

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN
KHOA ĐIỆN TỬ VIỄN THÔNG
BỘ MÔN MÁY TÍNH – HỆ THỐNG NHÚNG



NGUYỄN NGỌC TÙNG

Đề tài:

**Thu thập dữ liệu thô về tín hiệu photoplethysmography
và truyền dữ liệu thông qua kết nối bluetooth low energy**

Chuyên ngành Máy Tính - Hệ Thống Nhúng

TP. Hồ Chí Minh, tháng 6 năm 2023

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN
KHOA ĐIỆN TỬ - VIỄN THÔNG
BỘ MÔN MÁY TÍNH - HỆ THỐNG NHÚNG



NGUYỄN NGỌC TÙNG

MSSV: 19200560

Đề tài:

Thu thập dữ liệu thô về tín hiệu photoplethysmography và truyền dữ liệu thông qua kết nối bluetooth low energy

Collecting raw data on photoplethysmography signals and transmitting data via Bluetooth Low Energy (BLE) connection

KHÓA LUẬN TỐT NGHIỆP CỬ NHÂN
NGÀNH KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ - VIỄN THÔNG
CHUYÊN NGÀNH MÁY TÍNH - HỆ THỐNG NHÚNG

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC
ThS. NGUYỄN QUỐC KHOA

TP, Hồ Chí Minh, tháng 6 năm 2023

LỜI CẢM ƠN

Em muốn nói lời cảm ơn đến tất cả mọi người, những người đã giúp đỡ, truyền cảm hứng, hỗ trợ em trong suốt quá trình học tập và cả những người đã đóng góp hỗ trợ em trong việc hoàn thành khoá luận này.

Đầu tiên, em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Thầy Nguyễn Quốc Khoa – người đã có những hỗ trợ những đóng góp những phản hồi quan trọng để giúp em hoàn thành khoá luận một cách chín chu và tốt nhất. Em gửi lời cảm ơn đến các thầy cô trong Khoa điện tử - viễn thông cũng như các thầy cô trong trường Đại học Khoa học tự nhiên đã có những cách giáo dục tốt nhất để truyền đạt kiến thức, kỹ năng cho em cũng như các sinh viên khác có thể hoàn thành các nghiên cứu của mình.

Em cũng xin gửi lời cảm ơn đến anh Lưu Xuân Vũ, cũng như anh Bùi Văn Quốc đã cho em cơ hội tiếp cận dự án thực tế cũng như đã có những quan sát, góp ý hết sức kịp thời để giúp em hoàn thành mục tiêu của mình và cũng cảm ơn đến toàn bộ các anh chị đang làm việc tại ITRVN nói riêng và công ty ITRVN nói chung đã tạo môi trường thuận lợi cho em hoàn thành khoá luận của mình.

Cuối cùng, lời cảm ơn được gửi tới bố mẹ, tới bạn bè của em, những người vẫn luôn âm thầm động viên, giúp đỡ em về mặt tinh thần rất lớn để em có thể luôn vui vẻ, tự tin thực hiện ước mơ của mình.

Khoá luận này không thể thành công nếu không có sự hiện diện của tất cả những người đã đề cập ở trên. Em thật sự biết ơn vào sự hỗ trợ không ngừng của họ và niềm tin vào khả năng của em.

Một lần nữa, xin chân thành cảm ơn tất cả các mọi người đã trở thành một phần trong cuộc hành trình đáng nhớ này và đã làm cho luận văn này trở thành hiện thực.

TP Hồ Chí Minh, tháng 06, năm 2023

Nguyễn Ngọc Tùng

TÓM TẮT KHOÁ LUẬN

Đề tài “**thu thập dữ liệu thô về tín hiệu photoplethysmography và truyền dữ liệu thông qua kết nối bluetooth low energy**” tập trung vào việc nghiên cứu và thực hiện thu thập dữ liệu thô về tín hiệu photoplethysmography (PPG) từ AFE4420, tập trung vào hiệu hoạt động và cấu trúc của AFE4420 để có thể điều khiển nó thu thập tín hiệu PPG một cách chính xác và tin cậy. Sau đó, đề tài sẽ xây dựng kết nối Bluetooth Low Energy (BLE) để truyền dữ liệu PPG thu thập được đến một ứng dụng di động. Việc xây dựng kết nối BLE sẽ yêu cầu tìm hiểu về giao thức BLE và cách thiết lập kết nối trên vi điều khiển hỗ trợ BLE với ứng dụng di động. Đề tài đã thành công trong việc thu thập được tín hiệu PPG và xây dựng kết nối BLE để truyền tải dữ liệu thu thập được qua ứng dụng di động.

ABSTRACT

"Collecting raw data on photoplethysmography signals and transmitting data via Bluetooth Low Energy (BLE) connection" focuses on studying and implementing the collection of raw data on photoplethysmography (PPG) signals from the AFE4420. The project aims to understand the operation and structure of the AFE4420 in order to accurately and reliably control it for PPG signal acquisition. Subsequently, the project will establish a Bluetooth Low Energy (BLE) connection to transmit the collected PPG data to a mobile application. Building the BLE connection will involve studying the BLE protocol and setting up the connection on a microcontroller that supports BLE with the mobile application. The project has successfully collected PPG signals and established a BLE connection to transmit the collected data via the mobile application.

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU	1
1.1. Bối cảnh thực hiện đề tài	1
1.2. Lý do thực hiện đề tài	2
1.3. Mục tiêu thực hiện đề tài	3
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT	4
2.1. Giới thiệu về chip SoC nRF5340	4
2.2. Giới thiệu về Bluetooth Low Energy - BLE	5
2.2.1. Giới thiệu sơ lược về Bluetooth Low Energy	5
2.2.2. Cấu trúc ngăn xếp giao thức của BLE	5
2.2.3. GAP và vai trò của các thiết bị trong BLE	7
2.2.4. ATT và GAT: Biểu diễn và trao đổi dữ liệu trong BLE	7
2.3. Giới thiệu về tín hiệu photoplethysmography - PPG	9
2.3.1. Tín hiệu photoplethysmography - PPG	9
2.3.2. Nguyên lý hoạt động của đo đặc tín hiệu PPG	9
2.3.3. Dạng sóng của tín hiệu PPG	11
2.4. Giới thiệu tổng quan về AFE4420 trong đo đặc tín hiệu PPG	12
2.4.1. Giao tiếp I2C bên trong AFE4420	13
2.4.2. Tính năng bên trong AFE4420	14
2.4.2.1. Chế độ xung đồng hồ	14
2.4.2.2. Pha tín hiệu bên trong trạng thái tích cực	15
2.4.2.3. Photodiode và LED	15
2.4.2.4. Offset Cancellation DAC	16
2.4.2.5. Bộ TIA và lọc	16
2.4.2.6. Bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số (ADC)	16
2.4.2.7. Chế độ huỷ nền tự động động (Automatic Ambient Cancellation Mode - AACM)	17
2.4.2.8. Khối lưu trữ (First-In, First-Out – FIFO)	18
CHƯƠNG 3: THỰC HIỆN HỆ THỐNG	19
3.1. Kiến trúc hệ thống	19
3.1.1. Sơ đồ khối hệ thống	19
3.1.2. Kiến trúc phần mềm	20
3.2. Thực hiện cấu hình và thu thập dữ liệu PPG từ AFE4420	22
3.2.1. Cấu hình hoạt động cho AFE4420	22

3.2.1.1. Thiết lập độ lợi cho bộ khuếch đại TIA	22
3.2.1.2. Cấu hình mặc định cho hoạt động của AFE4420	23
3.2.1.3. Kích hoạt chế độ huỷ nền tự động - AACM	24
3.2.1.4. Hiệu chỉnh cho chế độ huỷ nền tự động	24
3.2.1.5. Thiết lập tần số lấy mẫu, ngưỡng dòng điện trong AFE4420	25
3.2.1.6. Cấu hình các pha tín hiệu và các photodiode	25
3.3. Hoạt động đo đặc trong hệ thống	27
3.3.1. Luồng chính thu thập dữ liệu các cảm biến	30
3.3.2. Luồng xử lý thu thập dữ liệu	31
3.3.3. Luồng thu thập dữ liệu của AFE4420	33
3.4. Truyền dữ liệu PPG đến ứng dụng di động thông qua kết nối BLE	35
3.4.1. Khởi tạo cấu hình BLE trên thiết bị	36
3.4.2. Xây dựng ứng dụng di động hỗ trợ kết nối BLE.	41
CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC	49
4.1. Kết quả thu thập dữ liệu PPG	49
4.2. Kết quả thực hiện gửi dữ liệu lên ứng dụng di động	53
CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN	56
5.1. Kết quả đạt được	56
5.2. Phạm vi ứng dụng	56
5.3. Hạn chế	57
5.4. Hướng phát triển	58
TÀI LIỆU THAM KHẢO	60
PHỤ LỤC	61

DANH SÁCH TỪ VIẾT TẮT

STT	Ký hiệu chữ viết tắt	Chữ viết đầy đủ
1	PPG	Photoplethysmography
2	BLE	Bluetooth low energy
3	SoC	System on chip
4	IoT	Internet of Things
5	API	Application Programming Interface
6	L2CAP	Logical Link Control & Adaptation Protocol
7	SMP	Security Manager Protocol
8	ATT	Attribute Protocol
9	GATT	Generic Attribute Profile
10	GAP	Generic Access Profile
11	PHY	Physical Layer
12	LL	Link Layer
13	LED	Light-emitting diode
14	ADC	Analog-to-Digital Converter
15	FIFO	First in, First out
16	TIA	Trans-impedance Amplifier
17	SPI	Serial Peripheral Interface
18	I2C	Inter – Integrated Circuit
19	DAC	Digital-to-Analog Converter
20	PRF	Pulse repetition frequency
21	AACM	Automatic Ambient Cancellation Mode
22	PD	Photodiode
23	MCU	Micro Controller Unit
24	UUID	Universally Unique Identifier
25	BREDR	Basic Rate/Enhanced Data Rate
26	MAC	Media Access Control

DANH SÁCH HÌNH ẢNH

Hình 1. 1. Các thiết bị sử dụng kỹ thuật đo PPG	2
Hình 2. 1. Chip SoC nRF5340	4
Hình 2. 2. Các chuẩn giao tiếp không dây nổi tiếng	4
Hình 2. 3. Kiến trúc ngăn xếp của Bluetooth Low Energy	5
Hình 2. 4. Mô hình kết nối BLE peripheral và central	7
Hình 2. 5. Mô hình kết nối BLE giữa Server và Client	7
Hình 2. 6. Ví dụ profile BLE về nhịp tim	8
Hình 2. 7. Các kiểu đo đặc PPG	9
Hình 2. 8. Nguyên lý đo đặc tín hiệu PPG	10
Hình 2. 9. Dạng sóng PPG trên cơ thể người	11
Hình 2. 10. Dạng sóng PPG lý tưởng	11
Hình 2. 11. Sơ đồ khối của AFE4420	12
Hình 2. 12. Các đường tín hiệu trong giao tiếp I2C	13
Hình 2. 13. Hoạt động đọc và ghi trong giao tiếp I2C của AFE4420	14
Hình 2. 14. Mô tả tổng quan về thời gian trong chế độ xung ngoại và chế độ dao động nội	14
Hình 2. 15. Định nghĩa các pha bên trong một chu kỳ PRF	15
Hình 2. 16. Các thiết lập giá trị Offset DAC qua các từng pha	16
Hình 2. 17. Pha đích cho việc hiệu chỉnh giá trị Offset DAC	17
Hình 2. 18. FIFO có thiết lập ngắt khi dữ liệu đạt đến ngưỡng thiết lập	18
Hình 3. 1. Sơ đồ khối thiết bị thu thập tín hiệu PPG	19
Hình 3. 2. Kiến trúc phần mềm của hệ thống	20
Hình 3. 3. Chi tiết thành phần bên trong kiến trúc phần mềm của hệ thống	21
Hình 3. 4. Cơ chế hủy nhiễu môi trường của AACM	24
Hình 3. 5. Mô tả cơ chế hoạt động của semaphore	29
Hình 3. 6. Lưu đồ thể hiện hoạt động của luồng chính	30
Hình 3. 7. Dữ liệu AFE4420 được cấu trúc và đẩy vào hàng đợi	31
Hình 3. 8. Chu kỳ thu thập dữ liệu của thiết bị	32
Hình 3. 9. Lưu đồ thể hiện việc kiểm tra semaphore để thu thập dữ liệu của thiết bị	32
Hình 3. 10. Lưu đồ thể hiện hoạt động của luồng thu thập dữ liệu trên AFE4420	33
Hình 3. 11. Cho vào semaphore mỗi khi có ngắt đủ dữ liệu trong FIFO	34

Hình 3. 12. Dữ liệu AFE4420 đẩy vào hàng đợi	34
Hình 3. 13. Mô hình kết nối BLE giữa thiết bị đo và điện thoại	35
Hình 3. 14. Lưu đồ thể hiện hoạt động quảng bá BLE của thiết bị	38
Hình 3. 15. Ứng dụng gửi yêu cầu đầu thu thập tín hiệu PPG	40
Hình 3. 16. Ứng dụng gửi yêu cầu dừng thu thập tín hiệu PPG	40
Hình 3. 17. Thiết bị gửi dữ liệu đến ứng dụng.....	41
Hình 3. 18. Màn hình ứng dụng thực hiện kết nối BLE đến thiết bị	42
Hình 3. 19. Màn hình ứng dụng thực hiện yêu cầu bắt đầu và dừng thu thập dữ liệu.....	43
Hình 3. 20. Lưu đồ thể hiện hoạt động yêu cầu kết nối BLE với thiết bị.....	44
Hình 3. 21. Thông báo đã kết nối BLE thành công	45
Hình 3. 22. Lưu đồ thể hiện kết nối BLE với thiết bị	46
Hình 3. 23. Lưu đồ thể hiện yêu hoạt động bấm nút bắt đầu thu thập dữ liệu	46
Hình 3. 24. Ứng dụng thực hiện vẽ biểu đồ sóng dựa trên dữ liệu nhận được.....	47
Hình 3. 25. Màn hình ứng dụng khi dạng sóng được vẽ	47
Hình 3. 26. Lưu đồ thể hiện hoạt động bấm nút dừng thu thập dữ liệu.....	48
Hình 4. 1. Dữ liệu PPG thu thập được trên thiết bị	49
Hình 4. 2. Vị trí đo ở LED1-RED và PD3	49
Hình 4. 3. Dạng sóng ở vị trí LED1-RED và PD3	50
Hình 4. 4. Dạng sóng ở vị trí LED1-IR và PD3	50
Hình 4. 5. Dạng sóng ở vị trí LED2-RED và PD1	51
Hình 4. 6. Vị trí đo ở LED2-IR và PD1	51
Hình 4. 7. Dạng sóng ở vị trí LED2-IR và PD1	52
Hình 4. 8. Kết nối thành công thiết bị với ứng dụng di động	53
Hình 4. 9. Dữ liệu được vẽ ra sau khi bấm nút bắt đầu thu thập dữ liệu	54
Hình 4. 10. Dạng sóng PPG được đo ở bụng.....	54
Hình 4. 11. Dạng sóng PPG được đo ở bắp chân	54

DANH SÁCH BẢNG

Bảng 2. 1. Các mức ngưỡng giá trị ADC của AFE4420	17
Bảng 3. 1. Ánh xạ giá trị độ lợi bộ TIA với thanh ghi điều khiển	23
Bảng 3. 2. Một số cấu hình trong AFE4420	23
Bảng 3. 3. Giá trị xấp xỉ cho hiệu chỉnh AACM	25
Bảng 3. 4. Thiết lập các ngưỡng dòng điện của dòng huỷ môi trường.....	25
Bảng 3. 5. Thiết lập pha dummy	26
Bảng 3. 6. Thiết lập pha môi trường	26
Bảng 3. 7. Thiết lập các pha LED	26
Bảng 3. 8. Tổng quan các thiết lập pha trong hệ thống	27
Bảng 3. 9. UUID của dịch vụ BLE bên trong thiết bị	37
Bảng 3. 10. Mô tả Request characteristic	37
Bảng 3. 11. Mô tả Notify characteristic	37
Bảng 3. 12. Mô tả các mã lệnh BLE trong hệ thống	39

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU

1.1. Bối cảnh thực hiện đề tài

Phẫu thuật là phương pháp phổ biến của nền y học hiện nay trong việc điều trị các căn bệnh, tuy nhiên đi kèm với nó là vết thương nơi vết mổ xảy ra, do đó các bệnh nhân cần phải theo dõi thường xuyên tình trạng vết mổ của mình để đảm bảo sức khỏe của mình, ngoài ra các vết thương hở do tai nạn gây ra cũng cần phải điều trị và theo dõi thường xuyên. Tuy nhiên với những bệnh nhân như thế, việc di chuyển đến các trung tâm y tế hay bệnh viện để tái khám là khó khăn, chính vì thế mà thiết bị theo dõi tình trạng những vết thương như thế được nghĩ đến. Và để có thể làm được điều đó, thu thập dữ liệu trên cơ thể người là hết sức quan trọng. Nhịp tim, nồng độ oxy trong máu, hay huyết áp đều được phân tích từ tín hiệu photoplethysmography (PPG) được thu thập bởi các thiết bị điện tử. Việc thu thập dữ liệu về tín hiệu photoplethysmography (PPG) trở nên ngày càng quan trọng để đánh giá sự hoạt động của tim và các thông số liên quan. Điều này đặc biệt có ý nghĩa trong việc theo dõi và phát hiện các vấn đề sức khỏe như bất thường nhịp tim, căng thẳng, hoặc mức độ oxy hóa trong máu.

Kết nối Bluetooth Low Energy (BLE) được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng di động hiện đại. BLE cung cấp khả năng truyền dữ liệu không dây tiết kiệm năng lượng, cho phép các thiết bị di động như điện thoại thông minh hoặc máy tính bảng kết nối với các thiết bị đo và thu thập dữ liệu từ các thiết bị y tế hoặc cảm biến. Các thiết bị thu thập dữ liệu được đeo trên cơ thể người phải tiết kiệm năng lượng hết sức có thể để có thể duy trì thời gian hoạt động và nâng cao trải nghiệm người dùng, do đó để truyền tải dữ liệu qua kết nối không dây thì khó có gì có thể thay thế kết nối BLE, chính vì lý do đó mà nó được sử dụng trong đề tài này.

Bằng cách thu thập dữ liệu PPG và truyền nó qua kết nối BLE, người dùng có thể theo dõi và giám sát sức khỏe của mình một cách tiện lợi và không gian lưu trữ nhiều dữ liệu trên thiết bị di động của mình. Điều này giúp cải thiện quản lý sức khỏe và tạo ra những thông tin quan trọng cho việc đưa ra quyết định chăm sóc sức khỏe cá nhân.

1.2. Lý do thực hiện đề tài

Với bối cảnh thực hiện đề tài đã được kể ở trên thì có nhiều lý do để thực hiện đề tài này.

Thứ nhất, đối với các bệnh nhân đang có những vết mổ hay vết thương hở trên cơ thể thì khó khăn trong việc di chuyển đến bệnh viện để tái khám do đó thiết bị có sẵn có thể theo dõi trực tiếp tình trạng sức khỏe là cần thiết.

Thứ hai, phương pháp đo đặc tín hiệu photoplethysmography (PPG) là một phương pháp phổ biến, dễ dàng và giá thành thấp để có thể dùng tín hiệu đó mà phân tích ra các chỉ số liên quan đến sức khỏe như: nhịp tim, nồng độ oxy trong máu (SpO2), huyết áp, ... nó được ứng dụng rất nhiều trong các thiết bị đeo như Apple watch, Mi band, ...



Hình 1. 1. Các thiết bị sử dụng kỹ thuật đo PPG

Thứ ba, trao đổi dữ liệu không dây từ thiết bị này sang thiết bị khác là xu hướng, kèm theo đáp ứng nhu cầu về mặt năng lượng thì kết nối BLE là công nghệ hết sức phù hợp để đem vào ứng dụng.

Ngoài ra, nghiên cứu, tìm hiểu và thực hiện các thiết bị có thể thu thập tín hiệu PPG và truyền tải dữ liệu đó qua ứng dụng di động là quá trình giúp cho người làm thu nạp thêm nhiều kiến thức và kỹ năng để giải quyết các vấn đề, các bài toán thực tế ngay trong cuộc sống hằng ngày.

Chính những lý do kể trên đã hình thành lên mục tiêu và con đường để em có thể tự tin thực hiện đề tài này.

1.3. Mục tiêu thực hiện đề tài

Từ bối cảnh cho đến lý do thực hiện đề tài đã kể ở trên thì thật sự có rất nhiều vấn đề cần được đưa ra và giải quyết để hoàn thành nó.

Trong khuôn khổ khả năng của bản thân em cũng như kiến thức của mình thì để hoàn toàn làm được một thiết bị hoàn chỉnh có khả năng phân tích đánh giá dữ liệu thu thập được cũng như cho người dùng trải nghiệm tuyệt vời khi dùng nó với ứng dụng di động là một hành trình khó và dài, cần rất nhiều thời gian và nỗ lực để hoàn thành.

Vì lẽ đó, trong khuôn khổ cho phép của khoá luận này, mục tiêu của em thực hiện trong đề tài này như sau:

- Tìm hiểu cách hoạt động của thành phần điện tử dùng để thu thập tín hiệu PPG mà ở đây là AFE4420.
- Sau khi hiểu cấu tạo cũng như hoạt động của nó, thì dùng AFE4420 kết hợp với chip SoC, ở đây là nRF5340 để lập trình nó thu thập dữ liệu tín hiệu PPG.
- Sử dụng được kết nối BLE để thực hiện các thao tác truyền dữ liệu PPG giữa thiết bị với ứng dụng di động.
- Tạo một ứng dụng di động với giao diện đơn giản sử dụng kết nối BLE với thiết bị để có thể hiển thị dữ liệu dạng sóng PPG cho người dùng theo dõi.

Trên đây là các mục tiêu cần phải thực hiện được trong đề tài này theo khả năng của một sinh viên. Dựa trên những mục tiêu trên thì kỹ năng, cũng như kiến thức kết hợp với sự tìm tòi học hỏi và kiên trì của bản thân thì các mục tiêu trên hoàn toàn có thể đạt được.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Giới thiệu về chip SoC nRF5340

nRF5340 là một chip System on Chip (SoC) hỗ trợ kết nối không dây tiên tiến mang lại hiệu suất cao về năng lượng và tính linh trong việc sử dụng. Nó được trang bị hai bộ xử lý Arm Cortex-M33 mạnh mẽ, cho phép xử lý hiệu quả các nhiệm vụ phức tạp. Với tính năng bảo mật tiên tiến và dải nhiệt độ hoạt động rộng lên đến 105°C, nRF5340 là lựa chọn tuyệt vời cho nhiều ứng dụng như thiết bị đeo thông minh tiên tiến, các hệ thống IoT phức tạp...



Hình 2. 1. Chip SoC

Một trong những tính năng nổi bật của nRF5340 là khả năng hỗ trợ nhiều giao thức kết nối không dây. Nó tích hợp Bluetooth 5.1 Direction Finding, Bluetooth 5 Long Range, NFC, Bluetooth Mesh, Thread và Zigbee, cho phép tương thích với nhiều tiêu chuẩn giao tiếp không dây. Tính linh hoạt này cho phép kết nối và tích hợp mượt mà với các thiết bị khác nhau.

Wireless IoT Network Protocols



Hình 2. 2. Các chuẩn giao tiếp không dây nổi tiếng

Với mức tiêu thụ năng lượng siêu thấp, nRF5340 được thiết kế để tối đa hóa tuổi thọ pin. Điều này làm cho nó trở thành giải pháp lý tưởng cho các thiết bị IoT tiết kiệm năng lượng và đồng hồ đeo tay thông minh yêu cầu hoạt động lâu dài mà không cần sạc thường xuyên.

