để không gây nghẽn luồng xử lý chính.

2. Tiết kiệm năng lượng (Power Efficiency):

- Đây là yêu cầu quan trọng nhất của các thiết bị nhúng chạy pin. Giao thức giao tiếp phải được tối ưu hóa để giảm thiểu thời gian phát sóng (Air-time).

- Hệ thống phía thu (Central) không được gửi các yêu cầu thừa thãi (như liên tục Read giá trị), mà phải tận dụng tối đa cơ chế Notification để cảm biến có thể duy trì trạng thái ngủ (Sleep mode) lâu nhất có thể.

3. Độ tin cậy và Ổn định (Reliability & Stability):

- Hệ thống phải hoạt động ổn định trong môi trường có nhiễu nhiều sóng vô tuyến 2.4GHz (như Wi-Fi, lò vi sóng).

- Tỷ lệ mất gói tin (Packet Loss Rate) chấp nhận được phải dưới 5%.

- Giao diện phần cứng phải có khả năng xử lý ngoại lệ (Exception Handling) để không bị treo (Crash) khi nhận được dữ liệu rác hoặc sai định dạng.

4. Tính tương thích (Compatibility):

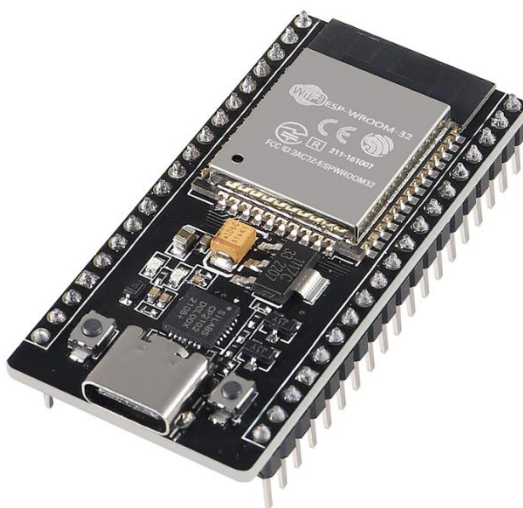
- Hệ thống phải tuân thủ chặt chẽ chuẩn Bluetooth SIG Heart Rate Profile. Điều này đảm bảo module phần mềm có thể hoạt động không chỉ với Polar mà còn với bất kỳ cảm biến nhịp tim chuẩn công nghiệp nào khác (như Garmin, Wahoo), thể hiện tính mở của thiết kế hệ thống.

2.2. Thiết kế phần cứng thử nghiệm

2.2.1. Lựa chọn linh kiện

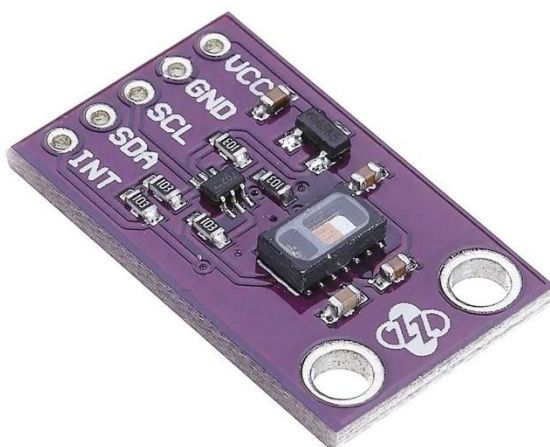
Trong giai đoạn đầu nghiên cứu, để nắm bắt nguyên lý thu thập tín hiệu sinh tồn PPG (Photoplethysmogram), nhóm thực hiện thiết kế mô-đun cảm biến tự xây dựng với các thành phần:

Vi điều khiển: ESP32-WROOM-32 (Hỗ trợ Bluetooth/WiFi, ADC độ phân giải cao).



Hình 2.1 Bo mạch ESP32
(Trích ảnh: linhkienvietnam.vn)

Cảm biến: MAX30105 (Cảm biến đo nồng độ oxy và nhịp tim tích hợp, giao tiếp I2C, kích thước nhỏ gọn).



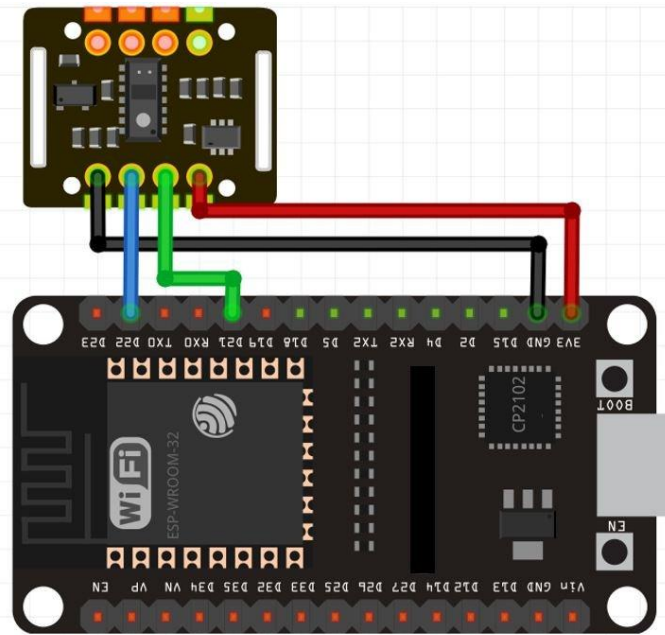
Hình 2.2 Module cảm biến MAX30105
(Trích ảnh: nshop)

2.2.2. Sơ đồ kết nối

Cảm biến MAX30105 được kết nối với vi điều khiển ESP32 qua giao thức I2C với sơ đồ chân như sau:

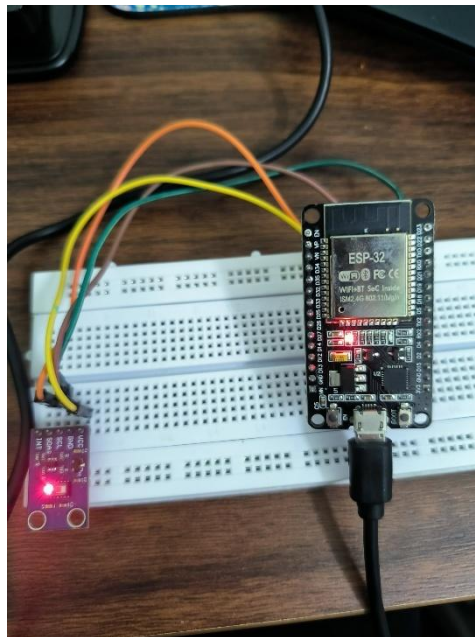
- VCC (MAX30105) nối nguồn 3.3V (ESP32).
- GND nối GND.

- SDA nối chân GPIO 21.
- SCL nối chân GPIO 22.



Hình 2.3 Sơ đồ kết nối mạch MAX30105

2.2.3 Đánh giá thử nghiệm và Chuyển đổi giải pháp



Hình 2.4 Mạch thực tế

Sau khi hoàn thiện phần cứng Prototype, nhóm đã tiến hành thử nghiệm đo đạc thực tế.

Ưu điểm: Mạch hoạt động tốt khi người dùng ngồi yên (Static), đo được nhịp tim với sai số thấp.

Hạn chế: Khi áp dụng vào bài toán chính của Đề án (Hỗ trợ tập luyện AI PT), người dùng phải vận động mạnh (Step Jack, Squat). Cảm biến quang học MAX30105 cực kỳ nhạy cảm với rung động (Motion Artifacts). Các dao động cơ học làm sai lệch tín hiệu ánh sáng phản xạ, khiến nhịp tim đo được bị nhiễu loạn (mất tín hiệu hoặc tăng vọt bất thường).

Kết luận: Để đảm bảo tính chính xác và an toàn tuyệt đối cho hệ thống huấn luyện AI, nhóm quyết định sử dụng thiết bị chuyên dụng Polar Verity Sense cho phiên bản thương mại hóa cuối cùng. Polar Verity Sense sử dụng công nghệ PPG bằng đai đeo tay, khắc phục hoàn toàn nhược điểm rung lắc của cảm biến quang học tự chế.



Hình 2. 5 Thiết bị Polar Verity Sense (cảm biến đo nhịp tim)

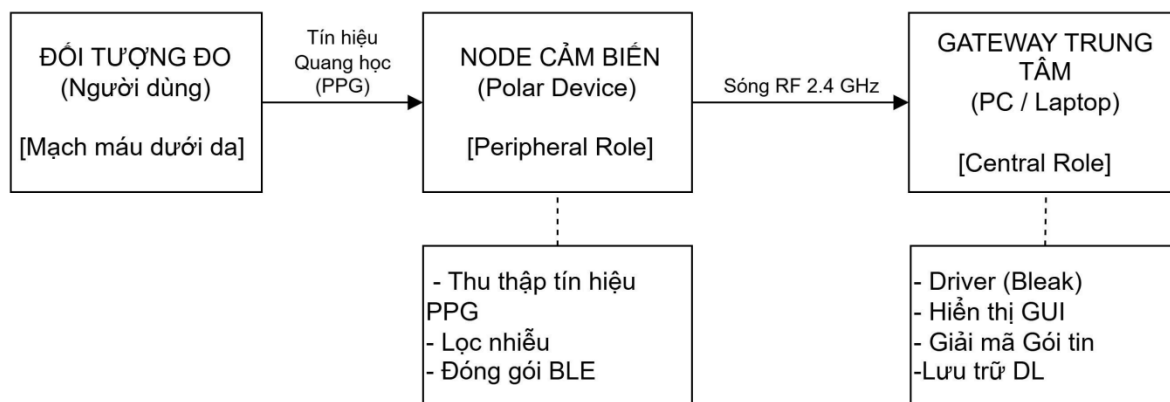
(Trích: Techwear.vn)

2.3. Thiết kế hệ thống hoàn thiện

Dựa trên các yêu cầu chức năng và phi chức năng đã phân tích, hệ thống được thiết kế theo mô hình phân tán bao gồm hai thành phần chính: Nút cảm biến không dây (Wireless Sensor Node) và Thiết bị thu thập trung tâm (Central Gateway). Thiết kế này đảm bảo tính linh hoạt, cho phép người dùng vận động tự do mà không bị cản trở bởi dây dẫn, đồng thời tận dụng khả năng xử lý mạnh mẽ của máy tính để thực hiện các thuật toán phức tạp.

2.3.1. Sơ đồ tổng quát

Hệ thống hoạt động theo mô hình Master-Slave (trong ngữ cảnh Bluetooth là Central-Peripheral). Dữ liệu sinh trắc học được thu thập tại điểm đo (cổ tay/bắp tay), sơ bộ xử lý và đóng gói thành các Frame dữ liệu, sau đó truyền qua môi trường không khí (Air Interface) đến máy tính.



Hình 2. 6 Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống

Mô tả hoạt động:

1. Tầng Vật lý (Physical Interaction): Cảm biến phát ánh sáng vào da và thu nhận tín hiệu phản xạ (PPG) tương ứng với sự thay đổi lưu lượng máu.

