

VIETNAM NATIONAL UNIVERSITY HO CHI MINH CITY
HO CHI MINH CITY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING

—o0o—



BIGPROJECT REPORT

Design of 2.4 GHz BLE Transmitter with Wake-Up Receiver (WuRx)

Project 4: Sensor node BLE and Directional coupler

SUPERVISOR : Dr. NGUYEN Van Hieu
SUBJECT : Microwave Engineering
CLASS : L01
GROUP : 04

Ho Chi Minh, ../../20..

Bảng phân công nhiệm vụ

STT	MSSV	Họ và Tên	Nhiệm vụ	Tiến độ
1	2210214	Lâm Gia Bảo	Viết chương 2: Lý thuyết về Directional Coupler	100%
2	2210278	Trần Quốc Bảo	Viết lí thuyết SoC	100%
3	2210342	Hà Xuân Cát	Viết chương 2: kiến trúc SoC	100%
4	2210631	Lý Đoàn Dự	Tổng hợp và format, viết chương 1	100%
5	2210725	Võ Phát Đạt	Viết chương 2: Lý thuyết về Directional Coupler	100%
6	2210779	Trương Nguyễn Nhật Đông	Nghiên cứu và viết mục lục	100%
7	2210780	Nguyễn Đại Đồng	Viết chương 2: Tổng quan về BLE	100%
8	2210838	Đỗ Tiến Giáp	Viết chương 2: Lý thuyết về Directional Coupler	100%

Mục lục

1	Giới thiệu tổng quan	4
1.1	Lý do chọn đề tài	4
1.2	Phạm vi nghiên cứu	4
1.3	Nhiệm vụ chính của nhóm	5
1.4	Phương pháp tiếp cận và công cụ sử dụng	5
1.5	Cấu trúc báo cáo đề tài	6
2	Cơ sở lý thuyết	7
2.1	Tổng quan về công nghệ Bluetooth Low Energy (BLE)	7

1 Giới thiệu tổng quan

1.1 Lý do chọn đề tài

Sự phát triển của Internet of Things (IoT) trong thập niên qua đã thúc đẩy nhu cầu về các thiết bị cảm biến không dây có kích thước nhỏ gọn, chi phí thấp, khả năng tiêu thụ năng lượng tối thiểu và tích hợp dễ dàng với hạ tầng mạng hiện hữu. Trong số các công nghệ truyền thông không dây hiện nay, Bluetooth Low Energy (BLE) nổi bật nhờ đặc tính tiêu thụ điện năng thấp, tốc độ truyền dữ liệu đáp ứng được yêu cầu của đa số ứng dụng IoT, đồng thời được hỗ trợ rộng rãi trên các thiết bị đầu cuối như điện thoại thông minh và máy tính bảng.

Một thách thức lớn đối với các thiết bị BLE là duy trì tuổi thọ pin trong khi vẫn đảm bảo khả năng kết nối và phản hồi nhanh. Giải pháp kết hợp giữa BLE transmitter và Wake-Up Receiver (WuRx) đã được đề xuất nhằm tối ưu hóa năng lượng. WuRx đóng vai trò duy trì trạng thái tiêu thụ siêu thấp và chỉ kích hoạt bộ phát BLE khi có tín hiệu điều khiển, từ đó giảm đáng kể thời gian hoạt động không cần thiết và kéo dài vòng đời pin của thiết bị.

Trên cơ sở đó, lớp được giao đề tài tổng quát “Thiết kế bộ phát BLE 2.4 GHz kết hợp với bộ Wake-Up Receiver (WuRx)”, nhằm xây dựng một hệ thống hoàn chỉnh bao gồm các khối chức năng từ phần cứng, phần mềm cho đến mạch RF thụ động phục vụ đo đạc và kiểm chứng.

1.2 Phạm vi nghiên cứu

Trong khuôn khổ đề tài chung, nhóm được phân công phụ trách hai nhiệm vụ chính:

- 1) Thiết kế và chế tạo node BLE dựa trên chip ESP32-C3. Khác với cách tiếp cận sử dụng module thương mại đóng gói sẵn (ví dụ ESP32-C3-WROOM), nhóm tiến hành thiết kế trực tiếp từ chip ESP32-C3, bao gồm các thành phần ngoại vi tối thiểu như bộ nhớ flash ngoài, mạch dao động thạch anh, mạch nguồn ổn áp và mạng RF matching cho anten PCB. Node này đồng thời được tích hợp các cảm biến cơ bản (nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng), phục vụ cho việc thử nghiệm truyền dữ liệu BLE.
- 2) Thiết kế và chế tạo Directional Coupler dưới dạng vi dải coupled-line, với hai biến thể coupling ($-10dB$ và $-20dB$). Bộ coupler cho phép lấy mẫu tín hiệu trong quá trình phát BLE, từ đó hỗ trợ việc đo công suất, kiểm chứng tín hiệu và cung cấp dữ liệu RF phục vụ cho các nhóm khác trong hệ thống.