Tổng thể, nRF5340 nổi bật với tính năng cao cấp, bảo mật mạnh mẽ và hỗ trợ nhiều giao thức không dây. Tính linh hoạt và hiệu suất xuất sắc của nó làm cho nó trở thành

lựa chọn hấp dẫn cho các nhà phát triển và kỹ sư tìm kiếm một giải pháp đáng tin cậy và hiệu quả.

2.2. Giới thiệu về Bluetooth Low Energy - BLE

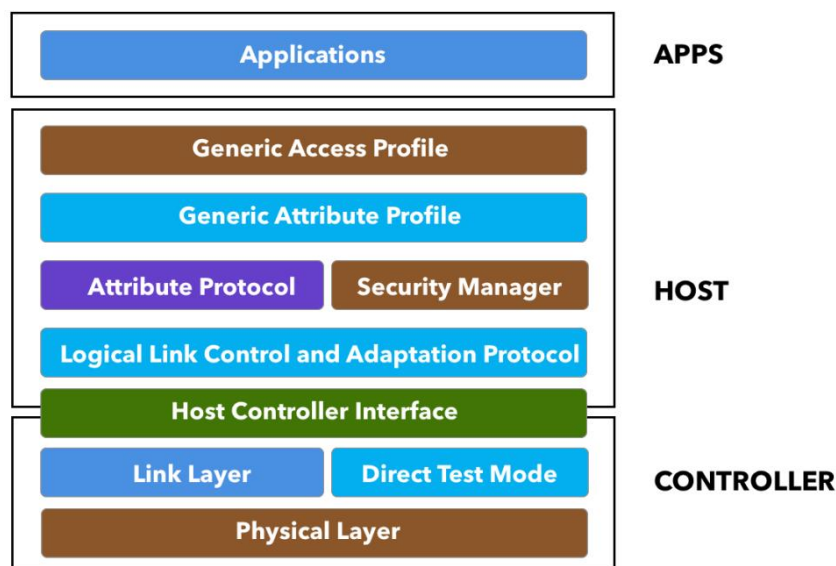
2.2.1. Giới thiệu sơ lược về Bluetooth Low Energy

Bluetooth Classic được sử dụng rộng rãi cho các ứng dụng thông qua việc truyền dữ liệu với tốc độ cao và dễ sử dụng. Tuy nhiên, đối với các thiết bị đeo tiết kiệm năng lượng và ứng dụng IoT, việc sạc pin thường xuyên không khả thi. Để giải quyết vấn đề này, Bluetooth Low Energy (BLE) đã được giới thiệu như một phiên bản tiết kiệm năng lượng trong Bluetooth Specification 4.0. Mục tiêu của BLE là cho phép các ứng dụng IoT tiết kiệm năng lượng mà vẫn đảm bảo kết nối và tốc độ truyền dữ liệu.

Bluetooth LE tập trung vào việc tiết kiệm năng lượng bằng cách giảm tốc độ truyền dữ liệu từ bằng cách chia nhỏ các gói dữ liệu từ 27 bytes đến 251 bytes và tối ưu hoá thời gian phát sóng radio. Điều này làm cho nó phù hợp cho các thiết bị hoạt động bằng pin như đồng hồ thông minh, cảm biến thông minh, và các thiết bị IoT. Ngoài ra, Bluetooth LE có các khía cạnh khác biệt với Bluetooth Classic, bao gồm các hình thức kết nối và loại thiết bị được hỗ trợ, nhằm phục vụ cho các ứng dụng IoT đặc biệt.

2.2.2. Cấu trúc ngăn xếp giao thức của BLE

Hình ảnh dưới đây mô tả kiến trúc ngăn xếp giao thức của BLE, cho thấy các tầng tạo thành phần Host của Bluetooth LE và tầng tạo thành phần Controller của Bluetooth LE.



Hình 2. 3. Kiến trúc ngăn xếp của Bluetooth Low Energy

Tầng ứng dụng (Applications): là nơi mà người dùng tương tác thông qua các API được hỗ trợ để sử dụng giao thức bên trong BLE.

Tầng chủ (Host): quyết định cách các thiết bị Bluetooth LE lưu trữ và trao đổi dữ liệu với nhau

- Giao thức Logical Link Control & Adaptation Protocol (L2CAP): cung cấp dịch vụ đóng gói dữ liệu cho các tầng trên cùng. Nó giúp gói gọn dữ liệu và cung cấp khả năng truyền và nhận dữ liệu giữa các thiết bị Bluetooth LE
- Giao thức Security Manager Protocol (SMP): xác định và cung cấp phương pháp để thiết lập kết nối an toàn. Nó đảm bảo rằng dữ liệu được truyền qua kết nối Bluetooth LE được bảo vệ và mã hóa đúng cách.
- Giao thức Attribute Protocol (ATT): cho phép một thiết bị biểu diễn một số dữ liệu cụ thể cho thiết bị khác. Nó cho phép trao đổi thông tin và thu thập dữ liệu giữa các thiết bị Bluetooth LE.
- Giao thức Generic Attribute Profile (GATT): xác định các quy trình cần thiết để sử dụng tầng ATT. Nó mô tả cách truy cập và quản lý các services và characteristics trên thiết bị Bluetooth LE.
- Giao thức Generic Access Profile (GAP): tương tác trực tiếp với ứng dụng để xử lý các dịch vụ liên quan đến phát hiện thiết bị và kết nối. Nó cung cấp các chức năng như tìm kiếm thiết bị và thiết lập kết nối giữa các thiết bị Bluetooth LE.

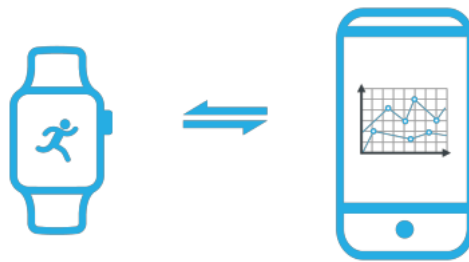
Tầng điều khiển (Controller): gồm các thành phần như sau:

- Tầng Vật lý (Physical Layer - PHY): xác định cách dữ liệu thực tế được biến đổi thành sóng radio, và cách nó được truyền và nhận. Tầng này quyết định các thông số về tần số, công suất và phương thức truyền dữ liệu trên sóng radio.
- Tầng Liên kết (Link Layer - LL): quản lý trạng thái của radio, được định nghĩa là một trong các chế độ sau - chế độ chờ (standby), chế độ quảng bá (advertising), chế độ quét (scanning), chế độ khởi tạo (initiating), và chế độ kết nối (connection). Tầng này điều khiển việc gửi và nhận các gói tin trong quá trình kết nối Bluetooth LE.

2.2.3. GAP và vai trò của các thiết bị trong BLE

Tầng GAP trong Bluetooth LE xác định các vai trò và chức năng của các thiết bị trong kết nối Bluetooth LE. Vai trò quảng bá và quét là các vai trò quan trọng trong quá trình thiết lập kết nối giữa các thiết bị Bluetooth LE. Một thiết bị quảng bá sẽ thông báo về sự tồn tại và khả năng kết nối của nó, trong khi một thiết bị khác sẽ quét và tìm kiếm các thiết bị quảng bá để thiết lập kết nối.

Trong Bluetooth LE, có hai vai trò chính là **peripheral** và **central**. Peripheral là thiết bị quảng bá sự hiện diện và mong muốn kết nối, trong khi central là thiết bị quét và tìm kiếm các thiết bị peripheral. Khi central quét và phát hiện gói quảng bá của peripheral, nó có thể khởi tạo một yêu cầu kết nối tới peripheral để thiết lập kết nối. Khi kết nối được thiết lập, peripheral và central có thể trao đổi dữ liệu và tương tác với nhau.



Hình 2. 4. Mô hình kết nối BLE peripheral và central

2.2.4. ATT và GAT: Biểu diễn và trao đổi dữ liệu trong BLE

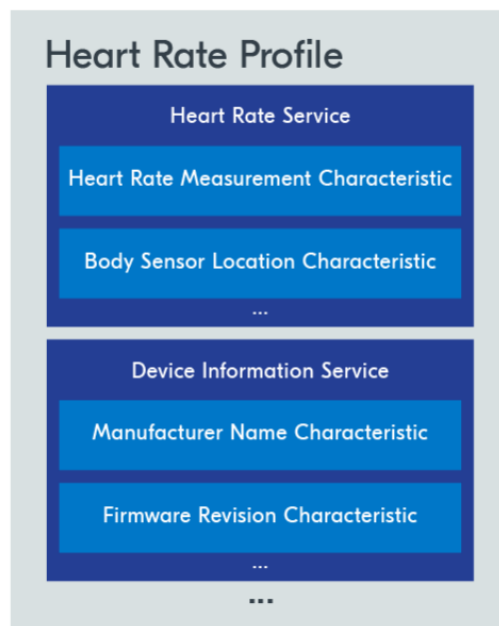
ATT xác định cách dữ liệu được truyền và xử lý trong quá trình kết nối của các thiết bị Bluetooth LE. Nó dựa trên mô hình client-server, trong đó server là thiết bị chứa dữ liệu và có thể gửi dữ liệu cho client (thiết bị khác) hoặc client có thể yêu cầu dữ liệu từ server.



Hình 2. 5. Mô hình kết nối BLE giữa Server và Client

GATT là một lớp giao thức nằm trên lớp ATT và sử dụng các khái niệm như profile, dịch vụ (service) và thuộc tính (characteristics) để quản lý việc truyền dữ liệu giữa các thiết bị Bluetooth LE.

- Profile: Một profile là một tập hợp các dịch vụ và thuộc tính liên quan đến một ứng dụng cụ thể. Ví dụ, profile Heart Rate Monitor (Bộ đo nhịp tim) xác định các dịch vụ và thuộc tính liên quan đến việc đo nhịp tim.
- Service (Dịch vụ): Một dịch vụ đại diện cho một chức năng cụ thể của một thiết bị Bluetooth LE. Ví dụ, dịch vụ Heart Rate (Nhịp tim) trong profile Heart Rate Monitor sẽ chứa thông tin về việc đo nhịp tim.
- Characteristic (Thuộc tính): Một thuộc tính là một phần của dịch vụ và chứa dữ liệu hoặc thông tin cụ thể. Ví dụ, trong dịch vụ Heart Rate, thuộc tính Heart Rate Measurement chứa dữ liệu về nhịp tim đo được.



Hình 2. 6. Ví dụ profile BLE về nhịp tim

2.3. Giới thiệu về tín hiệu photoplethysmography - PPG

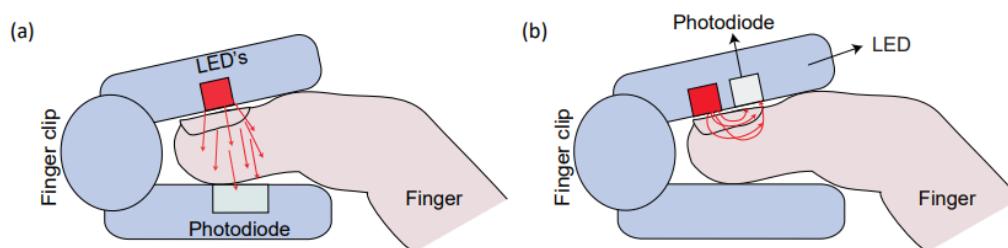
2.3.1. Tín hiệu photoplethysmography - PPG

Photoplethysmography (PPG) là một phương pháp không xâm lấn để đo lường sự thay đổi về khối lượng máu trong mạch dưới da, dựa vào các đặc tính quang học của cơ thể người như khả năng hấp thụ và phản xạ ánh sáng từ mô mạch máu trong cơ thể. Dựa trên sự thay đổi về lượng máu trong cơ thể được truyền tải bởi lượng ánh sáng, tín hiệu PPG và phân tích, nó có thể cung cấp thông tin về nhịp tim, nồng độ oxy trong máu và các thông số khác liên quan đến sự hoạt động của hệ tuần hoàn.

Một hệ thống đo lường PPG có cấu trúc cơ bản gồm LED để chiếu sáng và cảm biến ánh sáng (Photodiode) để đo lường lượng ánh sáng được truyền qua hoặc phản xạ từ cơ thể, ngoài ra còn có bộ điều khiển LED, bộ lọc loại bỏ nhiễu, bộ chuyển đổi tương tự sang số và vi xử lý. Với thiết kế phần cứng đơn giản và chi phí cho hệ thống thấp nên kỹ thuật đo PPG thường được dùng trong nhiều ứng dụng khác nhau.

Với hệ thống như trên thì có hai loại cấu hình thiết bị để đo PPG là: truyền qua (transmissive) và phản xạ (reflection):

- Loại truyền qua (transmissive type): LED và PD được đặt đối diện nhau.
- Loại phản xạ (reflection type): LED và PD được đặt gần với nhau.



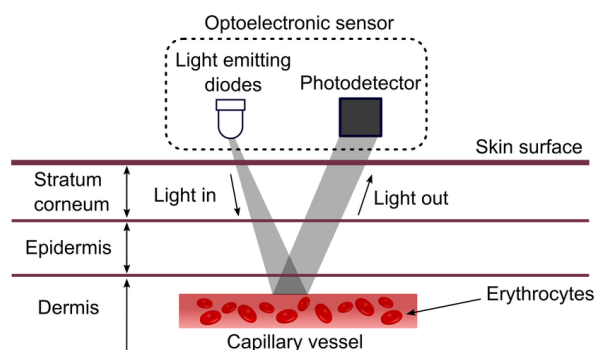
Hình 2. 7. Các kiểu đo đặc PPG

2.3.2. Nguyên lý hoạt động của đo đặc tín hiệu PPG

Hoạt động để đo đặc PPG có thể chia thành các giai đoạn khác nhau như chiếu sáng, hấp thụ và phản xạ, thu thập ánh sáng, xử lý tín hiệu.

Chiếu sáng là lúc mà nguồn sáng từ LED dùng để chiếu lên vùng da gần mạch máu, ánh sáng có thể là ánh sáng với các bước sóng khác nhau. Bước sóng 470, 570 và 660 nm hoặc cao hơn có thể đạt được tới biểu bì với mạch máu nhỏ, da thượng bì với các mạch

nhỏ và các động mạch trong mô dưới da, các mạch máu chính và các động mạch có nhịp đập mạnh chủ yếu nằm ở lớp thượng bì hoặc mô dưới da. Do đó, ánh sáng có bước sóng màu đỏ từ 640-660 nm và bước sóng hồng ngoại từ 880-940 nm thường được sử dụng chủ yếu để đo PPG.



Hình 2. 8. Nguyên lý đo đặc tín hiệu PPG

Hấp thụ và phản xạ là lúc mà ánh sáng chiếu qua da, nó sẽ gặp phản xạ và hấp thụ từ các mạch máu nằm gần bề mặt da. Mạch máu chứa các chromophore, chẳng hạn như hồng cầu chứa hemoglobin, có khả năng hấp thụ ánh sáng. Sự hấp thụ này tạo ra một phổ hấp thụ đặc trưng của máu, trong đó nồng độ oxyhemoglobin và deoxyhemoglobin ảnh hưởng đến sự hấp thụ ánh sáng. Ví dụ, trong giai đoạn giãn tâm, thể tích máu, đường kính động mạch và nồng độ hemoglobin trong vùng đo đạt giá trị nhỏ nhất. Do đó, độ hấp thụ ánh sáng cũng đạt giá trị nhỏ nhất, trong khi lượng ánh sáng được cảm biến ánh sáng phát hiện là lớn nhất. Ngược lại, trong giai đoạn co bóp tim, độ sáng ánh sáng được phát hiện bởi cảm biến ánh sáng giảm xuống mức tối thiểu.

Thu thập ánh sáng là khi ánh sáng phản xạ từ mạch máu được thu thập bởi một cảm biến ánh sáng (Photodiode), có khả năng chuyển đổi ánh sáng thành tín hiệu điện.

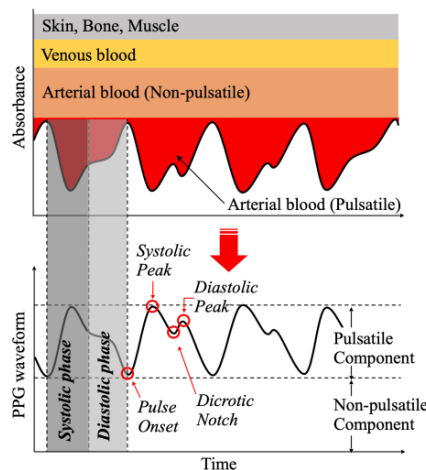
Xử lý tín hiệu là giai đoạn tín hiệu điện từ cảm biến ánh sáng được chuyển đổi thành dạng số bằng một bộ chuyển đổi tương tự sang số (ADC - Analog-to-Digital Converter). Sau đó, tín hiệu số này được xử lý bởi một vi xử lý hoặc các thuật toán tính toán để trích xuất các thông tin quan trọng như nhịp tim, huyết áp, nồng độ oxy trong máu (SpO_2) và nồng độ oxyhemoglobin, ...

2.3.3. Dạng sóng của tín hiệu PPG

Dạng sóng PPG được thu được từ lượng hấp thụ ánh sáng thông qua việc đảo ngược độ sáng được ghi lại bằng cảm biến ánh sáng sau khi ánh sáng được truyền qua hoặc phản xạ từ mô tế bào con người. Nói chung, dạng sóng PPG được chia thành hai thành phần chính là thành phần có nhịp (AC) và thành phần không có nhịp (DC).

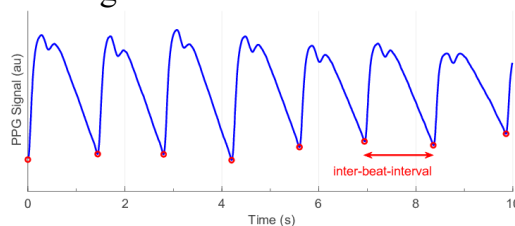
Thành phần có nhịp thường gọi là thành phần dòng điện xoay chiều (AC) liên quan đến sự thay đổi lượng máu trong mạch, đồng bộ với chu kỳ tim mạch, liên quan đến quá trình co giãn của cơ mạch.

Thành phần không có nhịp là thành phần dòng điện một chiều (DC) thường bị ảnh hưởng bởi các đặc điểm sinh học, chẳng hạn như thành phần mô và khối lượng máu cơ bản của vùng đo, cũng như các yếu tố bên ngoài, như ánh sáng môi trường và thông số thiết bị đo.



Hình 2. 9. Dạng sóng PPG trên cơ thể người

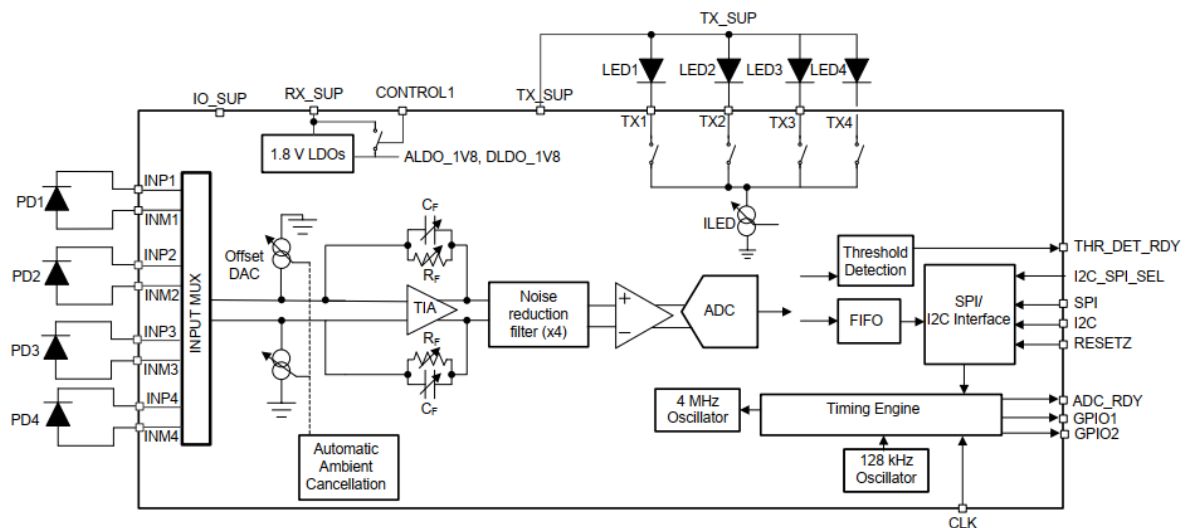
Dạng sóng PPG thay đổi theo hoạt động của tim và còn bị ảnh hưởng bởi hô hấp, hoạt động của hệ thần kinh tự động, hoạt động động mạch và hoạt động tĩnh mạch. Nó có hai đường cong chính: một đường cong tăng dần và một đường cong giảm dần. Đường cong tăng dần tương ứng với giai đoạn tâm thu, khi lượng máu trong các mạch nhỏ tăng do tim co bóp. Đường cong giảm dần tương ứng với giai đoạn tâm trương, khi lượng máu trong các mạch nhỏ giảm do tim giãn ra.



Hình 2. 10. Dạng sóng PPG lý tưởng

2.4. Giới thiệu tổng quan về AFE4420 trong đo đặc tín hiệu PPG

AFE4420 là một thiết bị gồm bộ truyền và bộ nhận tín hiệu sử dụng các đặc tính kỹ thuật về quang học trên cơ thể người để phục vụ cho các ứng dụng như giám sát nhịp tim, tính toán nồng độ oxy trong máu hay còn gọi là SpO₂, huyết áp, ... Hệ thống này hoạt động dựa trên một tham số quan trọng gọi là tần số lặp lại xung nhịp (PRF), xác định chu kỳ lặp lại của các hoạt động. Trong mỗi chu kỳ PRF, nó có thể tạo lên đến 16 pha tín hiệu để thu thập dữ liệu. Mỗi pha tín hiệu liên quan đến việc bật đèn LED hoặc không, kết hợp với việc thu thập và chuyển đổi tín hiệu nhận được từ một hoặc nhiều cảm biến PD (photodiode). Pha tín hiệu mà ở đó đèn LED được bật để chiếu sáng gọi là pha LED (LED phase), pha này chứa thông tin về tín hiệu PPG mà nó thu thập được. Trong khi đó, pha không có đèn LED chiếu sáng được gọi là pha môi trường (ambient phase). Các mẫu dữ liệu thu được từ pha LED và pha môi trường có thể được bù trừ cho nhau nhằm giúp loại bỏ hoặc giảm thiểu ảnh hưởng của ánh sáng môi trường đến việc phát hiện tín hiệu nhịp tim. Điều này giúp đảm bảo rằng chúng ta chỉ thu được tín hiệu thực sự từ tim mà không bị nhiễu từ ánh sáng xung quanh. Một khối FIFO (First in, First out) được sử dụng để lưu trữ các mẫu dữ liệu từ mỗi pha tín hiệu qua nhiều chu kỳ, đảm bảo việc thu thập và xử lý dữ liệu được thực hiện một cách liên tục và có tổ chức.