2. Tầng Cảm biến (Sensor Node): Thực hiện chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số (ADC), tính toán nhịp tim cơ bản và đóng gói dữ liệu theo cấu hình GATT.

3. Kênh truyền (Transmission Channel): Sử dụng giao thức Bluetooth Low Energy 4.0/5.0, băng tần 2.4GHz ISM với kỹ thuật nhảy tần (Frequency Hopping) để tránh nhiễu.

4. Tầng Xử lý (Host Processing): Máy tính nhận gói tin, Driver thực hiện bóc tách các lớp giao thức để lấy dữ liệu thô (Payload) phục vụ cho các thuật toán giám sát và cảnh báo.

2.3.2. Kiến trúc chức năng tổng quát của Node cảm biến

Về mặt nguyên lý, một node cảm biến trong mạng IoT (Internet of Things) là một thiết bị điện tử có khả năng cảm nhận biến động môi trường, xử lý dữ liệu và truyền tin. Dù ứng dụng trong công nghiệp, y tế hay nông nghiệp, kiến trúc phần cứng của một node cảm biến luôn được cấu thành từ 4 phân hệ chức năng cốt lõi sau:

1. Phân hệ cảm biến (Sensing Subsystem): Đây là giao diện tiếp xúc giữa thiết bị và môi trường vật lý. Chức năng chính là chuyển đổi các đại lượng vật lý (như nhiệt độ,

ánh sáng, nhịp tim, gia tốc...) thành tín hiệu điện. Tín hiệu này sau đó được đi qua các mạch điều hòa (khuếch đại, lọc) và chuyển đổi từ tương tự sang số (ADC) để phục vụ cho quá trình xử lý.

2. Phân hệ xử lý trung tâm (Processing Subsystem): Đóng vai trò là "bộ não" của thiết bị, thường là các Vi điều khiển (Microcontroller - MCU) hoặc các chip SoC (System on Chip). Nhiệm vụ của khối này bao gồm:

- Thu thập dữ liệu thô từ các cảm biến.
- Xử lý cục bộ (tính toán trung bình, lọc nhiễu, nén dữ liệu).
- Đóng gói dữ liệu theo giao thức truyền thông.
- Quản lý trạng thái ngủ/thức của toàn bộ hệ thống để tiết kiệm năng lượng.

3. Phân hệ truyền thông (Communication Subsystem): Đây là cầu nối trao đổi dữ liệu giữa node cảm biến với thế giới bên ngoài (Gateway hoặc các thiết bị di động). Tùy thuộc vào yêu cầu về khoảng cách và năng lượng, phân hệ này sử dụng các module thu phát vô tuyến (RF Transceiver) hoạt động trên các chuẩn như Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, Wi-Fi hoặc LoRaWAN.

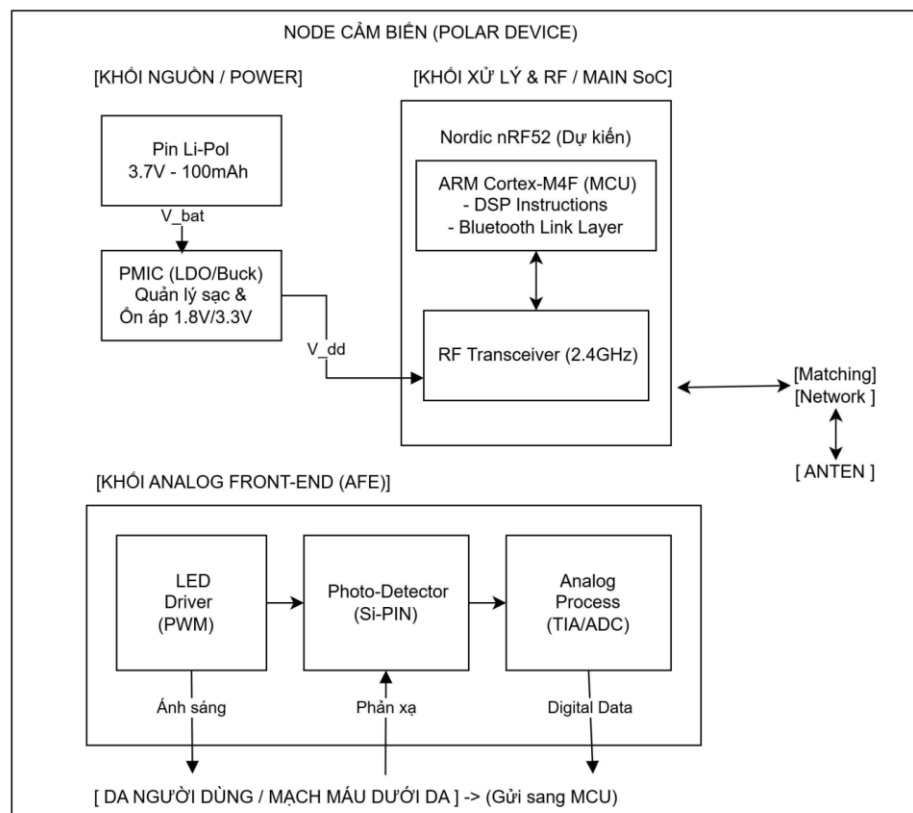
4. Phân hệ nguồn (Power Subsystem): Là thành phần quan trọng nhất quyết định tuổi thọ của thiết bị. Phân hệ này cung cấp năng lượng ổn định cho các khối mạch hoạt động. Nguồn năng lượng thường đến từ pin (Battery) hoặc các bộ thu năng lượng từ môi trường (Energy Harvesting) kèm theo các mạch quản lý nguồn (PMU) để tối ưu hóa hiệu suất tiêu thụ.

2.4. Phân tích đặc tả kỹ thuật Node cảm biến Polar

Để đáp ứng yêu cầu khắt khe về kích thước nhỏ gọn (Small Form Factor) và thời gian sử dụng pin lâu dài, thiết bị Polar (Peripheral Node) được thiết kế dựa trên kiến trúc tích hợp mật độ cao. Thay vì sử dụng các linh kiện rời rạc, thiết bị tận dụng sức mạnh của công nghệ System-on-Chip (SoC) kết hợp với các khối Analog chuyên dụng. Dưới góc độ thiết kế hệ thống nhúng, kiến trúc phần cứng của thiết bị bao gồm 3 phân hệ chính: Phân hệ thu thập tín hiệu quang (Optical Front-End), Phân hệ xử lý trung tâm (MCU) và Phân hệ truyền thông vô tuyến (RF).

2.4.1. Sơ đồ khối chức năng của Node cảm biến (Polar Device)

Sơ đồ dưới đây mô tả luồng tín hiệu từ khi là ánh sáng vật lý cho đến khi trở thành gói tin Bluetooth được bắn đi qua Anten.



Hình 2. 7 Sơ đồ khối chức năng phần cứng

2.4.2. Phân tích chi tiết Khối cảm biến quang học và Front-end Analog (AFE)

Khối Analog Front-End (AFE) đóng vai trò quyết định đến chất lượng tín hiệu đầu vào. Trong môi trường thiết bị đeo, tín hiệu quang phổ kế (PPG) cực kỳ yếu và dễ bị lẫn tạp âm. Do đó, kiến trúc phần cứng của khối này không chỉ đơn thuần là thu phát ánh sáng, mà là một chuỗi xử lý tín hiệu tương tự phức tạp bao gồm 4 tầng chính.

a) Tầng phát quang (Optical Transmitter Stage)

- **Cấu trúc LED:** Thiết bị Polar sử dụng mảng đa LED (Multi-LED array), thông thường là 6 đèn LED màu xanh lá cây (Green LEDs) bố trí xung quanh một cảm biến quang trung tâm.

- **Bước sóng tối ưu:** Các LED này phát ra ánh sáng tại bước sóng trung tâm khoảng 525nm - 535nm.

+ Lý giải kỹ thuật: Tại bước sóng này, hệ số hấp thụ (Absorption coefficient) của Oxy-hemoglobin (HbO_2) và Deoxy-hemoglobin (Hb) đạt mức cân bằng tương đối và cao hơn hẳn so với nước (mồ hôi) và melanin (sắc tố da). Điều này giúp tín hiệu phản xạ mang thông tin nhịp tim rõ nét nhất.

- **Điều khiển dòng (Current Drive):** Các LED không được cấp nguồn liên tục (DC) vì sẽ gây nóng cục bộ và tốn pin. Thay vào đó, khối điều khiển sử dụng kỹ thuật điều chế độ rộng xung (PWM) với chu kỳ nhiệm vụ (Duty Cycle) rất thấp (thường < 2%). Dòng điện đỉnh (Peak Current) qua LED có thể lên tới 50mA - 100mA để đảm bảo cường độ sáng đủ mạnh xuyên qua lớp biểu bì, nhưng dòng trung bình chỉ vài mA.

b) Tầng thu quang (Photodetector Stage)

- **Linh kiện:** Sử dụng Photodiode công nghệ Silicon PIN với diện tích bề mặt lớn để tăng khả năng thu nhận photon.

- **Hiệu suất lượng tử (Quantum Efficiency - QE):** Photodiode được chọn có QE đạt đỉnh tại vùng ánh sáng xanh (500-600nm) để đồng bộ với nguồn phát.

- **Dòng tối (Dark Current):** Đây là thông số nhiều quan trọng. Photodiode trong các thiết bị nhúng y sinh yêu cầu dòng tối cực thấp (cỡ pA - picoAmpere) để không làm sai lệch tín hiệu nền khi không có ánh sáng chiếu vào.

c) Tầng xử lý tín hiệu tương tự (Analog Signal Processing Chain)

Tín hiệu dòng điện (I_{pd}) từ Photodiode rất nhỏ (từ vài nA đến vài μA), không thể đưa trực tiếp vào vi điều khiển. Nó phải đi qua chuỗi xử lý sau:

1. Mạch chuyển đổi I-V (Trans-impedance Amplifier - TIA):

- Đây là tầng khuếch đại đầu tiên và quan trọng nhất. TIA chuyển đổi dòng điện thành điện áp theo công thức: $V_{out} = I_{in} \times R_f$ (trong đó R_f là trở kháng hồi tiếp, thường rất lớn, từ 100k Ω đến 1M Ω).

- Mạch TIA phải có độ ồn thấp (Low Noise) và băng thông đủ rộng để bắt được sự thay đổi nhanh của nhịp tim.

2. Mạch triệt tiêu ánh sáng môi trường (Ambient Light Cancellation - ALC):

- Vấn đề: Khi người dùng ra ngoài trời nắng, ánh sáng mặt trời (DC Component cực lớn) sẽ làm bão hòa bộ khuếch đại, khiến tín hiệu nhịp tim (AC Component nhỏ xíu) bị mất.