Các nhiệm vụ trên vừa đảm bảo tính độc lập trong nghiên cứu, vừa đóng góp vào

mục tiêu tổng thể của lớp, cụ thể là cung cấp một node BLE hoàn chỉnh và một bộ coupler RF cho hệ thống WuRx-BLE transmitter.

1.3 Nhiệm vụ chính của nhóm

Đề tài hướng đến việc đạt được các mục tiêu sau:

1) Đối với Sensor Node ESP32-C3

- Thiết kế schematic và layout PCB ở mức chip, bao gồm khối nguồn, ngoại vi, anten PCB và mạch matching.
- Phát triển firmware BLE trên nền tảng ESP-IDF, hỗ trợ các chức năng advertising, notification và quản lý năng lượng (light sleep, deep sleep, duty cycling).
- Đánh giá thực nghiệm về tiêu thụ năng lượng (dòng sleep/active), độ trễ wake-up (wake-up latency) và độ trễ vòng lặp đầu cuối (round-trip time).

2) Đối với Directional Coupler

- Thiết kế, mô phỏng cấu trúc vi dải coupled-line với hệ số ghép $-10dB$ và $-20dB$.
- Thực hiện layout PCB và chế tạo thực nghiệm.
- Đo và phân tích các tham số S (S_{11} , S_{21} , S_{31}), isolation, phase và băng thông, từ đó so sánh với kết quả mô phỏng.

1.4 Phương pháp tiếp cận và công cụ sử dụng

Để đạt được các mục tiêu nêu trên, nhóm áp dụng phương pháp tiếp cận theo các bước sau:

- **Thiết kế phần cứng:** sử dụng KiCad/Altium cho schematic và PCB; tham chiếu hướng dẫn thiết kế phần cứng chính thức từ Espressif cho ESP32-C3 nhằm đảm bảo tính toàn vẹn tín hiệu và hiệu quả RF.
- **Phát triển firmware:** xây dựng trên bộ công cụ ESP-IDF, ngôn ngữ C và FreeRTOS; triển khai quản lý năng lượng thông qua các chế độ sleep, lập trình wake-up từ GPIO.
- **Mô phỏng RF:** sử dụng phần mềm chuyên dụng như CST Microwave Studio hoặc Keysight ADS để mô phỏng directional coupler, tối ưu chiều rộng và khoảng cách vi dải.

- **Đo đặc thực nghiệm:** sử dụng Power Analyzer để đo dòng tiêu thụ, Oscilloscope để đo độ trễ wake-up, và Vector Network Analyzer (VNA) để đo tham số S của directional coupler.
- **Tích hợp hệ thống:** phối hợp với các nhóm khác trong lớp nhằm kết nối node BLE và coupler với front-end RF và WuRx, từ đó kiểm chứng hiệu quả hoạt động của toàn hệ thống.

1.5 Cấu trúc báo cáo đề tài

Báo cáo được cấu trúc thành sáu chương chính:

Chương 1: Giới thiệu tổng quan.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết (ESP32-C3, BLE, quản lý năng lượng, directional coupler).

Chương 3: Thiết kế và thực hiện (node BLE từ chip ESP32-C3, firmware, directional coupler).

Chương 4: Kết quả đo đạc và phân tích (tiêu thụ năng lượng, Wake-up latency, RTT, tham số S của coupler).

Chương 5: Thảo luận và đánh giá.

Chương 6: Kết luận và hướng phát triển.

2 Cơ sở lý thuyết

2.1 Tổng quan về công nghệ Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE) là một chuẩn truyền thông không dây trong băng tần ISM 2,4 GHz, được thiết kế cho các ứng dụng IoT tiêu thụ năng lượng thấp. Chuẩn này sử dụng 40 kênh RF, trong đó có 3 kênh quảng bá (advertising) và 37 kênh dữ liệu, với tốc độ truyền danh định 1 Mbps và khoảng cách hoạt động khoảng 10–50 m tùy điều kiện.

Điểm khác biệt quan trọng giữa BLE và Bluetooth Classic là cơ chế tiết kiệm năng lượng. BLE chỉ phát gói tin ngắn trong quá trình quảng bá và duy trì trạng thái ngủ phần lớn thời gian, thay vì giữ kết nối liên tục. Điều này giúp thiết bị chạy bằng pin nhỏ có thể hoạt động trong nhiều tháng hoặc thậm chí nhiều năm. Kiến trúc giao thức BLE gồm hai phần: Controller (lớp vật lý và liên kết, xử lý kết nối ở mức thấp) và Host (các giao thức cao hơn như ATT, GATT, GAP và quản lý bảo mật). Giao diện giữa hai phần được chuẩn hóa thông qua Host Controller Interface (HCI), cho phép linh hoạt trong phát triển phần cứng và firmware.

Trong hoạt động, thiết bị BLE có hai chế độ chính: advertising (phát gói tin để thông báo sự hiện diện, cho phép quét và thiết lập kết nối) và connection (trao đổi dữ liệu dựa trên profile GATT). Ngoài ra, thiết bị có thể ở trạng thái chờ (idle) hoặc deep-sleep, đảm bảo mức tiêu thụ dòng cực thấp.