

ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI



BÁO CÁO CUỐI KÌ WSN – NHÓM 5

Thiết kế mạng cảm biến không dây giám sát nhiệt độ và độ ẩm trên các cánh đồng diện tích 100 hecta

Nguyễn Trung Kiên	202120500	Kien.NT210500@sis.hust.edu.vn
Vũ Quang Nhật Hải	20222125	Hai.VQN222125@sis.hust.edu.vn
Nguyễn Anh Tú	20222423	Tu.NA222423@sis.hust.edu.vn

EE4552 – Wireless Sensor Network – Mạng cảm biến không dây

Giảng viên hướng dẫn: PGS. Lê Minh Thùy

Nhóm ngành: Kỹ thuật đo & Tin học công nghiệp

Mã lớp - Nhóm

HÀ NỘI, 11/2025

TÓM TẮT BÁO CÁO

Trong kỷ nguyên Nông nghiệp 4.0, việc giám sát các thông số môi trường trên diện rộng là chìa khóa để tối ưu hóa năng suất cây trồng. Đề án "Thiết kế mạng cảm biến không dây giám sát nhiệt độ và độ ẩm trên các cánh đồng diện tích 100 hecta" tập trung giải quyết bài toán cốt lõi về thu thập dữ liệu tự động với chi phí thấp, độ tin cậy cao và khả năng triển khai linh hoạt tại các khu vực canh tác lớn.

Nội dung đồ án trình bày quy trình thiết kế và hiện thực hóa một hệ thống IoT trọn vẹn (End-to-End System) bao gồm ba phân hệ chính:

- Phân hệ Thu thập (Sensor Node): Thiết kế phần cứng node mạng sử dụng vi điều khiển STM32F103C8T6 kết hợp với module thu phát vô tuyến LoRa SX1278, hoạt động ở tần số 433MHz. Các node được tối ưu hóa về năng lượng thông qua chế độ ngủ (Sleep Mode) và chiến lược đánh thức định kỳ, đảm bảo khả năng hoạt động bền bỉ với nguồn pin độc lập.
- Phân hệ Truyền dẫn (Gateway & Protocol): Xây dựng Gateway trung tâm dựa trên ESP32, đóng vai trò chuyển đổi giao thức (Protocol Bridge) giữa mạng LoRa và mạng WiFi/Internet. Nhóm thực hiện đã thiết kế một giao thức truyền thông tùy biến trên lớp vật lý LoRa để giải quyết vấn đề định địa chỉ và tránh xung đột gói tin cho mạng lưới quy mô lớn.
- Phân hệ Xử lý và Giám sát (Server & Dashboard): Phát triển hệ thống Local IoT Server sử dụng ngôn ngữ Python và Framework Flask. Hệ thống sở hữu cơ sở dữ liệu dạng tệp (CSV) được tối ưu hóa cho truy xuất đa luồng, tích hợp các thuật toán lọc nhiễu, chống trùng lặp dữ liệu và cơ chế tự động phát hiện topo mạng. Bên cạnh giao diện giám sát cục bộ, hệ thống còn tích hợp khả năng đồng bộ dữ liệu thời gian thực lên nền tảng đám mây ThingsBoard, hỗ trợ quản lý từ xa.

Kết quả thực nghiệm trên mô hình thực tế cho thấy hệ thống hoạt động ổn định với bán kính truyền dẫn đáp ứng yêu cầu 100 hecta, độ trễ toàn trình dưới 30 giây và sai số đo lường nằm trong ngưỡng cho phép. Sản phẩm của đồ án chứng minh tính khả thi trong việc ứng dụng công nghệ LoRa vào nông nghiệp chính xác tại Việt Nam.

Sinh viên thực hiện
(Ký và ghi rõ họ tên)

MỤC LỤC

DANH MỤC THUẬT NGỮ VÀ TỪ VIẾT TẮT	8
DANH MỤC HÌNH VẼ	9
DANH MỤC BẢNG BIỂU	12
CHƯƠNG 1. TỔ CHỨC VÀ QUẢN LÝ NHÓM.....	13
1.1 Sắp xếp các đầu việc chính	13
1.1.1 Yêu cầu dự án.....	13
1.1.2 Thiết lập mức độ ưu tiên và lý do	14
1.2 Giới thiệu thành viên	15
1.3 Kế hoạch triển khai dự án	16
1.3.1 Milestone.....	16
1.3.2 Gantt chart.....	17
1.4 Tóm tắt công việc hoàn thành & đánh giá đóng góp	19
CHƯƠNG 2. LỰA CHỌN GIẢI PHÁP & TỔNG QUAN THIẾT KẾ	21
2.1 Tổng quan đề tài.....	21
2.1.1 Mục tiêu và phạm vi đề tài.....	21
2.1.2 Phân tích yêu cầu kĩ thuật	22
2.2 Lựa chọn công nghệ truyền thông	23
2.2.1 Các công nghệ truyền thông không dây phổ biến & ứng dụng	23
2.2.2 Ưu và nhược điểm các công nghệ truyền thông & so sánh	30
Cơ chế Truy cập (CSMA/CA vs. Scheduled Access) và Tính Di động (Mobility)	32
2.3 Lựa chọn Module truyền thông và cấu hình mạng.....	32
2.3.1 Các cấu trúc mạng truyền tin không dây.....	32
2.3.2 Sơ đồ tổng quan kiến trúc mạng của hệ thống	37
2.4 Thiết kế phân bố các node trong mạng cảm biến không dây.....	38
2.4.1 Thiết kế phân bố Sensor Node.	38
2.4.2 Thiết kế phân bố Relay Node và Gateway.....	39

2.5 Lựa chọn linh kiện cho các node	43
2.5.1 Khối xử lý trung tâm	43
2.5.2 Khối truyền thông và tính toán phạm vi truyền thông	44
2.5.3 Khối cảm biến nhiệt độ - độ ẩm	45
2.5.4 Khối cảm biến độ ẩm đất	46
2.6 Sơ đồ khái tổng thể của hệ thống.....	47
CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN PHẦN CỨNG 49	
3.1 Thiết kế tổng thể.....	49
3.1.1 Sensor node	49
3.1.2 Relay node.....	49
3.1.3 Gateway	50
3.2 Thông số kỹ thuật nguồn hệ thống.....	51
3.2.1 Nguồn đầu vào và mạch sạc pin Li-ion TP4056.....	51
3.2.2 Pin Lithium YDL 7565121 3.7V 8000mAh.....	53
3.3 Thông số kỹ thuật các cảm biến	54
3.3.1 Cảm biến DHT22 - Nhiệt độ độ ẩm.....	54
3.3.2 Que đo độ ẩm đất, mạch chuyển đổi	55
3.4 Thông số kỹ thuật Module truyền thông	56
3.4.1 Module LoRa SX1278.....	56
3.4.2 Anten LoRa (433MHz)	57
3.5 Module STM32F103C8T6.....	58
3.5.1 Tổng quan về dòng vi điều khiển STM32	58
3.5.2 Chi tiết về module STM32F103C8T6	59
3.5.3 Các chế độ hoạt động của module STM32F103C8T6.....	60
3.6 Module ESP32	61
3.7 Bảng tổng hợp chi phí linh kiện.....	62
3.8 Sơ đồ nguyên lý và ghép nối Module.....	62
3.8.1 Sơ đồ nguyên lý các khối trong hệ thống mạng.....	62
3.8.2 Ghép nối module thử nghiệm	65
3.9 Sơ đồ PCB.....	67
3.9.1 Lựa chọn tiết diện dây.....	67

3.9.2	Lựa chọn tụ điện và điện trở	67
3.10	Đóng gói các node và đánh giá	67

CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ CÁCH THỨC VẬN HÀNH HỆ THỐNG VÀ GIAO THỨC TRUYỀN THÔNG..... 70

4.1	Kiến trúc mạng.....	70
4.1.1	Lựa chọn kiến trúc tổng quan của mạng	70
4.1.2	Sơ đồ kiến trúc và thành phần trong mạng	72
4.2	Cách thức vận hành hệ thống cần thiết kế.....	73
4.2.1	Tương tác và thứ tự tương tác của các thành phần trong hệ thống	73
4.2.2	Trạng thái và điều kiện chuyển đổi trạng thái của các thành phần trong hệ thống	75
4.2.3	Cấu trúc bản tin và Opcode	77
4.3	Pha Đăng ký (registration phase) và các bước thiết lập hệ thống	77
4.3.1	Quy trình đăng ký giữa Relay Node và Gateway	78
4.3.2	Quy trình đăng ký giữa Sensor Node và Relay Node	79
4.4	Pha Báo cáo và định tuyến dữ liệu trong mạng	82
4.4.1	Chu trình pha Báo cáo.....	82
4.4.2	Cấu trúc bản tin pha Báo cáo:	83
4.5	Cơ chế đa truy nhập phân chia theo thời gian (TDMA)	85
4.5.1	Sensor Node với Relay Node (Chia khe thời gian).....	85
4.5.2	Relay Node với Gateway (Phân phát độ lệch thời gian thức dậy).....	86

CHƯƠNG 5. ĐÁNH GIÁ TÍNH KHẢ THI HỆ THỐNG 88

5.1	Tính toán và đánh giá quỹ đường truyền – Link Budget:	88
5.1.1	Cơ sở lý thuyết và Mô hình toán học	88
5.1.2	Thiết lập tham số bài toán và tính toán Link Budget:	89
5.1.3	Đánh giá Link Budget:	90
5.2	Tính toán năng lượng tiêu thụ của Sensor node	90
5.2.1	Kích bản vận hành và thông số năng lượng phần cứng	90
5.2.2	Tính toán năng lượng tiêu thụ và tuổi thọ cho Sensor node	91
5.2.3	Tính toán năng lượng tiêu thụ và tuổi thọ cho Relay node.....	92
5.2.4	Nhận xét và Đánh giá tính khả thi:	92

CHƯƠNG 6. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN PHẦM MỀM NHÚNG94

6.1 Thiết kế tổng thể.....	94
6.1.1 Sensor node	94
6.1.2 Relay node.....	96
6.1.3 Gateway	98
6.2 Thiết kế đọc dữ liệu từ DHT22	100
6.2.1 Đặc điểm tín hiệu	100
6.2.2 Lưu đồ thuật toán, phân tích chi tiết	101
6.3 Thiết kế đọc dữ liệu từ que đo độ ẩm đất và mạch chuyển đổi	105
6.4 Báo lỗi và phương pháp xử lý	106
6.4.1 Xử lý báo lỗi cho Relay Node.....	106
6.4.2 Xử lý báo lỗi cho Relay Node.....	107

CHƯƠNG 7. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN SERVER.....109

7.1 Tổng quan và vai trò của Server	109
7.2 Kiến trúc hệ thống và Môi trường triển khai.....	110
7.2.1 Kiến trúc phần mềm tổng thể	111
7.2.2 Lựa chọn giao thức truyền thông	112
7.2.3 Môi trường và quy trình cài đặt hệ thống	112
7.3 Thiết kế cơ sở dữ liệu	113
7.3.1 Tổ chức lưu trữ dữ liệu	113
7.3.2 Cơ chế đảm bảo toàn vẹn dữ liệu (Thread Safety)	116
7.4 Giải thuật và luồng xử lý dữ liệu	116
7.4.1 Cơ chế tự động phát hiện mạng	116
7.4.2 Quy trình xử lý và làm sạch dữ liệu.....	117
7.4.3 Cơ chế đồng bộ dữ liệu lên cloud	119
7.5 Thiết kế Giao diện Giám sát	122
7.5.1 Công nghệ Frontend và Bộ cục tổng thể.....	123
7.5.2 Chức năng Quản lý cấu hình (Manager View)	123
7.5.3 Chức năng Giám sát Tổng quan (General View)	125
7.5.4 Chức năng Giám sát Chi tiết và Lịch sử (Detail View)	127
7.6 Giao diện lập trình ứng dụng (RESTful API)	128

CHƯƠNG 8. XÂY DỰNG THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ	131
8.1 Thủ nghiệm linh kiện.....	131
8.1.1 Kiểm thử cảm biến	131
8.1.2 Kiểm thử module truyền thông	131
8.1.3 Kiểm thử các chế độ STM32	131
8.1.4 Kiểm thử mạch sạc và mức tiêu thụ pin.....	132
8.2 Thủ nghiệm truyền thông.....	132
8.2.1 Thủ nghiệm lỗi truyền thông 1 (mô tả rõ)	132
8.2.2 Thủ nghiệm lỗi truyền thông 2 (mô tả rõ)	132
8.2.3 Thủ nghiệm thêm node vào mạng.....	132
8.2.4 Thủ nghiệm chu kỳ thu dữ liệu và cảnh báo	132
8.3 Thực nghiệm cuối kì.....	132
8.3.1 Mô tả hệ thống thực nghiệm	132
8.3.2 Kịch bản thực nghiệm	133
8.3.3 Kết quả thực nghiệm	134
CHƯƠNG 9. ĐÁNH GIÁ VÀ KẾT LUẬN	136
9.1 Đánh giá kết quả thực nghiệm cuối cùng.....	136
9.2 Đánh giá mức độ hoàn thành dự án	137
9.3 Kết luận cuối và hướng phát triển, mở rộng	138
TÀI LIỆU THAM KHẢO	140
PHỤ LỤC	142
A. Các chuẩn khoa học có đề cập	142

DANH MỤC THUẬT NGỮ VÀ TỪ VIẾT TẮT

Thuật ngữ	Ý nghĩa
ACs	Access Points
BLE	Bluetooth Low Energy
I2C	Giao tiếp nội bộ tích hợp (Inter-Integrated Circuit)
IEEE	Viện Kỹ sư Điện và Điện tử (Institute of Electrical and Electronics Engineer)
IoT	Internet vạn vật (Internet of Things)
ISO	Tổ Chức Tiêu Chuẩn Quốc Tế (International Organization for Standardization)
MISO	Master In, Slave Out (SPI)
MOSI	Master Out, Slave In (SPI)
MQTT	Giao thức truyền tin nhắn hàng đợi từ xa (Message Queuing Telemetry Transport)
RSSI	Chỉ số cường độ tín hiệu nhận Received Signal Strength Indicator