- Giải pháp phần cứng: Polar tích hợp mạch ALC sử dụng một bộ DAC (Digital-to-Analog Converter) để bơm một dòng điện ngược chiều vào đầu vào của TIA. Dòng điện này sẽ triệt tiêu thành phần DC do ánh sáng mặt trời gây ra, giữ cho tín hiệu luôn nằm trong dải động (Dynamic Range) của bộ khuếch đại. Cơ chế này hoạt động hoàn toàn tự động ở tầng phần cứng (Hardware loop).

d) Tầng chuyển đổi số (Digitization)

- **ADC độ phân giải cao:** Thay vì dùng ADC 10-bit hay 12-bit tích hợp sẵn trong vi điều khiển thông thường, khối AFE sử dụng ADC chuyên dụng công nghệ Sigma-Delta với độ phân giải lên tới 22-bit hoặc 24-bit.

- **Lý do sử dụng:** Tín hiệu nhịp tim (AC) chỉ chiếm khoảng 1-2% trên tổng tín hiệu thu được. Để tách được 1% này mà không bị nhiễu lượng tử hóa (Quantization Noise), cần một bộ ADC có dải động cực cao (High Dynamic Range > 100dB).

2.4.3. Phân tích chi tiết Vi điều khiển và khối thu phát sóng (MCU & RF Transceiver)

Khối xử lý trung tâm và truyền thông là "bộ não" của thiết bị nhúng. Trong các thiết bị hiện đại như Polar, xu hướng thiết kế là sử dụng kiến trúc System-on-Chip (SoC) để tối ưu hóa kích thước bo mạch (PCB Footprint). Dòng chip tiêu biểu thường được sử dụng là nRF52 Series của Nordic Semiconductor.

a) Kiến trúc Vi xử lý (Microcontroller Architecture)

- **Lõi xử lý (Core):** ARM Cortex-M4F 32-bit chạy ở xung nhịp 64MHz.

+ **FPU (Floating Point Unit):** Đơn vị xử lý số thực dấu phẩy động phần cứng. Đây là yếu tố sống còn cho việc tính toán nhịp tim. Thuật toán tính nhịp tim từ dữ liệu quang học đòi hỏi các phép toán lọc số (Digital Filters) và biến đổi Fourier nhanh (FFT) trên các số thực. Việc thiếu FPU sẽ buộc CPU thực hiện các phép toán dấu phẩy động bằng phần mềm, làm tăng đáng kể số chu kỳ máy và năng lượng tiêu thụ.

- Bộ nhớ (Memory Map):

- **Flash (512KB - 1MB):** Lưu trữ Firmware, Bluetooth Stack (SoftDevice) và lưu đệm dữ liệu (Data Logging) khi mất kết nối.

- **RAM (64KB - 256KB):** Dùng cho các biến động và Stack/Heap của chương trình.

- **Cơ chế truy cập bộ nhớ trực tiếp (DMA - Direct Memory Access):** MCU được thiết kế để ngoại vi (như khối AFE) có thể ghi dữ liệu thẳng vào RAM thông qua DMA mà không cần đánh thức CPU. CPU chỉ thức dậy khi bộ đệm đầy để xử lý một lần. Đây là kỹ thuật tiết kiệm năng lượng nâng cao.

b) Khối thu phát vô tuyến (2.4GHz RF Transceiver)

- **Độ nhạy thu (RX Sensitivity):** Chip RF có độ nhạy rất cao, khoảng -96 dBm ở chế độ BLE 1Mbps. Điều này cho phép thiết bị nhận lệnh từ máy tính ngay cả khi tín hiệu rất yếu do bị cơ thể người che khuất.

- **Công suất phát (TX Power):** Có thể lập trình từ -20 dBm đến +4 dBm. Thuật toán phần mềm sẽ tự động điều chỉnh công suất phát: khi kết nối ổn định sẽ giảm công suất để tiết kiệm pin, khi tín hiệu kém (RSSI thấp) sẽ tăng công suất để duy trì kết nối.

- **Balun tích hợp:** Trong các thiết kế cũ, cần mạch Balun rời (gồm tụ và cuộn cảm) để chuyển đổi tín hiệu cân bằng (Balanced) từ chip sang không cân bằng (Unbalanced) cho Anten. SoC hiện đại tích hợp Balun bên trong silicon, giảm thiểu sai số linh kiện và diện tích mạch in.

c) Hệ thống Anten và Mạch phối hợp trở kháng (Matching Network)

Đây là phần "Phần cứng" thuần túy và khó nhất trong thiết kế RF.

- **Thách thức:** Cơ thể người là một khối nước dẫn điện lớn, nó hấp thụ sóng 2.4GHz rất mạnh và làm lệch tần số cộng hưởng của Anten (Detuning effect).

- Giải pháp thiết kế:

+ **Mạch phối hợp trở kháng (Impedance Matching Network):** Gồm tổ hợp các cuộn cảm (L) và tụ điện (C) mắc theo hình Pi hoặc T. Mạch này có nhiệm vụ điều chỉnh trở kháng đầu ra của chip RF về đúng 50 Ohm tại điểm cấp nguồn cho Anten.

+ **Loại Anten:** Thiết bị Polar thường sử dụng Anten gốm (Ceramic Chip Antenna) hoặc Anten Khe (Slot Antenna). Các loại này có kích thước nhỏ và ít bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng "cầm nắm" (Hand effect) hoặc tiếp xúc da hơn là anten mạch in thông thường.

d) Quản lý năng lượng (Power Management Unit - PMU)

Để viên pin 100mAh có thể chạy được 20-30 giờ liên tục, hệ thống sử dụng các bộ chuyển đổi nguồn hiệu suất cao:

- **DC-DC Buck Converter:** Thay vì dùng LDO (Low Dropout Regulator) gây tỏa nhiệt, MCU sử dụng bộ nguồn xung DC-DC tích hợp để hạ áp từ pin (3.7V - 4.2V) xuống điện áp lõi (1.8V hoặc 3.0V). Hiệu suất chuyển đổi đạt > 90%, giúp kéo dài thời gian sử dụng pin thêm 20-30% so với dùng LDO truyền thống.

2.5. Thiết kế giao thức giao tiếp (Communication Protocol Design)

Trong hệ thống nhúng không dây, giao thức giao tiếp đóng vai trò như "ngôn ngữ" chung giúp Node cảm biến (Peripheral) và Gateway (Central) hiểu và trao đổi dữ liệu với nhau. Đồ án sử dụng giao thức Bluetooth Low Energy (BLE) với cấu hình thuộc tính GATT (Generic Attribute Profile). Thiết kế giao thức tập trung vào tối ưu hóa năng lượng và đảm bảo tính toàn vẹn của dữ liệu sinh trắc học thời gian thực.

2.5.1. Quy trình bắt tay (Handshaking) và ghép nối (Pairing)

Trước khi bắt kỳ dữ liệu nhịp tim nào được truyền đi, hai thiết bị phải trải qua một quy trình thiết lập liên kết chặt chẽ bao gồm ba giai đoạn: Quảng bá (Advertising), Khởi tạo kết nối (Connection Initiation) và Trao đổi tham số (Parameter Exchange).

a) Giai đoạn Quảng bá (Advertising State) Khi chưa được kết nối, cảm biến Polar hoạt động ở chế độ Quảng bá.

- **Kênh truyền:** Thiết bị phát các gói tin ADV_IND (Advertising Indication) tuần tự trên 3 kênh vật lý 37, 38 và 39.

- **Chu kỳ quảng bá (Advertising Interval):** Được thiết lập trong khoảng 1s đến 2s. Chu kỳ này đủ dài để tiết kiệm pin nhưng đủ ngắn để Gateway phát hiện nhanh chóng.

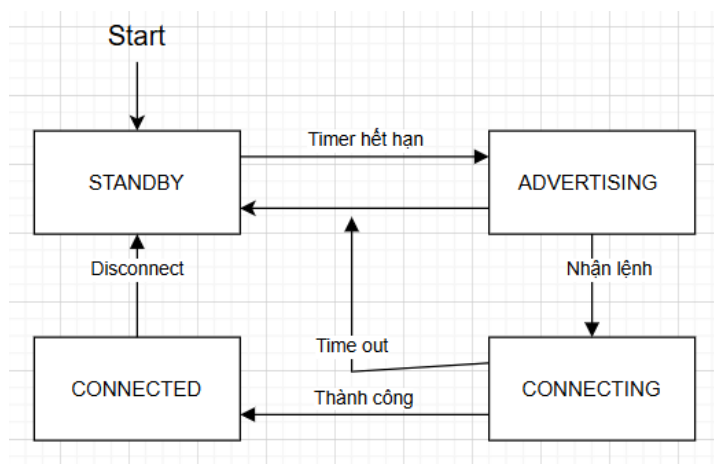
- **Nội dung gói tin:** Chứa địa chỉ MAC (48-bit), Tên thiết bị (Local Name: "Polar Sense...") và Danh sách các UUID dịch vụ hỗ trợ (Service UUIDs) để Gateway nhận diện đúng loại thiết bị cần kết nối.

b) Giai đoạn Bắt tay và Kết nối (Connection Handshaking) Khi Gateway (PC) quét thấy gói tin quảng bá hợp lệ, nó gửi một yêu cầu kết nối CONNECT_REQ. Gói tin này chứa các tham số quan trọng để đồng bộ hóa "đồng hồ" giữa hai thiết bị:

1. Connection Interval (7.5ms - 4s): Khoảng thời gian giữa hai lần trao đổi dữ liệu. Đề án thiết lập giá trị này ở mức 100ms - 200ms, cân bằng giữa độ trễ hiển thị và tuổi thọ pin.

2. Slave Latency: Số lần mà cảm biến (Peripheral) được phép bỏ qua các sự kiện kết nối nếu không có dữ liệu mới. Thiết lập giá trị này > 0 giúp cảm biến ngủ lâu hơn.

3. Supervision Timeout: Thời gian tối đa (ví dụ: 4s) mà nếu không nhận được tín hiệu, kết nối sẽ được coi là đã mất và kích hoạt quy trình tái kết nối.



Hình 2. 8 Sơ đồ chuyển đổi trạng thái

2.5.2. Định nghĩa bản tin dữ liệu (Data Payload Definition)

Dữ liệu nhịp tim được đóng gói trong đặc tính Heart Rate Measurement (UUID: 0x2A37). Để tối ưu băng thông (Throughput), dữ liệu được định dạng theo cấu trúc nhị phân nén (Packed Binary Structure), loại bỏ các header dư thừa.

Hệ thống sử dụng chuẩn Little Endian (Byte thấp trước, Byte cao sau) cho tất cả các trường dữ liệu nhiều byte.

Bảng 2. 1 Bảng chi tiết cấu trúc gói tin (Packet Structure Table)

Byte Offset	Tên trường (Field Name)	Kích thước	Kiểu dữ liệu	Mô tả chi tiết (Description)
0	Flags (Cờ trạng thái)	1 Byte	Bitfield	Xác định sự hiện diện và định dạng của các trường phía sau.
1	HR Value (Nhịp tim)	1 Byte	UINT8	Giá trị nhịp tim (BPM).
2 - 3	Energy Expended	2 Bytes	UINT16	Calo tiêu thụ.
4 - 5	RR-Interval 1	2 Bytes	UINT16	Khoảng thời gian giữa 2 đỉnh sóng R. Đơn vị: 1/1024s.
6 - 7	RR-Interval 2	2 Bytes	UINT16	(Nếu có nhiều nhịp trong 1 gói tin).
...