Hình 2. 11. Sơ đồ khối của AFE4420

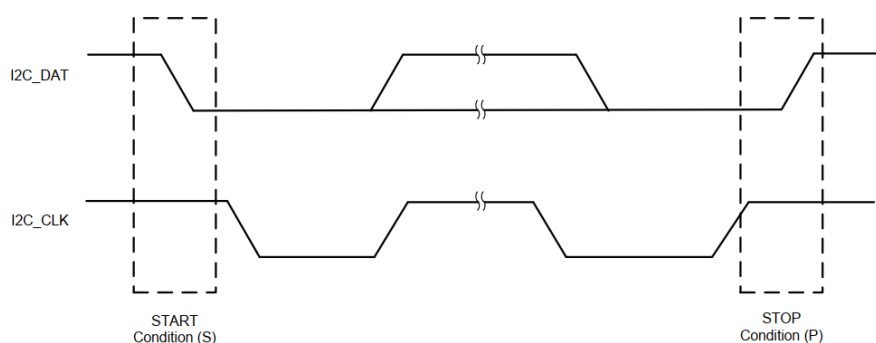
Tín hiệu ánh sáng thu được thông qua photodiode chuyển thành dòng điện, dòng này sau đó được chuyển đổi thành điện áp vi sai thông qua bộ khuếch đại TIA (Trans-impedance Amplifier), độ lợi của bộ khuếch đại này đặc trưng bởi mạch RF hồi tiếp có thể lập trình từ 10 kOhm đến 2 MOhm. Ở ngõ ra của bộ khuếch đại có bộ lọc RC để làm giảm nhiễu trên tín hiệu.

Tín hiệu sau khi ra khỏi bộ lọc sẽ được chuyển đổi bởi một bộ ADC và lưu trữ vào trong FIFO, có thể truy cập FIFO này thông qua giao tiếp SPI hoặc I2C. Trước đầu vào của bộ khuếch đại TIA có hỗ trợ bộ Offset Cancellation DAC, bộ này giúp loại bỏ tín hiệu dòng DC không mong muốn trên tín hiệu đầu vào do nhiễu từ môi trường gây ra.

Bộ truyền tín hiệu ánh sáng gồm một bộ điều khiển dòng LED (một cặp các bộ điều khiển song song giống nhau), có thể điều khiển một cách linh hoạt đến bất kỳ LED nào trong 4 đèn LED. Dòng điện cho mỗi đèn LED có thể được điều khiển một cách độc lập. Việc bật đèn LED có thể được đồng bộ hoàn toàn với việc lấy mẫu tín hiệu từ photodiode bởi bộ nhận. Trong AFE có hai bộ LDO, là ALDO và DLDO dùng để cung cấp nguồn điện cho các thành phần analog và digital trong mạch được điều khiển bởi chân CONTROL1.

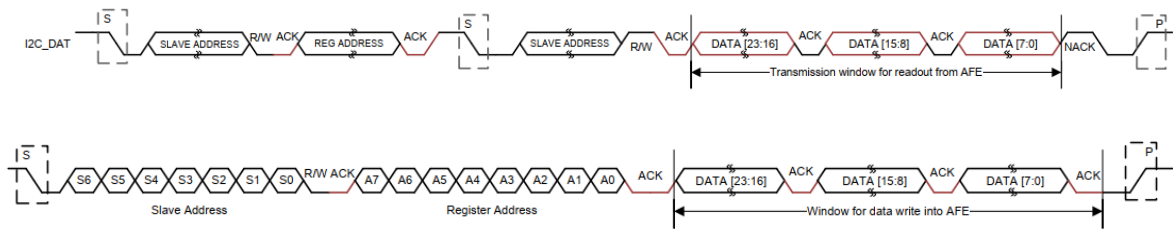
2.4.1. Giao tiếp I2C bên trong AFE4420

Bên trong AFE4420 có hỗ trợ giao tiếp I2C, các đường IC2_CLK và I2C_DAT được kéo lên thông qua điện trở. Điều kiện bắt đầu truyền là khi đường I2C_DAT chuyển từ mức cao xuống thấp và đường I2C_C đang ở mức cao, điều kiện dừng truyền thì ngược lại là khi mà đường I2C_DAT chuyển từ mức thấp lên cao và IC2_CLK đang ở mức cao.



Hình 2. 12. Các đường tín hiệu trong giao tiếp I2C

Dưới đây là hình ảnh mô tả hoạt động đọc và ghi của AFE4420 trong giao tiếp I2C:



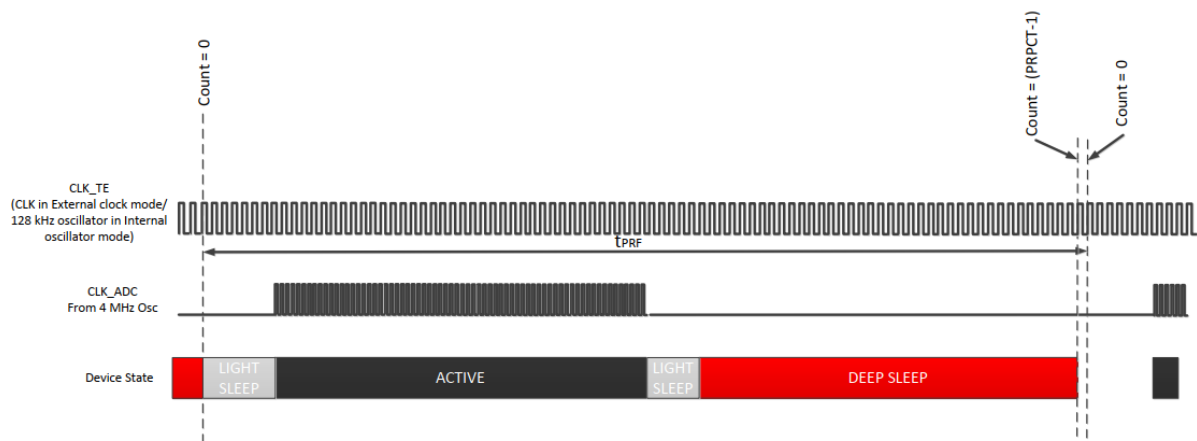
Hình 2. 13. Hoạt động đọc và ghi trong giao tiếp I2C của AFE4420

2.4.2. Tính năng bên trong AFE4420

2.4.2.1. Chế độ xung đồng hồ

AFE có bộ điều khiển thời gian (timming engine) nhằm điều khiển các chuyển đổi liên quan đến thời gian trong các pha tín hiệu. Có ba mode hoạt động cho bộ này lần lượt là: chế độ dao động nội (Internal oscillator mode), chế độ xung đồng hồ ngoại (External clock mode) và chế độ thu thập trong một lần (Single-shot acquisition).

Chế độ dao động nội là chế độ mặc định trong hệ thống sử dụng ở bộ dao động ở tần số 128 kHz. PRF là tham số đặc trưng cho tần số lấy mẫu của tín hiệu, dưới đây là mô tả tổng quan về thời gian hoạt động của bộ điều khiển thời gian.

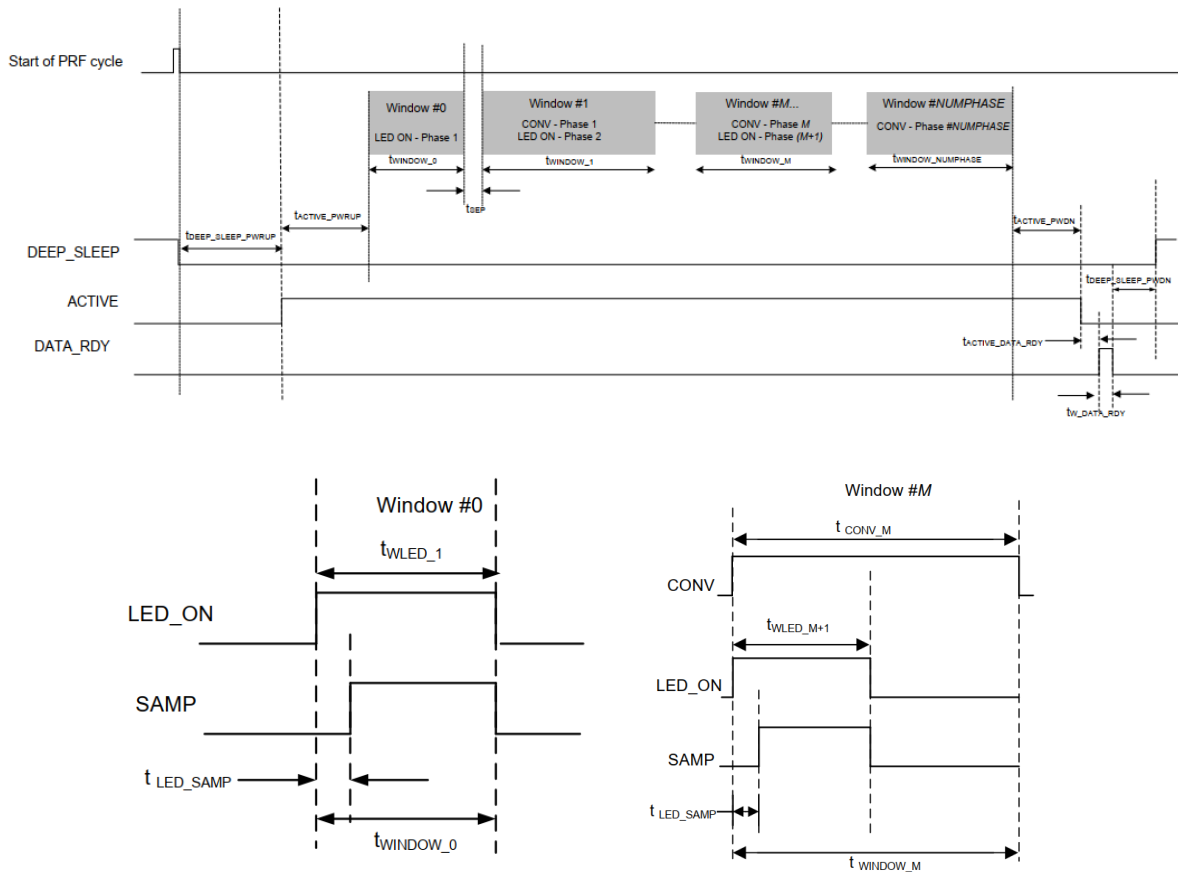


Hình 2. 14. Mô tả tổng quan về thời gian trong chế độ xung ngoại và chế độ dao động nội

Trạng thái tích cực (Active) là khoảng thời gian mà các pha tín hiệu được thực hiện để thu thập dữ liệu và chuyển đổi, lên đến 16 pha tín hiệu có thể tạo được trong trạng thái tích cực này.

2.4.2.2. Pha tín hiệu bên trong trạng thái tích cực

Bộ điều khiển thời gian tạo ra thời gian cho việc bật LED, thời gian cho việc lấy mẫu tín hiệu và thời gian cho việc chuyển đổi ADC. Lên đến 16 pha có thể tạo trong mỗi chu kỳ lấy mẫu và mỗi pha có thể cấu hình tín hiệu riêng biệt.



Hình 2. 15. Định nghĩa các pha bên trong một chu kỳ PRF

Bên trên là mô tả về một pha tín hiệu, pha 0 là pha đầu tiên khi nó cho LED sáng và lấy mẫu, trong khi pha M là các pha còn lại khi mà nó cho LED sáng và lấy mẫu tín hiệu của LED này và thực hiện chuyển đổi ADC cho các mẫu tín hiệu ở pha trước đó (M – 1).

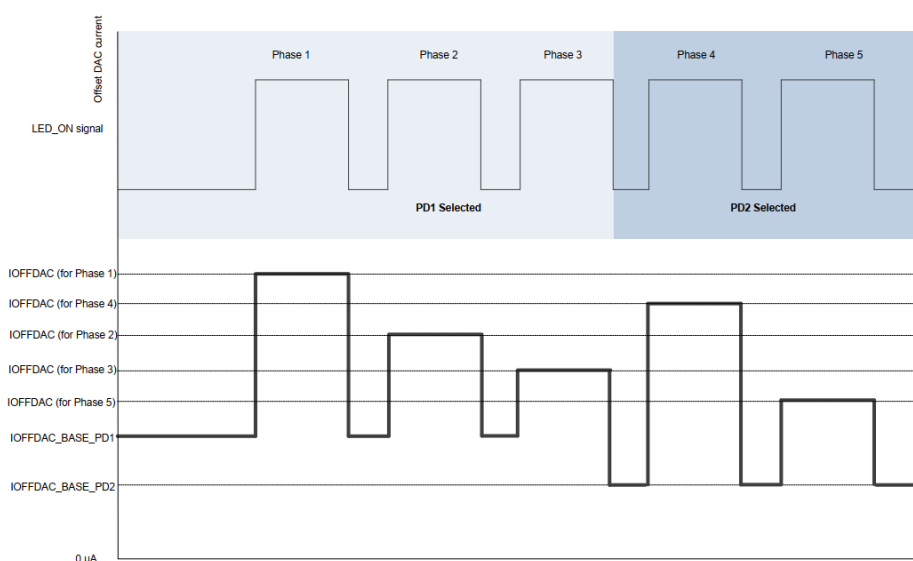
2.4.2.3. Photodiode và LED

AFE hỗ trợ 4 photodiode (PD) cho việc thu thập tín hiệu, người dùng có thể điều khiển để lựa chọn các PD thích hợp cho các pha tín hiệu khác nhau.

AFE cũng hỗ trợ 4 LED cho việc tạo ra tín hiệu để thu thập, dòng điện qua các LED được điều khiển bởi hai bộ điều khiển dòng và các mức dòng điện khác nhau tạo bởi bộ điều khiển dòng có thể được lập trình thông qua các thanh ghi.

2.4.2.4. Offset Cancellation DAC

Một tín hiệu quang học điển hình sẽ tồn tại thành phần dc và thành phần ac, thành phần ac được khuếch đại bởi bộ TIA tuy nhiên độ lợi sẽ bị giảm làm cho không đạt được tín hiệu tối đa do ảnh hưởng của thành phần dc gây ra bởi nhiễu từ môi trường. Để loại bỏ dòng dc này, bộ Offset Cancellation DAC được dùng để tạo ra dòng điện huỷ bỏ đi dòng dc, giúp đạt được độ lợi tín hiệu tối đa. Trong 16 pha tín hiệu, mỗi pha có thể được bộ này tạo ra dòng huỷ riêng biệt. Dòng điện tạo ra để huỷ bỏ thành phần dc có thể được lập trình để được các mức dòng khác nhau.



Hình 2. 16. Các thiết lập giá trị Offset DAC qua các từng pha

2.4.2.5. Bộ TIA và lọc

Độ khuếch đại của bộ TIA giúp chuyển đổi tín hiệu thu được từ các PD ở dạng dòng điện thành điện áp cho phép chuyển đổi sang tín hiệu số sau này, độ lợi của nó có thể lập trình ở các mức khác nhau từ 10 KOhm cho đến 2 MOhm.

Các mẫu tín hiệu ở đầu ra của bộ khuếch đại được lọc nhiễu thông qua bộ lọc RC gắn ở ngõ ra của bộ TIA. Băng thông của bộ lọc có thể được lập trình để đảm bảo ổn định tín hiệu. Đặt băng thông thấp giúp giảm nhiễu, tuy nhiên giá trị quá thấp có thể làm không ổn định tín hiệu dẫn đến mất mát tín hiệu và làm giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu.

2.4.2.6. Bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang số (ADC)

ADC là một phần của AFE và nhiệm vụ của nó là chuyển đổi dòng điện từ cảm biến ánh sáng thành dạng số. ADC trong trường hợp này cung cấp một biểu diễn 22-bit của dòng

điện đó. Các mã ADC này có thể được đọc từ thanh ghi có kích thước 24-bit. Chúng được biểu diễn theo định dạng bù hai, cho phép biểu diễn cả các giá trị âm và dương. Dải đầu vào của ADC được xác định là ± 1.2 V, tức là ADC có thể chuyển đổi các tín hiệu từ -1.2 V đến +1.2 V thành các giá trị số từ 0 đến 2^{21} . Các bit từ 21 đến 0 trong biểu diễn số này thể hiện giá trị tương ứng của tín hiệu đầu vào.

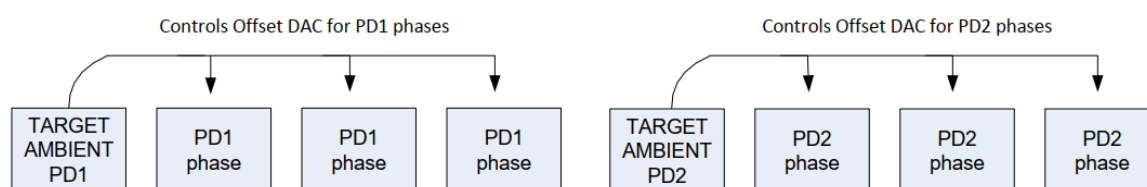
Sai biệt điện thế tại ngõ vào ADC	Giá trị ADC 24-bit
-FS	111000000000000000000000
$(-FS/2^{21})$	111111111111111111111111
0	000000000000000000000000
$(FS/2^{21})$	000000000000000000000001
FS	000111111111111111111111

Bảng 2. 1. Các mức ngưỡng giá trị ADC của AFE4420

Khi tín hiệu đầu vào vượt quá mức full-scale của ADC, ADC không thể chuyển đổi chính xác giá trị đó và mã đầu ra sẽ bão hoà. Điều này có nghĩa là giá trị đầu ra của ADC sẽ đạt tới giá trị tối đa hoặc tối thiểu có thể biểu diễn bởi độ phân giải của nó.

2.4.2.7. Chế độ huỷ nền tự động động (Automatic Ambient Cancellation Mode - AACM)

Như đã trình bày bên trên, AFE4420 có bộ Offset Cancellation DAC để giúp tạo ra dòng huỷ loại bỏ đi thành phần dc xuất hiện trên tín hiệu nhận được. Chế độ huỷ nền tự động cũng có vai trò tương tự như bộ Offset Cancellation DAC. Chế độ huỷ tín hiệu môi trường tự động là một tính năng trong mạch giao tiếp tương tự (AFE), khi được kích hoạt, nó tự động ước tính và huỷ tín hiệu môi trường tại đầu vào của bộ khuếch đại TIA. Việc huỷ tín hiệu môi trường này được thực hiện bằng cách vòng lặp AACM tự động điều chỉnh giá trị của DAC huỷ bỏ độ lệch. Việc huỷ bỏ tín hiệu môi trường tại đầu vào cho phép cài đặt độ lợi của bộ TIA cao hơn giúp đạt được tín hiệu tốt hơn.



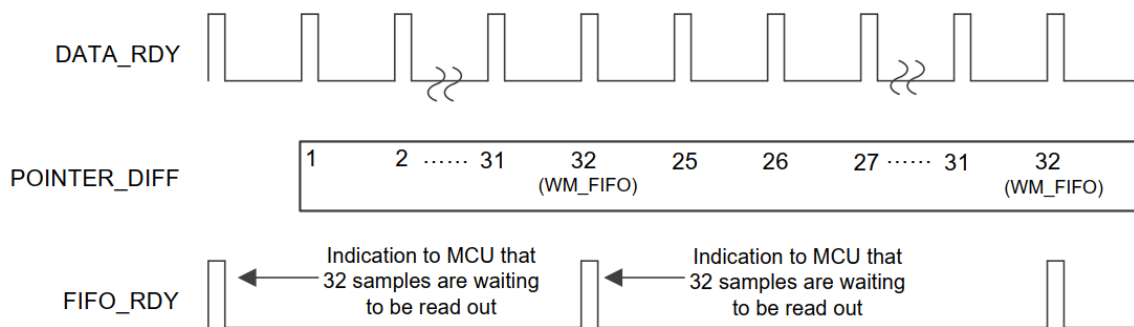
Hình 2. 17. Pha đích cho việc hiệu chỉnh giá trị Offset DAC

Khi bật chế độ huỷ nền tự động, một pha đích được chỉ định để cho bộ này phân tích tín hiệu trên pha đích và ước tính tạo ra dòng huỷ thích hợp, pha đích thường là pha môi trường.

2.4.2.8. Khối lưu trữ (First-In, First-Out – FIFO)

AFE có một FIFO có dung lượng 128 mẫu, được sử dụng để lưu trữ các mẫu dữ liệu từ các pha được tạo ra trong chu kỳ PRF (Pulse Repetition Frequency). Mỗi mẫu dữ liệu tương ứng với một từ ADC gồm 3 byte.

FIFO cũng có thể tạo ra tín hiệu ngắt cho vi điều khiển để cho phép đọc dữ liệu từ FIFO khi đã có đủ lượng dữ liệu mong muốn. Lượng dữ liệu cho phép để bật ngắt báo hiệu cho vi điều khiển được chỉ định bằng tham số gọi là watermark được lập trình trong thanh ghi của FIFO, khi thiết lập watermark ở một mức nhất định, ngắt sẽ tạo ra mỗi khi lượng data đạt đến ngưỡng của watermark báo hiệu có thể đọc dữ liệu từ FIFO.

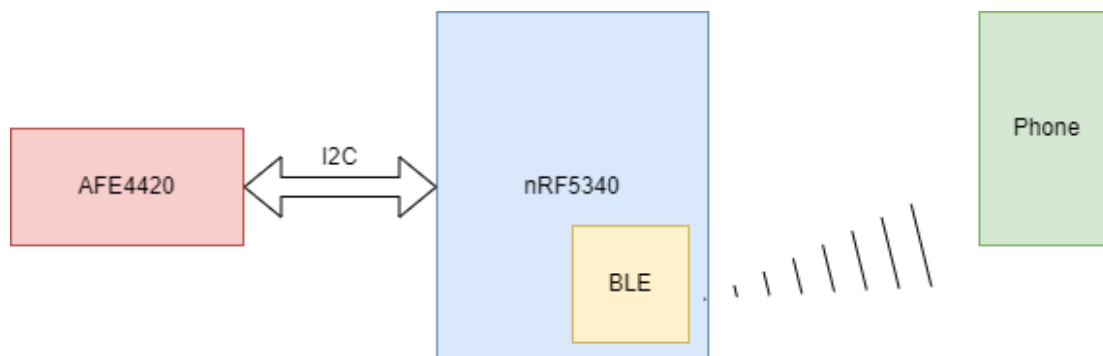


Hình 2. 18. FIFO có thiết lập ngắt khi dữ liệu đạt đến ngưỡng thiết lập

CHƯƠNG 3: THỰC HIỆN HỆ THỐNG

3.1. Kiến trúc hệ thống

3.1.1. Sơ đồ khối hệ thống



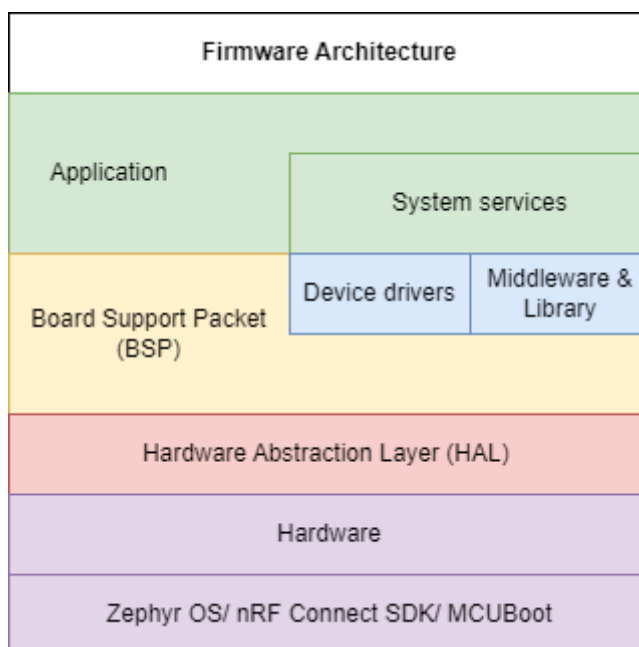
Hình 3. 1. Sơ đồ khối thiết bị thu thập tín hiệu PPG

Trong hệ thống, chúng ta có các thành phần chính đóng vai trò quan trọng. Sơ đồ trên biểu thị sự tương tác giữa các thành phần này và công việc mà chúng thực hiện. Dưới đây là mô tả chi tiết về từng thành phần trong hệ thống:

- **Chip SoC nRF5340:** Đây là thành phần trung tâm của hệ thống, chịu trách nhiệm xử lý các hoạt động và quản lý các phần khác. Chip SoC nRF5340 là một vi xử lý mạnh mẽ và tích hợp sẵn các tính năng liên quan đến kết nối BLE. Nó đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển và quản lý toàn bộ hệ thống. AFE4420 thực hiện hoạt động thu thập dữ liệu tín hiệu thô về PPG
- **AFE4420:** Đây là một thành phần đặc biệt trong hệ thống, được sử dụng để thực hiện hoạt động thu thập dữ liệu tín hiệu thô về PPG (Photoplethysmography). AFE4420 là một mạch tích hợp chuyên dụng cho việc đo lường tín hiệu PPG từ cảm biến. Nó có khả năng chuyển đổi tín hiệu quang học thành tín hiệu điện tử và cung cấp dữ liệu thu thập cho chip SoC để xử lý và truyền đi.
- **Thành phần BLE (Bluetooth Low Energy):** Thành phần này được tích hợp sẵn trong chip SoC nRF5340 và chịu trách nhiệm cho việc thiết lập và quản lý kết nối BLE với các thiết bị khác. BLE cung cấp giao thức truyền thông không dây tiết kiệm năng lượng và ổn định, cho phép trao đổi dữ liệu giữa ứng dụng di động và thiết bị đo đạc thông qua kết nối BLE.