DANH MỤC HÌNH VẼ

HÌNH 1-1: MILESTONE & KẾ HOẠCH TRIỀN KHAI DỰ ÁN	17
HÌNH 1-2: GANTT CHART PHÂN CHIA CÔNG VIỆC BÁO CÁO VÀ THUYẾT TRÌNH.....	17
HÌNH 1-3: GANTT CHART PHÂN CHIA CÔNG VIỆC LỰA CHỌN LINH KIỆN VÀ PHẦN CỨNG	18
HÌNH 1-4: GANTT CHART PHÂN CHIA CÔNG VIỆC THIẾT KẾ TRUYỀN THÔNG DỮ LIỆU VÀ PHẦN MỀM NHÚNG	18
HÌNH 1-5: GANTT CHART PHÂN CHIA CÔNG VIỆC XỬ LÝ DỮ LIỆU VÀ PHẦN MỀM	19
HÌNH 1-6: GANTT CHART PHÂN CHIA CÔNG VIỆC KIỂM THỬ VÀ ĐÁNH GIÁ.....	19
HÌNH 2-1: CÔNG NGHỆ BLUETOOTH & BLE.....	23
HÌNH 2-2: CÔNG NGHỆ ZIGBEE.....	24
HÌNH 2-3: CÔNG NGHỆ WI-FI	26
HÌNH 2-4: CÔNG NGHỆ LoRA	27
HÌNH 2-5: CÔNG NGHỆ NB-IOT	28
HÌNH 2-6: CÔNG NGHỆ LTE	29
HÌNH 2-7: CÁU TRÚC MẠNG SAO (STAR TOPOLOGY).....	33
HÌNH 2-8: CÁU TRÚC MẠNG LUỐI (MESH TOPOLOGY)	34
HÌNH 2-9: CÁU TRÚC MẠNG CÂY (TREE TOPOLOGY)	35
HÌNH 2-10: SƠ ĐỒ CÁU TRÚC MẠNG CỦA HỆ THỐNG.....	38
HÌNH 2-11 PHÂN BỐ CÁC SENSOR NODE (MÀU XANH)	39
HÌNH 2-12: PHƯƠNG ÁN PHÂN BỐ 1	40
HÌNH 2-13: PHƯƠNG ÁN PHÂN BỐ 2	41
HÌNH 2-14: PHƯƠNG ÁN PHÂN BỐ 3	42
HÌNH 2-15. MÔ HÌNH TRUYỀN THÔNG LoRa GIỮA 2 NÚT CẢM BIẾN	44
HÌNH 2-16. ĐỘ NHẠY SX1278	44
HÌNH 2-17: SƠ ĐỒ KHỐI TỔNG THỂ CỦA HỆ THỐNG.....	48
HÌNH 3-1: MẠCH SẠC XẢ TP4056.....	51
HÌNH 3-2 PIN Li-ION 113450P	53
HÌNH 3-3 MODULE CẢM BIẾN DHT22	54
HÌNH 3-4 CẢM BIẾN ĐỘ ÂM ĐẤT HW-080 VÀ MẠCH CHUYỂN ĐỔI LM393	55
HÌNH 3-5 MODULE LoRa RA-02	56
HÌNH 3-6 ANTENE LoRa	58
HÌNH 3-7: DATASHEET STM32F103C8T6.....	59
HÌNH 3-8 MODULE ESP32 WROOM	61
HÌNH 3-9 MODULE LM393 VÀ HW-080	62
HÌNH 3-10 MẠCH CHUYỂN ĐỔI CỦA DHT22	63
HÌNH 3-11 XUNG THẠNH ANH CỦA STM32F103C8T6.....	63
HÌNH 3-12 KHỐI NGUỒN VÀ BẢO VỆ PIN	64
HÌNH 3-13 SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ MODULE ESP32 WROOM.....	65

HÌNH 3-14 GHÉP NỐI NGOẠI VI KHỐI SENSOR NODE	66
HÌNH 3-15 GHÉP NỐI NGOẠI VI KHỐI RELAY NODE	66
HÌNH 3-16 SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ GHÉP NỐI KHỐI GATEWAY	67
HÌNH 3-17 MẠCH PCB CỦA RELAY NODE VÀ SENSOR NODE.....	68
HÌNH 4-1: SƠ ĐỒ KIẾN TRÚC VÀ CÁC THÀNH PHẦN TRONG MẠNG.....	72
HÌNH 4-2: SEQUENCE DIAGRAM VÀ CÁU TRÚC BẢN TIN PHA ĐĂNG KÝ GIỮA RELAY VÀ GATEWAY/SERVER.....	78
DỰA VÀO HÌNH 4-3 LUÔNG HOẠT ĐỘNG CỦA PHA ĐĂNG KÝ GIỮA RELAY VÀ GATEWAY DIỄN RA NHƯ SAU:.....	78
HÌNH 4-4: SEQUENCE DIAGRAM CHO PHA ĐĂNG KÝ GIỮA SENSOR NODE VÀ RELAY NODE	80
HÌNH 4-5: CHU TRÌNH HOẠT ĐỘNG VÀ CÁU TRÚC CÁC TRƯỜNG BẢN TIN TRONG PHA ĐĂNG KÝ GIỮA SENSOR NODE VÀ RELAY NODE	81
HÌNH 4-6: SEQUENCE DIAGRAM CÁC BẢN TIN GỬI TRONG PHA BÁO CÁO VÀ CÁU TRÚC CÁC TRƯỜNG	83
HÌNH 5-1: THÔNG SỐ ĐỘ NHẠY THU TẠI CÁC SPREADING FACTOR (SF) CỦA MODULE LoRa SX1278	89
HÌNH 6-1: FLOWCHART CHU TRÌNH LÀM VIỆC CỦA SENSOR NODE.....	95
HÌNH 6-2: FLOWCHART CHU TRÌNH LÀM VIỆC CỦA RELAY NODE	97
HÌNH 6-3: FLOWCHART CHU TRÌNH LÀM VIỆC CỦA GATEWAY	99
HÌNH 6-4: FLOWCHART CỦA STM32F103C8T6 GỬI TIN HIỆU BẮT ĐẦU ĐỌC CẢM BIÉN DHT22	101
HÌNH 6-5: FLOWCHART STM32F103C8T6 ĐỌC TỪNG BIT CỦA DHT22	103
HÌNH 6-6: FLOW CHART ĐỌC ĐẦY ĐỦ DỮ LIỆU CỦA DHT22.....	104
HÌNH 6-7: FLOWCHART ĐỌC CẢM BIÉN ĐỘ ÂM ĐẤT VÀ XỬ LÝ SÓ LIỆU	106
HÌNH 7-1: TỔNG QUAN KIẾN TRÚC HỆ THỐNG	110
HÌNH 7-2: CÁU TRÚC THƯ MỤC HỆ THỐNG	111
HÌNH 7-3: THƯ VIỆN YÊU CẦU	113
HÌNH 7-4: ADV.CSV.....	115
HÌNH 7-5: CYCLE.CSV.....	115
HÌNH 7-6: DATA.CSV	115
HÌNH 7-7: MSG.CSV	115
HÌNH 7-8: OLD_DATA.CSV	115
HÌNH 7-9: GIAO DIỆN THEO DÕI TRÊN THINGSBOARD	119
HÌNH 7-10: CÁU HÌNH KẾT NỐI THINGSBOARD.....	120
HÌNH 7-11: DỮ LIỆU CỦA MỘT CẢM BIÉN THEO THỜI GIAN THỰC	121
HÌNH 7-12: ATTRIBUTE CỦA CẢM MỘT CẢM BIÉN ĐÃ KHAI BÁO RELAY	122
HÌNH 7-13: MÀN HÌNH QUẢN LÝ.....	123
HÌNH 7-14: XÓA BỎ RELAY KHỎI HỆ THỐNG	124

HÌNH 7-15: TÙY CHỈNH THAM SỐ VÀ KHỞI ĐỘNG HỆ THỐNG	124
HÌNH 7-16: CẤU HÌNH NGUỒNG CẢNH BÁO	125
HÌNH 7-17: MÀN HÌNH GIÁM SÁT TỔNG QUÁT TRẠNG THÁI BÌNH THƯỜNG	126
HÌNH 7-18: MÀN HÌNH GIÁM SÁT TỔNG QUÁT CẢNH BÁO NHIỆT ĐỘ.....	126
HÌNH 7-19: MÀN HÌNH GIÁM SÁT CHI TIẾT CẢM BIẾN 0XFE	127
HÌNH 7-20: MÀN HÌNH GIÁM SÁT CHI TIẾT CẢM BIẾN 0XFD.....	128
HÌNH 7-21: MÀN HÌNH GIÁM SÁT CHI TIẾT CẢM BIẾN 0XFC	128
HÌNH 8-1 TERMINAL CỦA RELAY NODE VÀ SENSOR NODE.....	135
HÌNH 8-2 SERVER BROKER	135

DANH MỤC BẢNG BIỂU

BẢNG 1-1: YÊU CẦU CHO DỰ ÁN MÔN HỌC EE452 VÀ THIẾT LẬP MỨC ĐỘ UU TIÊN	14
BẢNG 1-2: GIỚI THIỆU THÀNH VIÊN DỰ ÁN	16
BẢNG 2-1: SO SÁNH CÁC CÔNG NGHỆ TRUYỀN THÔNG KHÔNG DÂY	31
BẢNG 2-2: SO SÁNH CÁC SƠ ĐỒ CẤU TRÚC MẠNG	35
BẢNG 2-3: MỘT SỐ LINH KIỆN CHO KHỐI TRUNG TÂM.....	43
BẢNG 2-4: MỘT SỐ LỰA CHỌN LINH KIỆN CẢM BIẾN NHIỆT ĐỘ - ĐỘ ÂM	45
BẢNG 2-5: MỘT SỐ LỰA CHỌN LINH KIỆN CẢM BIẾN ĐO ĐỘ ÂM ĐÁT.....	46
BẢNG 3-1: THÔNG SỐ MẠCH SẠC XẢ TP4056.....	52
BẢNG 3-2: THÔNG SỐ PIN LI-ION 113450P	53
BẢNG 3-3:THÔNG SỐ CỦA CẢM BIẾN DHT22	54
BẢNG 3-4: THÔNG SỐ CỦA MẠCH CHUYỂN ĐỔI LM393	55
BẢNG 3-5: THÔNG SỐ CỦA MODULE LoRa RA-02	57
BẢNG 3-6: THÔNG SỐ CỦA MODULE STM32F103C8T6.....	59
BẢNG 3-7: CÁC CHẾ ĐỘ HOẠT ĐỘNG CỦA STM32F103C8T6	60
BẢNG 3-8: THÔNG SỐ CỦA MODULE ESP32 WROOM	61
BẢNG 4-1: SO SÁNH UU/NHUỘC ĐIỂM GIỮA CÁC KIẾN TRÚC MẠNG KHÔNG DÂY PHỐ BIỂN.....	70
BẢNG 4-2: BẢNG TỔNG HỢP CÁC FUNCTION CODE SỬ DỤNG TRONG HỆ THỐNG	77
BẢNG 4-3: MÔ TẢ CÁC TRƯỜNG TRONG CẤU TRÚC BẢN BTIN DỮ LIỆU SENSOR NODE GỬI CHO RELAY QUẢN LÝ	83
BẢNG 4-4: MÔ TẢ CÁC TRƯỜNG BẢN TIN CHUYỂN TIẾP DỮ LIỆU TỪ RELAY SLÊN GATEWWAY.....	84
BẢNG 4-5: CẤU TRÚC PAYLOAD DỮ LIỆU CỦA MỖI SENSOR NODECẤU TRÚC PAYLOAD DỮ LIỆU CỦA MỖI SENSOR NODE	85
BẢNG 5-1: DÒNG TIÊU THỤ CỦA CÁC LINH KIỆN PHẦN CỨNG.....	90
BẢNG 7-1: YÊU CẦU CẤU HÌNH PHẦN CỨNG VÀ PHẦN MỀM CHO SERVER	112
BẢNG 7-2: CẤU TRÚC CÁC TỆP DỮ LIỆU TRONG HỆ THỐNG	114
BẢNG 7-3: DANH SÁCH CÁC RESTFUL API CHÍNH CỦA HỆ THỐNG	129

CHƯƠNG 1. TỔ CHỨC VÀ QUẢN LÝ NHÓM

Để đảm bảo dự án thiết kế mạng cảm biến không dây giám sát nhiệt độ và độ ẩm trên diện tích 100 hecta được triển khai hiệu quả và đúng tiến độ, việc thiết lập cơ cấu tổ chức nhóm và xây dựng kế hoạch làm việc chi tiết là bước khởi đầu tiên quyết định. Chương này sẽ trình bày về phương pháp phân chia công việc, quy trình phối hợp giữa các thành viên cũng như lộ trình thực hiện cụ thể để đáp ứng các yêu cầu khắt khe về mặt kỹ thuật và thời gian của môn học.

1.1 Sắp xếp các đầu việc chính

1.1.1 Yêu cầu dự án

TT	Nội dung	Mức độ ưu tiên
1	Yêu cầu đo lường: <ul style="list-style-type: none">- Dải đo: -10°C ÷ 50°C với nhiệt độ, 0–100 %RH (độ ẩm không khí) và 0–60% Vol (độ ẩm đất).- Độ chính xác: ±0.5 °C và ±2% RH (không khí), ±3% Vol (độ ẩm đất).- Độ phân giải hiển thị: 0.1°C và 0.1 %RH.- Thời gian đo một mẫu : <60s. (nâng cao < 10s)	1
2	Yêu cầu nguồn và năng lượng tiêu thụ: <ul style="list-style-type: none">- Thiết bị sử dụng pin (Nâng cao: sử dụng năng lượng mặt trời để tăng thời gian hoạt động).- Tuổi thọ pin/nút: ≥ 2 năm (với chế độ tiết kiệm năng lượng).- Pin có thể thay thế, sạc lại qua năng lượng tái tạo.	1
3	Yêu cầu kích thước và trọng lượng: <ul style="list-style-type: none">- Kích thước (dự kiến): 50 cm x 80 cm- Có tiềm năng phục vụ chuẩn chống nước IP65- Trọng lượng (dự kiến): <150g.	3
4	Yêu cầu truyền thông và mạng: <ul style="list-style-type: none">- Công nghệ RF ưu tiên có vùng phủ rộng,- Bán kính truyền nhận mỗi nút: ≥ 100 m để phủ 100 hecta.- Gateway trung tâm có thể có kết nối Internet qua WiFi/4G.	1
5	Yêu cầu truyền thông và mạng: <ul style="list-style-type: none">- Độ trễ thấp nhất thu thập dữ liệu: < 30 s (nâng cao: < 5 s).	2

	- Tối thiểu: 100 nút cảm biến (nâng cao: mở rộng hàng nghìn nút).	
6	Yêu cầu phần mềm & giao diện Phần mềm máy tính: - Thu thập giá trị đo từ thiết bị đo, quản lý dữ liệu, xuất báo cáo dạng excel. - Giao diện theo mẫu thống nhất.	2
7	Yêu cầu phần mềm & giao diện Phần mềm máy tính: - Cảnh báo vượt ngưỡng: LED tại nút + thông báo qua server. - Có thể cấu hình ngưỡng nhiệt độ, độ ẩm và chu kỳ đo từ xa.	3
8	Yêu cầu mở rộng & nâng cao - Update firmware OTA (Over The Air) (tính năng nâng cao) - Tích hợp thuật toán tiết kiệm năng lượng thông minh (adaptive duty cycle). - Hỗ trợ phân tích dữ liệu cho ứng dụng nông nghiệp chính xác (ví dụ: dự báo tưới tiêu...).	3
9	Ràng buộc triển khai - Mỗi nhóm tối đa 3 sinh viên. - Cần lập kế hoạch triển khai 13 tuần: khảo sát – thiết kế – lập trình – thử nghiệm – báo cáo.	1

Bảng 1-1: Yêu cầu cho dự án môn học EE452 và thiết lập mức độ ưu tiên

1.1.2 Thiết lập mức độ ưu tiên và lý do

- Việc thiết lập mức độ ưu tiên cho các yêu cầu dự án được trình bày trong Bảng 1.1. Các mức độ ưu tiên này được định nghĩa và áp dụng như sau:
 - Mức độ 1 (Bắt buộc): Đây là các yêu cầu cốt lõi, mang tính chất bắt buộc (mandatory) để định hình và đảm bảo sự thành công cơ bản của dự án. Các hạng mục này xác định chức năng nền tảng của hệ thống và phải được hoàn thành trước tiên.
 - Mức độ 2 (Ưu tiên cao): Bao gồm các yêu cầu quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng, hiệu suất và tính hoàn chỉnh của giải pháp. Các hạng mục này được ưu tiên thực hiện sau hoặc song song với Mức độ 1 để tối ưu hóa tiến độ và đảm bảo chất lượng sản phẩm.
 - Mức độ 3 (Ưu tiên thấp): Gồm các tính năng mở rộng hoặc nâng cao (nice to have), không ảnh hưởng trực tiếp đến chức năng cốt lõi. Các hạng mục này sẽ được thực hiện sau khi đã hoàn thành Mức độ 1 và có thể được triển khai song song với Mức độ 2, tùy thuộc vào và thời gian của nhóm.
- Lý do thiết lập ưu tiên:

Việc phân loại và gán mức độ ưu tiên được xác định dựa trên hai yếu tố then chốt: (1) Mục tiêu cốt lõi của môn học "Mạng cảm biến không dây" (Wireless Sensor Network - WSN) và (2) Yêu cầu đặc thù của bài toán thực tế.