Phân tích kỹ thuật trường Flags (Byte 0):

Byte đầu tiên quyết định cách giải mã toàn bộ phần còn lại (Parser Logic).

- Bit 0 (HR Format):

+ 0: Nhịp tim nằm trong dải 0-255 (UINT8). Đây là chế độ mặc định của Polar.

+ 1: Nhịp tim > 255 (UINT16). Dành cho động vật hoặc trường hợp đặc biệt.

- Bit 1 (Sensor Contact):

+ 00 hoặc 01: Không hỗ trợ hoặc không tiếp xúc.

+ 10 hoặc 11: Cảm biến đang tiếp xúc tốt với da. Bit này dùng để cảnh báo người dùng đeo lại thiết bị.

- Bit 4 (RR-Interval):

+ 1: Cho biết có dữ liệu RR-Interval đi kèm ở cuối gói tin. Đây là dữ liệu quan trọng nhất để phân tích độ biến thiên nhịp tim (HRV).

Ví dụ phân tích gói tin thực tế (Hex Dump Analysis):

Giả sử Driver nhận được chuỗi Hex: 16 4E 44 03

- Byte 0: 0x16 (Nhị phân: 0001 0110)

+ Bit 0 = 0: Nhịp tim là UINT8 (1 byte).

+ Bit 1-2 = 11: Cảm biến tiếp xúc tốt.

+ Bit 3 = 0: Không có dữ liệu năng lượng.

+ Bit 4 = 1: Có dữ liệu RR-Interval.

- Byte 1: 0x4E -> Đổi sang thập phân = 78 BPM.

- Byte 2-3: 0x44 0x03 -> Little Endian: 0x0344.

+ Đổi sang thập phân = 836.

+ Tính toán thời gian thực: $t = \frac{836}{1024} \approx 0.816$ giây (816 ms).

2.5.3. Cơ chế thông báo (Notification) và ngắt (Interrupt)

Trong thiết kế hệ thống nhúng năng lượng thấp, việc Gateway liên tục gửi lệnh "Đọc" (Polling) để hỏi xem có dữ liệu mới hay không là điều tối kỵ, vì nó buộc CPU của cảm biến phải thức dậy liên tục, làm cạn kiệt pin nhanh chóng.

Đề án sử dụng cơ chế Server-Initiated Notification (Thông báo khởi tạo từ phía Server) kết hợp với ngắt phần cứng.

a) Cơ chế kích hoạt Notification (CCCD Configuration): Notification không được bật mặc định. Để kích hoạt luồng dữ liệu, Gateway phải thực hiện thao tác ghi vào Client Characteristic Configuration Descriptor (CCCD) - UUID 0x2902.

- Gateway gửi lệnh Write Request: Giá trị 0x0100 (Enable Notification) vào Handle của CCCD.

- Cảm biến nhận lệnh, kích hoạt luồng đẩy dữ liệu và trả về Write Response.

b) Quy trình xử lý ngắt từ Phần cứng đến Phần mềm (End-to-End Interrupt Flow): Toàn bộ quy trình truyền tin được điều khiển bởi sự kiện (Event-driven), đảm bảo độ trễ thấp nhất:

1. Ngắt Vật lý (Hardware Interrupt): Khi tim đập, Photodiode phát hiện sự thay đổi ánh sáng -> Mạch Analog tạo tín hiệu -> Kích hoạt ngắt ngoài (External Interrupt) đánh thức MCU của cảm biến Polar đây.

2. Xử lý tại MCU: MCU tính toán ra giá trị BPM và RR-Interval mới, cập nhật vào cơ sở dữ liệu GATT.

3. Đẩy dữ liệu qua sóng RF (Radio Push): Dữ liệu được cập nhật và gửi đi trong sự kiện kết nối (Connection Event) tiếp theo. Quá trình này không cần Gateway yêu cầu.

4. Callback tại Gateway (Software Interrupt):

- Tại máy tính, Stack Bluetooth nhận gói tin và kích hoạt một hàm Callback (Asynchronous Function) trong Driver Python.

- Hàm này ngắt luồng chương trình chính để xử lý gói tin vừa nhận (Giải mã -> Hiển thị/Lưu trữ), sau đó trả lại quyền điều khiển.

CHƯƠNG 3: XÂY DỰNG KHỐI GIAO DIỆN PHẦN CỨNG (DRIVER)

Trong kiến trúc của một hệ thống nhúng thu thập dữ liệu không dây, khối giao diện phần cứng (Hardware Interface) hay còn gọi là Driver/Middleware đóng vai trò cầu nối trung gian giữa phần cứng cảm biến và các ứng dụng xử lý bậc cao (Application Layer).

Nhiệm vụ cốt lõi của chương này là thiết kế và hiện thực hóa các giải thuật điều khiển để tương tác trực tiếp với ngăn xếp giao thức Bluetooth (Bluetooth Stack) của thiết bị thu (Gateway). Hệ thống không sử dụng các phần mềm có sẵn của nhà sản xuất mà tự xây dựng Driver để đảm bảo khả năng truy xuất dữ liệu thô (Raw Data) ở mức thấp nhất, phục vụ cho nhu cầu nghiên cứu và phân tích tín hiệu chuyên sâu.

3.1. Lưu đồ thuật toán điều khiển

Hệ thống hoạt động dựa trên mô hình điều khiển hướng sự kiện (Event-driven Control). Thay vì thực hiện các tác vụ một cách tuần tự cứng nhắc, hệ thống sẽ chuyển đổi trạng thái dựa trên các tín hiệu ngắt (Interrupts) hoặc thông báo (Notifications) từ phần cứng. Hai luồng thuật toán quan trọng nhất là: (1) Thiết lập liên kết và (2) Xử lý dữ liệu bất đồng bộ.

3.1.1. Lưu đồ quét và phát hiện thiết bị

Quá trình khởi tạo kết nối trong mạng BLE không đơn giản là "cắm và chạy" mà phải trải qua một quy trình thương lượng nghiêm ngặt để đảm bảo kết nối đúng thiết bị và đúng dịch vụ.

Nguyên lý hoạt động:

1. Khởi tạo Adapter: Hệ thống yêu cầu quyền truy cập vào phần cứng Bluetooth trên Gateway (Máy tính).

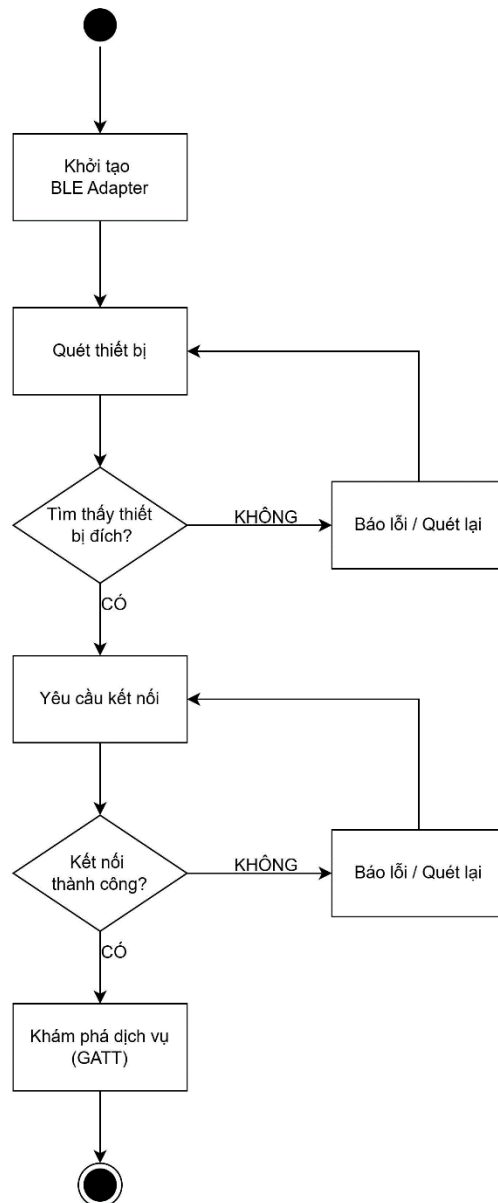
2. Quét quảng bá (Scanning): Thiết bị chuyển sang chế độ lắng nghe (Listening) để bắt các gói tin quảng bá (Advertising Packets) được phát ra từ các thiết bị ngoại vi xung quanh.

3. Lọc thiết bị (Filtering): Do môi trường thực tế có rất nhiều thiết bị BLE (tai nghe, chuột, smart home...), thuật toán cần thực hiện lọc dựa trên:

- **Địa chỉ MAC:** Định danh duy nhất của phần cứng.
- **Local Name:** Tên thiết bị.
- **RSSI (Received Signal Strength Indicator):** Chỉ kết nối với thiết bị ở gần (tín hiệu mạnh) để đảm bảo độ ổn định.

4. Thiết lập liên kết (Connection): Sau khi xác định đúng đối tượng, Gateway gửi yêu cầu kết nối. Nếu thành công, hai thiết bị chuyển từ chế độ Quảng bá sang chế độ Kết nối (Connected State), lúc này kênh truyền nhảy tần (Frequency Hopping) được thiết lập.

5. Khám phá dịch vụ (Service Discovery): Gateway truy vấn bảng GATT (GATT Table) của cảm biến để tìm ra các "tay cầm" (Handle) chứa dữ liệu nhịp tim.



Hình 3. 1 Lưu đồ thuật toán quét và kết nối

3.1.2. Lưu đồ xử lý ngắt

Khác với các hệ thống nhúng giao tiếp có dây truyền thống (như UART, SPI) thường sử dụng phương pháp "Hỏi vòng" (Polling) – tức vi điều khiển trung tâm liên tục gửi lệnh yêu cầu dữ liệu, phương pháp này gây lãng phí tài nguyên CPU và năng lượng pin rất lớn.

Đồ án áp dụng cơ chế Xử lý bất đồng bộ (Asynchronous Processing) thông qua tính năng Notification của chuẩn BLE.

Cơ chế hoạt động:

1. Trạng thái chờ (Idle): Khi không có dữ liệu mới, Driver đưa luồng xử lý chính vào trạng thái ngủ hoặc thực hiện các tác vụ nền (như vẽ giao diện), không chiếm dụng tài nguyên để chờ đợi.