3.1.2. Kiến trúc phần mềm

Kiến trúc về chương trình phần mềm bên trong hệ thống được chia thành cấu trúc lớp với nhiều lớp khác nhau, mỗi lớp phụ trách những chức năng khác nhau bên trong hệ thống và thể hiện sự liên kết, kết nối giữa các lớp.



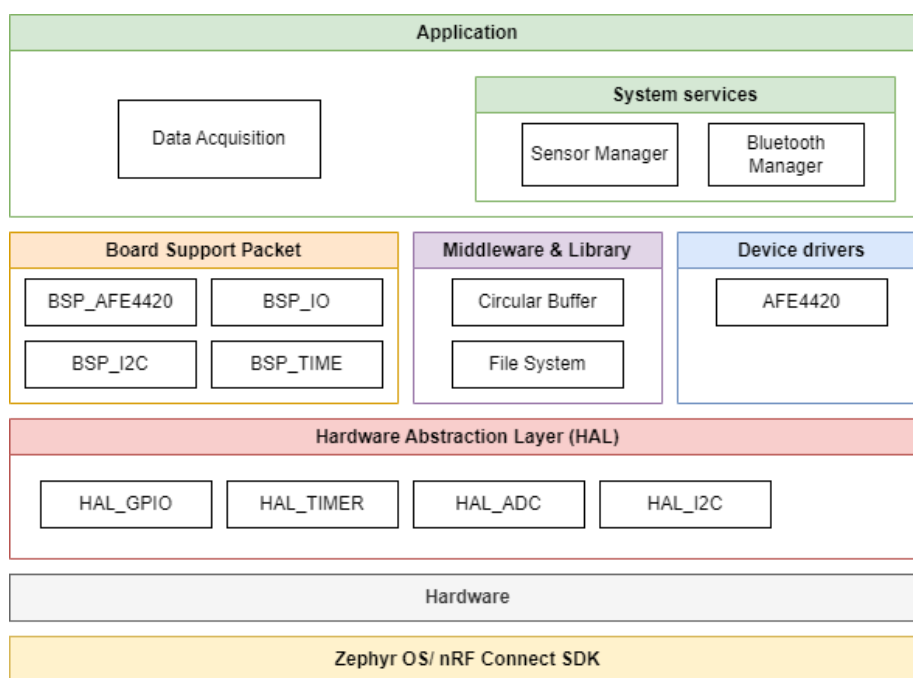
Hình 3. 2. Kiến trúc phần mềm của hệ thống

Các lớp được mô tả như sau:

- **Application:** đây là trung tâm quản lý cho tất cả các tính năng được cung cấp trên thiết bị. Nó đảm nhận vai trò điều khiển và quản lý các chức năng cụ thể. Nó đảm nhận vai trò tương tác với người dùng và điều phối các hoạt động của thiết bị để đáp ứng đúng các nhu cầu và mong muốn của người dùng.
- **System services:** đóng vai trò quan trọng trong việc quản lý và điều khiển các chức năng cụ thể trên thiết bị. Nhiệm vụ chính của lớp này là đảm bảo hoạt động hiệu quả của thiết bị thông qua việc cung cấp các dịch vụ hệ thống cần thiết. Cụ thể như quản lý nguồn điện, quản lý các chức năng liên quan đến bluetooth, quản lý cảm biến...
- **Board support packet (BSP):** lớp này giữ vai trò quan trọng trong việc cung cấp các giao diện chuẩn giữa phần cứng và các lớp phần mềm trên cao trên thiết bị. Nó đảm bảo tính tương thích và khả năng tương tác, giúp xây dựng một hệ thống lâu dài, ổn

định và hiệu quả. Với vai trò như một giao diện tiêu chuẩn, BSP cung cấp một cầu nối chắc chắn và đáng tin cậy giữa các lớp thấp với các lớp cao hơn.

- **Middleware & library:** đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các tính năng và chức năng độc lập với phần cứng cụ thể trên thiết bị. Đây là những thành phần phần mềm giúp mở rộng khả năng của thiết bị và cung cấp các tính năng không phụ thuộc vào phần cứng cụ thể.
- **Device drivers:** cung cấp các giao diện để tương tác với các thành phần phần cứng khác trên thiết bị. Nhờ vào các trình điều khiển này, các thành phần phần cứng như cảm biến và các thiết bị khác có thể được sử dụng và điều khiển trong các ứng dụng.
- **Hardware abstraction layer (HAL):** cung cấp giao diện để truy cập các thiết bị ngoại vi của MCU (vi điều khiển). Nó đóng vai trò làm cầu nối giữa phần mềm và phần cứng, cho phép ứng dụng và các thành phần khác tương tác với các thiết bị phần cứng cụ thể.
- **Hardware:** lớp này đại diện cho thiết bị thực tế. Đây là phần cứng thực hiện các chức năng và tính năng của thiết bị.
- Bên cạnh các lớp phần mềm trên, hệ thống còn sử dụng Zephyr OS, nRF Connect SDK và MCUboot. Zephyr OS là hệ điều hành được sử dụng để quản lý và điều khiển các tác vụ và tài nguyên trên thiết bị. nRF Connect SDK là một bộ thư viện phần mềm hỗ trợ phát triển ứng dụng trên nền tảng nRF SoC.



Hình 3. 3. Chi tiết thành phần bên trong kiến trúc phần mềm của hệ thống

Biểu đồ trên là sự ánh xạ vào kiến trúc phần mềm minh họa một hệ thống thu thập dữ liệu thực tế sử dụng AFE4420 và cách nó được tích hợp vào kiến trúc phần mềm. Nó cho thấy các thành phần cụ thể trong mỗi lớp và chức năng của chúng.

Ở tầng ứng dụng, có thành phần Data Acquisition, là một ứng dụng được sử dụng cho các hoạt động đo đạc trong hệ thống. Nhiệm vụ của nó là sử dụng các dịch vụ được định nghĩa bên trong Sensor Manager để khởi động và kết thúc quá trình đo đạc và thực hiện các thao tác liên quan đến kết nối Bluetooth Low Energy (BLE) thông qua dịch vụ Bluetooth Manager.

Ở tầng thấp hơn, trong lớp BSP (Board Support Package), có các thành phần như BSP_AFE4420, BSP_I2C, và các thành phần tương tự. Chúng cung cấp tiện ích trong việc giao tiếp với các thành phần phần cứng cụ thể một cách thuận tiện hơn. Ví dụ, BSP_AFE4420 cho phép tương tác với phần cứng AFE4420 thông qua driver đi kèm.

Tiếp theo, ở tầng thấp hơn nữa, có các thành phần HAL_I2C, HAL_GPIO và các thành phần tương tự. Chúng cung cấp các phương thức để tương tác trực tiếp với các thành phần phần cứng của thiết bị, như giao tiếp I2C và điều khiển GPIO...

Tổng quan, sơ đồ này mô tả sự tương tác và liên kết giữa các thành phần phần cứng và phần mềm trong hệ thống thu thập dữ liệu. Từ tầng ứng dụng xuống tầng BSP và HAL, các thành phần này cung cấp các công cụ và giao diện cho việc điều khiển và tương tác với phần cứng một cách tiện lợi và hiệu quả. Điều này giúp đơn giản hóa việc phát triển và tích hợp chức năng đo đạc vào hệ thống.

3.2. Thực hiện cấu hình và thu thập dữ liệu PPG từ AFE4420

3.2.1. Cấu hình hoạt động cho AFE4420

3.2.1.1. Thiết lập độ lợi cho bộ khuếch đại TIA

Thiết lập độ lợi cho bộ TIA của AFE4420, bảng dưới đây cho thấy các mức độ lợi có sẵn của AFE4420. Đây là các lựa chọn độ lợi mà AFE4420 cung cấp cho phép người dùng điều chỉnh độ nhạy của bộ khuếch đại dòng điện. Bằng cách chọn mức độ lợi phù hợp, người dùng có thể tối ưu hóa hiệu suất và độ nhạy của hệ thống theo nhu cầu và yêu cầu cụ thể của ứng dụng.

RF REGISTER VALUE	TIA GAIN (R_F)
0	10 KOhm
1	25 KOhm
2	50 KOhm
3	100 KOhm
4	166 KOhm
5	200 KOhm
6	250 KOhm
7	500 KOhm
8	1 MOhm
9	1.5 MOhm
10	2 MOhm

Bảng 3. 1. Ánh xạ giá trị độ lợi bộ TIA với thanh ghi điều khiển

Các mức độ lợi từ mức 10 KOhm cho đến 2 MOhm, chọn độ lợi phù hợp giúp khuếch đại tín hiệu thu được từ photodiode để dễ dàng xử lý sau này khi thực hiện chuyển đổi ADC. Trong hệ thống đo đặc hiện tại mức độ lợi được chọn là **250 KOhm**, nằm ở khoảng giữa các mức, do đã được kiểm tra cùng các mức độ lợi khác cho thấy mức này là ổn định cho tín hiệu thu thập được.

3.2.1.2. Cấu hình mặc định cho hoạt động của AFE4420

Bước thiết lập này sẽ xây dựng các cấu hình ban đầu cho AFE để hoạt động, nó bao gồm các cấu hình về cách dùng xung đồng hồ của hệ thống, các vấn đề về thời gian cho các hoạt động trong một pha tín hiệu như là thời gian sáng của led, thời gian lấy mẫu trong một pha, hay băng thông của lọc RC.

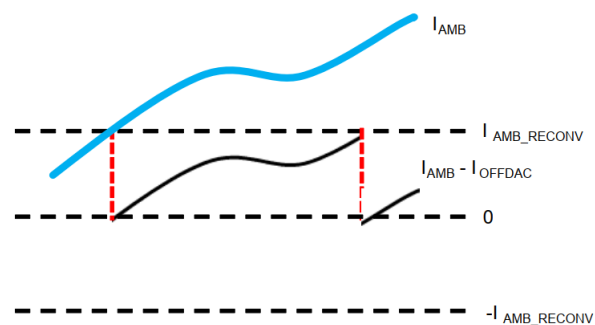
Băng thông bộ lọc	22.5 K
Thời gian lấy mẫu khi LED sáng	23.4375 us
Thời gian chuyển đổi mẫu lấy được của LED ở pha trước đó	7.8125 us
Dòng điều khiển LED	Chế độ 2X tối đa lên đến 100mA

Bảng 3. 2. Một số cấu hình trong AFE4420

Trong quá trình chuyển đổi và lưu trữ dữ liệu trong FIFO của AFE4420, có thể thiết lập ngưỡng cho phép đọc khi đạt đến một số mẫu dữ liệu nhất định. Trong trường hợp này, ngưỡng được đặt là 100 mẫu.

3.2.1.3. Kích hoạt chế độ huỷ nền tự động - AACM

Tín hiệu PPG thu thập được sẽ bị nhiễu bởi thành phần dc gây ra từ ảnh hưởng của môi trường, nó làm giảm đi độ khuếch đại của bộ khuếch đại TIA, do đó cần phải loại bỏ thành phần này. Chế độ huỷ nền tự động – AACM trong AFE giúp thực hiện loại bỏ thành phần dc này, do đó ta cần thiết lập cho phép chế độ này hoạt động để nó tạo ra dòng điện huỷ đi thành phần dc, giúp làm tăng độ khuếch đại của bộ TIA làm cho tín hiệu rõ ràng và tốt hơn để chuyển đổi một cách chính xác.



Hình 3. 4. Cơ chế huỷ nhiễu môi trường của AACM

Ở hình trên, đường sóng màu xanh thể hiện dòng điện môi trường xung quanh gây nhiễu, đường sóng màu đen thể hiện tín hiệu dòng điện đã được điều chỉnh kéo về dưới mức ngưỡng cho phép của tín hiệu bằng cách dùng dòng huỷ bỏ. Khi sự khác biệt giữa dòng điện môi trường xung bắt đầu vượt quá một ngưỡng (được đánh dấu là I_{AMB_RECONV}), AACM sẽ tự động điều chỉnh giá trị của Offset DAC, từ đó kéo dòng điện xung quanh gần với mức không.

3.2.1.4. Hiệu chỉnh cho chế độ huỷ nền tự động

Việc phát hiện dòng môi trường đạt đến ngưỡng được thực hiện bởi AACM thông qua quan sát mã đầu ra của pha môi trường được đặt làm mục tiêu để ước tính giá trị dòng huỷ (IFS_OFFDAC) tạo ra. Nó ước tính bằng cách tự thực hiện quá trình hiệu chuẩn dựa trên các thông số RF độ lợi và dòng huỷ tối đa để thiết lập giá trị tương ứng vào các thanh ghi bên trong AFE sau đó được thiết lập cho các photodiode cần thiết.

IFS_OFFDAC	TIA GAIN (R _F) (KOhm) (KOhm)									
	10	25	50	166	200	250	500	1000	1500	2000
1X mode	-	-	21	43	71	85	107	213	427	640
2X mode	-	21	43	85	142	171	213	427	853	853
4X mode	-	43	85	171	283	341	427	853	-	-
8X mode	34	85	171	341	567	683	853	-	-	-
16X mode	68	171	341	683	1133	1365	-	-	-	-

Bảng 3. 3. Giá trị xấp xỉ cho hiệu chỉnh AACM

Hệ thống được thiết lập ở mức IFS_OFFDAC là **1X mode** và RF là **250 KOhm** do đó giá trị **107** sẽ được ghi vào thanh ghi bên trong AFE để cấu hình cho các photodiode.

3.2.1.5. Thiết lập tần số lấy mẫu, ngưỡng dòng điện trong AFE4420

Tần số lấy mẫu của tín hiệu PPG hay còn gọi là chu kỳ lặp lại hoạt động (PRF) bên trong AFE được đặt là **50 Hz**.

Dòng huỷ tối được tạo ra ở 1X mode tương ứng với dòng điện lúc hiệu chuẩn nên giá trị dòng điện tối đa có thể tạo ra là $\pm 15.875 \mu A$.

Thanh ghi điều khiển thiết lập chế độ		
Chế độ	Giá trị IFS_OFFDAC	Dải dòng điện
1X mode	000	$\pm 15.875 \mu A$
2X mode	001	$\pm 31.75 \mu A$
4X mode	011	$\pm 63.5 \mu A$
8X mode	101	$\pm 127 \mu A$
16X mode	111	$\pm 254 \mu A$

Bảng 3. 4. Thiết lập các ngưỡng dòng điện của dòng huỷ môi trường

3.2.1.6. Cấu hình các pha tín hiệu và các photodiode

Các pha tín hiệu được chia thành ba pha:

- Pha dummy: pha này được dùng làm pha môi trường giả cho hoạt động hiệu chỉnh của bộ tạo dòng huỷ giúp tạo ra giá trị dòng huỷ chính xác.
- Pha môi trường: pha này tương ứng với môi trường thật bên ngoài, bộ tạo dòng huỷ sau khi được hiệu chỉnh có thể tạo dòng huỷ đúng pha môi trường thực tế ở pha này.
- Pha LED: đây là pha mà các LED sáng để thu thập tín hiệu và thực hiện chuyển đổi dữ liệu thu thập được.

AFE cho phép tối đa 16 pha trong một lần lấy mẫu, hệ thống hiện tại đang sử dụng thực tế là **12 pha**, dùng **4 LED** để phát sáng và dùng **2 photodiodode** (PD1 và PD3) để thu thập tín hiệu.

Cấu hình pha dummy cho cả PD1 và PD3 ở các pha thứ 1 và pha thứ 7. Lúc này các LED sẽ không sáng, đối với pha 1, đầu PD1 sẽ thu tín hiệu và pha 7 thì đầu PD3 sẽ thu tín hiệu. Dữ liệu thu được ở các pha này sẽ không được lưu vào FIFO.

Pha	LED	PD1	PD3
1	OFF	ON	OFF
7	OFF	OFF	ON

Bảng 3. 5. Thiết lập pha dummy

Cấu hình các pha môi trường cho PD1 là ở phase 2 và PD3 là ở phase 8. Lúc này LED vẫn chưa được bật và dữ liệu thu được bởi các PD sẽ được lưu vào FIFO.

Pha	LED	PD1	PD3
2	OFF	ON	OFF
8	OFF	OFF	ON

Bảng 3. 6. Thiết lập pha môi trường

Sau khi đã các hình các pha dummy và pha môi trường, tiến hành thiết lập các pha LED. Pha LED bao gồm 8 pha được chia cho cả 4 LED, 4 pha LED đầu tiên sẽ do PD1 thu tín hiệu, 4 pha LED còn lại do PD3 thu tín hiệu.

Pha	LED1	LED2	LED3	LED4	PD1	PD3
3	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
4	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF
5	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF
6	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
9	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
10	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON
11	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
12	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON

Bảng 3. 7. Thiết lập các pha LED

Bảng dưới đây mô tả các cấu hình các pha bên trong AFE4420.

Pha	LEDs được bật	PD lấy mẫu	Ghi chú
1		PD1	Pha dummy cho AACM hiệu chỉnh trên PD1
2		PD1	Pha môi trường
3	LED1	PD1	
4	LED2	PD1	
5	LED3	PD1	
6	LED4	PD1	
7		PD3	Pha dummy cho AACM hiệu chỉnh trên PD3
8		PD3	Pha môi trường
9	LED1	PD3	
10	LED2	PD3	
11	LED3	PD3	
12	LED4	PD3	

Bảng 3. 8. Tổng quan các thiết lập pha trong hệ thống

3.3. Hoạt động đo đạc trong hệ thống

Để thực hiện thu thập dữ liệu từ AFE4420, chương trình được chia thành nhiều luồng hay còn gọi là các thread được hỗ trợ bởi Zephyr OS để xây dựng các chương trình thời gian thực trên chip nRF5340.

Trong Zephyr, một thread (luồng) là một đơn vị thực thi độc lập, được sử dụng để thực hiện các công việc cùng một lúc trong hệ thống nhúng. Luồng có thể được xem như các "nhóm công việc" được chạy đồng thời trên một bộ xử lý.

Một thread trong Zephyr có thể có một luồng thực thi duy nhất hoặc nhiều luồng thực thi song song. Mỗi thread được xác định bởi một tập hợp các thông số như ưu tiên, độ ưu tiên và ngăn xếp (stack).

Các thread trong Zephyr có thể được tạo ra, tiếp tục chạy và kết thúc. Khi một thread đang chạy, nó có thể đợi hoặc chờ đợi các tác vụ hoặc sự kiện xảy ra. Khi các tác vụ hoặc sự kiện được kích hoạt, thread sẽ bắt đầu thực hiện và tiếp tục chạy cho đến khi hoàn thành hoặc có yêu cầu chuyển đổi ngữ cảnh.

Việc sử dụng thread trong Zephyr giúp tăng hiệu suất và đáp ứng của hệ thống nhúng. Bằng cách chia các công việc thành các thread riêng biệt, hệ thống có thể thực hiện nhiều công việc đồng thời mà không bị chặn hoặc tắc nghẽn. Điều này cũng cho phép quản lý và ưu tiên các tác vụ khác nhau một cách linh hoạt, đồng thời cải thiện khả năng phản hồi của hệ thống.

Trong một ứng dụng đa luồng, có nhiều luồng đang chạy đồng thời. Nếu nhiều hơn một luồng cố gắng truy cập vào cùng một phần mã đồng thời, thường được gọi là phần mã quan trọng (critical section), điều này có thể dẫn đến hành vi không mong muốn hoặc sai sót. Đó là lúc cần sử dụng đồng bộ hóa luồng, đó là một cơ chế để đảm bảo chỉ có một luồng thực thi phần mã quan trọng tại bất kỳ thời điểm nào.

Đồng bộ hóa luồng là một cách để giải quyết vấn đề xung đột khi nhiều luồng cùng truy cập và thay đổi dữ liệu chung. Khi một luồng đang thực thi trong phần mã quan trọng, các luồng khác phải đợi cho đến khi luồng trước đó hoàn thành trước khi được phép truy cập. Điều này đảm bảo rằng các thay đổi dữ liệu được thực hiện một cách an toàn và tránh gây ra các lỗi không đáng có.

Có một số cơ chế đồng bộ hóa luồng khác nhau mà các ứng dụng đa luồng có thể sử dụng, ví dụ như semaphore (cờ hiệu), mutex (khóa độc quyền). Các cơ chế này cho phép luồng giao tiếp và điều khiển trạng thái của nhau, đảm bảo rằng các tác vụ được thực thi một cách tuần tự và đúng đắn.

Việc sử dụng đồng bộ hóa luồng trong ứng dụng đa luồng giúp tránh các xung đột và lỗi dữ liệu không mong muốn. Nó đảm bảo rằng các tác vụ được thực thi một cách an toàn và đúng đắn, đồng thời giúp tối ưu hóa hiệu suất và sử dụng tài nguyên.

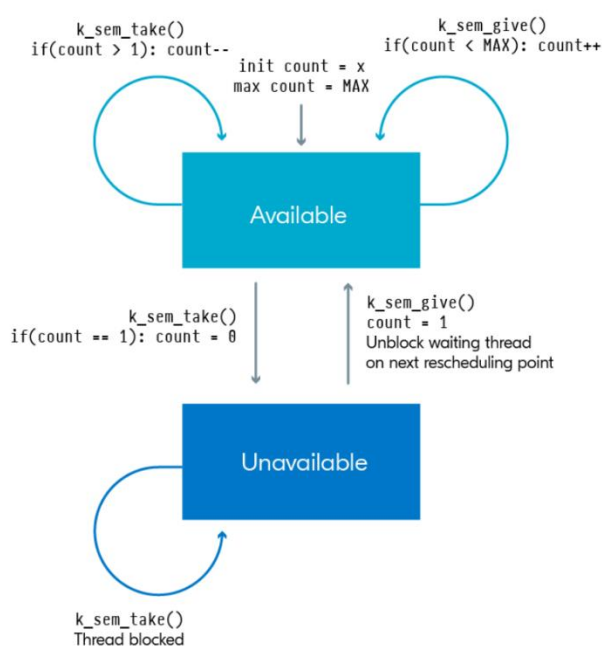
Cơ chế đồng bộ semaphore:

Semaphore là một cách để kiểm soát truy cập vào tài nguyên chung bằng cách sử dụng giá trị của biến semaphore. Khi một luồng muốn truy cập vào tài nguyên, nó sẽ kiểm

tra giá trị của semaphore. Nếu giá trị là không âm, tức là còn các phiên bản của tài nguyên khả dụng, luồng sẽ tiếp tục và giảm giá trị semaphore. Nếu giá trị là âm, tức là không còn phiên bản của tài nguyên khả dụng, luồng sẽ phải đợi cho đến khi một phiên bản trở thành khả dụng bằng cách chờ đợi việc tăng giá trị của semaphore từ các luồng khác.