Trọng tâm của môn học là thiết kế và vận hành *mạng* truyền thông. Do đó, các yêu cầu liên quan đến công nghệ RF (Radio Frequency), giao thức truyền thông, kiến trúc mạng, và khả năng quản lý (scaling) số lượng lớn các nút cảm biến được đặt ở mức ưu tiên cao nhất (Mức độ 1).

Thêm vào đó, bài toán đặt ra là giám sát một diện tích quy mô lớn (100 hecta), điều này áp đặt các ràng buộc kỹ thuật nghiêm ngặt. Hệ thống đòi hỏi công nghệ truyền thông phải có vùng phủ rộng (long-range) và chiến lược quản lý năng lượng hiệu quả (low-power) để đảm bảo tuổi thọ pin. Vì vậy, các yêu cầu về dài đo, độ chính xác của cảm biến (Mức độ 1) và khả năng quản lý tối thiểu 100 nút (Mức độ 2) là tối quan trọng để hệ thống có thể hoạt động tin cậy trong môi trường triển khai thực tế.

➤ Một số lưu ý điều chỉnh:

Một số hạng mục được điều chỉnh ưu tiên dựa trên thực tế nguồn lực của nhóm:

- Yêu cầu về nguồn: Hạng mục "Pin có thể thay thế, sạc lại qua năng lượng tái tạo" có mức độ ưu tiên chung là 1. Tuy nhiên, nhóm sẽ tập trung hoàn thiện giải pháp sử dụng pin (ưu tiên 1), trong khi đó, tiêu mục "sử dụng năng lượng tái tạo" (ví dụ: năng lượng mặt trời) sẽ được điều chỉnh sang Mức độ 2 (Ưu tiên cao). Lý do là đây là một lĩnh vực đòi hỏi chuyên môn sâu mà các thành viên trong nhóm chưa có kinh nghiệm thực tiễn.
- Cảnh báo vượt ngưỡng: Hạng mục "Cảnh báo vượt ngưỡng: LED tại nút + thông báo qua server" được xếp ở Mức độ 3. Mặc dù vậy, do phần "Thông báo qua server" có liên quan trực tiếp đến việc phát triển phần mềm máy chủ (Mức độ 2) và phần "LED tại nút" có khối lượng công việc không lớn, nhóm dự kiến sẽ phát triển tính năng này song song với quá trình hoàn thiện server (Mức độ 2).

1.2 Giới thiệu thành viên

	<p>Họ và tên: Nguyễn Trung Kiên MSSV: 20210500 Phụ trách công việc: + Quản lý công việc + Phát triển Local server quản lý thiết bị + Phát triển Dashboard Cloud + Phát triển Gateway + Cấu hình bản tin</p>
---	---

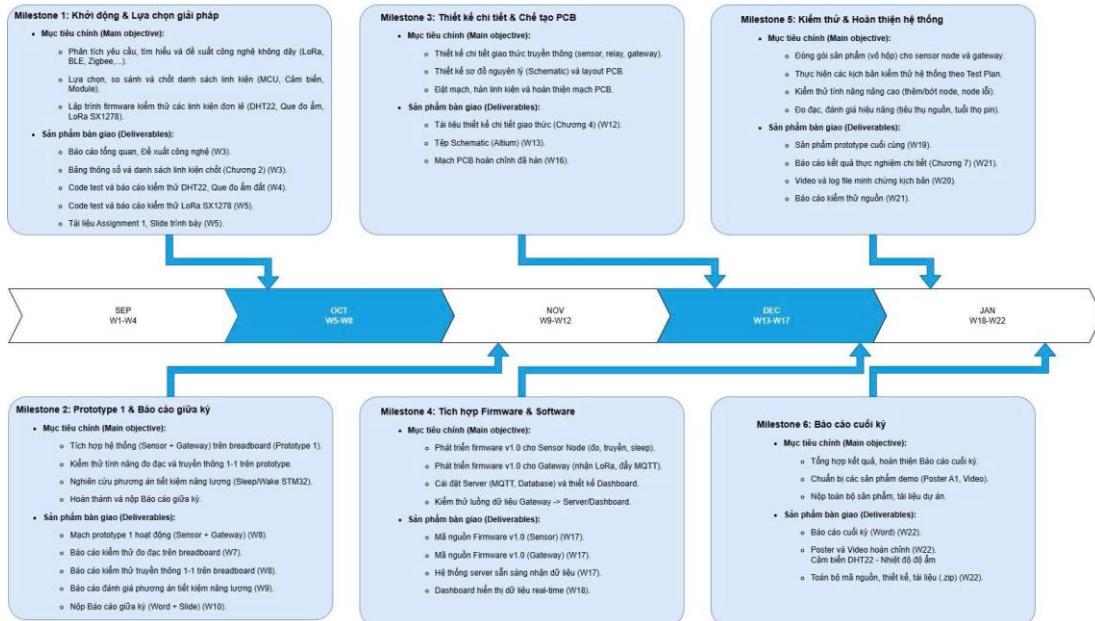
	<p>Họ và tên: Vũ Quang Nhật Hải MSSV: 20222125 Phụ trách công việc: + Phát triển Sensor Node, Relay Node và Gateway + Cấu hình bản tin + Tạo danh sách lệnh + Hoàn thiện Slide</p>
	<p>Họ và tên: Nguyễn Anh Tú MSSV: 20222423 Phụ trách công việc: + Phát triển Sensor Node và Relay Node + Cấu hình bản tin + Lựa chọn phần cứng. + Chỉnh sửa Video + Hoàn thiện Slide</p>

Bảng 1-2: *Giới thiệu thành viên dự án*

1.3 Kế hoạch triển khai dự án

1.3.1 Milestone

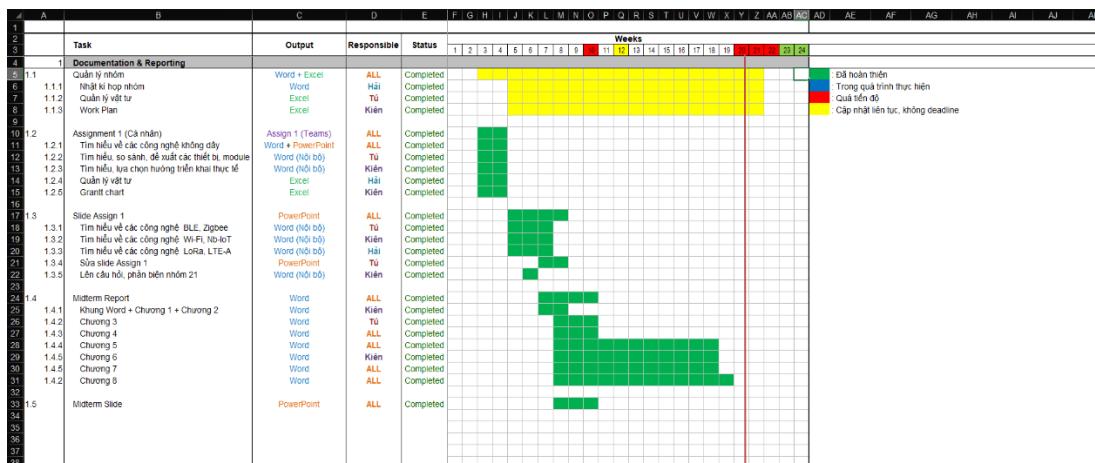
Quá trình thực hiện dự án được hoạch định chi tiết dựa trên Gantt chart và được chia thành 6 mốc Milestone quan trọng. Các mốc này được trải đều từ giai đoạn khởi động (W1) đến khi hoàn thành sản phẩm (W22). Mỗi mốc đều xác định rõ các mục tiêu chính cần đạt và các sản phẩm bàn giao cụ thể.



Hình 1-1: Milestone & kế hoạch triển khai dự án

1.3.2 Gantt chart

Để quản lý và theo dõi tiến độ dự án một cách chi tiết, nhóm đã xây dựng một Gantt chart chi tiết

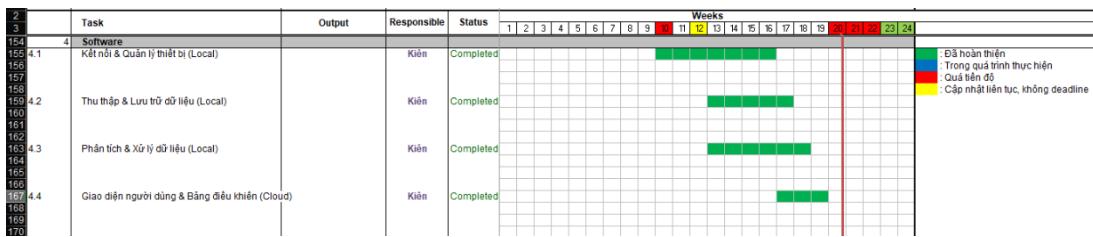


Hình 1-2: Gantt chart phân chia công việc báo cáo và thuyết trình

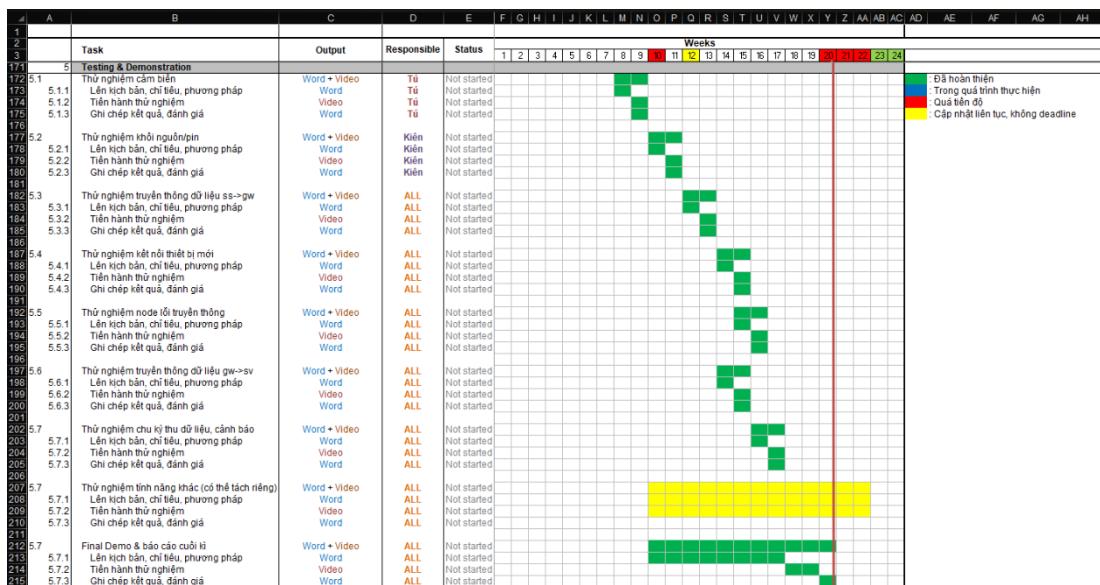
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
	Task	Output	Responsible	Status	Weeks																											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
44	2 Hardware																															
45	2.1.1	Phản ứng yếu cầu bài toán	Word (Nội bộ)	ALL	Completed																											
46	2.1.2	Lựa chọn cảm biến độ nhạy	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
47	2.1.3	Lựa chọn cảm biến độ ẩm	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
48	2.1.4	Lựa chọn cảm biến độ ẩm	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
49	2.1.5	Lựa chọn công nghệ Module truyền thông	Word (Nội bộ)	Hải	Completed																											
50	2.1.6	Lựa chọn MCU sensor node	Word (Nội bộ)	Hải	Completed																											
51	2.1.7	Lựa chọn MCU gateway	Word (Nội bộ)	Hải	Completed																											
52	2.1.8	Lựa chọn ăng-ten nguồn sensor node	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
53	2.2	Kiểm tra thử nghiệm, đánh giá yêu cầu	Word (Nội bộ)	ALL	Completed																											
54	2.2.1	Kiểm thử Module DHT22	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
55	2.2.2	Kiểm thử Quę đeo độ ẩm, mạch chuyển đổi	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
56	2.2.3	Kiểm thử Module LoRa SX1278	Word (Nội bộ)	Hải	Completed																											
57	2.2.4	Kiểm thử MCU STM32F103CBT6	Word (Nội bộ)	Hải	Completed																											
58	2.3	Test thay mạch cảm biến Breadboard	Word (Nội bộ)	ALL	Completed																											
59	2.3.1	Test tính năng độ ẩm	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
60	2.3.2	Test tính năng truyền thông	Word (Nội bộ)	Hải	Completed																											
61	2.3.3	Test các chế độ / chuyển đổi chế độ	Word (Nội bộ)	ALL	Completed																											
62	2.3.4	Test tổng thể, đánh giá tổng quát	Word (Nội bộ)	Word	Completed																											
63	2.4	Test nguồn hệ thống	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
64	2.4.1	Test độ ổn định của nguồn	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
65	2.4.2	Đánh giá mức tiêu thụ, tuổi thọ pin	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
66	2.4.3	Hiệu suất và tối ưu nguồn	Word (Nội bộ)	Tú	Completed																											
67	2.5	PCB	Allium	ALL	Overdue																											
68	2.5.1	Schematic	Allium	Tú	Completed																											
69	2.5.2	PCB / Đặt mạch	Allium	Tú	Completed																											
70	2.5.3	Hàn linh kiện	Allium	Tú	Completed																											
71	2.5.4	Test thông mạch, đánh giá tổng quát	Allium	ALL	Overdue																											
72	2.6	Đóng gói sản phẩm hoàn chỉnh	Prototype	ALL	Completed																											
73	2.6.1	Đóng gói, lắp đặt sensor node	Prototype	ALL	Completed																											
74	2.6.2	Đóng gói, lắp đặt Gateway	Prototype	ALL	Completed																											
75																																
76																																
77																																
78																																
79																																
80																																
81																																
82																																
83																																
84																																