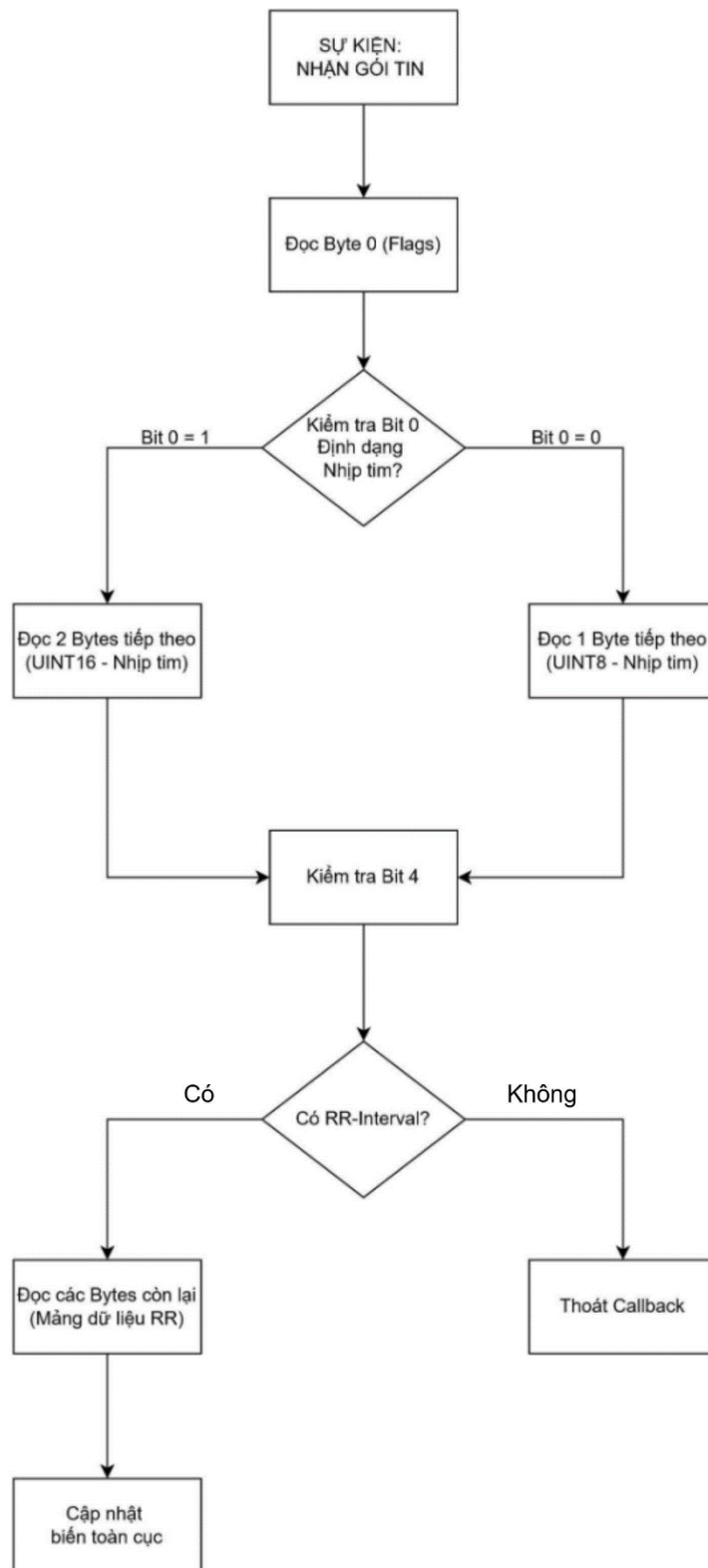
2. Kích hoạt ngắt (Interrupt Trigger): Ngay khi cảm biến Polar hoàn thành một chu kỳ đo và tính toán (ví dụ: mỗi giây một lần), nó sẽ đẩy (Push) một gói tin dữ liệu qua sóng vô tuyến. Tầng vật lý của Gateway nhận tín hiệu này và kích hoạt một "Sự kiện" (Event).

3. Thực thi Callback: Hàm xử lý ngắt (Callback Function) được gọi. Tại đây, hệ thống thực hiện các tác vụ thời gian thực (Real-time tasks):

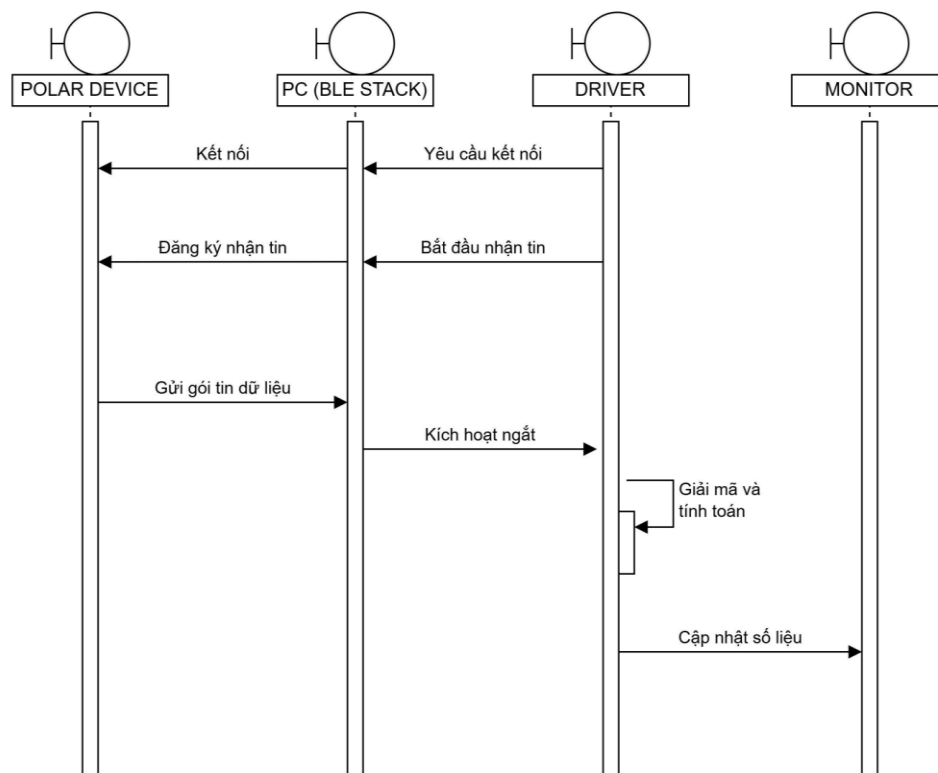
- Nhận mảng dữ liệu thô (Raw Byte Array).
- Phân tích cờ (Flags) và tách dữ liệu.
- Lưu trữ vào bộ đệm (Buffer).

4. Hoàn tất và Trả quyền điều khiển: Sau khi xử lý xong gói tin hiện tại, hàm Callback kết thúc (Return), trả quyền điều khiển lại cho hệ điều hành và Driver quay trở lại trạng thái chờ, sẵn sàng cho gói tin tiếp theo.

Cơ chế này đảm bảo độ trễ thấp nhất có thể ($\text{Latency} < 200\text{ms}$) và tối ưu hóa năng lượng cho cả thiết bị phát và thu.



Hình 3. 2 Lưu đồ thuật toán xử lý dữ liệu bất đồng bộ



Hình 3. 3 Sơ đồ tuần tự quá trình thu thập dữ liệu

Diễn giải quy trình thu thập và xử lý dữ liệu

Quá trình giao tiếp giữa hệ thống máy tính (Host) và thiết bị nhúng Polar (Peripheral) diễn ra theo cơ chế bất đồng bộ (Asynchronous) dựa trên sự kiện, bao gồm các bước tuần tự sau:

1. Thiết lập liên kết (Connection Establishment): Đầu tiên, khối Driver trên máy tính (sử dụng thư viện Bleak) thực hiện quét và gửi yêu cầu kết nối đến địa chỉ MAC của thiết bị Polar. Sau khi quá trình bắt tay (Handshaking) hoàn tất, một kênh truyền thông tin cậy được thiết lập giữa BLE Stack của hệ điều hành và Firmware của cảm biến.

2. Đăng ký nhận thông báo (Subscription): Thay vì liên tục gửi lệnh yêu cầu dữ liệu (Polling), Driver gửi một lệnh "Start Notify" đến đặc tính (Characteristic) đo nhịp tim có UUID chuẩn 0x2A37. Hành động này thông báo cho thiết bị Polar rằng máy tính đã sẵn sàng nhận dữ liệu bất cứ khi nào có phép đo mới. Đây là bước quan trọng giúp tiết kiệm năng lượng cho cả hai phía.

3. Đẩy dữ liệu từ phần cứng (Data Notification): Tại thiết bị Polar, vi điều khiển liên tục lấy mẫu tín hiệu từ cảm biến quang học. Ngay khi tính toán xong một giá trị nhịp

tim mới, thiết bị tự động đóng gói dữ liệu thành một bản tin (Data Packet) và đẩy (Push) sang máy tính thông qua sóng vô tuyến mà không cần chờ lệnh yêu cầu từ máy tính.

4. Kích hoạt ngắt mềm (Event Callback): Khi BLE Stack trên máy tính nhận được gói tin, nó lập tức kích hoạt sự kiện và gọi hàm xử lý ngắt (Callback Function) đã được đăng ký trong Driver. Tại thời điểm này, Driver nhận được dữ liệu dưới dạng chuỗi Byte thô (Raw Hex Data).

5. Giải mã và Xử lý tín hiệu (Processing): Hàm Callback thực hiện các phép toán thao tác bit (Bitwise operations) để phân tích gói tin:

- Đọc Byte đầu tiên (Flags) để xác định định dạng dữ liệu.
- Trích xuất giá trị nhịp tim (BPM) và khoảng biến thiên nhịp tim (RR-Intervals).
- Chuyển đổi các giá trị Hex sang số thập phân (Decimal) và đơn vị thời gian thực (ms).

6. Cập nhật dữ liệu (Update Data): Sau khi dữ liệu được giải mã hoàn tất, Driver cập nhật các biến toàn cục và gửi tín hiệu đến giao diện người dùng (GUI) để hiển thị kết quả mới nhất

3.2. Xây dựng Driver giao tiếp

Để hiện thực hóa các giải thuật điều khiển đã thiết kế ở mục 3.1, đồ án lựa chọn ngôn ngữ lập trình Python kết hợp với thư viện Bleak (Bluetooth Low Energy Platform Agnostic Klient). Đây là thư viện mã nguồn mở hỗ trợ giao tiếp BLE đa nền tảng, cho phép Driver hoạt động ổn định trên cả Windows, Linux và macOS mà không cần thay đổi mã nguồn.

3.2.1. Khởi tạo Stack Bluetooth và Định nghĩa UUID

Trong kiến trúc GATT (Generic Attribute Profile), mỗi dịch vụ và đặc tính được định danh bởi một mã UUID (Universally Unique Identifier) 128-bit. Để kết nối đúng với chức năng đo nhịp tim của thiết bị Polar, Driver cần khai báo chính xác các UUID chuẩn do tổ chức Bluetooth SIG quy định.