Semaphore có các thuộc tính sau:

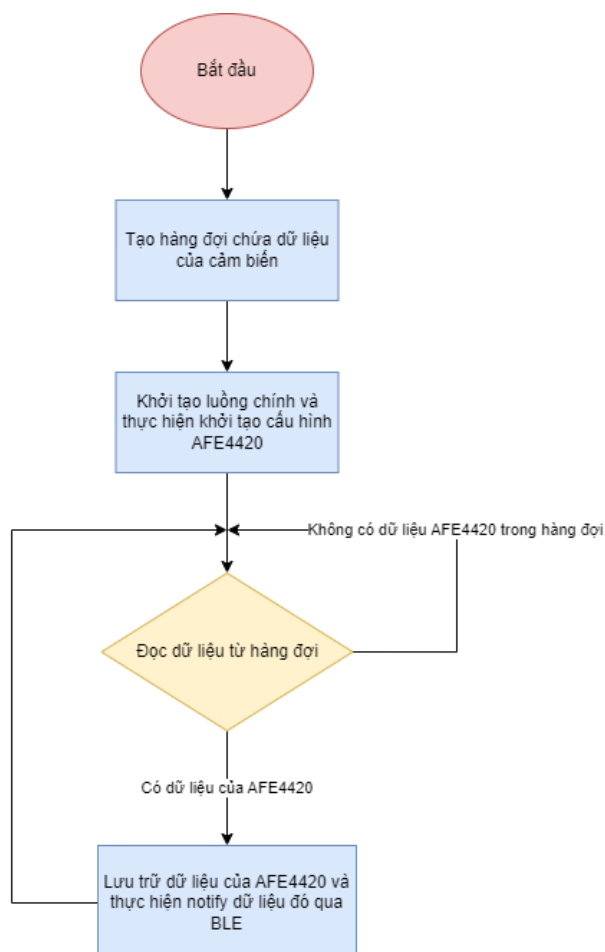
- Khi khởi tạo, ta đặt một giá trị khởi tạo (lớn hơn 0) và một giới hạn tối đa.
- "Give" (tăng giá trị) sẽ tăng giá trị của semaphore cho đến khi giá trị đạt đến giới hạn tối đa, trong trường hợp đó, giá trị sẽ không tăng được nữa. "Give" có thể được thực hiện từ bất kỳ luồng nào.
- "Take" (giảm giá trị) sẽ giảm giá trị của semaphore cho đến khi bằng 0. Bất kỳ luồng nào cố gắng lấy semaphore khi đang bằng 0 thì phải chờ đợi cho đến khi một luồng khác làm cho nó khả dụng (bằng cách thực hiện "give" semaphore).



Hình 3. 5. Mô tả cơ chế hoạt động của semaphore

3.3.1. Luồng chính thu thập dữ liệu các cảm biến

Khi hệ thống vừa được khởi động hay bật nguồn, luồng chính sẽ được khởi tạo để thực hiện việc đọc dữ liệu thu thập được của các luồng cảm biến khác trong hệ thống, ở đây khi luồng chính được khởi tạo nó sẽ thực hiện khởi tạo các cấu hình ban đầu cho AFE4420.

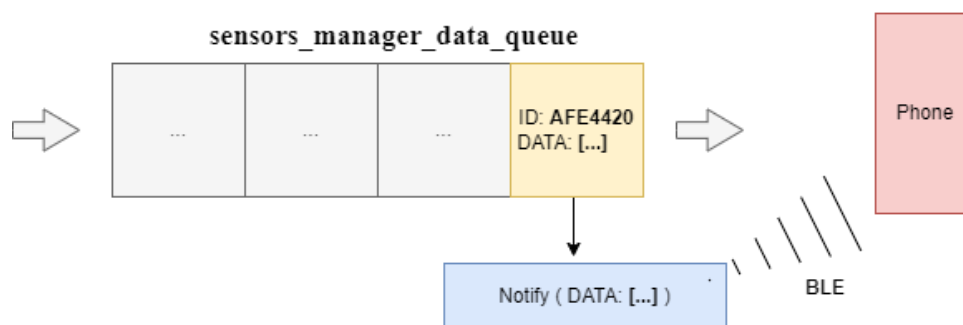


Hình 3. 6. Lưu đồ thể hiện hoạt động của luồng chính

Ở luồng này, một hàng đợi tên là **sensors_manager_data_queue** được tạo để lưu trữ các cấu trúc dữ liệu của các cảm biến khác nhau được thu thập trong hệ thống, bao gồm cả AFE4420. Cấu trúc này gồm có:

- ID: chỉ ra loại dữ liệu của cảm biến nào được đọc. VD: nếu là dữ liệu PPG của AFE4420 thì có ID là AFE4420.
- Dữ liệu của loại cảm biến: đây là nơi mà dữ liệu thu thập được của cảm biến được lưu trữ, đối với AFE4420 sẽ là một mảng kiểu số nguyên 32 bit gồm 500 phần tử.

Khi luồng này được chạy, nó liên tục đọc các cấu trúc dữ liệu có ở trong hàng đợi và dựa vào ID của cấu trúc đó tương ứng với loại cảm biến nào thì sẽ thực hiện các tác vụ xử lý tương ứng với loại cảm biến đó. Ở đây, khi có dữ liệu của AFE4420 trong hàng đợi, luồng này sẽ thực hiện lưu trữ dữ liệu của AFE4420 vào trong một bộ đệm (buffer) để nhằm mục đích lưu trữ nó sau này vào trong SD card, sau đó nó sẽ thực hiện notify lần lượt các giá trị dữ liệu trong AFE4420 qua kết nối BLE để gửi dữ liệu đó qua ứng dụng di động.



Hình 3. 7. Dữ liệu AFE4420 được cấu trúc và đẩy vào hàng đợi

3.3.2. Luồng xử lý thu thập dữ liệu

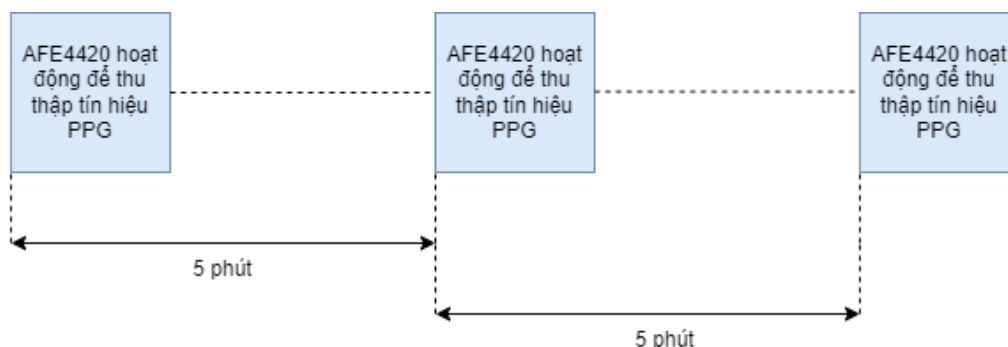
Ở bên trên là luồng hoạt động cho việc đọc và gửi dữ liệu đã được thu thập bởi các cảm biến cũng như dữ liệu của AFE4420. Còn việc bắt đầu cho AFE4420 tiến hành cho LED sáng và thu thập dữ liệu qua photodiode được thực hiện bên trong luồng xử lý dữ liệu thu thập này.

Luồng này sẽ thực hiện điều khiển việc cho cảm biến bắt đầu hoạt động và tiến hành thu thập dữ liệu và điều khiển kết thúc quá trình thu thập đó.

Luồng này được hoạt động dựa theo các chế độ hoạt động thu thập dữ liệu khác nhau, mỗi chế độ có cách thu nhập riêng biệt để đa dạng hoá khả năng thu thập và hiệu suất làm việc khác nhau cho thiết bị. Để tối ưu hiệu suất cũng như dễ dàng cho việc thu thập dữ liệu thì chế độ thu thập liên tục (continuous mode) sẽ được thiết lập cho thiết bị.

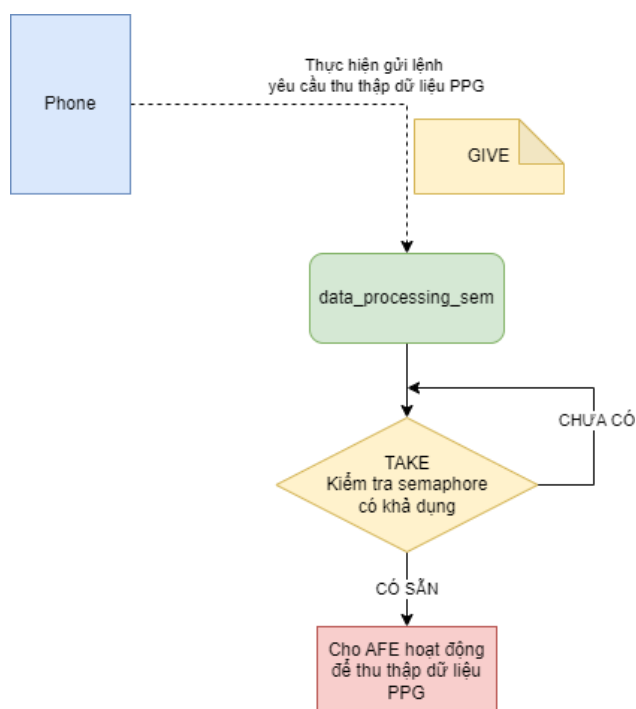
Chế độ thu thập liên tục là chế độ mà khi có lệnh thực hiện thu thập dữ liệu, luồng này sẽ cho phép các cảm biến tiến hành thu thập dữ liệu mỗi năm phút một lần cho đến khi có lệnh yêu cầu ngừng thực hiện thu thập dữ liệu. Ở đây, AFE4420 sẽ thực hiện phát sáng và thu thập dữ liệu qua photodiode mỗi năm phút một lần.

Trong mỗi lần thực hiện thu thập dữ liệu đó, AFE4420 sẽ thực hiện thu thập đủ số mẫu cần thiết để đảm bảo dữ liệu đáng tin cậy, số mẫu cần thiết để thực hiện đọc và gửi qua kết nối BLE được thiết lập là 500 mẫu, tương ứng với tích tốc độ lấy mẫu của AFE4420 đang được thiết lập là 50 Hz và số pha có nghĩa trong việc lấy mẫu của cảm biến là 10 pha, bao gồm 2 pha môi trường và 8 pha LED sáng.



Hình 3. 8. Chu kỳ thu thập dữ liệu của thiết bị

Khi có lệnh gọi thực hiện bắt đầu quá trình thu thập dữ liệu, tức là tiến hành đi vào chế độ thu thập liên tục. Lúc này hệ thống cho – “give” một semaphore gọi là `data_processing_sem`, luồng này sẽ liên tục lấy - “take” để kiểm tra xem semaphore này có khả dụng hay không. Khi semaphore này khả dụng, tức là có tín hiệu yêu cầu bắt đầu cho AFE4420 hoạt động để thu thập dữ liệu, luồng này sẽ tiến hành cho các cảm biến hoạt động để thu thập dữ liệu.

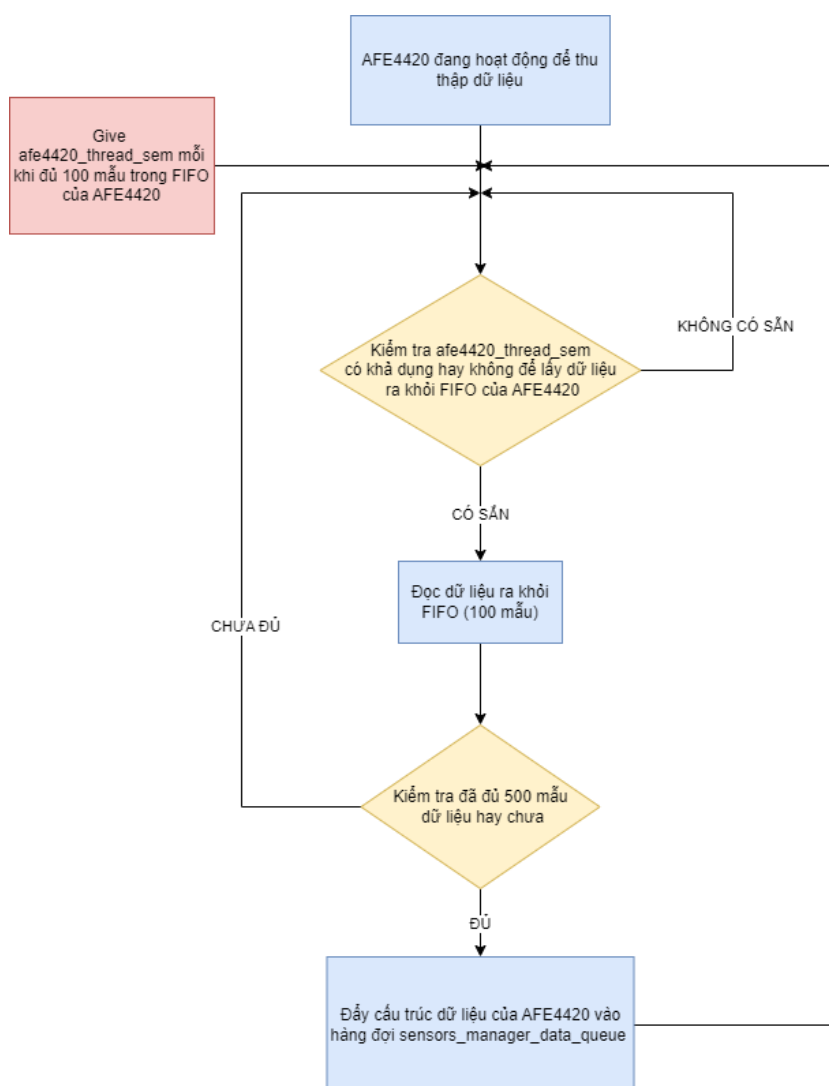


Hình 3. 9. Lưu đồ thể hiện việc kiểm tra semaphore để thu thập dữ liệu của thiết bị

3.3.3. Luồng thu thập dữ liệu của AFE4420

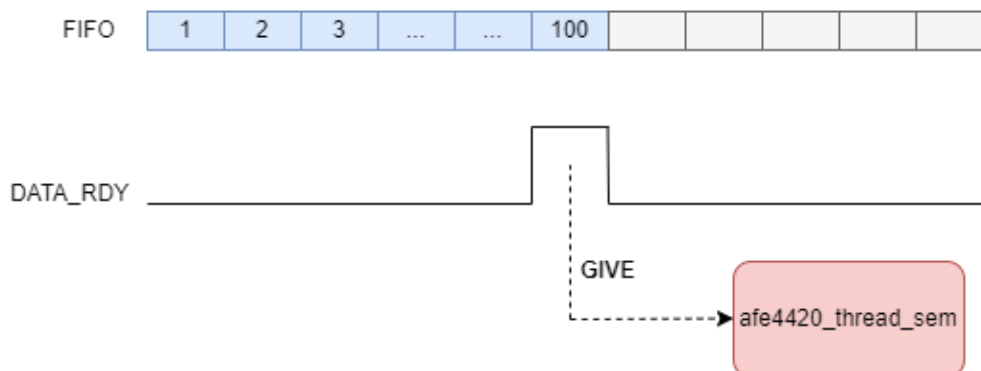
Khi luồng xử lý thu thập dữ liệu hoạt động, nó cho phép các cảm biến hoạt động để thu thập dữ liệu của từng loại cảm biến. Mỗi loại cảm biến khác nhau lại có một luồng riêng biệt để xử lý cho việc đọc và ghi dữ liệu của chúng.

Đối với AFE4420, luồng thu thập dữ liệu của AFE4420 là luồng mà hoạt động của nó là đọc những dữ liệu mà nó thu thập được và lưu những giá trị thu thập được đó vào trong hàng đợi để cho luồng chính tiến hành đọc và gửi dữ liệu đó qua kết nối BLE.



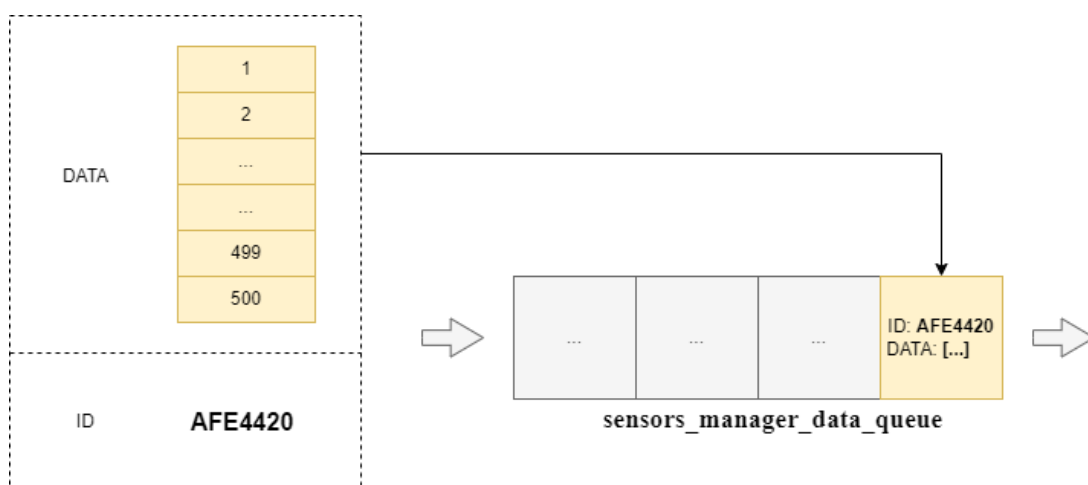
Hình 3. 10. Lưu đồ thể hiện hoạt động của luồng thu thập dữ liệu trên AFE4420

Khi tiến hành khởi tạo các cấu hình ban đầu cho AFE4420 thì có thiết lập ngưỡng dữ liệu cho phép đọc ra khỏi FIFO là 100 mẫu, lúc này khi dữ liệu được thu thập đủ 100 mẫu thì một ngắt DATA_RDY được tạo ra, tín hiệu ngắt này sẽ give cho một semaphore được thiết lập trong luồng này là **afe4420_thread_sem**. Do đó, mỗi khi có tín hiệu DATA_RDY thì semaphore lại khả dụng, lúc này hoạt động của luồng là luôn kiểm tra semaphore này có khả dụng để tiến hành lấy dữ liệu.



Hình 3. 11. Cho vào semaphore mỗi khi có ngắt đủ dữ liệu trong FIFO

Khi semaphore đã khả dụng thì 100 mẫu sẽ được đọc ra, do ta cần 500 mẫu nên phải chờ đến khi thu thập đủ thì mới đẩy 500 mẫu đó đã được cấu trúc lại vào hàng đợi **sensors_manager_data_queue** để cho luồng chính thực hiện lưu trữ và gửi những dữ liệu này đi đến ứng dụng di động thông qua kết nối BLE.



Hình 3. 12. Dữ liệu AFE4420 được cấu trúc và đẩy vào hàng đợi

3.4. Truyền dữ liệu PPG đến ứng dụng di động thông qua kết nối BLE

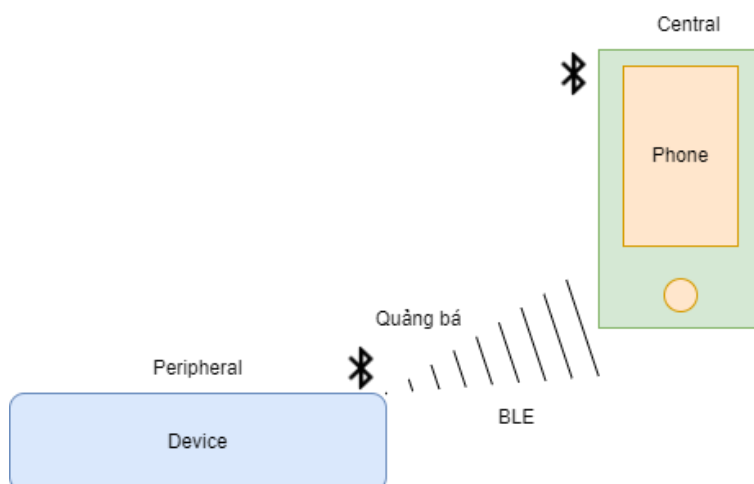
Hệ thống được xây dựng để giao tiếp với thiết bị khác cụ thể là ứng dụng trên điện thoại di động thông qua kết nối bluetooth low energy để thực hiện các hành vi khác nhau, bao gồm:

- Yêu cầu bắt đầu thực hiện thu thập dữ liệu.
- Yêu cầu dừng hoạt động thu thập dữ liệu.
- Nhận dữ liệu được gửi lên từ thiết bị.

Trong quá trình xây dựng một hệ thống để kết nối thiết bị với ứng dụng trên điện thoại, chúng ta cần xác định một mô hình hoạt động. Trong mô hình này, thiết bị sẽ đóng vai trò là một peripheral và sẽ thực hiện việc quảng bá tín hiệu để thông báo sự hiện diện của nó cho các thiết bị khác trong phạm vi quét. Đồng thời, nó sẽ cho phép các thiết bị khác có thể kết nối đến nó và thực hiện yêu cầu giao tiếp.

Trên điện thoại, ứng dụng sẽ đóng vai trò là một central và sẽ thực hiện quá trình quét và tìm kiếm các thiết bị peripheral đang quảng bá xung quanh. Khi ứng dụng tìm thấy một thiết bị, nó có thể thực hiện yêu cầu kết nối đến thiết bị đó để thiết lập một kênh giao tiếp.

Thông qua việc áp dụng mô hình này, thiết bị peripheral sẽ thông báo về sự tồn tại và sẵn sàng kết nối, trong khi ứng dụng central trên điện thoại sẽ tìm kiếm và xác định các thiết bị đó. Việc kết nối giữa thiết bị và ứng dụng sẽ tạo ra một kết nối hai chiều, cho phép trao đổi dữ liệu và thực hiện các lệnh điều khiển thiết bị.



Hình 3. 13. Mô hình kết nối BLE giữa thiết bị đo và điện thoại

Sau khi thiết bị này kết nối với điện thoại thông qua một ứng dụng, nó có khả năng tiếp nhận các yêu cầu từ ứng dụng thông qua các dịch vụ - service và các thuộc tính – characteristics đã được định nghĩa trước. Ngoài ra, thiết bị cũng thực hiện chức năng thông báo, gửi thông tin thu thập được về dữ liệu cho điện thoại. Điều này cho phép ứng dụng có thể thực hiện các hành động dựa trên dữ liệu thu thập được.

3.4.1. Khởi tạo cấu hình BLE trên thiết bị

Trên thiết bị, quá trình thu thập dữ liệu bắt đầu bằng việc thực hiện các cấu hình ban đầu để khởi tạo kết nối BLE (Bluetooth Low Energy). Điều này bao gồm việc thiết lập các thông tin quảng bá của thiết bị và cấu hình các dịch vụ (services) và thuộc tính (characteristics) liên quan.