Hình 1-3: Gantt chart phân chia công việc lựa chọn linh kiện và phần cứng

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
	Task	Output	Responsible	Status	Weeks																											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
85	3 Hardware																															
86	3.1	Firmware hỗ trợ kiểm thử cảm biến	C/C++ code + Word	Tú	Completed																											
87	3.1.1	Firmware STM32 test DHT22	C/C++ code	Tú	Completed																											
88	3.1.2	Firmware STM32 test qua độ ẩm	C/C++ code	Tú	Completed																											
89	3.1.3	Tổng hợp/danh giá	Word	Tú	Completed																											
90	3.2	Firmware hỗ trợ kiểm thử Module LoRa SX1278	C/C++ code + Word	ALL	Completed																											
91	3.2.1	Thiết kế phương án truyền thông	Word	ALL	Completed																											
92	3.2.2	Test truyền nhận với các Spreading Factor	Word	ALL	Completed																											
93	3.2.3	Test truyền nhận với các bandwidth	Word	ALL	Completed																											
94	3.2.4	Test truyền nhận với nhiều Module	Word	ALL	Completed																											
95	3.2.5	Các kịch bản kiểm thử khác	Word	ALL	Completed																											
96	3.2.6	Lựa chọn tham số, đánh giá ổn định	Word	ALL	Completed																											
97	3.3	Firmware test các chế độ STM32	C/C++ code + Word	ALL	Completed																											
98	3.3.1	Phương án chuyển chế độ 1	C/C++ code	Tú	Completed																											
99	3.3.2	Phương án chuyển chế độ 2	C/C++ code	Tú	Completed																											
100	3.3.3	Đánh giá các phương án	C/C++ code	ALL	Completed																											
101	3.3.4	Firmware chuyển chế độ sensor node	C/C++ code	Hải	Completed																											
102	3.3.5	Firmware chuyển chế độ gateway	C/C++ code	Tú	Completed																											
103	3.4	Thiết kế phương án truyền relay	Word	Hải	Completed																											



Hình 1-5: Gantt chart phân chia công việc xử lý dữ liệu và phần mềm



Hình 1-6: Gantt chart phân chia công việc kiểm thử và đánh giá

Biểu đồ Gantt trực quan hóa toàn bộ kế hoạch dự án trong 23 tuần, chia công việc thành 5 hạng mục chính: (1) Documentation & Reporting (Tài liệu & Báo cáo), (2) Hardware (Phần cứng), (3) Firmware (Phần mềm nhúng), (4) Software (Phần mềm Server/Dashboard), và (5) Testing & Demonstration (Kiểm thử & Demo). Biểu đồ này xác định rõ thời gian bắt đầu, thời gian kết thúc, các công việc phụ thuộc lẫn nhau (dependencies) và người chịu trách nhiệm chính (Responsible) cho từng đầu việc.

1.4 Tóm tắt công việc hoàn thành & đánh giá đóng góp

Như vậy, nhóm đã hoàn thành việc xây dựng khung làm việc, phân công trách nhiệm cụ thể cho từng thành viên và thống nhất được lộ trình triển khai dự án. Với sự chuẩn bị kỹ lưỡng về mặt nhân sự và kế hoạch, nhóm có đủ cơ sở để bước vào giai đoạn nghiên cứu chuyên sâu. Chương tiếp theo sẽ đi vào phân tích chi tiết các yêu cầu kỹ thuật và đưa ra những lựa chọn công nghệ phù hợp nhất cho hệ thống.

CHƯƠNG 2. LỰA CHỌN GIẢI PHÁP & TỔNG QUAN THIẾT KẾ

Trên cơ sở kế hoạch và mục tiêu đã xác định tại Chương 1, bước quan trọng tiếp theo là tìm kiếm các giải pháp kỹ thuật tối ưu để giải quyết bài toán giám sát môi trường trên quy mô rộng lớn. Chương 2 sẽ tập trung phân tích các yêu cầu cốt lõi của đề tài, từ đó đánh giá và lựa chọn công nghệ truyền thông, dòng vi điều khiển cũng như các cảm biến phù hợp, đồng thời phác thảo sơ đồ khái tổng quát của toàn bộ hệ thống.

2.1 Tổng quan đề tài

Trong bối cảnh nông nghiệp hiện đại, việc giám sát chặt chẽ các điều kiện môi trường là yếu tố then chốt để đảm bảo năng suất cây trồng. Tại Việt Nam, với xu hướng phát triển các cánh đồng mẫu lớn có diện tích lên tới hàng trăm hecta, các phương pháp đo đặc thù công hoặc hệ thống có dây truyền thống bộc lộ nhiều hạn chế về chi phí, khả năng vận hành và bảo trì.

Đề tài Thiết kế mạng cảm biến không dây giám sát nhiệt độ và độ ẩm trên các cánh đồng diện tích 100 hecta được thực hiện nhằm giải quyết bài toán trên. Hệ thống ứng dụng công nghệ mạng cảm biến không dây (WSN) để thu thập dữ liệu tự động từ các điểm đo phân tán, giúp người quản lý nông nghiệp có được thông tin chính xác theo thời gian thực để ra quyết định tưới tiêu và chăm sóc hợp lý.

2.1.1 Mục tiêu và phạm vi đề tài

Mục tiêu của đề tài: Mục tiêu chính là xây dựng một hệ thống mạng cảm biến hoàn chỉnh có khả năng hoạt động ổn định tại môi trường thực tế. Hệ thống cần đạt được các tiêu chí sau:

- Thiết kế các nút cảm biến đo lường chính xác nhiệt độ, độ ẩm không khí và độ ẩm đất.
- Xây dựng mạng truyền thông không dây tầm xa, đảm bảo khả năng thu thập dữ liệu ổn định trên diện tích rộng.
- Phát triển hệ thống thu thập trung tâm và phần mềm giám sát để lưu trữ, hiển thị và cảnh báo dữ liệu cho người dùng.

Phạm vi của đề tài:

- Về đối tượng nghiên cứu: Tập trung vào công nghệ truyền tin không dây công suất thấp LoRa, kiến trúc mạng cảm biến và kỹ thuật thiết kế mạch tiết kiệm năng lượng.

- Về không gian triển khai: Hệ thống được tính toán để phủ sóng cho diện tích canh tác khoảng 100 hecta. Khoảng cách giữa các nút và bộ thu trung tâm phải đảm bảo kết nối liền mạch trong phạm vi này.
- Về cấu hình hệ thống:
 - Phần cứng: Sử dụng vi điều khiển STM32F103C8T6, module giao tiếp LoRa SX1278 và các cảm biến chuyên dụng như DHT22 (đo không khí), HS0163 (đo đất).
 - Phần mềm: Lập trình firmware cho các nút cảm biến, thiết bị Gateway và xây dựng giao diện giám sát trên máy tính.

2.1.2 Phân tích yêu cầu kỹ thuật

Dựa trên đề bài và yêu cầu thực tế của dự án, hệ thống cần đáp ứng các chỉ tiêu kỹ thuật cụ thể dưới đây:

1. Yêu cầu về đo lường Hệ thống cần thu thập ba thông số môi trường quan trọng với độ chính xác cao:
 - Nhiệt độ môi trường: Dải đo từ -10 đến 50 độ C; độ chính xác +/- 0.5 độ C.
 - Độ ẩm không khí: Dải đo từ 0% đến 100% RH; độ chính xác +/- 2% RH.
 - Độ ẩm đất: Dải đo từ 0% đến 60% Vol; độ chính xác +/- 3% Vol.
 - Độ phân giải hiển thị cho các giá trị là 0.1 đơn vị.
 - Thời gian lấy mẫu và phản hồi của cảm biến cần nhỏ hơn 60 giây.
2. Yêu cầu về năng lượng Do thiết bị đặt tại hiện trường rộng lớn, khó tiếp cận để bảo trì thường xuyên, yêu cầu về năng lượng là rất khắt khe:
 - Các nút cảm biến hoạt động độc lập bằng pin.
 - Tuổi thọ pin phải đạt tối thiểu 2 năm nhờ vào các thuật toán tiết kiệm năng lượng (chế độ ngủ).
3. Yêu cầu về truyền thông và mạng Để phủ sóng toàn bộ diện tích 100 hecta, hệ thống truyền tin cần đạt các thông số:
 - Sử dụng công nghệ vô tuyến có vùng phủ rộng, ưu tiên công nghệ LoRa.
 - Bán kính truyền nhận của mỗi nút mạng phải đạt tối thiểu 100 mét.
 - Hệ thống trung tâm (Gateway) phải có khả năng quản lý ít nhất 100 nút cảm biến và có tiềm năng mở rộng lớn hơn trong tương lai.
 - Độ trễ khi thu thập dữ liệu từ các nút về trung tâm phải nhỏ hơn 30 giây.

4. Yêu cầu về thiết kế và môi trường

- Thiết bị cần có kích thước nhỏ gọn và trọng lượng nhẹ (dưới 150g) để dễ dàng lắp đặt trên cây trồm hoặc cọc đỡ.
- Vỏ hộp thiết bị cần đáp ứng tiêu chuẩn chống nước và bụi (tương đương IP65) để hoạt động bền bỉ dưới điều kiện mưa nắng ngoài trời.

5. Yêu cầu về chức năng phần mềm

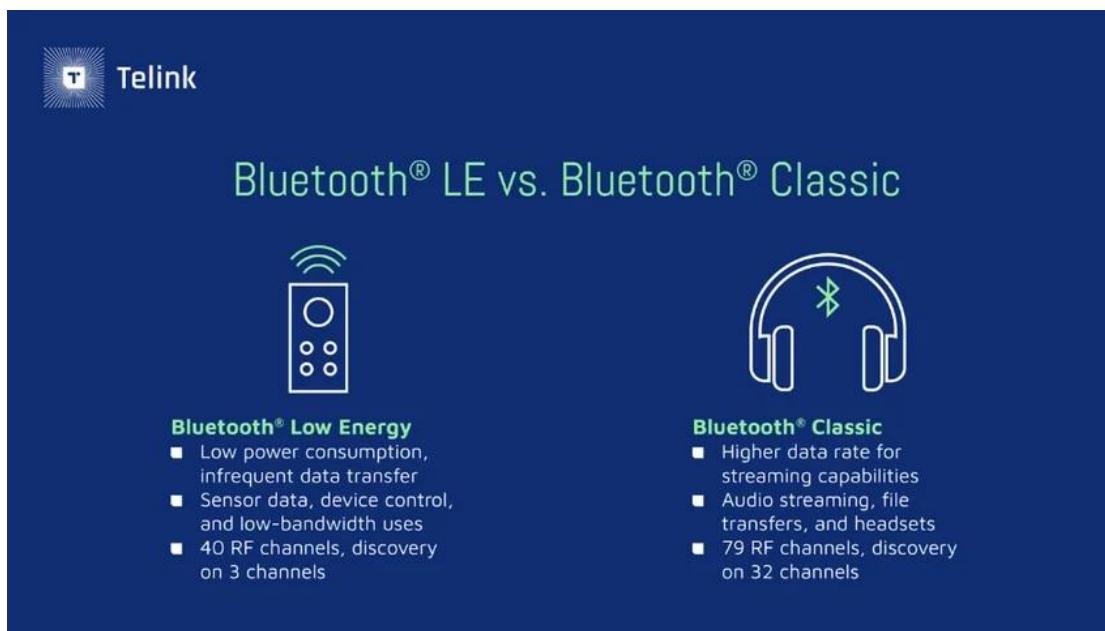
- Phần mềm giám sát phải hiển thị trực quan các giá trị đo, hỗ trợ xuất báo cáo dạng tệp Excel.
- Có chức năng cảnh báo khi thông số môi trường vượt ngưỡng cài đặt (báo đèn LED tại chỗ và thông báo trên phần mềm).
- Hỗ trợ cấu hình từ xa các tham số như ngưỡng cảnh báo và chu kỳ đo đặc để thuận tiện cho việc vận hành.

2.2 Lựa chọn công nghệ truyền thông

2.2.1 Các công nghệ truyền thông không dây phổ biến & ứng dụng

A. Bluetooth Low Energy (BLE)

BLE là một sự phát triển của Bluetooth cổ điển, được thiết kế để tiết kiệm năng lượng tối đa, tập trung vào khả năng tương thích với thiết bị di động.



Hình 2-1: Công nghệ Bluetooth & BLE

➤ Thiết kế Giao thức và Tương thích Di động

Tối ưu hóa Năng lượng: Mức tiêu thụ dòng điện trung bình của thiết bị BLE ở chế độ ngủ sâu (deep sleep) có thể chỉ khoảng 1 μ A . Mặc dù tốc độ dữ liệu có

thể đạt khoảng 2 Mbps, BLE ưu tiên hiệu quả năng lượng bằng cách giữ thiết bị ở chế độ ngủ gần như liên tục

Tương thích Di động: Lợi thế cạnh tranh lớn nhất của BLE là khả năng tương thích tích hợp sẵn (native support) với hầu hết các thiết bị di động (smartphone), cho phép điều khiển và giám sát từ xa mà không cần một cổng trung tâm (hub) chuyên dụng, giúp đơn giản hóa việc triển khai.

➤ Bluetooth Mesh và Khả năng Mở rộng

Mặc dù Bluetooth ban đầu hoạt động theo mô hình mạng Star (Sao), sự ra đời của Bluetooth Mesh đã cho phép các thiết bị BLE tạo thành một mạng lưới liên tục, tương tự như Zigbee Mesh.