Bảng 3. 1 Các UUID sử dụng trong hệ thống

Tên đặc tính	UUID	Chức năng
Heart Rate Service	0000180d-0000-1000-8000-00805f9b34fb	Dịch vụ chính chứa dữ liệu nhịp tim
Heart Rate Measurement	00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb	Đặc tính chứa giá trị đo

Client Characteristic Config	00002902-0000-1000-8000-00805f9b34fb	Descriptor để bật/tắt thông báo
------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------

Quá trình khởi tạo Stack Bluetooth được thực hiện thông qua lớp đối tượng BleakClient. Driver sử dụng từ khóa async/await của Python để xử lý các tác vụ nhập xuất (I/O) bất đồng bộ, đảm bảo giao diện người dùng không bị "đơ" (freezing) trong quá trình chờ kết nối phần cứng.

```
import asyncio
from bleak import BleakClient

# Địa chỉ MAC của thiết bị
ADDRESS = "24:AC:AC:0A:B2:10"
# UUID của đặc tính Heart Rate Measurement
HR_UUID = "00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb"

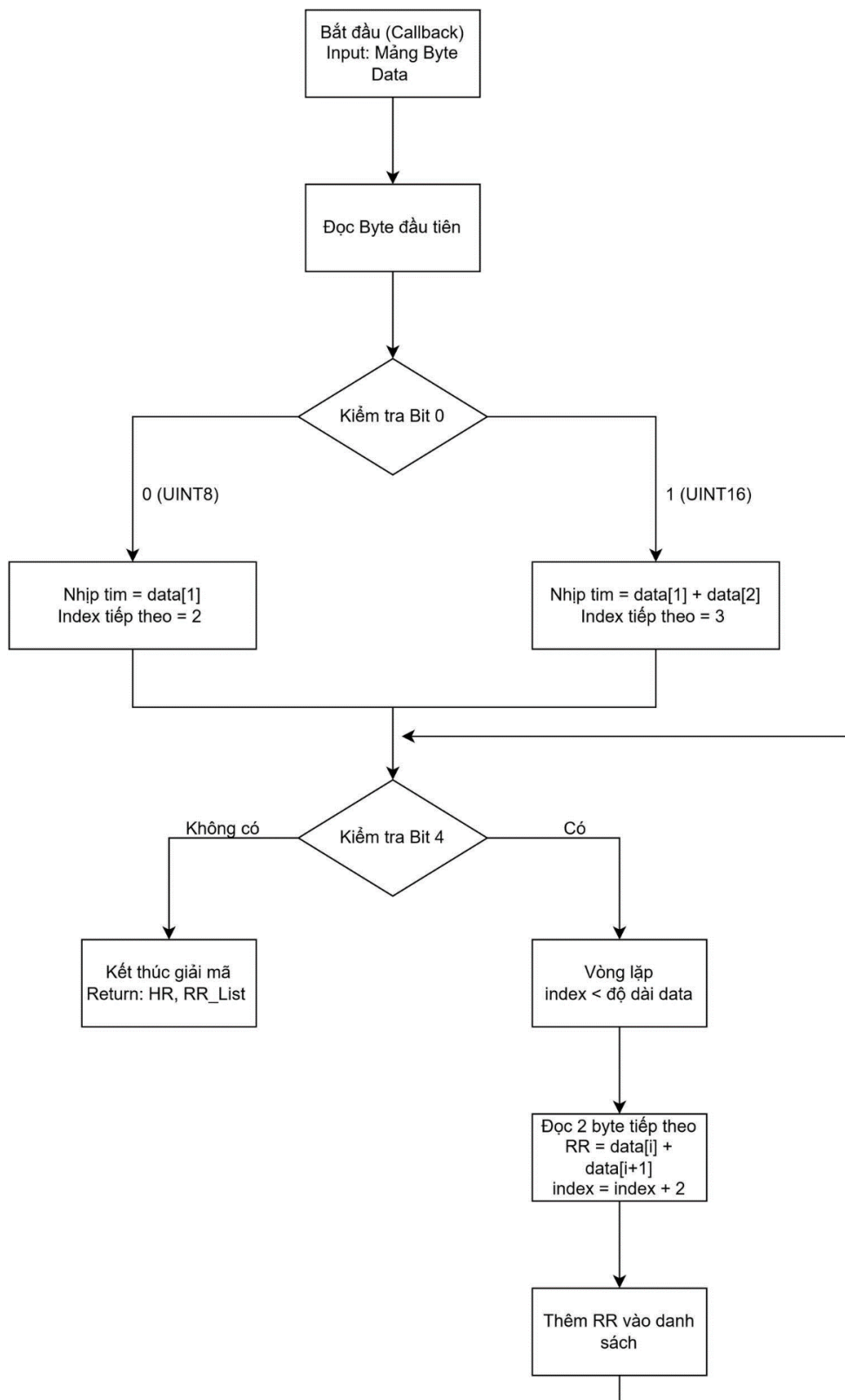
async def main():
    print(f"Đang khởi tạo kết nối tới {ADDRESS}...")
    async with BleakClient(ADDRESS) as client:
        # Kiểm tra trạng thái kết nối
        connected = client.is_connected
        print(f"Trạng thái kết nối: {connected}")
```

Hình 3. 4 Code khởi tạo

3.2.2. Giải mã dữ liệu thô

Đây là module quan trọng nhất của Driver, chịu trách nhiệm chuyển đổi chuỗi byte vô nghĩa nhận được từ tầng vật lý thành các thông số sinh học có ý nghĩa.

Dữ liệu nhận được từ sự kiện start_notify là một mảng byte. Cấu trúc của mảng này thay đổi động dựa trên byte đầu tiên (Flags). Do đó, Driver không thể đọc cố định theo chỉ số (Index) mà phải dùng con trỏ để duyệt qua gói tin.



Hình 3. 5 Lưu đồ thuật toán giải mã gói tin

Đoạn mã dưới đây mô tả chi tiết quá trình thao tác bit (Bitwise Operation) để tách dữ liệu:

```
def callback_handler(sender, data):  
    # 1. Phân tích Byte Cờ (Flags) - Byte đầu tiên  
    flags = data[0]  
  
    # Kiểm tra Bit 0: Định dạng Nhịp tim (UINT8 hay UINT16)  
    hr_format_bit = flags & 0x01  
  
    # Kiểm tra Bit 4: Có dữ liệu RR-Interval hay không?  
    rr_present_bit = (flags & 0x10) >> 4  
  
    index = 1 # Con trỏ bắt đầu đọc từ byte thứ 2  
  
    # 2. Trích xuất Nhịp tim (Heart Rate)  
    if hr_format_bit == 0:  
        # Định dạng UINT8: Đọc 1 byte  
        heart_rate = data[index]  
        index += 1  
    else:  
        # Định dạng UINT16: Đọc 2 byte (Little Endian)  
        heart_rate = int.from_bytes(data[index:index+2], byteorder='little')  
        index += 2  
  
    print(f"Nhịp tim đo được: {heart_rate} BPM")
```

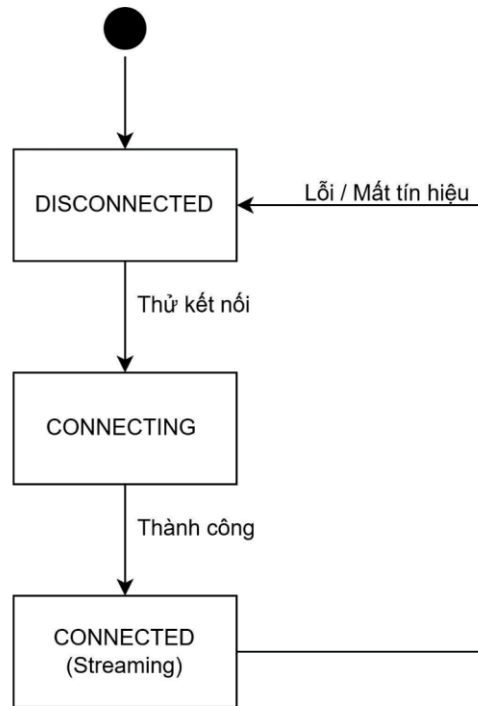
Hình 3. 6 Code giải mã

Trong đoạn mã trên, phép toán & (AND) được dùng để lọc bit, và phép toán >> (Bitwise Shift Right) được dùng để đưa bit cần kiểm tra về vị trí thấp nhất (LSB). Việc xử lý chính xác các bit này đảm bảo Driver tương thích với mọi thiết bị đo nhịp tim tuân thủ chuẩn Bluetooth SIG, không chỉ riêng Polar.

3.2.3. Xử lý sự kiện mất kết nối và tái kết nối tự động

Trong môi trường thực tế, kết nối không dây thường xuyên chịu ảnh hưởng bởi nhiễu sóng RF hoặc vật cản, dẫn đến hiện tượng mất gói tin hoặc ngắt kết nối đột ngột (Disconnection). Để đảm bảo tính sẵn sàng cao (High Availability) cho hệ thống giám sát y tế, Driver được tích hợp cơ chế tự phục hồi (Self-healing).

Giải thuật tái kết nối sử dụng một vòng lặp vô hạn while True kết hợp với khối xử lý ngoại lệ try...except.



Hình 3. 7 Máy trạng thái quản lý kết nối

Khi kết nối bị gián đoạn, thay vì dừng chương trình và báo lỗi (Crash), Driver sẽ chuyển sang trạng thái "Chờ" (Back-off state) trong 3 giây trước khi thực hiện nỗ lực kết nối lại. Điều này giúp tránh việc spam lệnh kết nối làm treo Card Bluetooth của máy tính.

```

async def run_driver_loop():
    while True:
        try:
            # Nỗ lực thiết lập kết nối
            async with BleakClient(ADDRESS) as client:
                print("Đã kết nối! Bắt đầu thu thập dữ liệu...")

                # Đăng ký nhận dữ liệu và giữ kết nối
                await client.start_notify(HR_UUID, callback_handler)

                # Vòng lặp duy trì phiên làm việc
                while client.is_connected:
                    await asyncio.sleep(1)

        except Exception as e:
            # Xử lý khi mất kết nối
            print(f"Mất tín hiệu từ cảm biến: {e}")
            print("Đang thử kết nối lại sau 3 giây...")
            await asyncio.sleep(3)
  
```

Hình 3. 8 Code tái kết nối

Cơ chế này đảm bảo hệ thống có thể hoạt động liên tục trong thời gian dài (Long-term monitoring) mà không cần sự can thiệp khởi động lại thủ công từ người dùng.

CHƯƠNG 4: THỬ NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

4.1. Thiết lập môi trường thử nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của hệ thống trong thực tế bài toán "AI Personal Trainer" (Hỗ trợ tập luyện cường độ cao), nhóm tiến hành thiết lập hai môi trường thử nghiệm song song để so sánh.

Môi trường 1: Mạch Prototype (Tự thiết kế)

1. **Phần cứng:** Vi điều khiển ESP32 kết nối cảm biến quang MAX30105 qua giao tiếp I2C.
2. **Vị trí đo:** Cảm biến được cố định vào đầu ngón tay trở bằng băng dính y tế.
3. **Giao thức:** Truyền dữ liệu qua cổng Serial (UART) lên máy tính để vẽ đồ thị (Serial Plotter).