- Dữ liệu quảng bá: Thông qua quá trình khởi tạo, thiết bị xác định dữ liệu quảng bá mà nó sẽ gửi ra môi trường xung quanh. Điều này cho phép các thiết bị khác có thể nhận biết sự hiện diện và tính năng của thiết bị đó. Thông tin quảng bá có thể bao gồm tên thiết bị, mã định danh, hoặc các thông tin khác để xác định và phân biệt thiết bị từ các thiết bị khác trong phạm vi kết nối.
- Xác định các dịch vụ và thuộc tính liên quan: các dịch vụ đại diện cho các chức năng hoặc khả năng của thiết bị, trong khi các thuộc tính định nghĩa các đặc điểm chi tiết và thông tin cụ thể về mỗi dịch vụ. Việc cấu hình này giúp ứng dụng trên điện thoại có thể hiểu và tương tác với thiết bị một cách chính xác.

Về dữ liệu quảng bá, thiết bị sẽ khởi tạo dữ liệu quảng bá bao gồm:

- Tên của thiết bị: được đặt là DevicePPG-XXXX, trong đó XXXX là bốn ký tự cuối của địa chỉ MAC của thiết bị.
- Thông tin quảng bá sẽ được thiết lập hỗ trợ cho việc kết nối chung và không hỗ trợ cho kết nối BREDR (Basic Rate/Enhanced Data Rate - một loại kết nối Bluetooth truyền thống).

Sau khi khởi tạo thông tin quảng bá BLE, ta có thể tiếp tục tạo một profile để chứa các dịch vụ (services) và thuộc tính (characteristics) trong hệ thống. Profile này sẽ hỗ trợ việc trao đổi dữ liệu giữa các thiết bị trong mạng BLE. Trong việc tạo profile, ta cần định

nghĩa các dịch vụ và thuộc tính mà thiết bị sẽ cung cấp. Mỗi dịch vụ đại diện cho một chức năng hoặc khả năng cụ thể của thiết bị. Và mỗi thuộc tính định nghĩa các đặc điểm chi tiết và thông tin cần thiết cho mỗi dịch vụ.

Ta xây dựng một service để dễ dàng quản lý và thực hiện trao đổi dữ liệu giữa thiết bị và ứng dụng di động. Service này có tên là DevicePPG Service và có UUID đặc trưng cho nó.

Tên dịch vụ	UUID
DevicePPG Service	6218e200-aa57-4302-9785-9d3727b0bde9

Bảng 3. 9. UUID của dịch vụ BLE bên trong thiết bị

Trong trường hợp này, ta cần tạo hai thuộc tính cần thiết là "Request characteristic" và "Notify characteristic".

- Request characteristic: Đây là một thuộc tính được sử dụng để gửi yêu cầu từ ứng dụng trên điện thoại đến thiết bị. Yêu cầu này có thể bao gồm các tác vụ như bắt đầu thu thập dữ liệu hoặc yêu cầu dừng thu thập dữ liệu.
- Notify characteristic: Đây là một thuộc tính được sử dụng để gửi dữ liệu từ thiết bị đến ứng dụng trên điện thoại. Dữ liệu này là dữ liệu đã được thu thập bởi thiết bị.

Bảng dưới đây mô tả về "Request characteristic" và "Notify characteristic".

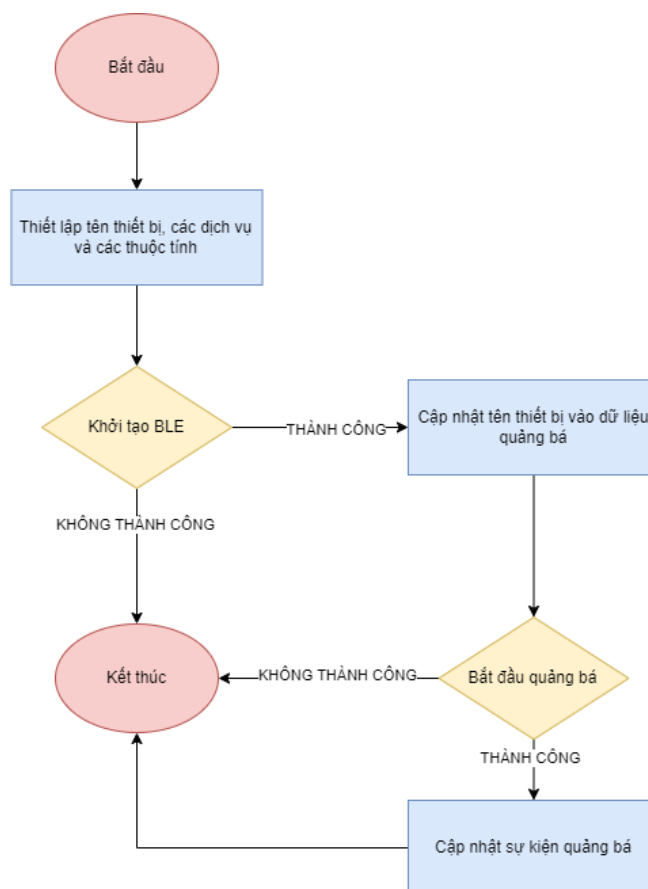
	Mô tả
Characteristic Name	Request
Characteristic UUID	6218e201-aa57-4302-9785-9d3727b0bde9
Characteristic Properties	Write/Read
Characteristic Data Length	247 bytes

Bảng 3. 10. Mô tả Request characteristic

	Mô tả
Characteristic Name	Notification
Characteristic UUID	6218e205-aa57-4302-9785-9d3727b0bde9
Characteristic Properties	Read/Notify
Characteristic Data Length	247 bytes

Bảng 3. 11. Mô tả Notify characteristic

Sau khi đã hoàn thành các cấu hình kết nối BLE cho thiết bị, ta cần tiến hành khởi tạo việc quảng bá (advertising) thiết bị. Quảng bá cho phép thiết bị được phát hiện và kết nối với các thiết bị khác trong kết nối BLE.



Hình 3. 14. Lưu đồ thể hiện hoạt động quảng bá BLE của thiết bị

Sau khi đã thiết lập các dịch vụ và thuộc tính bên trong, quá trình khởi tạo Bluetooth Low Energy (BLE) sẽ được thực hiện bởi cấu trúc ngăn xếp (stack) BLE có sẵn trong chip nRF5340. Khi quá trình khởi tạo thành công, thông tin quảng bá sẽ được cập nhật, bao gồm cả tên thiết bị, và quá trình quảng bá sẽ bắt đầu.

Quá trình quảng bá là quá trình mà thiết bị BLE phát đi các gói tin quảng bá để thông báo về sự hiện diện của nó đến các thiết bị khác trong phạm vi. Mỗi sự kiện quảng bá sẽ diễn ra theo một khoảng thời gian nhất định. Trong thời gian này, thiết bị BLE sẽ gửi các gói tin quảng bá chứa thông tin về dịch vụ và thuộc tính mà nó hỗ trợ, bao gồm cả tên thiết bị để các thiết bị khác có thể phát hiện và kết nối với nó.

Để khởi động quá trình thu thập dữ liệu từ AFE4420 thông qua kết nối BLE của thiết bị với ứng dụng di động, chúng ta cần ghi một lệnh yêu cầu vào thuộc tính "request

characteristic". Lệnh này sẽ thông báo cho thiết bị rằng chúng ta muốn bắt đầu thu thập dữ liệu.

Tương tự, để yêu cầu dừng hoạt động của quá trình thu thập dữ liệu, chúng ta cần ghi một lệnh yêu cầu dừng vào "request characteristic" và gửi đi. Thiết bị sẽ nhận lệnh này và ngừng thu thập dữ liệu theo yêu cầu.

Các lệnh yêu cầu được ghi dưới dạng mã hex đã được định nghĩa trong chương trình để phân biệt và xử lý các yêu cầu khác nhau một cách chính xác trên thiết bị.

Bảng dưới đây mô tả các yêu cầu trên request characteristic.

Lệnh	Mã HEX	Mô tả
Bắt đầu thu thập dữ liệu	0x0801100A	Lệnh này sẽ bắt đầu quá trình thu thập dữ liệu trên thiết bị với chế độ mặc định (chế độ thu thập liên tục nếu không thiết lập các chế độ khác trước đó).
Dừng thu thập dữ liệu	0x0801100B	Lệnh này sẽ dừng quá trình thu thập dữ liệu trên thiết bị.

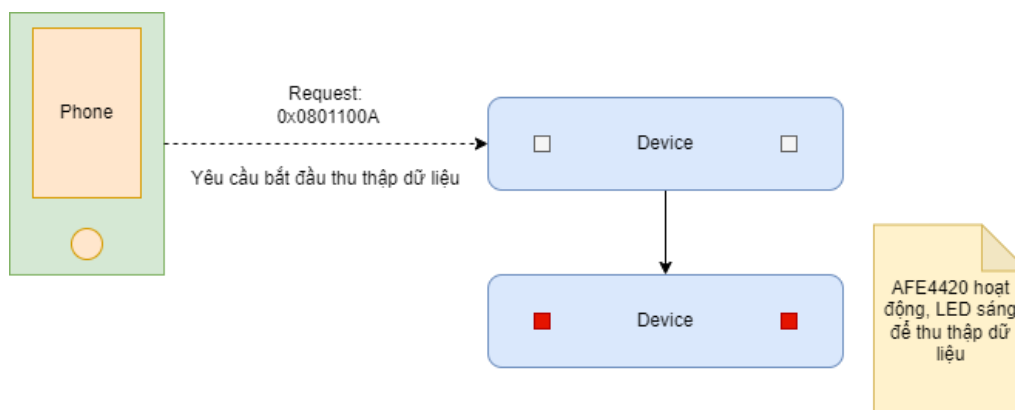
Bảng 3. 12. Mô tả các mã lệnh BLE trong hệ thống

Khi thiết bị nhận được một yêu cầu có mã hex là 0x0801100A, đó là yêu cầu để bắt đầu quá trình thu thập dữ liệu. Khi đó, hệ thống sẽ chuyển sang chế độ thu thập dữ liệu, cụ thể là chế độ thu thập liên tục mỗi năm phút một lần cho đến khi nhận được lệnh yêu cầu dừng thu thập.

Trong chế độ này, AFE4420 sẽ hoạt động và tiến hành thu thập dữ liệu. Các luồng công việc liên quan đến hoạt động thu thập dữ liệu sẽ thực hiện các chức năng của mình để đọc và truyền dữ liệu đến ứng dụng thông qua kết nối BLE.

Trong quá trình thu thập dữ liệu, AFE4420 sẽ lặp lại quá trình thu thập mỗi năm phút một lần, cho phép thu thập dữ liệu liên tục theo khoảng thời gian đã định. Khi nhận được lệnh yêu cầu dừng thu thập dữ liệu, hệ thống sẽ kết thúc quá trình thu thập và chuyển về trạng thái chờ lệnh tiếp theo.

Thông qua kết nối BLE, dữ liệu thu thập được sẽ được truyền từ thiết bị đến ứng dụng để thực hiện các xử lý và hiển thị tương ứng trên ứng dụng di động.

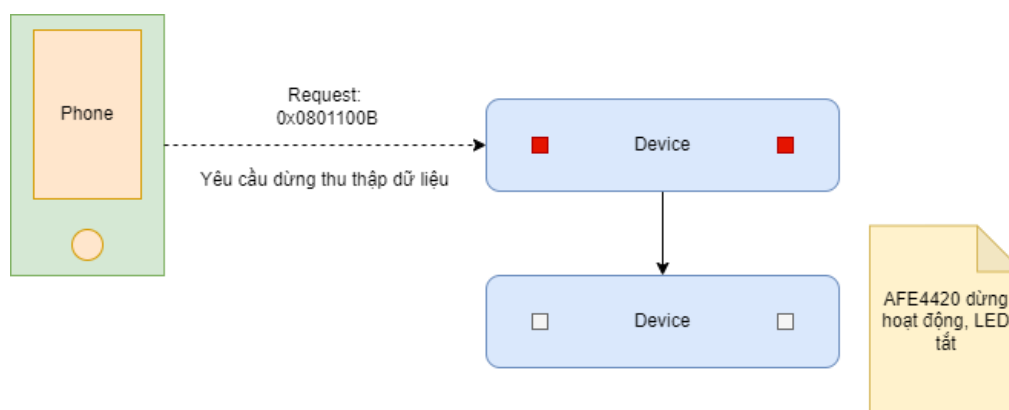


Hình 3. 15. Ứng dụng gửi yêu cầu đầu thu thập tín hiệu PPG

Khi thiết bị nhận được một yêu cầu có mã hex là 0x0801100B, đó là yêu cầu để dừng hoạt động thu thập dữ liệu trên thiết bị. Khi nhận được yêu cầu này, thiết bị sẽ thoát khỏi chế độ thu thập liên tục.

Trong quá trình thu thập dữ liệu, các hoạt động liên quan đến thu thập dữ liệu sẽ bị dừng lại. AFE4420 chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu, cũng sẽ ngừng hoạt động và thiết bị không gửi dữ liệu thu thập được lên ứng dụng nữa. Thiết bị sẽ trở về trạng thái chờ bình thường, sẵn sàng tiếp nhận các yêu cầu khác.

Việc dừng hoạt động thu thập dữ liệu sẽ đảm bảo rằng không có dữ liệu mới được gửi lên thiết bị sau yêu cầu dừng. Thiết bị sẽ chỉ chờ đợi và sẵn sàng thực hiện các yêu cầu khác khi được gửi đến nó.



Hình 3. 16. Ứng dụng gửi yêu cầu dừng thu thập tín hiệu PPG

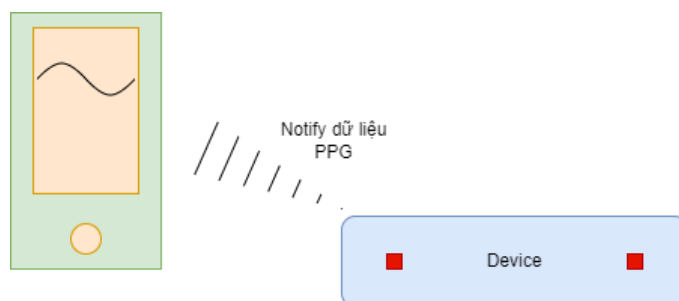
3.4.2. Xây dựng ứng dụng di động hỗ trợ kết nối BLE.

Trên thiết bị di động, chúng ta có thể xây dựng một ứng dụng hỗ trợ kết nối BLE, cho phép kết nối đến thiết bị đo đặc và thực hiện các yêu cầu liên quan đến quá trình thu thập dữ liệu. Ứng dụng này sẽ giúp người dùng thực hiện các yêu cầu bắt đầu và dừng thu thập dữ liệu trên thiết bị đo.

Dữ liệu thu thập được từ thiết bị đo sẽ được gửi đến ứng dụng di động. Trên ứng dụng, chúng ta có thể sử dụng dữ liệu này để vẽ dạng sóng PPG (Photoplethysmography), giúp người dùng thuận tiện theo dõi và đánh giá trạng thái sức khỏe của mình.

Ứng dụng sẽ cung cấp giao diện đơn giản, thân thiện, cho phép người dùng kết nối và tương tác với thiết bị đo qua kết nối BLE. Người dùng có thể gửi yêu cầu bắt đầu thu thập dữ liệu để bắt đầu quá trình theo dõi. Ngược lại, họ cũng có thể gửi yêu cầu dừng hoạt động thu thập dữ liệu khi cần thiết.

Từ dữ liệu thu thập được, ứng dụng sẽ tạo ra một biểu đồ sóng PPG, hiển thị trực quan. Điều này giúp người dùng theo dõi sức khỏe của mình và đánh giá các biểu hiện bất thường trong dạng sóng PPG.



Hình 3. 17. Thiết bị gửi dữ liệu đến ứng dụng

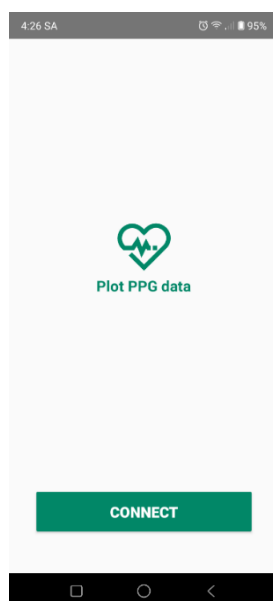
Ứng dụng được xây dựng trên nền tảng Android đóng vai trò là central trong quá trình kết nối BLE và thực hiện các yêu cầu tương tác với thiết bị đo đặc. Trước khi thực hiện kết nối, ứng dụng cần cấu hình kết nối BLE để đảm bảo việc giao tiếp hiệu quả.

Cấu hình kết nối BLE trên ứng dụng di động bao gồm việc xây dựng và định nghĩa các dịch vụ và thuộc tính tương tự như trên thiết bị đo đặc. Thông qua việc biết trước các dịch vụ và thuộc tính của thiết bị, ta có thể tạo các đối tượng tương ứng trên ứng dụng di động mà không cần phải tìm kiếm các dịch vụ trong thiết bị sau khi đã kết nối.

Việc đã cấu hình sẵn các dịch vụ và thuộc tính trên ứng dụng di động giúp tối ưu quá trình tương tác và truyền thông giữa ứng dụng và thiết bị đo đạc. Khi kết nối được thiết lập, ứng dụng có thể thực hiện các yêu cầu bắt đầu và dừng thu thập dữ liệu thông qua giao tiếp BLE với thiết bị.

Ứng dụng được xây dựng với hai màn hình chính nhằm cung cấp trải nghiệm người dùng thuận tiện. Màn hình đầu tiên được hiển thị khi ứng dụng được mở lên, và nó chứa một nút kết nối BLE để người dùng có thể khởi tạo quá trình kết nối với thiết bị đo đạc. Khi người dùng nhấn vào nút kết nối, ứng dụng sẽ tự động thực hiện kết nối BLE với thiết bị đã được cấu hình trước đó.

Sau khi kết nối được thiết lập thành công, ứng dụng chuyển sang màn hình thứ hai. Trên màn hình này, người dùng sẽ nhận được một thông báo nhỏ xác nhận kết nối thành công. Việc kết nối không yêu cầu quá trình quét và tìm kiếm thiết bị, mà dựa trên địa chỉ MAC của thiết bị đã được cấu hình trước đó trong ứng dụng. Điều này giúp tiết kiệm thời gian và đảm bảo việc kết nối nhanh chóng và đáng tin cậy đến một thiết bị duy nhất.

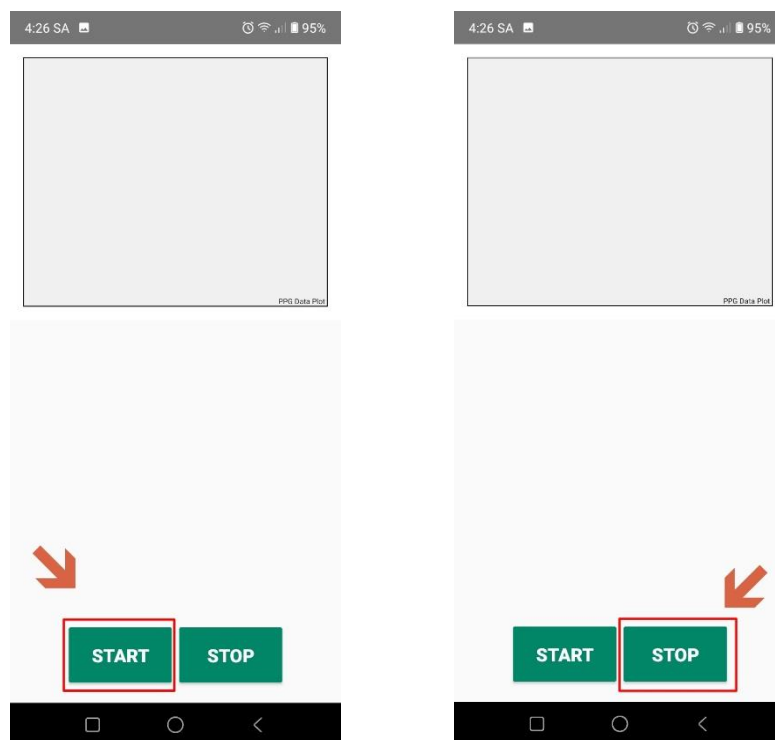


Hình 3. 18. Màn hình ứng dụng thực hiện kết nối BLE đến thiết bị

Bên trên là hình ảnh màn hình đầu tiên của ứng dụng, khi muốn thực hiện kết nối đến thiết bị ta chỉ cần bấm vào nút “Connect” và đảm bảo là đã bật tính năng bluetooth trên thiết bị để có thể thực hiện kết nối.

Sau khi kết nối thành công, màn hình thứ hai được hiển thị với nút bấm cho phép người dùng yêu cầu bắt đầu thu thập dữ liệu và yêu cầu dừng hoạt động thu thập. Mục đích của hai yêu cầu này là điều khiển hoạt động thu thập dữ liệu trên thiết bị đo đạc.

Trên màn hình này, người dùng có thể nhấn vào nút "Start" để gửi một yêu cầu bắt đầu thu thập dữ liệu đến thiết bị. Khi yêu cầu này được gửi, thiết bị sẽ chuyển sang chế độ thu thập liên tục và bắt đầu ghi lại các dữ liệu. Đồng thời, trên màn hình cũng hiển thị một biểu đồ, cho phép người dùng theo dõi dạng sóng PPG được tạo ra từ dữ liệu thu thập.



Hình 3. 19. Màn hình ứng dụng thực hiện yêu cầu bắt đầu và dừng thu thập dữ liệu

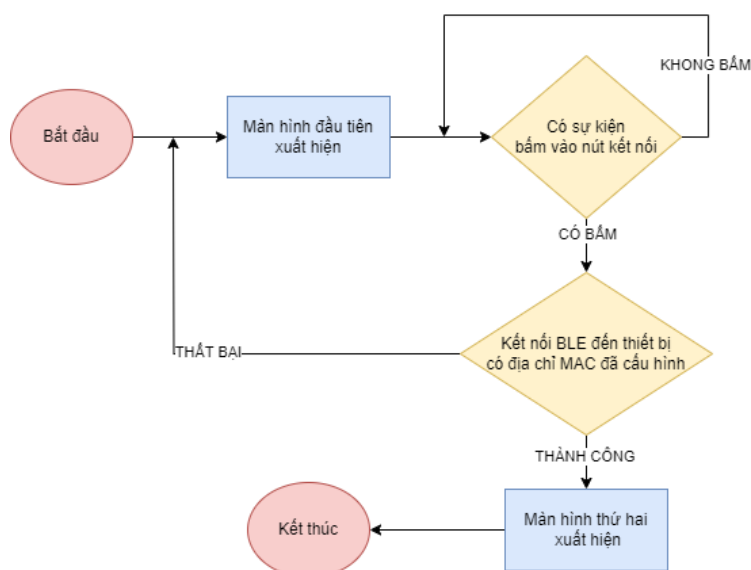
Ngoài ra, màn hình cũng cung cấp nút "Stop" để người dùng có thể gửi yêu cầu dừng hoạt động thu thập dữ liệu. Khi yêu cầu này được gửi, thiết bị sẽ dừng ghi lại dữ liệu và chuyển về trạng thái chờ. Tại thời điểm này, biểu đồ sẽ không được cập nhật và người dùng có thể chúng được hiển thị.

Việc cung cấp màn hình thứ hai với các nút yêu cầu bắt đầu và dừng thu thập dữ liệu cùng biểu đồ PPG giúp người dùng tương tác và kiểm soát hoạt động thu thập dữ liệu một cách thuận tiện. Người dùng có thể dễ dàng theo dõi sóng PPG và tùy chỉnh quá trình thu thập dữ liệu theo nhu cầu của mình.