- Mở rộng Phạm vi: BLE Mesh giải quyết giới hạn tầm ngắn điển hình của Bluetooth bằng cách cho phép tin nhắn "nhảy" qua các nút trung gian, mở rộng khả năng phủ sóng linh hoạt.
- Đảm bảo An toàn: Bluetooth Mesh cũng được thiết kế để đảm bảo an toàn và bảo mật cao cho dữ liệu và hệ thống.

➤ Hiệu suất Năng lượng Cực thấp và Dòng Ứng dụng

BLE được tối ưu hóa cho các kịch bản gửi các gói dữ liệu nhỏ không thường xuyên, giảm thiểu thời gian hoạt động của radio (time-on-air).

Ứng dụng: BLE là lựa chọn hàng đầu cho các thiết bị đeo thông minh (Wearables), cảm biến y tế (Health Sensors), khóa thông minh, và các hệ thống theo dõi tài sản nội bộ (Asset Tracking).

B. Zigbee

Zigbee là một tiêu chuẩn mở toàn cầu cho mạng lưới không dây bằng thông thấp, hoạt động dựa trên lớp PHY/MAC của IEEE 802.15.4.



Hình 2-2: Công nghệ Zigbee

➤ Kiến trúc Mạng lưới và Giao thức Lớp trên

Kiến trúc cốt lõi của Zigbee là khả năng tạo Mạng lưới (Mesh Networking).

- **Nguyên tắc Hoạt động:** Mạng Mesh cho phép thiết bị truyền dữ liệu qua các nút trung gian (hop) để đến các nút ở xa, mở rộng đáng kể phạm vi phủ sóng ngoài tầm nhìn trực tiếp (thường là 10–20 m trong nhà).
- **Tính Năng:** Mạng lưới Zigbee có khả năng tự động cấu hình (self-forming) khi thiết bị mới được thêm vào và tự phục hồi (self-healing) nếu các nút bị vô hiệu hóa hoặc bị xóa, đảm bảo độ ổn định liên tục.
- **Khả năng Mở rộng:** Zigbee có thể hỗ trợ số lượng nút mạng lớn, lên đến 60.000 nút, là yếu tố quan trọng cho các triển khai nhà thông minh hoặc tòa nhà lớn.

➤ **Tối ưu hóa Năng lượng và Tốc độ Dữ liệu Thấp**

Zigbee được thiết kế ưu tiên cho tuổi thọ pin kéo dài và truyền dữ liệu không liên tục (intermittent data transmissions).

- **Tiêu thụ Năng lượng:** Do sử dụng các chế ngự sâu hiệu quả của 802.15.4, Zigbee có mức tiêu thụ dòng điện rất thấp ở chế độ ngủ (khoảng nA), giúp kéo dài tuổi thọ pin của cảm biến.
- **Tốc độ Dữ liệu:** Tốc độ dữ liệu khô (raw, over-the-air) tối đa là 250 kbit/s ở băng tần 2.4 GHz. Tốc độ thông lượng thực tế sẽ thấp hơn do overhead gói tin, nhưng đủ cho dữ liệu cảm biến (payloads) nhỏ.

➤ **Ưu thế Cạnh tranh**

Lợi thế lớn nhất của Zigbee là tính ổn định, độ bảo mật (sử dụng mã hóa đối xứng 128-bit) và khả năng tạo mạng lưới mạnh mẽ.

C. Wi-Fi

Wi-Fi được tối ưu hóa cho thông lượng dữ liệu cao và tốc độ truy cập Internet, là công nghệ chủ đạo trong phân khúc WLAN.

➤ **Tối ưu hóa cho Thông lượng và Mô hình Mạng Dạng Sao**

Tối ưu hóa Tốc độ: Wi-Fi được thiết kế để cung cấp thông lượng dữ liệu cao (High Throughput) cho các ứng dụng đòi hỏi băng thông lớn như truyền phát đa phương tiện và hội nghị video.

Mô hình Mạng: Wi-Fi thường hoạt động theo mô hình Dạng Sao (Star), với một Điểm Truy cập (AP) trung tâm quản lý tất cả các kết nối từ các thiết bị người dùng.

Hạn chế Năng lượng: Do ưu tiên tốc độ, các phiên bản Wi-Fi truyền thống thường tiêu thụ năng lượng tương đối cao so với WPAN.



Hình 2-3: Công nghệ Wi-Fi

➤ Wi-Fi 6 (802.11ax) cho Mật độ Thiết bị Cao

Sự ra đời của Wi-Fi 6 (802.11ax) đã giải quyết các hạn chế truyền thống của Wi-Fi trong môi trường mật độ cao.

- OFDMA: Việc áp dụng kỹ thuật OFDMA cho phép phân bổ tài nguyên phổ tần hiệu quả hơn, giảm độ trễ và tăng khả năng xử lý số lượng thiết bị đồng thời. Tốc độ tổng hợp của Wi-Fi 6 có thể đạt tới 5.9 Gbps.
- TWT (Target Wake Time): Tính năng này cho phép thiết bị thỏa thuận với AP về thời gian thức dậy chính xác để nhận dữ liệu, giúp kéo dài thời gian ngủ sâu và cải thiện đáng kể hiệu quả năng lượng.

➤ Ưu thế về Tốc độ và Hạn chế về Độ trễ trong môi trường Contention

Ưu thế: Wi-Fi có ưu thế tuyệt đối về tốc độ truyền tải, lý tưởng cho các ứng dụng đòi hỏi băng thông lớn như camera an ninh HD hoặc stream media.

Hạn chế: Mặc dù Wi-Fi 6 cải thiện đáng kể, Wi-Fi vẫn hoạt động trên phổ tần không cấp phép bằng cơ chế tranh chấp CSMA/CA. Trong môi trường nhiều kênh lân cận (ACI) và tranh chấp cao, hiệu suất mạng vẫn có thể bị suy giảm nghiêm trọng (~90%) , khiến Wi-Fi không thể cam kết Chất lượng Dịch vụ (SLA-based QoS) như các công nghệ di động.

D. LoRa và LoRaWAN

LoRaWAN là một giao thức LPWAN không cấp phép, được thiết kế cho các thiết bị IoT cần truyền dữ liệu nhỏ ở khoảng cách rất xa.



Hình 2-4: Công nghệ LoRa

➤ Kỹ thuật Điều chế CSS và Phạm vi Phủ sóng

Điều chế CSS: LoRa sử dụng kỹ thuật điều chế trai phổ Chirp Spread Spectrum (CSS). CSS cung cấp độ nhạy thu (receiver sensitivity) cực kỳ cao, giúp tín hiệu có thể được giải mã ngay cả khi cường độ tín hiệu rất yếu, từ đó đạt được phạm vi phủ sóng xa.

Phạm vi: Phạm vi hoạt động điển hình là 2–5 km trong môi trường đô thị và có thể lên đến 15 km ở các khu vực nông thôn, thưa dân.

Tốc độ Dữ liệu: LoRaWAN là công nghệ tốc độ thấp, tối đa khoảng 50 kbps . Tốc độ này được điều chỉnh bởi Spreading Factor (SF) — một yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ dữ liệu, thời gian hoạt động trên không (time-on-air), và tuổi thọ pin .

➤ Giới hạn Chu kỳ Hoạt động (Duty Cycle) và Hạn chế Mạng

Nguyên lý Duty Cycle: Vì LoRaWAN hoạt động trên phổ tần không cấp phép , các cơ quan quản lý (ví dụ: ETSI ở Châu Âu) áp đặt giới hạn

Chu kỳ Hoạt động (Duty Cycle). Giới hạn này quy định tổng thời gian một thiết bị hoặc một kênh có thể truyền tải trong một khoảng thời gian nhất định (thường là 1% đối với nhiều dải phụ: 865–868 MHz).

Hạn chế Khả năng Mở rộng: Giới hạn Duty Cycle ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng mở rộng (Scalability) của mạng, vì nó giới hạn vật lý về số lượng gói dữ liệu mà mạng có thể xử lý và thời gian phản hồi (downlink) từ Gateway. Điều này khiến LoRaWAN không phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ trễ thấp và lưu lượng lớn.

➤ Ưu thế Chi phí Thấp và Ứng dụng Nông nghiệp Thông minh

Chi phí Triển khai: LoRaWAN có chi phí triển khai phần cứng nút (node) thấp nhất và không yêu cầu phí sử dụng phô tần. Tuy nhiên, nó yêu cầu tổ chức phải tự triển khai và quản lý các Gateway riêng biệt.

Ứng dụng: LoRaWAN là lựa chọn hàng đầu cho các ứng dụng IoT trên diện tích rộng, nơi yêu cầu thu thập dữ liệu không thường xuyên, như Giám sát môi trường và Nông nghiệp thông minh (giám sát độ ẩm đất, nhiệt độ, điều khiển tưới tiêu tự động).

E. NB-IoT

NB-IoT (Narrowband Internet of Things) là một công nghệ LPWAN được chuẩn hóa bởi 3GPP, hoạt động trên băng tần cấp phép.



Hình 2-5: Công nghệ NB-IoT

- Chuẩn 3GPP, Băng thông Hẹp và Thâm nhập Sâu

Băng thông Hẹp và Hiệu quả Phô tần: NB-IoT (LTE Cat NB1) sử dụng băng thông hẹp chỉ 180 kHz để tăng hiệu quả phô tần. Công nghệ này được 3GPP phát triển dựa trên nền tảng 4G/LTE.

Thâm nhập Sâu: NB-IoT được tối ưu hóa để cung cấp khả năng thâm nhập sâu trong nhà (Deep Indoor Penetration), lý tưởng cho các thiết bị lắp đặt tĩnh ở những vị trí khó tiếp cận sóng di động (ví dụ: tầng hầm, lòng đất).

Độ tin cậy: Hoạt động trên phổ tần được cấp phép (như LTE800 MHz) cung cấp môi trường truyền thông được kiểm soát, đảm bảo độ tin cậy và khả năng bảo vệ tốt hơn chống lại nhiễu so với LoRaWAN.

➤ Cơ chế Tiết kiệm Năng lượng (PSM/eDRX) và QoS Cấp phép

PSM (Power Saving Mode) và eDRX (Extended Discontinuous Reception): NB-IoT sử dụng các chế độ ngủ sâu tiên tiến của 3GPP để giảm mức tiêu thụ điện năng xuống mức microampere khi không truyền dữ liệu, tối đa hóa tuổi thọ pin.

QoS Cấp phép: Do sử dụng cơ chế Scheduled Access của mạng di động, NB-IoT có thể cung cấp Chất lượng Dịch vụ (QoS) được đảm bảo, là yếu tố thiết yếu cho các dịch vụ tiện ích công cộng quan trọng.

➤ Ưu thế về Độ tin cậy và Ứng dụng Đo lường Thông minh

Ưu thế: Khả năng hỗ trợ số lượng nút mạng cực lớn (lên đến 200.000 nút/cổng) và độ tin cậy cấp độ di động (sử dụng bảo mật 4G/LTE) khiến NB-IoT trở thành lựa chọn ưu việt cho các ứng dụng công nghiệp và tiện ích.

Ứng dụng: NB-IoT là lựa chọn ưu tiên cho các dự án Đo lường thông minh (Smart Metering) (đồng hồ điện, nước, gas), nơi thiết bị là tĩnh, cần tuổi thọ pin lâu dài và độ tin cậy truyền dữ liệu cao.

F. LTE và LTE Advanced

LTE (Long-Term Evolution) và LTE Advanced (A-LTE) là tiêu chuẩn mạng di động thế hệ thứ tư (4G), được thiết kế cho thông lượng cao, độ trễ thấp và tính di động cao.



Hình 2-6: Công nghệ LTE

➤ Tốc độ, Độ trễ Thấp và Tính năng Carrier Aggregation

Tốc độ Thông lượng: LTE Advanced là sự phát triển của LTE để tiến lên tiêu chuẩn IMT-Advanced. LTE tiêu chuẩn đã đạt tốc độ đỉnh đường xuống lên đến 326 Mb/s (20 MHz). A-LTE có tốc độ thông lượng lý thuyết lên tới 1.5 Gb/s.

Độ trễ: LTE cung cấp độ trễ cực thấp, với thời gian trễ vòng (round-trip latency) chỉ khoảng 10 ms (hoặc 5 ms đối với các phiên bản 4G/5G tiên tiến hơn).

Carrier Aggregation (CA): A-LTE sử dụng kỹ thuật Carrier Aggregation để tổng hợp tối đa năm sóng mang thành phần (Component Carrier), mỗi sóng mang có băng thông lên đến 20 MHz. Điều này cho phép mở rộng băng thông tối đa lên tới 100 MHz, là chìa khóa để đạt được tốc độ cao vượt trội.

➤ Cơ chế Truy cập Theo lịch trình và Hỗ trợ Mobility

Scheduled Access: Không giống như Wi-Fi sử dụng CSMA/CA, LTE hoạt động trên phô tần cáp phép và sử dụng cơ chế Truy cập Theo lịch trình. Trạm gốc quản lý việc phân bổ tài nguyên, loại bỏ va chạm, và cung cấp khả năng vận hành không bị nhiễu (interference-free operation).

Tính Di động (Mobility): LTE được thiết kế để hỗ trợ tính di động cao, với cơ chế chuyển giao nhanh (fast handover) giữa các trạm gốc, đảm bảo kết nối liên tục ngay cả khi thiết bị di chuyển với tốc độ cao. Tính năng này, cùng với bảo mật cấp độ SIM, làm cho LTE vượt trội so với Wi-Fi trong các ứng dụng di động quan trọng.

➤ Tối ưu hóa Năng lượng Uplink (SC-FDMA) và Ứng dụng Quan trọng

SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access): LTE sử dụng SC-FDMA cho đường lên (Uplink) thay vì OFDMA (dùng cho đường xuống). SC-FDMA tạo ra tín hiệu giống như sóng mang đơn (single-carrier-like signal) với tỉ số công suất đỉnh trên công suất trung bình (PAPR) thấp hơn. PAPR thấp là yếu tố then chốt giúp tăng hiệu quả của bộ khuếch đại công suất trên thiết bị di động, kéo dài đáng kể tuổi thọ pin trong quá trình truyền dữ liệu lên mạng.

Ứng dụng: Do độ tin cậy cao, độ trễ thấp và tính di động, LTE/A-LTE là lựa chọn hàng đầu cho các ứng dụng truyền thông quan trọng (Critical Communication), điều khiển từ xa, và vận tải.