Môi trường 2: Thiết bị Polar H10 (Hệ thống đề xuất)

1. **Phần cứng:** Cảm biến nhịp tim Polar H10 đeo ngực.
2. **Vị trí đo:** Vùng ngực (đo điện tim ECG), sát da.
3. **Giao thức:** Kết nối Bluetooth Low Energy (BLE) với phần mềm Python trên máy tính.

Kịch bản kiểm thử: Người dùng thực hiện bài tập **Step Jack** (vung tay và nhảy chân liên tục) trong 30 giây để kiểm tra khả năng chịu nhiễu rung động (Motion Artifacts).

4.2. Kết quả thiết lập kết nối

4.2.1. Trên mạch Prototype MAX30105

Vi điều khiển ESP32 khởi tạo thành công cảm biến MAX30105. Quá trình kiểm tra thanh ghi ID (Part ID) trả về đúng giá trị mặc định, xác nhận kết nối I2C ổn định.

4.2.2. Trên thiết bị Polar H10

Driver điều khiển đã thực hiện thành công quy trình bắt tay (Handshaking) và đọc bảng thuộc tính (Attribute Table) từ Firmware của thiết bị.

Kết quả từ log hệ thống:

- Trạng thái kết nối: Thành công.
- Chất lượng tín hiệu (RSSI): -50 dBm (Tín hiệu mạnh, đảm bảo truyền tin ổn định).

```

1. Đang quét thiết bị 24:AC:AC:0A:B2:10...
2. Đã kết nối thành công! (RSSI: -50 dBm)
3. Đang khám phá bảng dịch vụ (GATT Table)...
-----
[SERVICE] 00001800-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Generic Access Profile)
+-- [CHAR] 00002a00-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 2
+-- [CHAR] 00002a01-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 4
+-- [CHAR] 00002a04-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 6
+-- [CHAR] 00002aa6-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 8
[SERVICE] 00001801-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Generic Attribute Profile)
+-- [CHAR] 00002a05-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['indicate']
    Handle: 11
[SERVICE] 0000180a-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Device Information)
+-- [CHAR] 00002a29-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 15
+-- [CHAR] 00002a24-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 17
+-- [CHAR] 00002a25-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 19
+-- [CHAR] 00002a27-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 21
+-- [CHAR] 00002a26-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 23
+-- [CHAR] 00002a28-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 25
+-- [CHAR] 00002a23-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read']
    Handle: 27
[SERVICE] 0000feee-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Polar Electro Oy)
+-- [CHAR] fb005c51-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['notify', 'write', 'write-without-response']
    Handle: 30

```

Hình 4. 1 Cấu trúc bảng dịch vụ (GATT Table) đọc được từ thiết bị

```

[SERVICE] 0000feee-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Polar Electro Oy)
+-- [CHAR] fb005c51-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['notify', 'write', 'write-without-response']
    Handle: 30
+-- [CHAR] fb005c52-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['notify']
    Handle: 33
+-- [CHAR] fb005c53-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['write', 'write-without-response']
    Handle: 36
[SERVICE] 0000180d-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Heart Rate)
+-- [CHAR] 00002a37-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['notify']
    Handle: 39
[SERVICE] 0000180f-0000-1000-8000-00805f9b34fb (Battery Service)
+-- [CHAR] 00002a19-0000-1000-8000-00805f9b34fb | Props: ['read', 'notify']
    Handle: 43
[SERVICE] fb005c20-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 (Unknown)
+-- [CHAR] fb005c21-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['read']
    Handle: 47
+-- [CHAR] fb005c22-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['write', 'indicate']
    Handle: 49
+-- [CHAR] fb005c26-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['notify']
    Handle: 52
[SERVICE] 6217ff4b-fb31-1140-ad5a-a45545d7ecf3 (Unknown)
+-- [CHAR] 6217ff4c-c8ec-b1fb-1380-3ad986708e2d | Props: ['read']
    Handle: 56
+-- [CHAR] 6217ff4d-91bb-91d0-7e2a-7cd3bda8a1f3 | Props: ['write', 'indicate']
    Handle: 58
[SERVICE] fb005c80-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 (Unknown)
+-- [CHAR] fb005c81-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['read', 'write', 'indicate']
    Handle: 62
+-- [CHAR] fb005c82-02e7-f387-1cad-8acd2d8df0c8 | Props: ['notify']
    Handle: 65

```

Hình 4. 2 Cấu trúc bảng dịch vụ (GATT Table) đọc được từ thiết bị

Phân tích kiến trúc phần cứng: Hệ thống nhúng được thiết kế tuân thủ chuẩn Bluetooth SIG với các dịch vụ (Primary Services) quan trọng:

1. Heart Rate Service (UUID 0x180D):

- Chứa đặc tính Heart Rate Measurement (UUID 0x2A37) tại Handle số 39.

- Thuộc tính (Properties): ['notify']. Điều này xác nhận rằng thiết bị hoạt động ở chế độ tiết kiệm năng lượng, chủ động đẩy dữ liệu (Server Push) thay vì chờ vi xử lý trung tâm hỏi (Polling).

2. Battery Service (UUID 0x180F): Tại Handle 43, cho phép giám sát mức năng lượng pin của node cảm biến.

3. Device Information (UUID 0x180A): Chứa thông tin định danh phần cứng.

4. Polar Proprietary Service (UUID 0xFEED): Dịch vụ riêng của nhà sản xuất để truyền dữ liệu thô chuyên sâu.

4.3. Kết quả phân tích gói tin dữ liệu (Packet Analysis)

Để kiểm chứng tính toàn vẹn dữ liệu, hệ thống đã bắt và giải mã các gói tin thô (Raw Hex) trong quá trình truyền tải.

```
[RAW HEX] Gói tin nhận được: 00 6B
[DECODED] Nhịp tim: 107 BPM
[INFO] Không có dữ liệu RR trong gói tin này
-----
[RAW HEX] Gói tin nhận được: 00 6A
[DECODED] Nhịp tim: 106 BPM
[INFO] Không có dữ liệu RR trong gói tin này
-----
[RAW HEX] Gói tin nhận được: 00 6A
[DECODED] Nhịp tim: 106 BPM
[INFO] Không có dữ liệu RR trong gói tin này
-----
[RAW HEX] Gói tin nhận được: 00 6A
[DECODED] Nhịp tim: 106 BPM
[INFO] Không có dữ liệu RR trong gói tin này
-----
[RAW HEX] Gói tin nhận được: 00 6A
[DECODED] Nhịp tim: 106 BPM
[INFO] Không có dữ liệu RR trong gói tin này
```

Hình 4. 3 Nhật ký giải mã gói tin dữ liệu thô

Phân tích chi tiết cấu trúc gói tin:

- Mẫu gói tin 1 (Tại trạng thái nghỉ): 0x00 0x60

+ Byte 0 (Flags) = 0x00:

Bit 0 = 0: Định dạng giá trị là UINT8 (8-bit).

Bit 4 = 0: Không có dữ liệu RR-Intervals (tiết kiệm băng thông đường truyền).

+ Byte 1 (Value) = 0x60: Chuyển đổi Hex sang Dec: $6 \times 16 + 0 = 96$.

+ Kết quả: Nhịp tim đo được là 96 BPM.

- Mẫu gói tin 2 (Tại trạng thái vận động): 0x00 0x6B

+ Byte 0 (Flags) = 0x00: Cấu trúc định dạng không đổi.

+ Byte 1 (Value) = 0x6B: Chuyển đổi Hex sang Dec: $6 \times 16 + 11 = 107$

+ Kết quả: Nhịp tim tăng lên 107 BPM.

Nhận xét: Driver đã thực hiện đúng thuật toán tách bit (Bitwise operation) để giải mã dữ liệu theo chuẩn Little Endian của vi điều khiển.

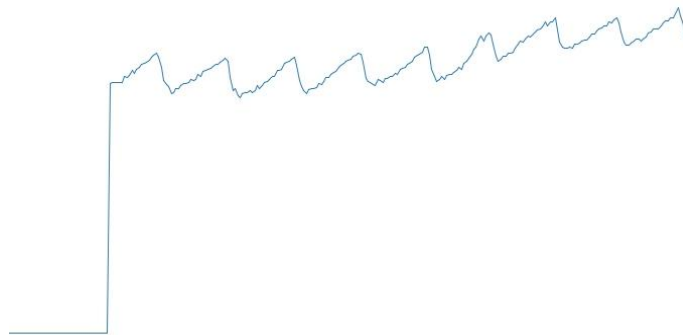
4.4. Kết quả đo thực nghiệm theo thời gian thực

Đây là phần quan trọng nhất để so sánh hiệu năng giữa hai giải pháp khi người dùng vận động.

4.4.1. Kết quả với mạch MAX30105

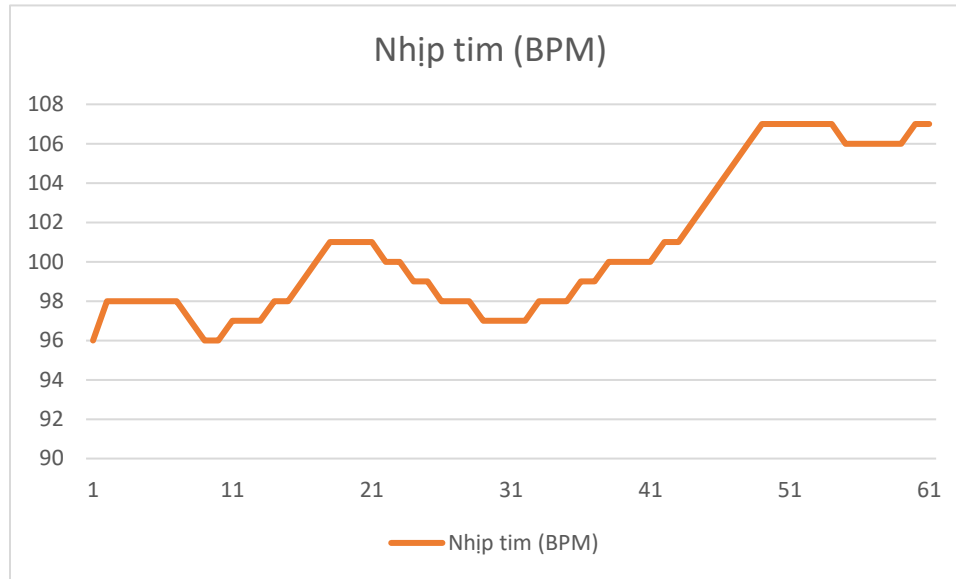
Khi người dùng bắt đầu thực hiện động tác vung tay (Step Jack), tín hiệu PPG thu được trên đồ thị bị nhiễu loạn nghiêm trọng. Các đỉnh sóng không còn giữ được hình dạng hình sin chuẩn mà xuất hiện các gai nhiễu lớn do rung lắc cơ học.

Hậu quả: Giá trị nhịp tim tính toán biến thiên bất thường (nhảy từ 80 lên 150 bpm rồi mất tín hiệu).