Để xây dựng các màn hình như đã mô tả, chúng ta sẽ sử dụng các thành phần khác nhau trong Android Studio. Dưới đây là một số thành phần quan trọng trong việc xây dựng ứng dụng:

- **Button (Nút bấm):** Đây là một thành phần quan trọng để thực hiện các hành động khi người dùng nhấn vào. Trong ứng dụng này, chúng ta sẽ sử dụng button để tạo các nút kết nối, nút yêu cầu bắt đầu và dừng thu thập dữ liệu.
- **ImageView (Hình ảnh):** Thành phần này được sử dụng để hiển thị các hình ảnh trong các màn hình. Trong trường hợp này, chúng ta có thể sử dụng ImageView để hiển thị các biểu tượng, hình ảnh liên quan đến kết nối BLE.
- **LineChart (Biểu đồ đường):** Đây là một thành phần đặc biệt được thêm vào từ một thư viện bên thứ ba, cho phép chúng ta tạo ra một biểu đồ đường để hiển thị tín hiệu PPG dựa trên dữ liệu thu thập được. Với LineChart, chúng ta có thể trực quan hóa và vẽ dữ liệu PPG thành một dạng sóng dễ nhìn và theo dõi.

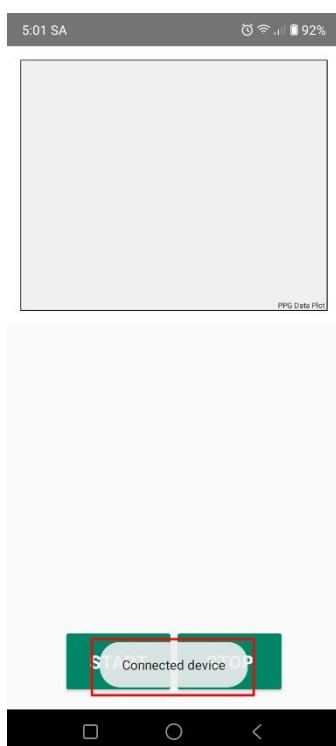
Trong màn hình đầu tiên của ứng dụng, ta sẽ thiết kế một nút bấm có tên là "Connect". Khi người dùng nhấn vào nút bấm này, một sự kiện nhấn vào nút bấm sẽ được kích hoạt. Khi ứng dụng nhận được sự kiện nhấn nút kết nối, nó sẽ chuyển sang màn hình thứ hai và sử dụng các API liên quan trong Android Studio để thực hiện kết nối BLE đến thiết bị có địa chỉ MAC đã được định nghĩa trước đó. Địa chỉ MAC này chính là địa chỉ của thiết bị đo đặc mà chúng ta đã biết trước và thêm vào ứng dụng.



Hình 3. 20. Lưu đồ thể hiện hoạt động yêu cầu kết nối BLE với thiết bị

Sau khi kết nối thành công, trên màn hình thứ hai sẽ hiển thị một thông báo nhỏ dưới dạng để thông báo cho người dùng rằng đã thiết lập kết nối thành công với thiết bị đo. Điều này giúp người dùng biết rằng ứng dụng đã sẵn sàng để gửi các yêu cầu tới thiết bị.

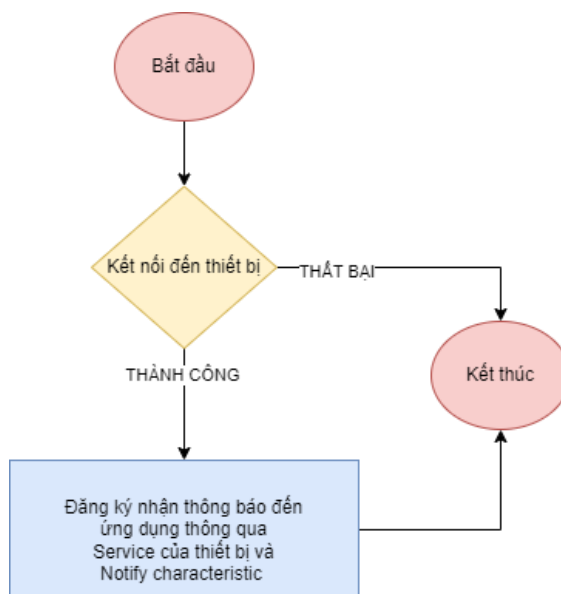
Khi đã kết nối thành công, các chức năng trên màn hình thứ hai trở nên có ý nghĩa. Người dùng sẽ có thể sử dụng các nút bấm tương ứng để gửi yêu cầu bắt đầu hoặc dừng thu thập dữ liệu từ thiết bị. Các yêu cầu này sẽ được chuyển đến thiết bị thông qua kết nối BLE để điều khiển hoạt động thu thập dữ liệu.



Hình 3. 21. Thông báo đã kết nối BLE thành công

Khi ứng dụng thành công kết nối đến thiết bị đo đạc, nó sẽ tự động đăng kí (subscribe) để nhận thông báo (notify) từ dịch vụ BLE của thiết bị. Điều này cho phép ứng dụng liên tục nhận dữ liệu mới từ thiết bị trong quá trình thu thập.

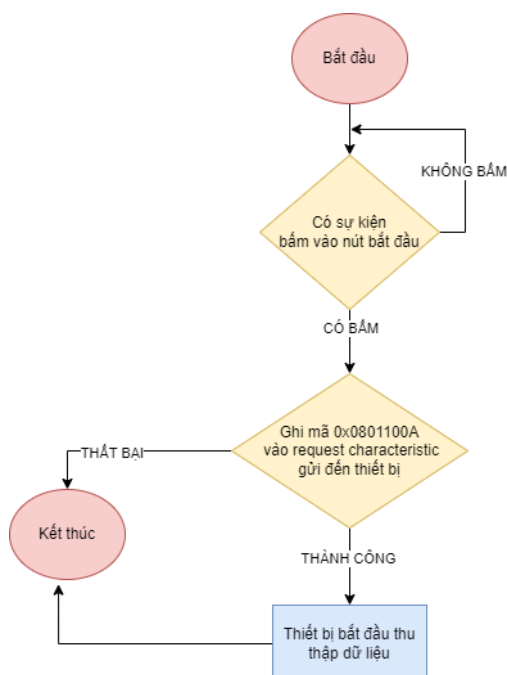
Khi đã đăng kí, mỗi khi thiết bị gửi dữ liệu mới, ứng dụng sẽ nhận được thông báo (notify) và có thể xử lý dữ liệu đó để hiển thị lên biểu đồ sóng PPG. Việc nhận thông báo (notify) giúp ứng dụng liên tục cập nhật dữ liệu từ thiết bị, đảm bảo việc theo dõi sóng PPG và các thông số liên quan được thực hiện một cách chính xác và liên tục.



Hình 3. 22. Lưu đồ thể hiện kết nối BLE với thiết bị

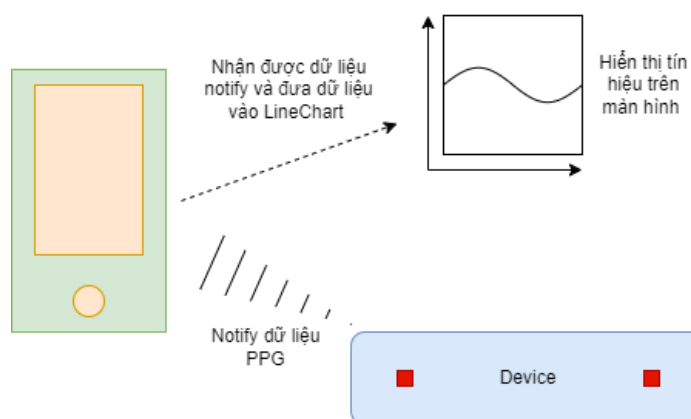
Sau khi đã đăng kí nhận thông báo đến ứng dụng hoạt động thu thập dữ liệu của thiết bị sẽ gửi các dữ dữ liệu đến ứng dụng thông qua cơ chế thông báo này.

Khi người dùng bấm vào nút "Start", ứng dụng sẽ phát hiện sự kiện nhấn nút và thực hiện ghi mã lệnh bắt đầu thu thập dữ liệu (0x0801100A) vào thuộc tính yêu cầu (request characteristic), sau đó gửi yêu cầu này đến thiết bị.



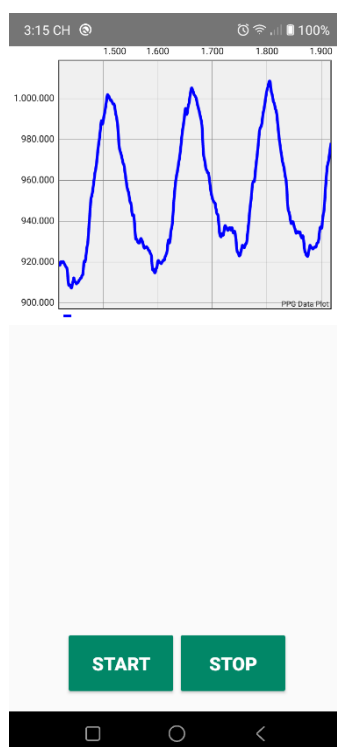
Hình 3. 23. Lưu đồ thể hiện yêu hoạt động bấm nút bắt đầu thu thập dữ liệu

Khi thiết bị nhận được yêu cầu lệnh bắt đầu thu thập dữ liệu, nó sẽ chuyển sang chế độ thu thập dữ liệu liên tục và kích hoạt hoạt động của AFE4420. Thiết bị sẽ đọc dữ liệu thô từ cảm biến và thông báo liên tục dữ liệu này về ứng dụng di động để có thể được biểu diễn dưới dạng sóng tín hiệu PPG.



Hình 3. 24. Ứng dụng thực hiện vẽ biểu đồ sóng dựa trên dữ liệu nhận được

Qua đó, quá trình thu thập dữ liệu diễn ra liên tục và thông tin về dữ liệu thô được chuyển đến ứng dụng để tạo ra biểu đồ sóng PPG. Điều này cho phép người dùng theo dõi và đánh giá tín hiệu PPG một cách thuận tiện và chính xác.

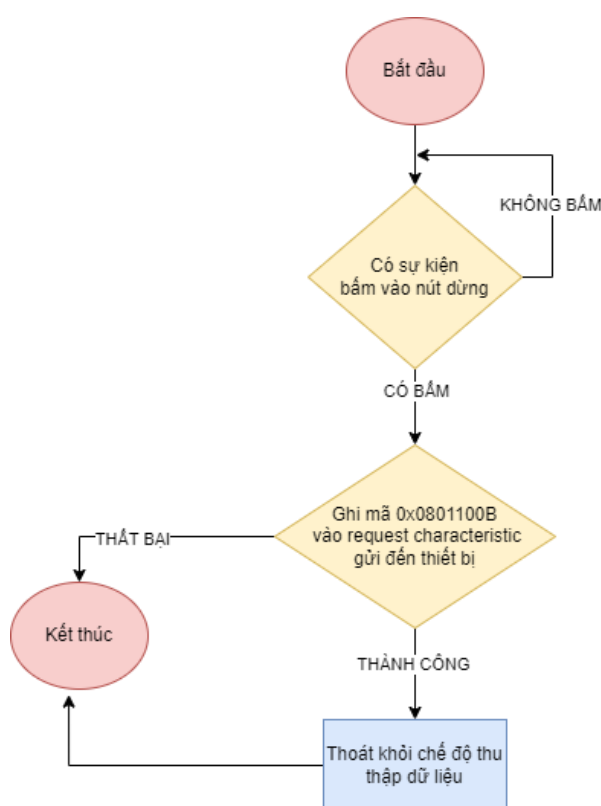


Hình 3. 25. Màn hình ứng dụng
khi dạng sóng được vẽ

Khi người dùng bấm vào nút “Stop”, một sự kiện nút nhấn cũng được phát hiện, sự kiện này sẽ ghi mã lệnh dừng thu thập dữ liệu (0x0801100B) vào thuộc tính yêu cầu (request characteristic).

Lúc này, thiết bị sẽ trở lại trạng thái chờ đợi bình thường. Các thông báo dữ liệu từ thiết bị sẽ không còn xuất hiện trên màn hình và người dùng không thể theo dõi tín hiệu PPG trong thời gian này.

Việc dừng thu thập dữ liệu cho phép người dùng tạm dừng quá trình theo dõi tín hiệu PPG khi cần thiết và trở lại hoạt động thu thập dữ liệu khi cần thiết.



Hình 3. 26. Lưu đồ thể hiện hoạt động bấm nút dừng thu thập dữ liệu

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC

4.1. Kết quả thu thập dữ liệu PPG

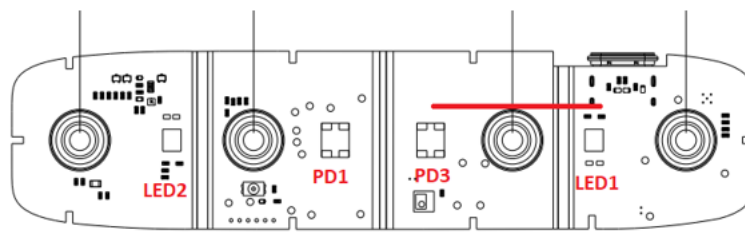
Dưới đây là hình ảnh mô tả cấu trúc kết quả của dữ liệu thô PPG thu thập được trên AFE4420. Có thể thấy kết quả bao gồm dữ liệu của các pha như lúc cấu hình, gồm có 2 pha môi trường và 8 pha LED, các trên các pha LED dữ liệu được thu thập bởi 2 PD là PD1 và PD2, kết quả được mô tả như hình ảnh dưới đây.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Timestamp	Amb_PD1	LED1_PD1	LED2_PD1	LED3_PD1	LED4_PD1	Amb_PD3	LED1_PD3	LED2_PD3	LED3_PD3	LED4_PD3
3.957E+12	1438627	29186	25228	25484	34558	1497036	81516	73603	78685	82869
3.957E+12	21328	-2375	2573	6392	2619	74798	49444	39738	35975	35739
3.957E+12	-3309	11389	5619	2179	217	31015	25260	15552	17245	18260
3.957E+12	79	3522	5250	9237	1291	9525	-4606	-9342	-6965	-3940
3.957E+12	-5106	1702	2640	4631	535	-12206	10161	11769	15407	13698
3.957E+12	-978	1764	3695	4579	8634	8539	25964	10297	13796	13786
3.957E+12	-3402	6262	5425	9539	2610	3576	16760	12655	10536	10395
3.957E+12	-3573	3301	3997	6119	10080	4903	20483	14135	18653	15438
3.957E+12	-6293	5078	2510	8327	2260	6405	17859	19969	18107	24658
3.957E+12	2220	-4120	-1166	2223	-3331	7992	17588	20574	8776	14346
3.957E+12	-3148	7008	8320	9783	4856	17052	20313	7976	10531	11528
3.957E+12	-3523	9609	575	1655	8846	6722	12521	17449	25466	28831
3.957E+12	-3122	3040	1542	4051	1351	12156	19664	17837	17630	8900
3.957E+12	-5117	3423	5873	4917	5590	11630	18598	13946	23557	13387
3.957E+12	-488	1313	-1727	963	3637	10986	20989	22091	15929	14933
3.957E+12	-3543	2209	5152	3101	4702	15612	19717	18717	18821	16370
3.957E+12	-4364	4645	7770	2826	-4849	13140	27151	22651	18090	11434
3.957E+12	5378	3751	1723	834	7280	13026	18069	19437	20688	17116
3.957E+12	-2614	1297	9529	3554	1776	6867	19167	15306	13570	13091
3.957E+12	-822	238	-779	8977	4189	13463	10910	17842	25653	12032
3.957E+12	-1509	9397	6680	1648	2857	531	19860	10334	22670	10505
3.957E+12	1451	745	5807	3678	888	14471	10045	18288	15599	17479

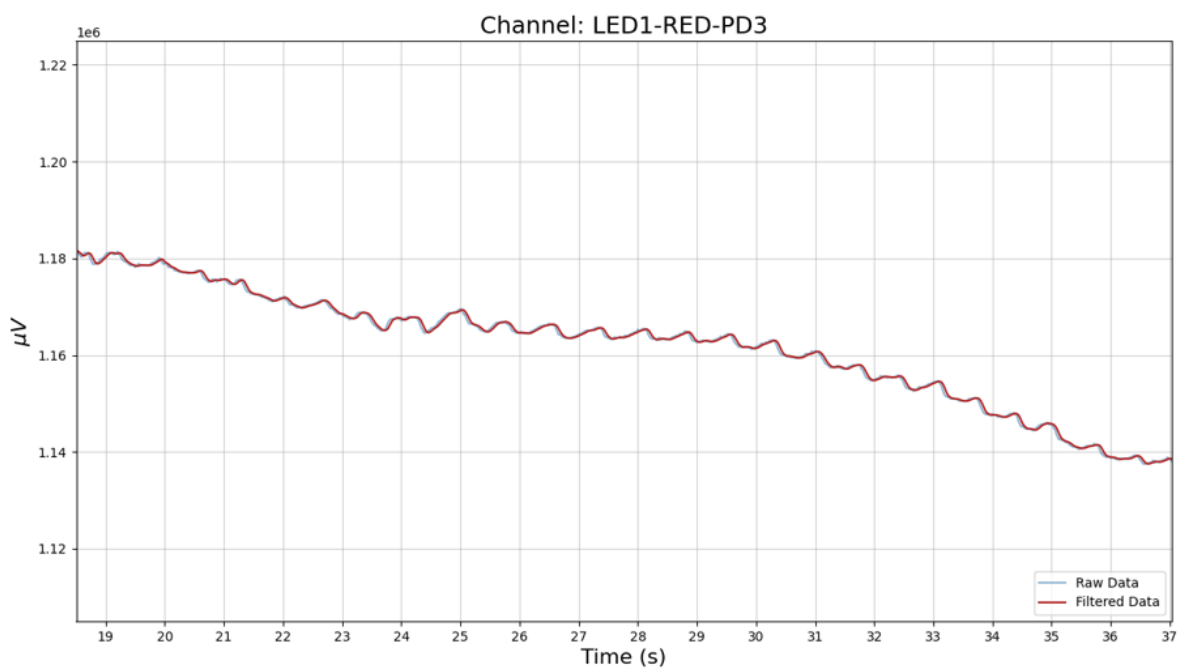
Hình 4. 1. Dữ liệu PPG thu thập được trên thiết bị

Bên dưới đây là các kết quả đạt được khi thực hiện thu thập dữ liệu thô tín hiệu PPG trên AFE4420 ở các vị trí LED và được thu bởi các PD khác nhau, kết quả được vẽ lại bằng biểu đồ đường dựa trên các số liệu thu thập được.

LED1-RED and PD3

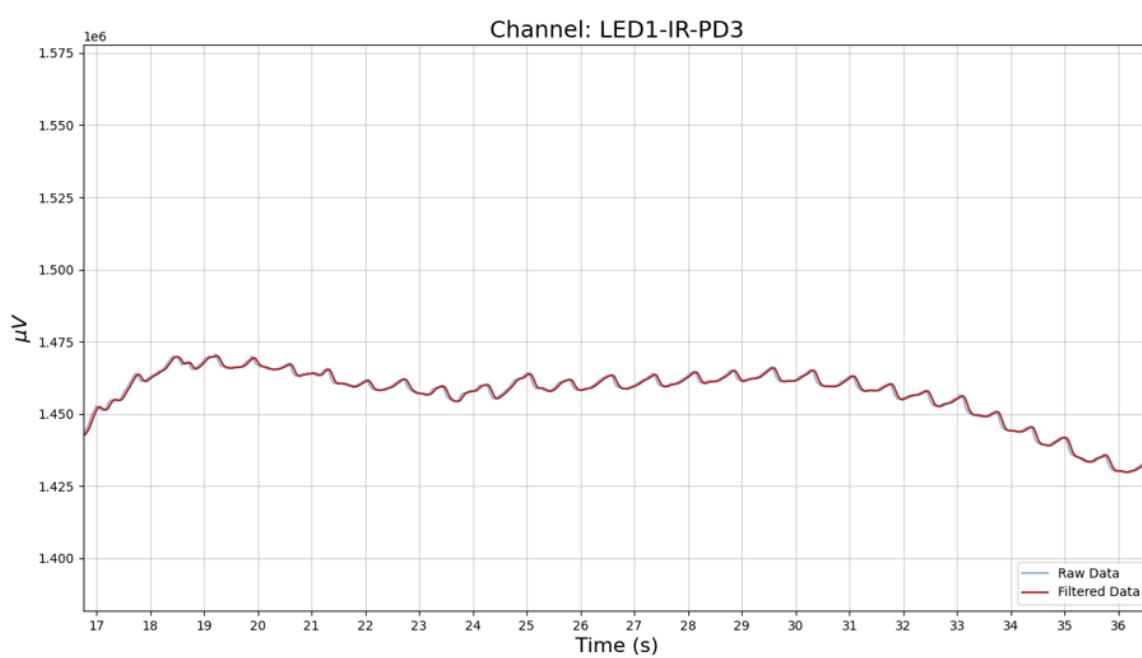
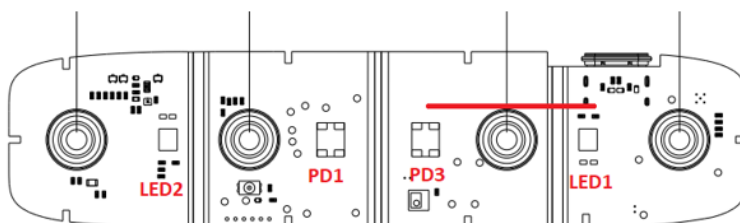


Hình 4. 2. Vị trí đo ở LED1-RED và PD3



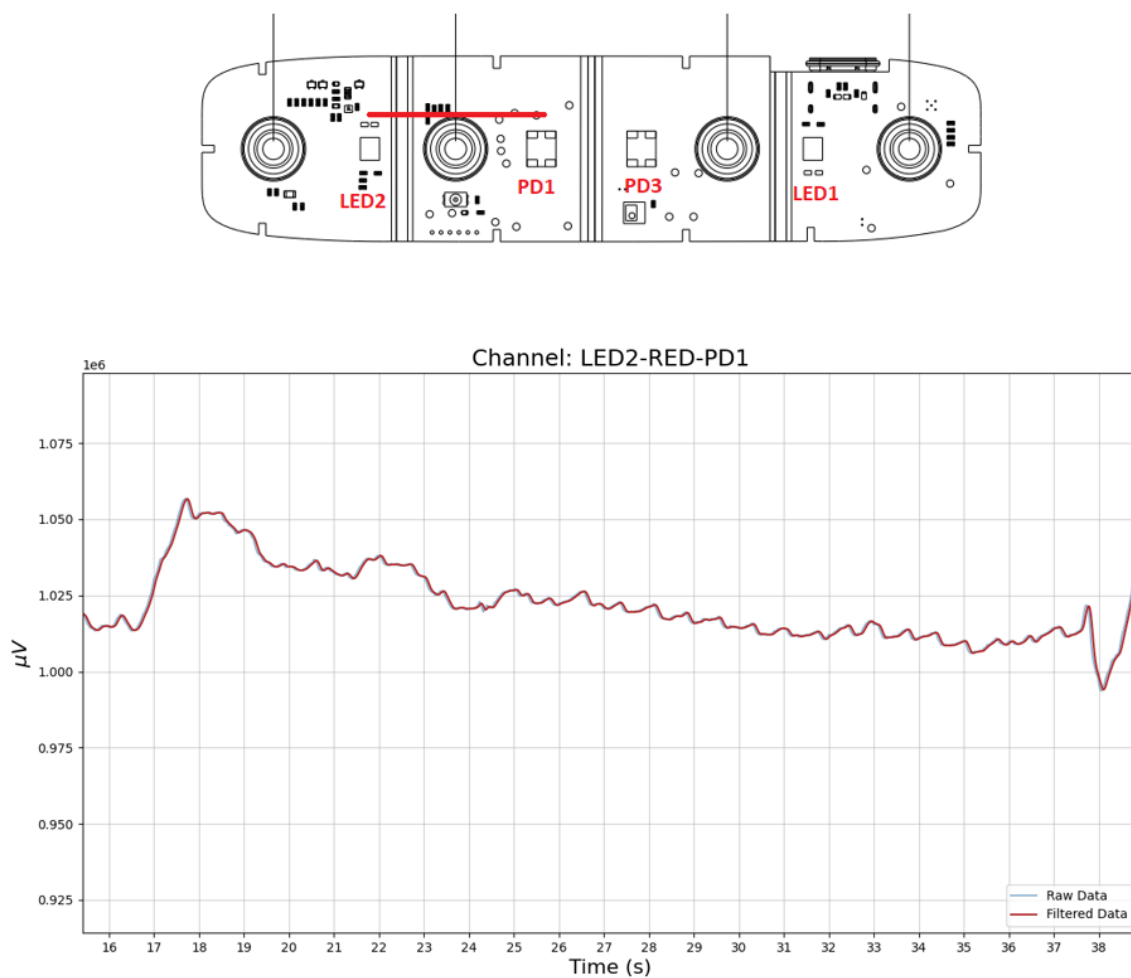
Hình 4. 3. Dạng sóng ở vị trí LED1-RED và PD3