2.2.2 Ưu và nhược điểm các công nghệ truyền thông & so sánh

Bảng này cung cấp cái nhìn trực quan về sự đánh đổi giữa các công nghệ:

Bảng 2-1: So sánh các công nghệ truyền thông không dây

Thông Số	Zigbee	BLE	Wi-Fi 6	LoRaWAN	NB-IoT	LTE/A-LTE
Phạm vi	10–100 m (Mesh)	10–50 m	30–300 m	2–15 km	10–15 km	Rất rộng
Tốc độ Dữ liệu Tối đa	250 kbps	~2 Mbps	Lên đến 5.9 Gbps	~50 kbps	200 kbps (DL)	Lên đến 1.5 Gbps
Độ Trễ Mạng	Rất thấp (< 1 giây)	Thấp	Thấp	2–3 giây (Cao)	1–5 giây (Trung bình)	Rất thấp (5–10 ms)
Tiêu thụ Năng lượng	Rất thấp	Rất thấp	Trung bình/Cao	Cực thấp	Cực thấp	Trung bình/Cao
Phổ tần	Không cấp phép	Không cấp phép	Không cấp phép	Không cấp phép	Được cấp phép	Được cấp phép
Khả năng Mở rộng	Lớn (60.000 nút)	Trung bình	Thấp	Trung bình (Giới hạn Duty Cycle)	Rất lớn (200.000 nút)	Rất lớn

Phân tích Các Trục Đánh đổi Quan trọng

➤ Tốc độ/Phạm vi và Tiêu thụ Năng lượng

Đây là trục đánh đổi cơ bản nhất trong thiết kế mạng không dây. Các công nghệ được nghiên cứu phân cực rõ rệt:

- Tập trung vào NL thấp: Các công nghệ WPAN (Zigbee, BLE) và LPWAN (LoRa, NB-IoT) hy sinh tốc độ thông lượng cao để đạt được tuổi thọ pin kéo dài (có thể lên đến nhiều năm) và tầm xa (LPWAN). LoRaWAN thường tiêu thụ ít điện năng hơn NB-IoT trong các dự án yêu cầu tốc độ làm mới cao.
- Tập trung vào Tốc độ cao: Wi-Fi và LTE/A-LTE ưu tiên thông lượng (Gigabit) và độ trễ thấp, dẫn đến yêu cầu năng lượng cao hơn và thiết bị thường cần được cấp nguồn liên tục.

➤ Phổ tần (Licensed vs. Unlicensed) và Đảm bảo QoS

Sự khác biệt về phổ tần quyết định khả năng cung cấp Chất lượng Dịch vụ (QoS):

- Phổ tần Không cấp phép (LoRaWAN, Wi-Fi): Chi phí triển khai thấp. Tuy nhiên, hoạt động trên phổ tần chia sẻ khiến QoS không thể đảm bảo (Best-

effort traffic). Đặc biệt, LoRaWAN bị ràng buộc nghiêm ngặt bởi quy định Duty Cycle , giới hạn lưu lượng truyền tải và khả năng mở rộng (scalability) của mạng.

- Phổ biến Được cấp phép (LTE, NB-IoT): Độ tin cậy cao, khả năng chống nhiễu tốt hơn. Sử dụng Cơ chế Scheduled Access cho phép nhà mạng quản lý tài nguyên tập trung và đảm bảo QoS (SLA-based QoS).

Cơ chế Truy cập (CSMA/CA vs. Scheduled Access) và Tính Di động (Mobility)

- CSMA/CA (Wi-Fi, Zigbee): Cơ chế tranh chấp này là nguyên nhân chính gây ra sự giảm hiệu suất và tăng độ trễ trong các môi trường có mật độ thiết bị cao (high contention) . Các công nghệ này có tính di động kém, không có cơ chế chuyển giao (handover) hiệu quả.
- Scheduled Access (LTE, NB-IoT): Cơ chế truy cập được quản lý tập trung bởi trạm gốc, loại bỏ va chạm , đảm bảo độ trễ thấp được cam kết (5–10 ms) và hỗ trợ tính di động liền mạch (fast handover). Đây là ưu thế tuyệt đối của LTE/A-LTE trong các ứng dụng yêu cầu di chuyển liên tục và độ tin cậy cao .

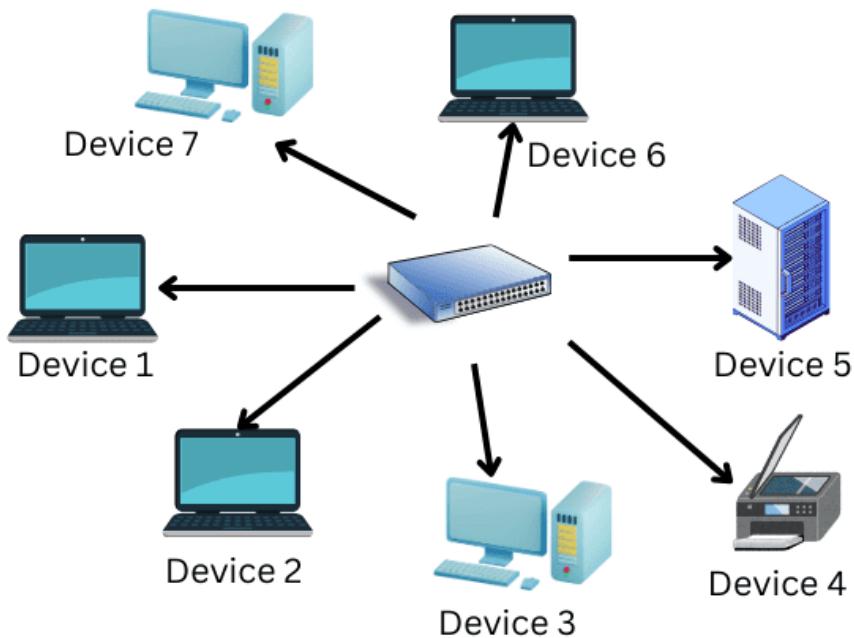
2.3 Lựa chọn Module truyền thông và cấu hình mạng

2.3.1 Các cấu trúc mạng truyền tin không dây

Trong thiết kế mạng cảm biến không dây (WSN), việc lựa chọn topo mạng (network topology) là yếu tố nền tảng quyết định đến phương thức giao tiếp, khả năng tiết kiệm năng lượng và độ tin cậy của toàn hệ thống. Có ba cấu trúc mạng cơ bản thường được áp dụng là: Cấu trúc hình sao (Star), Cấu trúc mạng lưới (Mesh) và Cấu trúc hình cây (Tree). Dưới đây là phân tích chi tiết về đặc điểm kỹ thuật và nguyên lý hoạt động của từng loại.

A. Cấu trúc mạng hình sao (Star Topology)

Đây là mô hình mạng đơn giản và phổ biến nhất, đặc biệt là trong các ứng dụng sử dụng công nghệ LoRaWAN. Mạng hình sao bao gồm một trạm trung tâm (Gateway) đóng vai trò là bộ điều phối duy nhất và nhiều nút cảm biến (End Nodes) xung quanh.



Hình 2-7: Cấu trúc mạng sao (Star Topology)

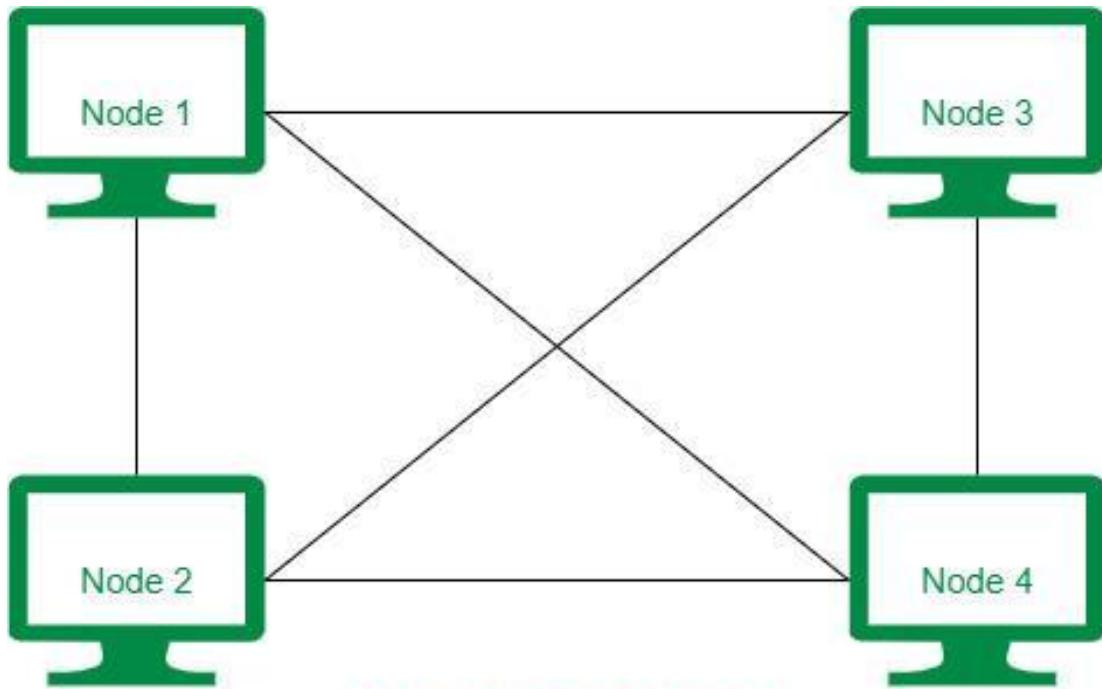
Nguyên lý hoạt động: Các nút cảm biến không giao tiếp trực tiếp với nhau. Mọi dữ liệu thu thập được từ nút con đều phải được gửi trực tiếp đến Gateway thông qua một liên kết đơn (single-hop). Gateway chịu trách nhiệm thu nhận, xử lý hoặc chuyển tiếp dữ liệu lên server.

Phân tích kỹ thuật: Ưu điểm lớn nhất của mô hình này là sự đơn giản trong đồng bộ hóa và tiết kiệm năng lượng tối đa cho các nút cảm biến. Do không phải làm nhiệm vụ chuyển tiếp dữ liệu cho nút khác, các nút cảm biến có thể duy trì trạng thái ngủ (Sleep mode) trong phần lớn thời gian hoạt động và chỉ thức dậy khi cần đo đặc hoặc gửi tin. Điều này giúp kéo dài tuổi thọ pin, phù hợp với yêu cầu hoạt động trên 2 năm của dự án. Ngoài ra, độ trễ trong mạng hình sao là thấp và có tính nhất định cao do dữ liệu chỉ đi qua một chặng đường truyền.

Tuy nhiên, nhược điểm chí mạng của cấu trúc này là phụ thuộc hoàn toàn vào Gateway. Nếu Gateway gặp sự cố, toàn bộ mạng sẽ tê liệt. Bên cạnh đó, phạm vi phủ sóng bị giới hạn bởi khả năng thu phát của cặp thiết bị xa nhất.

B. Cấu trúc mạng lưới (Mesh Topology)

Cấu trúc mạng lưới là mô hình trong đó các nút mạng có khả năng kết nối đa điểm. Một nút không chỉ đóng vai trò thu thập dữ liệu mà còn hoạt động như một bộ định tuyến (Router) để chuyển tiếp dữ liệu cho các nút lân cận



Mesh Topology.

Hình 2-8: Cấu trúc mạng lưới (Mesh Topology)

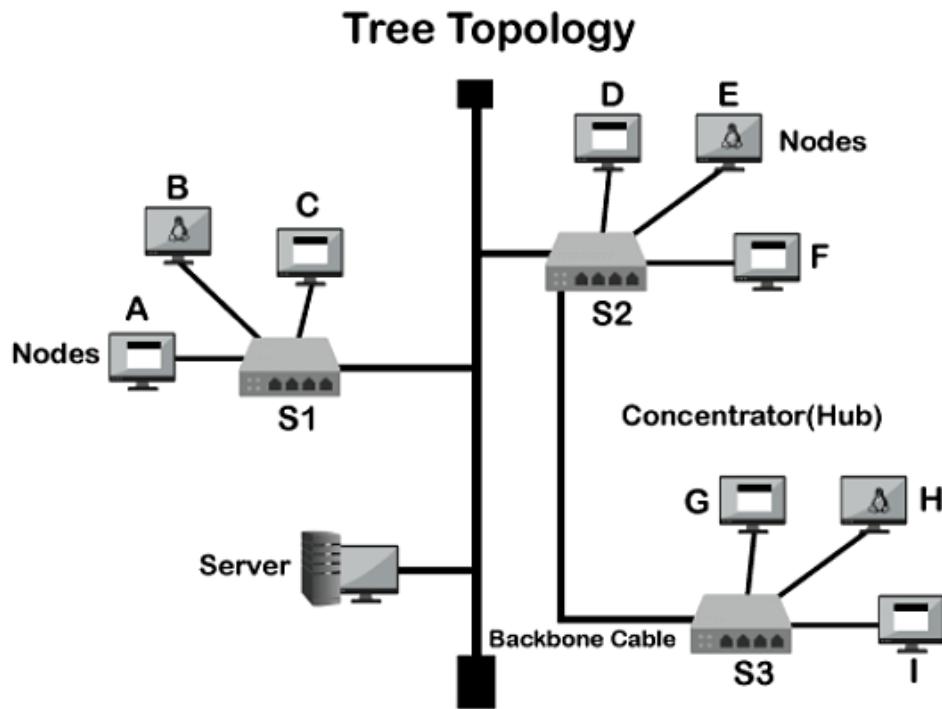
Nguyên lý hoạt động: Dữ liệu từ một nút nguồn có thể đi qua nhiều nút trung gian (multi-hop) để đến được đích cuối cùng là Gateway. Hệ thống sử dụng các thuật toán định tuyến phức tạp để tự động tìm đường đi tối ưu và có khả năng tự cấu hình (self-organizing) cũng như tự phục hồi (self-healing).

Phân tích kỹ thuật: Ưu thế vượt trội của Mesh là khả năng mở rộng vùng phủ sóng rất lớn và độ tin cậy cao. Nếu một liên kết bị đứt hoặc một nút bị hỏng, mạng sẽ tự động tìm đường đi khác thay thế, giúp hệ thống hoạt động bền bỉ trong môi trường nhiều vật cản.

Tuy nhiên, sự phức tạp này đi kèm với cái giá phải trả về năng lượng. Để sẵn sàng chuyển tiếp dữ liệu bất cứ lúc nào, các nút mạng (hoặc ít nhất là các nút đóng vai trò Router) không thể rơi vào trạng thái ngủ sâu, dẫn đến tiêu hao năng lượng lớn. Đồng thời, việc truyền tin qua nhiều chặng làm tăng độ trễ và khiến việc quản lý đồng bộ thời gian trở nên khó khăn.

C. Cấu trúc mạng hình cây (Tree Topology)

Cấu trúc hình cây, hay còn gọi là cấu trúc phân cấp (Cluster Tree), là sự kết hợp giữa tính chất mở rộng của mạng lưới và tính phân cấp của mạng hình sao.



Hình 2-9: Cấu trúc mạng cây (Tree Topology)

Nguyên lý hoạt động: Mạng được tổ chức theo các tầng từ gốc (Root/Gateway) đến các cành và lá. Gateway là nút gốc cao nhất. Các nút ở tầng dưới gửi dữ liệu lên nút cha (Parent Node) ở tầng trên. Nút cha có nhiệm vụ thu thập dữ liệu từ các nút con và chuyển tiếp về gốc.