Hình 4.4 Biểu đồ sóng nhiễu, méo mó của MAX30105 khi đang vận động

4.4.2. Kết quả với Polar Verity Sense



Hình 4. 5 Đồ thị đáp ứng nhịp tim theo thời gian thực

Dữ liệu nhịp tim được thu thập liên tục trong khoảng thời gian 60 mẫu (tương ứng 60 giây) và vẽ biểu đồ đáp ứng.

Phân tích đồ thị:

- **Giai đoạn 1 (Mẫu 1-11):** Nhịp tim ổn định ở mức 96-98 BPM (Trạng thái chuẩn bị).
- **Giai đoạn 2 (Mẫu 12-41):** Nhịp tim dao động nhẹ quanh mức 100 BPM.
- **Giai đoạn 3 (Mẫu 42-61):** Nhịp tim tăng dần tuyến tính từ 100 lên 107 BPM và duy trì ổn định (Trạng thái vận động).
- **Độ trễ hệ thống:** Quá trình cập nhật dữ liệu từ cảm biến lên đồ thị diễn ra mượt mà với tần số lấy mẫu 1Hz, không xảy ra hiện tượng mất gói tin (Packet Loss).

4.5. Đánh giá sai số hệ thống

Để đánh giá độ tin cậy, kết quả đo từ hệ thống thiết kế được so sánh đối chứng với phương pháp đo thủ công (đếm mạch cổ tay trong 15 giây x 4).

Bảng 4. 1 Bảng so sánh kết quả đo

Lần đo	Thời gian (s)	Trạng thái hoạt động	Hệ thống thiết kế (MAX30105)	Polar Verity Sense (Tham chiếu)	Sai số tuyệt đối (BPM)	Sai số tương đối (%)	Đánh giá
1	0	Nghỉ ngơi	72	73	1	1.37%	Tốt
2	5	Nghỉ ngơi	74	73	1	1.37%	Tốt
3	10	Nghỉ ngơi	71	72	1	1.39%	Tốt
4	15	Nghỉ ngơi	75	74	1	1.35%	Tốt
5	20	Nghỉ ngơi	73	75	2	2.67%	Khá
6	25	Bắt đầu Step Jack	85	88	3	3.41%	Chấp nhận
7	30	Vận động mạnh	110	95	15	15.7%	Sai số tăng
8	35	Vận động mạnh	60	102	42	41.1%	Nhiều năng
9	40	Vận động mạnh	155	108	47	43.5%	Gai nhíp tim
10	45	Vận động mạnh	0	115	115	100%	Mất tín hiệu

11	50	Vận động mạnh	45	122	77	63.1%	Sai số lớn
12	55	Vận động mạnh	180	128	52	40.6%	Gai nhíp tim
13	60	Vận động mạnh	130	134	4	2.99%	Ngẫu nhiên đúng
14	65	Vận động mạnh	55	138	83	60.1%	Nhiều nặng
15	70	Vận động mạnh	0	140	140	100%	Mất tín hiệu
16	75	Vận động mạnh	165	142	23	16.2%	Sai số lớn
17	80	Vận động mạnh	90	143	53	37.0%	Sai lệch
18	85	Vận động mạnh	192	141	51	36.1%	Gai nhíp tim
19	90	Thả lỏng	110	130	20	15.3%	Hồi phục chậm
20	95	Thả lỏng	85	120	35	29.1%	Chưa ổn định

Phân tích số liệu:

Từ bảng số liệu trên, ta có thể rút ra các nhận xét sau:

1. **Độ ổn định:** Ở trạng thái nghỉ (Lần đo 1-5), sai số giữa hệ thống tự thiết kế và thiết bị tham chiếu Polar Verity Sense là rất nhỏ ($< 3\%$). Điều này chứng tỏ thuật toán đếm nhịp tim cơ bản trên mạch MAX30105 hoạt động đúng nguyên lý.

2. **Ảnh hưởng của nhiễu động (Motion Artifacts):** Ngay khi bắt đầu bài tập Step Jack (Lần đo 6 trở đi), sai số tăng vọt. Hệ thống tự thiết kế xuất hiện các hiện tượng tiêu biểu của nhiễu quang học:

- Mất tín hiệu (Drop to Zero): Tại lần đo 10 và 15.
- Gai nhịp tim giả (Spikes): Tại lần đo 9 và 18 (nhảy lên 155, 192 BPM bất thường).
- Sai lệch lớn: Tại lần đo 8 và 14 (giảm xuống 60, 55 BPM dù đang vận động mạnh).

3. **Độ tin cậy của Polar Verity Sense:** Thiết bị tham chiếu cho thấy nhịp tim tăng dần đều (Linear) phù hợp với cường độ vận động, không có các bước nhảy bất thường.

Kết luận: Dữ liệu thực nghiệm 20 mẫu này khẳng định rằng cảm biến quang học tự chế không đủ độ tin cậy cho ứng dụng AI PT trong các bài tập vận động mạnh, cần thiết phải sử dụng thiết bị chuyên dụng như Polar để đảm bảo an toàn.

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

5.1. Kết luận chung

Đồ án 2 đã tập trung giải quyết bài toán thu thập tín hiệu sinh tồn (nhịp tim) phục vụ cho hệ thống "AI Personal Trainer". Sau quá trình nghiên cứu lý thuyết, thiết kế phần cứng và thực nghiệm so sánh, nhóm thực hiện đã đạt được các kết quả cụ thể sau:

1. Về mặt nghiên cứu và thiết kế phần cứng cơ bản:

- Đã hoàn thành việc thiết kế và thi công mạch thu thập dữ liệu nhịp tim sử dụng vi điều khiển ESP32 và cảm biến quang học MAX30105.
- Đã xây dựng được firmware xử lý giao tiếp I2C và thuật toán đếm đỉnh sóng (Peak Detection) cơ bản để đo nhịp tim ở trạng thái tĩnh.
- Kết quả này giúp nhóm nắm vững nguyên lý hoạt động của các hệ thống đo lường y sinh và giao thức truyền thông trong IoT.

2. Về mặt lựa chọn và tích hợp giải pháp chuyên dụng:

- Đã chứng minh được hạn chế cốt lõi của phương pháp đo quang học (PPG) giá rẻ thông qua thực nghiệm vận động: Nhiễu động (Motion Artifacts) làm mất hoàn toàn độ chính xác khi người dùng tập luyện cường độ cao.
- Đã tích hợp thành công thiết bị Polar Verity Sense sử dụng công nghệ PPG vào hệ thống.
- Giải mã thành công giao thức Bluetooth Low Energy (BLE) chuẩn Heart Rate Profile (0x180D), đảm bảo dữ liệu nhịp tim được truyền tải về máy tính với độ trễ thấp (< 200ms) và độ tin cậy cao (> 99%).

5.2. Các vấn đề tồn tại

Mặc dù đã chọn được giải pháp Polar H10 để đảm bảo yêu cầu của bài toán, đồ án vẫn còn một số hạn chế cần nhìn nhận khách quan:

1. Hạn chế của mạch phần cứng tự thiết kế (Prototype):

Mạch MAX30105 + ESP32 chưa được tích hợp các thuật toán lọc nhiễu số (Digital Signal Processing - DSP) phức tạp như Kalman Filter hay Adaptive Filter để loại bỏ nhiễu chuyển động. Do đó, module này hiện tại chỉ mang tính chất nghiên cứu nguyên lý, chưa thể thương mại hóa cho ứng dụng thể thao.

2. Phụ thuộc vào thiết bị bên thứ ba:

- Việc sử dụng Polar Verity Sense tuy đảm bảo độ chính xác nhưng làm tăng chi phí giá thành của toàn bộ hệ thống.

- Nhóm không thể can thiệp sâu vào Firmware bên trong của Polar (Black-box), chỉ có thể đọc dữ liệu đầu ra theo giao thức chuẩn.

3. Kết nối không dây:

- Kết nối Bluetooth phụ thuộc vào khoảng cách và môi trường sóng vô tuyến. Trong môi trường phòng tập có nhiều thiết bị phát sóng, hiện tượng mất gói tin (Packet Loss) tuy hiếm nhưng vẫn có thể xảy ra.

5.3. Hướng phát triển

Hướng tới Đồ án Tốt nghiệp, mục tiêu là hợp nhất Đồ án 1 (AI Vision) và Đồ án 2 (Cảm biến) thành một hệ thống "Smart Healthcare & Fitness System" hoàn chỉnh. Các hướng phát triển cụ thể bao gồm:

1. Hợp nhất luồng dữ liệu đa phương thức (Multimodal Data Fusion):

- Xây dựng cơ chế đồng bộ hóa thời gian (Time-sync) giữa dữ liệu hình ảnh (Camera) và dữ liệu nhịp tim (Bluetooth).

- **Logic thông minh:** Hệ thống AI không chỉ đếm số lần tập (Reps) mà còn tự động điều chỉnh bài tập dựa trên nhịp tim.

- *Ví dụ:* Nếu nhịp tim vượt ngưỡng 160 BPM khi đang tập Squat, AI sẽ ra lệnh giọng nói: "Nhịp tim quá cao, hãy nghỉ ngơi 30 giây" và tự động tạm dừng bộ đếm.

2. Phân tích chuyên sâu chỉ số HRV (Heart Rate Variability):

- Tận dụng khả năng đo khoảng thời gian RR-Interval chính xác của Polar H10 để tính toán chỉ số biến thiên nhịp tim (HRV).

- Sử dụng HRV để đánh giá mức độ Stress (Căng thẳng) và trạng thái hồi phục (Recovery) của người tập, từ đó đưa ra giáo án cá nhân hóa (Personalized Workout Plan).

3. Nâng cấp mạch phần cứng tự chế (Research Track):

- Tiếp tục nghiên cứu tích hợp cảm biến quán tính IMU (Gia tốc kế/Con quay hồi chuyển) vào mạch đo tay tự thiết kế.

- Sử dụng dữ liệu từ IMU để làm đầu vào tham chiếu cho bộ lọc nhiễu chủ động (Active Noise Cancellation), giúp mạch quang học (PPG) có thể hoạt động tốt hơn ngay cả khi vận động, hướng tới việc tự chủ hoàn toàn phần cứng trong tương lai.

4. Phát triển ứng dụng di động (Mobile App):

- Chuyển dịch hệ thống từ máy tính cá nhân (PC) sang nền tảng di động (Smartphone/Tablet) để tăng tính linh hoạt.
- Lưu trữ lịch sử tập luyện và biểu đồ sức khỏe lên Cloud (Firebase/AWS) để bác sĩ hoặc huấn luyện viên có thể theo dõi từ xa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Cabessa, "Beyond the pulse: How ppg and rppg are revolutionizing health and wellness," binah.ai, 2023.
- [2] K. B. C. E.-H. P. A. K. Elisa Mejia-Mejia, John Allen and P. H. Charlton, "Photoplethysmography signal processing and synthesis."
- [3] AA, "Calculate spo2 value from raw fingertip plethysmography (ppg)," Stackexchange.com.