LED1-IR and PD3



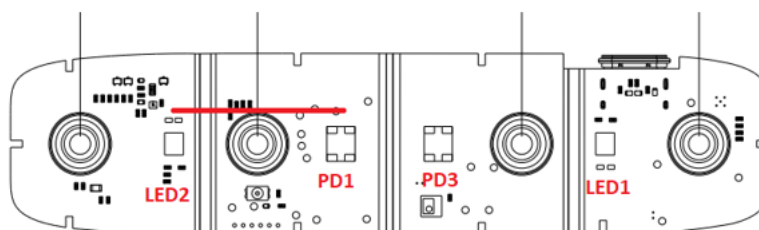
Hình 4. 4. Dạng sóng ở vị trí LED1-IR và PD3

LED2-RED and PD1

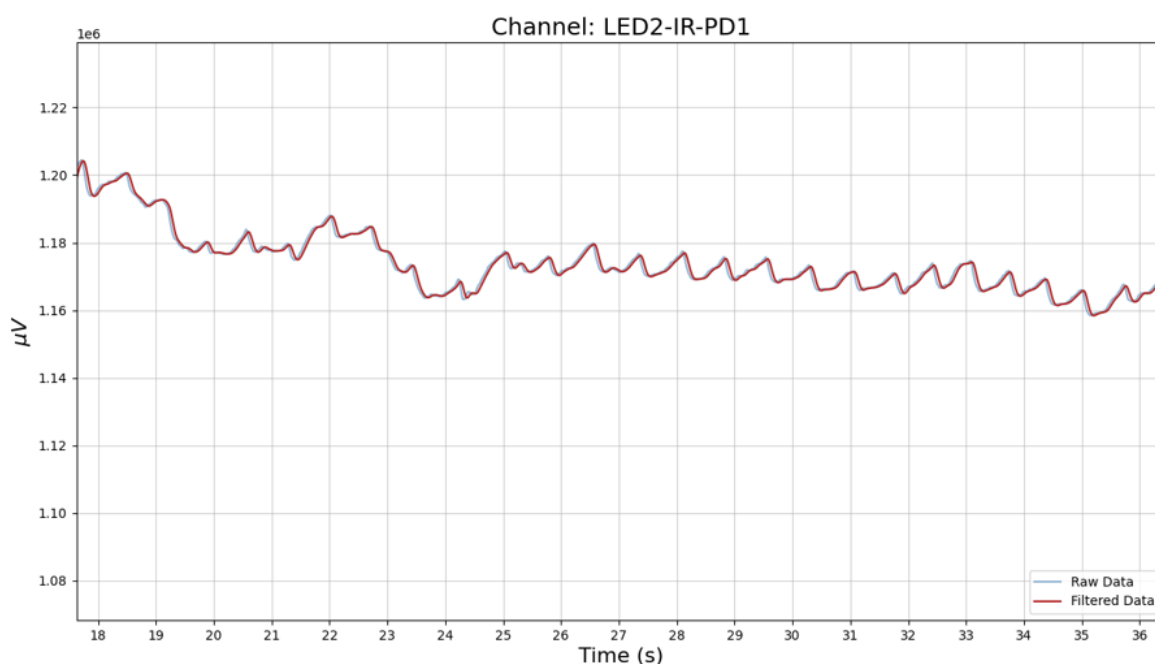


Hình 4. 5. Dạng sóng ở vị trí LED2-RED và PD1

LED2-IR and PD1



Hình 4. 6. Vị trí đo ở LED2-IR và PD1



Hình 4. 7. Dạng sóng ở vị trí LED2-IR và PD1

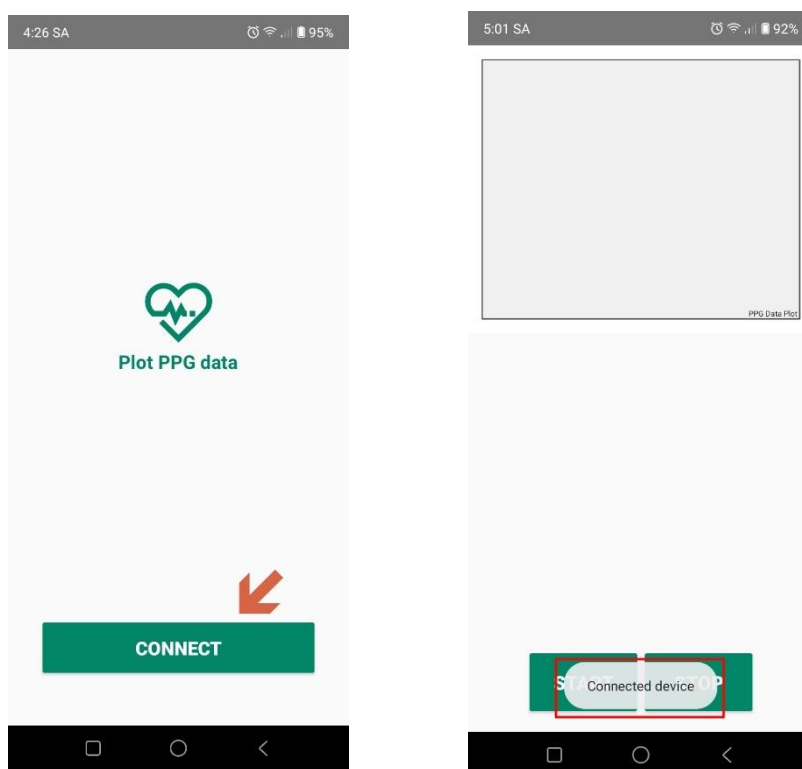
Dựa trên các kết quả vẽ được, ta nhận thấy một số nhận định quan trọng. Đầu tiên, các kết quả đo được từ các trường hợp khác nhau cho thấy một hình dạng gần như nhất quán, cho thấy phương pháp thực hiện đo đặc đang hoạt động đúng trên tất cả các LED và PD của hệ thống. Điều này cho thấy tính tin cậy và độ ổn định của hệ thống trong việc thu thập tín hiệu PPG.

Thứ hai, các kết quả vẽ ra đều có dạng sóng gọn, với các điểm nhấp nhô và biên độ khác nhau tùy thuộc vào vị trí thu và LED được phát sáng. Điều này cho thấy tính biến đổi của tín hiệu PPG theo thời gian và vị trí trên cơ thể. Mặc dù chưa đạt được dạng sóng PPG lý tưởng, nhưng vẫn có thể nhìn thấy được hình thái cơ bản của tín hiệu PPG và sự biến đổi trong nó.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng vẫn tồn tại một số hạn chế. Đầu tiên, phương pháp thu thập dữ liệu hiện tại chưa được tối ưu hóa hoàn toàn để loại bỏ nhiễu và tăng độ chính xác của tín hiệu. Điều này có thể ảnh hưởng đến tính chính xác của kết quả thu thập được. Thứ hai, vẫn còn sự ảnh hưởng của nhiễu từ môi trường, như ánh sáng xung quanh, có thể gây ảnh hưởng đến chất lượng tín hiệu thu được.

4.2. Kết quả thực hiện gửi dữ liệu lên ứng dụng di động

Khi thiết bị được bật nguồn, hệ thống sẽ tự động khởi động và bắt đầu quảng bá tín hiệu Bluetooth, tạo điều kiện cho các điện thoại di động có thể kết nối với nó. Quá trình kết nối này đòi hỏi người dùng thực hiện các bước cần thiết để thiết lập kết nối giữa thiết bị và ứng dụng di động.



Hình 4. 8. Kết nối thành công thiết bị với ứng dụng di động

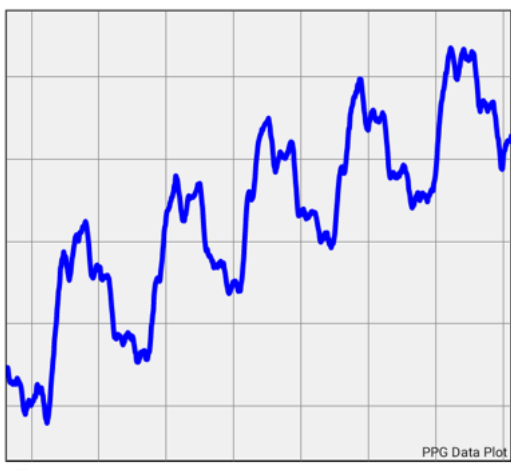
Sau khi thiết bị và ứng dụng đã thiết lập kết nối thành công, chúng sẽ có thể truyền thông tin và dữ liệu giữa nhau. Thiết bị sẽ bắt đầu thu thập tín hiệu PPG từ người dùng thông qua cảm biến và sau đó truyền tải dữ liệu đã thu thập được về cho ứng dụng di động. Tại đây, dữ liệu PPG có thể được hiển thị một cách trực quan.

Khi người dùng nhấn vào nút "Start", thiết bị sẽ khởi động quá trình thu thập dữ liệu tín hiệu PPG và truyền tải nó lên ứng dụng để người dùng có thể quan sát và theo dõi dạng sóng của tín hiệu PPG.

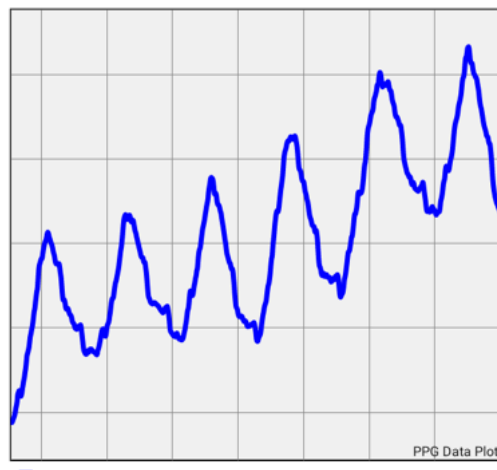


Hình 4. 9. Dữ liệu được vẽ ra sau khi bấm nút bắt đầu thu thập dữ liệu

Ta thấy rằng kết quả nhận được khi dữ liệu tín hiệu PPG được vẽ trên ứng dụng cũng ra được hình dạng sóng, có đầy đủ các điểm đỉnh và điểm bắt đầu, điểm nút khá nhỏ tuy nhiên về mặt tổng quát dữ liệu vẽ được trên ứng dụng vẫn có kết quả cho ra hình thái dạng sóng của tín hiệu PPG.



Hình 4. 11. Dạng sóng PPG được đo ở bắp chân



Hình 4. 10. Dạng sóng PPG được đo ở bụng

Kết quả thu được từ thực nghiệm cho thấy sự đa dạng và biến đổi của tín hiệu PPG phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm thể trạng của người và vị trí đặt cảm biến trên cơ thể.

Mỗi người và khu vực trên cơ thể khác nhau sẽ tạo ra những kết quả khác nhau trong việc thu thập tín hiệu PPG.

Với dữ liệu thu thập từ bắp chân, chúng ta quan sát được rằng tín hiệu PPG ở khu vực này có sự phức tạp cao hơn. Nhiều xuất hiện nhiễu trên các đỉnh của sóng PPG và biên độ có vẻ đều nhau. Điều này cho thấy thiết bị có khả năng thu thập tín hiệu PPG từ khu vực bắp chân, tuy nhiên, sự hiện diện của nhiễu làm cho dữ liệu trở nên khó khăn trong việc phân tích và đánh giá chính xác.

Trái lại, dữ liệu thu thập từ vùng bụng cho thấy sự khác biệt đáng kể so với khu vực bắp chân. Tín hiệu PPG ở khu vực bụng có dạng sóng ít bị nhiễu hơn và hình thái sóng PPG rõ ràng hơn. Điều này có thể lý giải bởi sự tập trung nhiều mạch máu và gần với tim. Do đó, việc đặt cảm biến trên vùng bụng giúp thu thập dữ liệu PPG dễ dàng hơn và cho kết quả đáng tin cậy hơn so với khu vực bắp chân.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, thiết bị đã thành công trong việc thu thập tín hiệu PPG từ các vị trí khác nhau trên cơ thể người. Tuy nhiên, chất lượng của tín hiệu thu được bị ảnh hưởng đáng kể bởi vị trí đặt cảm biến trên cơ thể.

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN

5.1. Kết quả đạt được

Qua quá trình thực hiện và các kết quả đạt được của thiết bị, chúng ta có thể rút ra những nhận định quan trọng về hiệu quả và tính ứng dụng của hệ thống thu thập dữ liệu tín hiệu PPG.

Đầu tiên, nghiên cứu đã thành công trong việc thực hiện thu thập dữ liệu thô về tín hiệu PPG từ cảm biến AFE4420. Điều này cho phép ta hiểu rõ hơn về nguyên tắc hoạt động và tính năng của cảm biến, và áp dụng chúng vào thiết bị để thu thập dữ liệu PPG. Điều này khẳng định tính khả thi và đáng tin cậy của hệ thống thu thập dữ liệu PPG trong môi trường thực tế.

Thứ hai là thành công trong việc xây dựng kết nối không dây thông qua giao thức Bluetooth Low Energy (BLE). Điều này cho phép thiết bị kết nối và truyền tải dữ liệu PPG đến các thiết bị di động khác một cách hiệu quả và ổn định. Sự kết hợp giữa hệ thống thu thập dữ liệu PPG và kết nối BLE đã tạo ra một giải pháp linh hoạt và thuận tiện để truyền tải dữ liệu PPG đến ứng dụng di động.

Một kết quả quan trọng khác là xây dựng thành công một ứng dụng di động đơn giản để trực quan hóa dữ liệu PPG. Điều này cho phép người dùng theo dõi và xem các biểu đồ và đồ thị của tín hiệu PPG một cách trực quan và dễ hiểu. Ứng dụng này tạo ra một giao diện người dùng thuận tiện và thân thiện, giúp người dùng nắm bắt và theo dõi thông tin về sức khỏe của họ một cách dễ dàng.

5.2. Phạm vi ứng dụng

Như đã đề cập trong chương 1, ban đầu thiết bị được thực hiện để phục vụ cho mục đích y tế liên quan đến các bệnh nhân sau phẫu thuật cần theo dõi tình trạng vết mổ thường xuyên để đảm bảo sức khỏe, thu thập dữ liệu PPG là một bước quan trọng để có thể sử dụng sau này trong việc phân tích đánh giá tình trạng vết thương nơi vị trí phẫu thuật.

Tuy nhiên, phạm vi ứng dụng của hệ thống thu thập tín hiệu PPG và truyền tải đến ứng dụng di động qua Bluetooth Low Energy (BLE) không chỉ có dừng lại ở đó, nó có thể được mở rộng sang nhiều lĩnh vực đa dạng khác nhau. Dưới đây là một số phạm vi ứng dụng tiềm năng của đề tài:

Chăm sóc sức khỏe cá nhân: Hệ thống có thể được sử dụng để theo dõi và đánh giá sức khỏe cá nhân. Tín hiệu PPG sau khi được xử lý, phân tích nó có thể cho ta biết về nhịp tim và các thông số sức khỏe khác, như nhịp tim tối đa, nhịp tim trung bình và chỉ số SpO₂, người dùng có thể giám sát sức khỏe của mình và nhận biết các tín hiệu cảnh báo sớm về các vấn đề liên quan đến tim mạch và sức khỏe tổng quát.

Theo dõi hoạt động thể chất: đối với lĩnh vực về thể thao, bằng cách theo dõi biến đổi của tín hiệu PPG trong quá trình vận động, người dùng có thể đo lường mức độ cường độ hoạt động, lượng calo tiêu thụ và tình trạng cơ bắp. Điều này giúp người dùng tối ưu hóa chế độ tập luyện, đánh giá hiệu suất và đạt được mục tiêu về thể chất.

Quản lý căng thẳng và tâm lý: tín hiệu PPG có thể phản ánh sự biến đổi của nhịp tim và cung cấp thông tin về tần số và biên độ của nó. Điều này hỗ trợ trong việc đo lường và quản lý căng thẳng, giúp người dùng nhận ra những tình trạng tâm lý không ổn định và thực hiện các biện pháp cần thiết để cải thiện trạng thái tâm lý.

Nghiên cứu và phân tích dữ liệu: Dữ liệu thu thập từ hệ thống PPG có thể được sử dụng cho mục đích nghiên cứu và phân tích trong lĩnh vực y tế và khoa học. Các nhà nghiên cứu có thể sử dụng dữ liệu PPG để khám phá mối liên hệ giữa nhịp tim và các yếu tố khác, như giấc ngủ, stress và hoạt động thể chất. Điều này có thể giúp cải thiện hiểu biết về sức khỏe con người và phát triển phương pháp chẩn đoán và điều trị hiệu quả hơn.

5.3. Hạn chế

Mặc dù hệ thống thu thập tín hiệu PPG và truyền tải đến ứng dụng di động qua Bluetooth Low Energy (BLE) mang lại nhiều lợi ích và tiềm năng, tuy nhiên, cũng tồn tại một số hạn chế cần được lưu ý. Dưới đây là những hạn chế quan trọng của đề tài này:

Một trong những hạn chế quan trọng là thiết bị hiện tại vẫn đang thu thập và truyền tải dữ liệu thô về tín hiệu PPG. Điều này có nghĩa là dữ liệu thu được chưa được lọc và xử lý, không có sự chọn lọc để loại bỏ nhiễu và đảm bảo độ chính xác của tín hiệu. Để nâng cao hiệu suất và chính xác của hệ thống, cần thiết phải phát triển thuật toán hoặc các thành phần khác để lọc và làm tối ưu dữ liệu PPG.

Nhiều từ ảnh hưởng của môi trường là điều khó tránh khỏi, do đó cần thiết kế thiết bị có thiết kế tốt để tránh ảnh hưởng nhiễu từ nhiều nguồn sáng khác nhau đến từ môi trường xung quanh.

Ngoài ra, hạn chế khác cần được đề cập là tầm xa giới hạn của kết nối Bluetooth Low Energy (BLE). Kết nối BLE có tầm xa giới hạn và có thể bị ảnh hưởng bởi vật cản và môi trường xung quanh. Điều này có thể làm gián đoạn hoặc mất kết nối trong quá trình truyền tải dữ liệu PPG. Để cải thiện hiệu suất, cần tiếp tục nghiên cứu và thử nghiệm các giải pháp để tăng cường tầm xa và độ ổn định của kết nối BLE.

Bảo mật và riêng tư: Vì dữ liệu sức khỏe cá nhân được thu thập và truyền tải, vấn đề bảo mật và riêng tư là một hạn chế quan trọng. Cần đảm bảo rằng các biện pháp bảo mật và quyền riêng tư được triển khai một cách chặt chẽ để bảo vệ thông tin cá nhân của người dùng và ngăn chặn việc truy cập trái phép hoặc lạm dụng dữ liệu.

Năng lượng cũng là một vấn đề, mặc dù đã dùng kết nối BLE để tiết kiệm năng lượng, tuy nhiên, thiết bị hiện tại chỉ có thể thu thập dữ liệu khi cần thiết không thể liên tục thu thập theo dõi người dùng để đảm bảo về mặt năng lượng do đó không thể liên tục thực hiện quá trình đo đặc tín hiệu.

Ngoài ra, có thể thấy rằng hệ thống chỉ dừng lại ở mức thu thập dữ liệu thô, đối với các ứng dụng thực tế thì dữ liệu này cần được xử lý để có thể cho biết về các thông tin như nhịp tim, SpO2, huyết áp,... Do đó cần thực hiện các bước thuật toán để xử lý dữ liệu thu thập được thành thông tin có ý nghĩa cho người dùng.

5.4. Hướng phát triển

Có nhiều hướng phát triển tiềm năng cho đề tài này, nhằm nâng cao hiệu suất và khả năng ứng dụng của hệ thống thu thập tín hiệu PPG và truyền tải đến ứng dụng di động. Dưới đây là một số hướng phát triển quan trọng có thể được xem xét:

Nâng cao thuật toán xử lý tín hiệu: Để cải thiện độ chính xác và tin cậy của dữ liệu PPG, cần tiếp tục nghiên cứu và phát triển các thuật toán xử lý tín hiệu tiên tiến. Các thuật toán này có thể bao gồm lọc nhiễu, phân tích tín hiệu, và các phương pháp trích xuất đặc trưng. Sự cải tiến trong thuật toán sẽ đảm bảo rằng dữ liệu thu thập được chính xác và đáng tin cậy hơn, đồng thời cung cấp thông tin quan trọng về nhịp tim và sức khỏe cho người dùng.

Hơn nữa, hợp tác với các nhà sản xuất thiết bị y tế và chuyên gia y tế là một hướng phát triển quan trọng. Sự kết hợp giữa công nghệ và y tế sẽ mang lại những cơ hội mới trong việc áp dụng hệ thống thu thập tín hiệu PPG và truyền tín hiệu đến ứng dụng di động

vào việc chẩn đoán, điều trị và quản lý bệnh. Các chuyên gia y tế có thể sử dụng dữ liệu PPG để đưa ra các quyết định và khuyến nghị chính xác hơn về sức khỏe và chăm sóc cho bệnh nhân.

Từ phạm vi ứng dụng kể trên ta có thể mở rộng khả năng ứng dụng: Nó có thể được sử dụng trong giám sát sức khỏe cá nhân, theo dõi tình trạng tim mạch, giảng dạy và nghiên cứu y học, và nhiều ứng dụng khác. Việc nghiên cứu và phát triển các ứng dụng mới sẽ mở ra cơ hội để áp dụng công nghệ PPG vào các lĩnh vực mới và mang lại lợi ích cho người dùng và cộng đồng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mohammad Afaneh, **“Intro Bluetooth Low Energy”**, 2018.
- [2] Elisa Mejia-Mejia, John Allen, Karthik Budidha, Chadi El-Hajj, Panayiotis A. Kyriacou, Peter H. Charlton, **“Photoplethysmography Signal Processing and Synthesis”**, 2021, page 6.
- [3] Junyung Park, Hyeon Seok Seok, Sang-Su Kim, Hangsik Shin, **“Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review”**, 2022, page 4.
- [5] Badar Jahangir Kayani, **“Development of continuous monitoring pulse oximeter device”**, 2012, page 30.
- [6] Chungkeun Lee, Hang Sik Shin, Myoungho Lee, **“Relations between ac-dc components and optical path length in photoplethysmography”**, 2011.
- [7] Texas instruments, **“AFE4420 Ultra-Small, Integrated AFE With FIFO for Multi-sensor Wearable, Optical Heart-rate Monitoring and Bio-sensing”**, 2018.
- [8] Zephyr, **“Zephyr Project Documentation”**, 2022.
- [9] Nordic Semiconductor, **“nRF5340 Product Specification”**, 2022.

PHỤ LỤC