Phân tích kỹ thuật: Mô hình này giúp mở rộng phạm vi mạng tốt hơn so với cấu trúc hình sao và quản lý đơn giản hơn so với mạng lưới. Nó cho phép kiểm soát luồng dữ liệu theo cấp bậc, dễ dàng phát hiện lỗi tại từng nhánh.

Nhược điểm của mô hình này là vấn đề nút cổ chai (bottle-neck). Các nút ở gần gốc cây phải xử lý lưu lượng dữ liệu rất lớn từ toàn bộ các nhánh dưới gửi lên, dẫn đến việc cạn kiệt năng lượng nhanh hơn các nút lá. Nếu một nút cha bị hỏng, toàn bộ nhánh con phía dưới sẽ mất kết nối với trung tâm.

Dưới đây là bảng tổng hợp so sánh ba cấu trúc mạng dựa trên các tiêu chí kỹ thuật quan trọng, phục vụ cho việc ra quyết định lựa chọn giải pháp cho dự án.

Bảng 2-2: So sánh các sơ đồ cấu trúc mạng

Tiêu chí so sánh	Cấu trúc hình sao (Star)	Cấu trúc mạng lưới (Mesh)	Cấu trúc hình cây (Tree)
------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------

Nguyên lý truyền tin	Truyền trực tiếp 1 chặng (Single-hop) từ nút đến trung tâm.	Truyền đa chặng (Multi-hop), các nút tự định tuyến qua nhau.	Truyền phân cấp theo tầng (Hierarchical), từ con sang cha.
Độ phức tạp triển khai	Tháp. Dễ thiết kế, cài đặt và bảo trì.	Cao. Phức tạp về thuật toán định tuyến và cấu hình.	Trung bình. Cần quy hoạch rõ vai trò cha - con.
Tiêu thụ năng lượng (Nút cảm biến)	Rất thấp. Nút có thể ngủ hoàn toàn khi không đo. Tối ưu cho pin.	Cao. Nút phải thức để lắng nghe và chuyển tiếp dữ liệu.	Không đồng đều. Nút lá thấp, nhưng nút cha (router) tiêu thụ cao.
Phạm vi phủ sóng	Bị giới hạn bởi công suất thu phát của nút và Gateway.	Rất rộng. Dễ dàng mở rộng bằng cách thêm nút trung gian.	Rộng. Mở rộng được nhờ các nút trung gian theo nhánh.
Độ tin cậy và ổn định	Phụ thuộc hoàn toàn vào Gateway (Single point of failure).	Rất cao. Có tính năng tự phục hồi khi mất kết nối cục bộ.	Trung bình. Nếu nút cha hỏng, toàn bộ nhánh con bị mất kết nối.
Độ trễ truyền tin	Tháp và ổn định (Do chỉ qua 1 chặng).	Cao và khó dự đoán (Do qua nhiều chặng và xử lý định tuyến).	Trung bình, tăng dần theo số cấp (độ sâu) của cây.
Khả năng xuyên vật cản	Kém hơn nếu vật cản nằm chắn giữa nút và Gateway.	Tốt. Tín hiệu có thể đi vòng qua vật cản nhờ các nút khác.	Tốt hơn Star, nhưng phụ thuộc vào vị trí nút cha.
Tải trọng lên Gateway	Cao. Gateway phải xử lý đồng thời tất cả các kết nối.	Thấp hơn. Gateway chỉ nhận dữ liệu từ các nút lân cận.	Trung bình. Gateway nhận dữ liệu từ các nút cấp 1.
Chi phí phần cứng	Tháp nhất. Số lượng thiết bị tối thiểu.	Cao. Cần mật độ nút dày đặc để duy trì kết nối lưới.	Trung bình. Có thể cần thêm các nút Repeater chuyên dụng.
Phù hợp với dự án (LoRa/100ha)	Rất phù hợp. Tận dụng tầm xa của	Ít phù hợp. Phức tạp, khó đảm bảo	Có thể xem xét nếu địa hình quá phức

	LoRa, đảm bảo pin > 2 năm.	năng lượng cho các nút router.	tạp, nhưng khó quản lý pin.
--	----------------------------	--------------------------------	-----------------------------

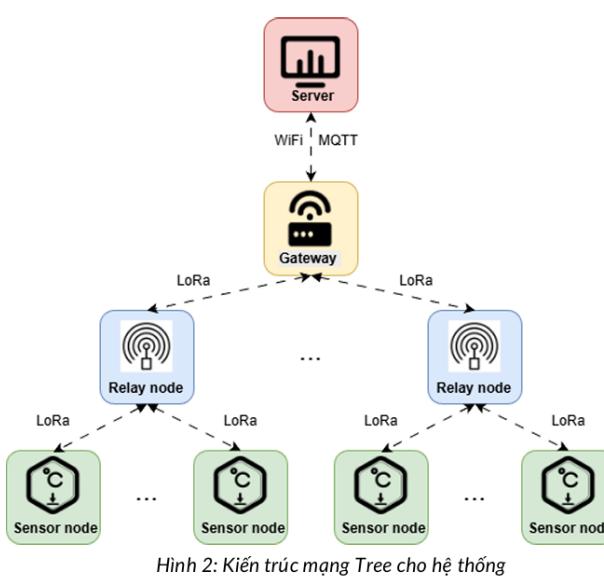
2.3.2 Sơ đồ tổng quan kiến trúc mạng của hệ thống

Sau khi cân nhắc kỹ lưỡng các ưu nhược điểm của từng mô hình mạng truyền tin (Star, Mesh, Tree) và đối chiếu với yêu cầu thực tế của dự án giám sát trên diện tích rộng lớn 100 hecta, nhóm thực hiện quyết định lựa chọn cấu trúc mạng hình cây (Tree Topology) làm giải pháp triển khai chính thức. Quyết định này dựa trên 5 luận cứ kỹ thuật quan trọng sau đây:

1. Thứ nhất, khả năng mở rộng phạm vi phủ sóng hiệu quả: Với diện tích canh tác lên tới 100 hecta, việc sử dụng một Gateway duy nhất (như mô hình Star) sẽ gặp khó khăn trong việc đảm bảo kết nối ổn định tới các điểm biên xa nhất, đặc biệt khi gặp vật cản. Mô hình Tree cho phép bố trí các Relay Node (nút chuyển tiếp) đóng vai trò trung gian, giúp mở rộng bán kính truyền tin và đảm bảo toàn bộ khu vực đều nằm trong vùng phủ sóng chất lượng cao mà không cần tăng công suất phát quá mức cho phép.
2. Thứ hai, tối ưu hóa năng lượng cho các nút cảm biến ở xa: Trong mạng LoRa, khoảng cách truyền càng xa thì thiết bị càng phải sử dụng hệ số trai phỏ (Spreading Factor - SF) lớn, dẫn đến tiêu tốn nhiều năng lượng hơn. Nhờ có các Relay Node nằm rải rác trong mạng Tree, các Sensor Node ở xa thay vì phải truyền trực tiếp về Gateway với công suất lớn, chúng chỉ cần gửi tín hiệu ngắn tới Relay Node gần nhất. Cơ chế này giúp giảm đáng kể năng lượng tiêu thụ cho các nút cảm biến, đảm bảo mục tiêu tuổi thọ pin trên 2 năm.
3. Thứ ba, giảm tải áp lực xử lý cho Gateway trung tâm: Việc tập trung toàn bộ lưu lượng dữ liệu từ hàng trăm nút cảm biến về một điểm duy nhất dễ gây ra hiện tượng nghẽn cổ chai và mất gói tin tại Gateway. Kiến trúc phân cấp của mạng Tree cho phép các Relay Node thu thập và đệm dữ liệu từ các nhánh con trước khi chuyển tiếp về trung tâm, giúp phân tải lưu lượng và nâng cao độ ổn định cho toàn hệ thống.
4. Thứ tư, tính linh hoạt trong quản lý và mở rộng: Mô hình mạng Tree có tính module hóa cao. Khi cần mở rộng vùng giám sát sang các cánh đồng lân cận, ta chỉ cần thiết lập thêm các cụm (Cluster) mới gồm Relay và Sensor Node mà không làm ảnh hưởng đến cấu trúc mạng hiện hữu. Điều này rất phù hợp với đặc thù canh tác nông nghiệp có thể thay đổi quy mô theo từng mùa vụ.
5. Thứ năm, khả năng cài đặt lõi cục bộ: Một ưu điểm lớn của kiến trúc này là khả năng khoanh vùng sự cố. Nếu một nhánh mạng gặp trục trặc (ví dụ

do Relay Node hỏng), sự cố chỉ ảnh hưởng cục bộ đến khu vực đó, trong khi các nhánh còn lại vẫn hoạt động và gửi dữ liệu về trung tâm bình thường. Điều này giúp người vận hành dễ dàng phát hiện, bảo trì và hạn chế rủi ro tê liệt toàn bộ hệ thống.

Như vậy, với những ưu thế vượt trội về tầm phủ sóng, quản lý năng lượng và độ tin cậy, kiến trúc mạng hình cây là sự lựa chọn tối ưu nhất để hiện thực hóa bài toán giám sát môi trường nông nghiệp quy mô lớn mà nhóm đang theo đuổi. Mô hình này sẽ là nền tảng để triển khai các thiết kế chi tiết về phần cứng và giao thức truyền thông trong các phần tiếp theo của báo cáo.



- **Sensor Node (90 ~ 100):** Là thiết bị đầu cuối thực hiện việc thu thập dữ liệu môi trường.
- **Relay Node (10):** Vai trò là thiết bị trung gian, làm cầu nối giữa các cụm Sensor Node và Gateway trung tâm
- **Gateway (1):** Tiếp nhận toàn bộ dữ liệu từ mạng WSN LoRa và làm cầu nối dữ liệu đó lên hệ thống Server
- **Server (1):** Tiếp nhận, lưu trữ, xử lý và trực quan hóa dữ liệu. Giúp người vận hành có công cụ quản lý từ xa

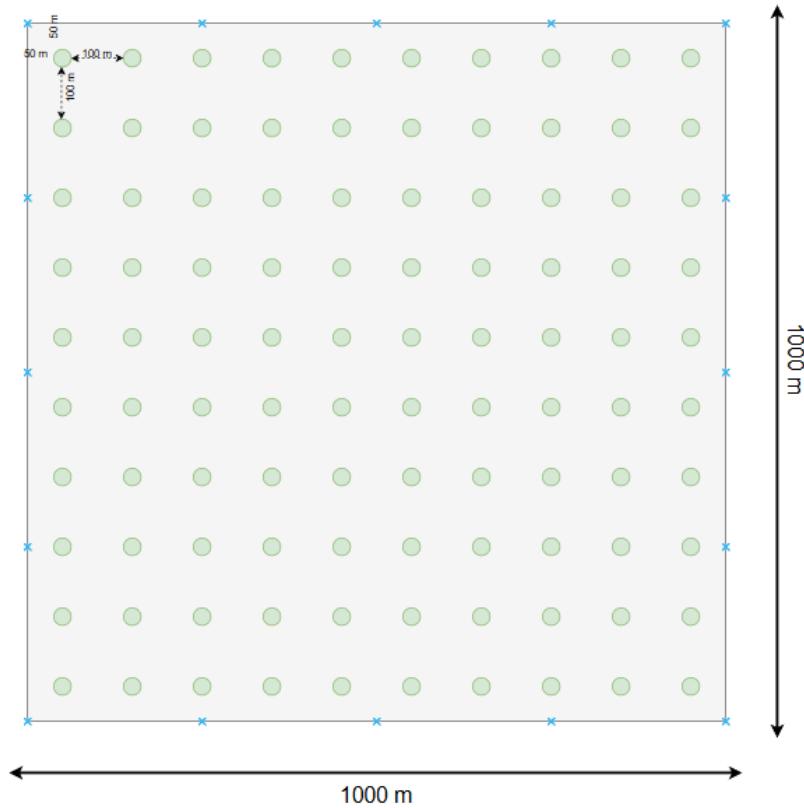
Hình 2-10: Sơ đồ cấu trúc mạng của hệ thống

2.4 Thiết kế phân bố các node trong mạng cảm biến không dây

Dựa trên yêu cầu phủ sóng diện tích 100 hecta, nhóm giả sử cành đồng hình vuông với cạnh là 1 km, phù hợp với hình dạng phô biển tại các đồng ruộng tại Việt Nam.

2.4.1 Thiết kế phân bố Sensor Node.

Hệ thống được thiết kế theo mô hình mạng hình tree mở với cấu trúc phân bố các Sensor Node như sau, thể hiện ở hình...



Hình 2-11 Phân bố các sensor node (màu xanh)

Mô hình: Sử dụng cấu trúc Lưới (Grid Topology) đều.

Mật độ: Toàn bộ khu vực 100ha được chia thành mạng lưới ô vuông gồm 10x10 ô. Tổng cộng 100 node cảm biến được đặt tại tâm của các ô này.

Khoảng cách: Khoảng cách giữa hai node lân cận theo chiều dọc và chiều ngang được thiết lập cố định là 100m.

Mục đích: Việc phân bố dạng lưới đều giúp dữ liệu thu thập được mang tính đại diện cao cho toàn bộ khu vực canh tác, tránh tình trạng dữ liệu bị thiên lệch (nơi quá dày, nơi quá thưa), đồng thời giúp việc định vị và bảo trì node sau này trở nên dễ dàng nhờ tọa độ quy ước rõ ràng.

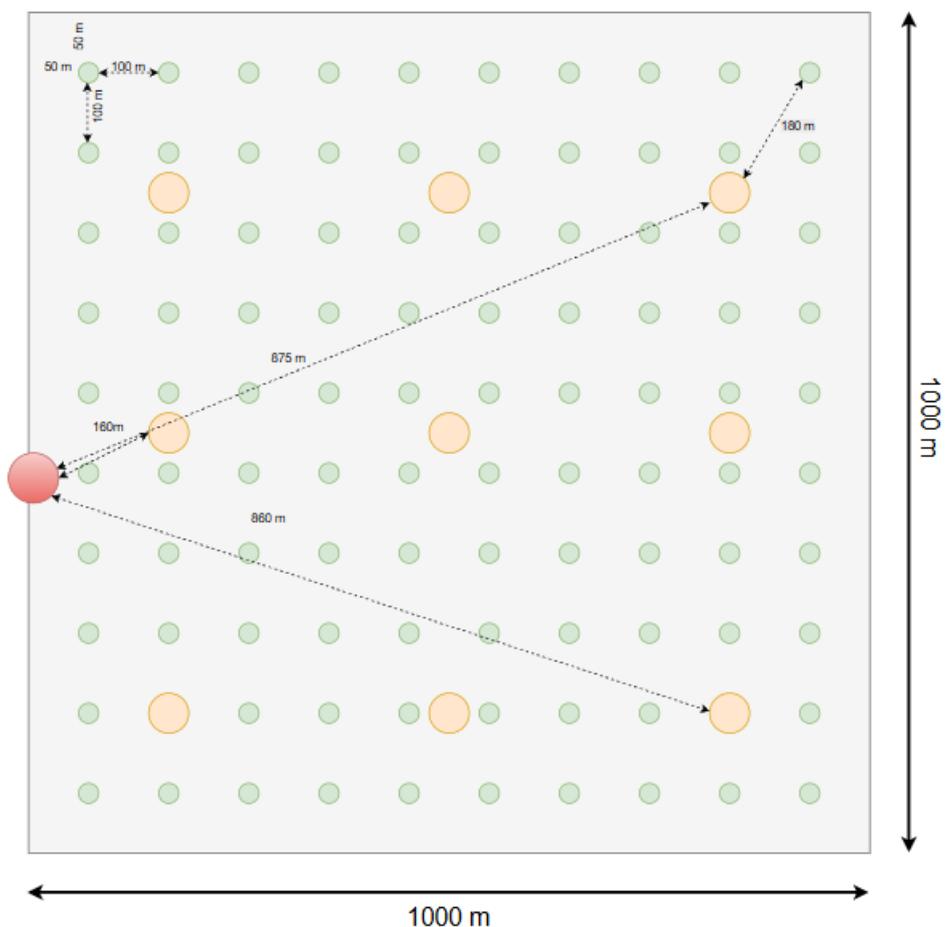
2.4.2 Thiết kế phân bố Relay Node và Gateway

Nhóm quyết định sử dụng từ 8-12 relay node phân bố trên đồng ruộng sao cho khả năng thu nhận đối với sensor node là tối ưu nhất, dưới đây là một số phương án phân bố relay node mà nhóm đã đề xuất. Có vị trí đặc biệt sensor node đặt rất gần so với relay node để đảm bảo sự bao phủ của relay node là tối ưu và hạn chế việc một sensor node mà nằm phủ tốt nhất của nhiều relay node.

Gateway được đặt bên ngoài cánh đồng tại vị trí đảm bảo kết nối thuận tiện nhất với các và được cấp phát nguồn liên tục. Tùy vào tình hình mà ta có thể chọn những phương án phân bổ hợp lý nhất.

2.4.2.1. Phương án 1

Sử dụng 9 relay node phân bố ở những vị trí như sau



Hình 2-12: Phương án phân bổ 1

Mô tả bố trí: Sử dụng 9 Relay Node (màu cam), vị trí Gateway (màu đỏ) đặt tại tọa độ mép trái, khoảng cách xa nhất đến Relay cuối cùng là đường chéo xuyên qua cánh đồng.

Tải trọng mạng: Mỗi Relay Node quản lý trung bình từ 9 đến 12 Sensor Node. Đây là mức tải trọng trung bình, phù hợp với năng lực xử lý của STM32F103.

Khoảng cách truyền dẫn:

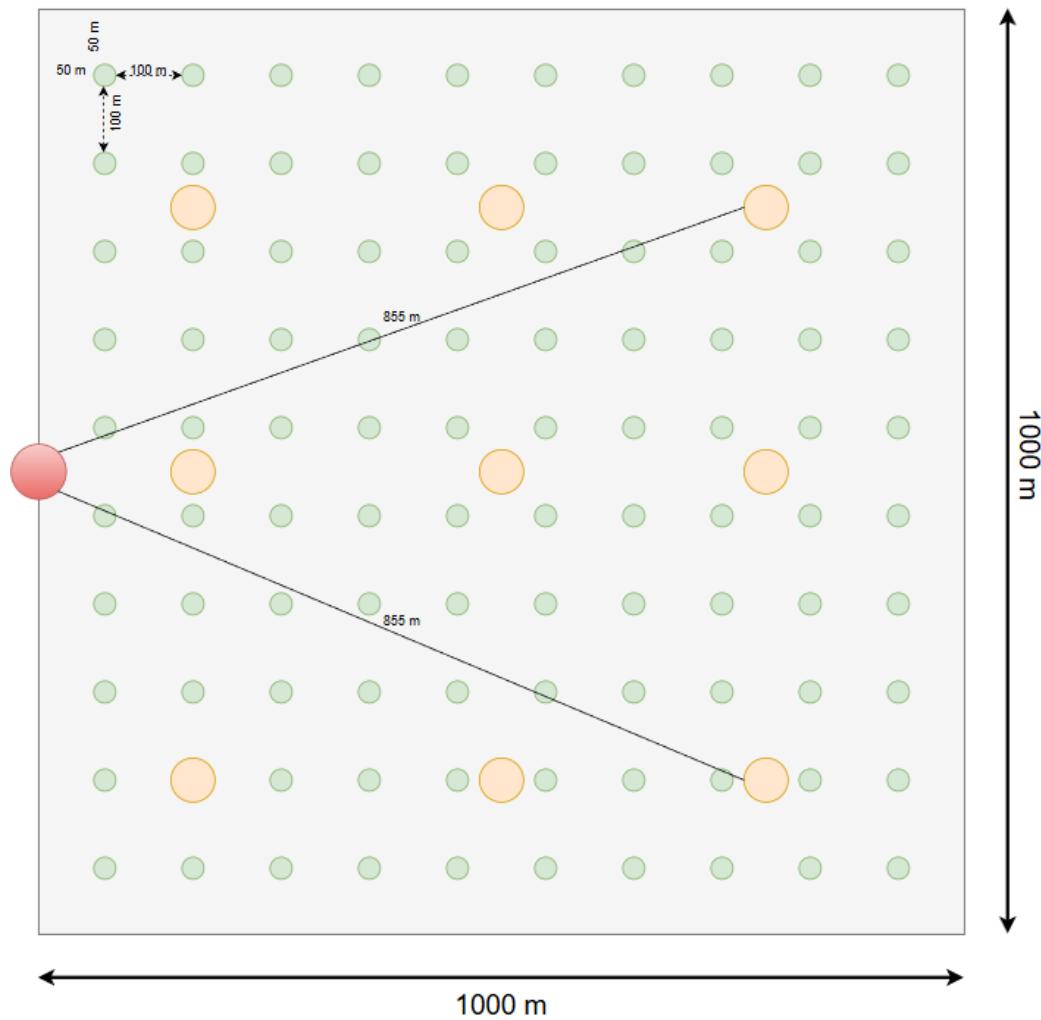
- Khoảng cách xa nhất (Sensor đến Relay): 180 m.
- Khoảng cách xa nhất (Relay đến Gateway): 875 m.

Đánh giá:

Tiết kiệm chi phí phần cứng (chỉ dùng 9 node). Khoảng cách 875m nằm trong vùng làm việc hiệu quả của LoRa SX1278 .

2.4.2.2. Phương án 2

Sử dụng 9 relay node và phân bố vị trí như sau



Hình 2-13: Phương án phân bố 2

Mô tả bố trí: Sử dụng 9 Relay Node (màu cam), vị trí Gateway (màu đỏ) đặt tại tọa độ mép trái, khoảng cách xa nhất đến Relay cuối cùng là đường chéo xuyên qua cánh đồng.

Tải trọng mạng: Mỗi Relay Node quản lý trung bình từ 8 đến 16 Sensor Node..

Khoảng cách truyền dẫn:

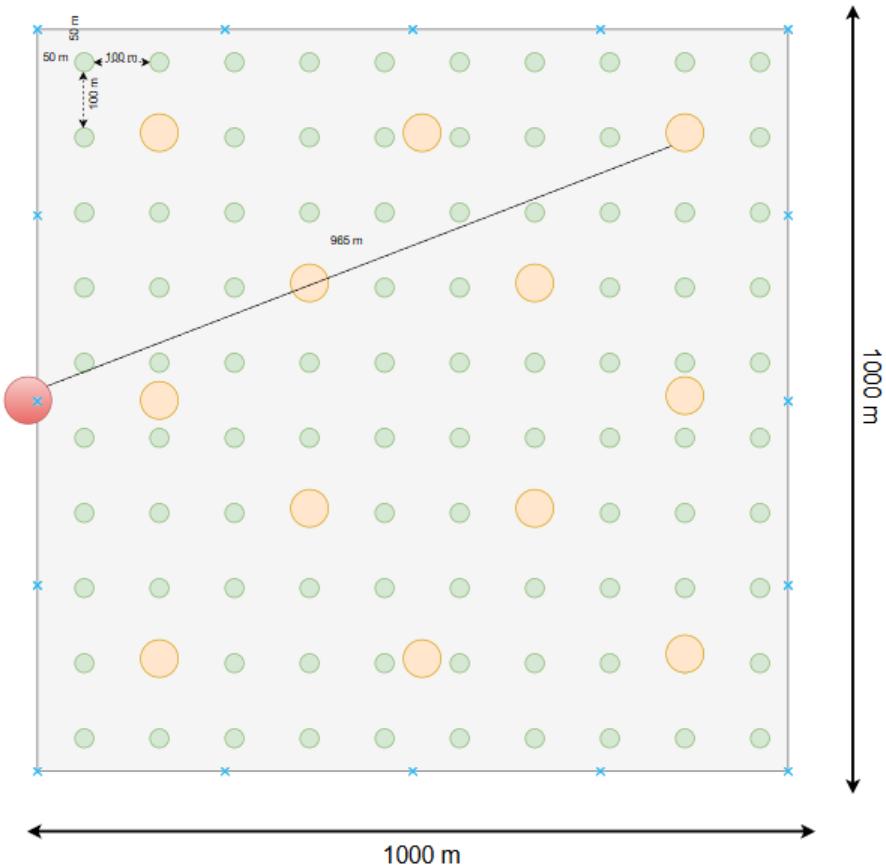
- Khoảng cách xa nhất (Sensor đến Relay): 212m.
- Khoảng cách xa nhất (Relay đến Gateway): 855 m.

Đánh giá:

Sự thay đổi khoảng cách không đáng kể, nhưng lại tăng số lượng quản lý của mỗi con Relay lên. Xảy ra trường hợp không cân xứng khi một số con sẽ quản lý nhiều Sensor, số con lại quản lí ít.

2.4.2.3. Phương án 3

Sử dụng 12 node phân bố



Hình 2-14: Phương án phân bố 3

Phương án này tăng cường số lượng điểm tiếp sóng để giảm tải cho từng node và tăng độ ổn định.

- **Mô tả bố trí:**

- Sử dụng **12 Relay Node** phân bố rải đều, mỗi node quản lý từ 9-12 Sensor Node.
- Mạng lưới được chia nhỏ hơn, tạo thành cấu trúc lưới hoặc biến thể so le.

- **Phân tích kỹ thuật:**

- **Tải trọng mạng:** Do số lượng trạm thu tăng lên, mỗi Relay Node chỉ phải quản lý từ **8 đến 9 Sensor Node**. Việc giảm tải giúp Relay xử lý gói tin nhanh hơn, giảm độ trễ (latency) toàn mạng.

- **Khoảng cách truyền dẫn:**

- Khoảng cách xa nhất (Sensor đến Relay): Vẫn duy trì mức **~180 m.**
- Khoảng cách xa nhất (Relay đến Gateway): Tăng lên **965m** (do vị trí Relay xa nhất bị đẩy lùi về phía mép đối diện Gateway).

Nhận xét phương án này tăng chi phí do tăng thêm số lượng Relay node, những giảm số lượng công việc đi cho mỗi node. Phương án này xuất hiện những sensor và relay đặt gần nhau hơn bình thường hoặc Relay thực hiện chức năng luôn của sensor. Khoảng cách xa nhất từ Relay đến với gateway tăng nhưng vẫn đảm bảo khoảng cách truyền.

2.5 Lựa chọn linh kiện cho các node

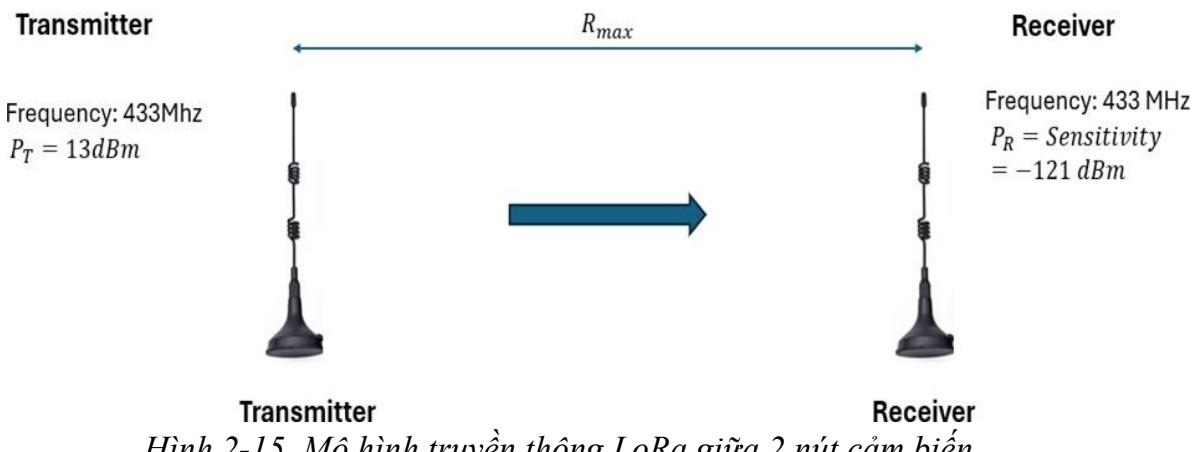
2.5.1 Khối xử lý trung tâm

Bảng 2-3: Một số linh kiện cho khối trung tâm

Tiêu chí	STM32F103C8T6	ESP8266	ESP32
Kiến trúc CPU	ARM Cortex-M3 (32-bit)	Tensilica L106 (32-bit, single-core)	Xtensa LX6 (32-bit, dual-core, 240 MHz)
Tốc độ xung nhịp	72 MHz	80 MHz	160 – 240 MHz
Bộ nhớ Flash / RAM	64 KB Flash, 20 KB SRAM	4 MB Flash (ngoài), 160 KB SRAM	4–16 MB Flash (ngoài), 520 KB SRAM
Số chân I/O khả dụng	~37 GPIO	~9 GPIO thực dụng	~30 GPIO
ADC / PWM / Timer	10/12-bit ADC (16 kênh), nhiều timer, PWM mạnh	10-bit ADC (1 kênh), PWM qua software	12-bit ADC (18 kênh), nhiều PWM & timer
Giao tiếp	UART, SPI, I2C, CAN, USB (FS), PWM	UART, SPI, I2C, Wi-Fi	UART, SPI, I2C, I2S, Wi-Fi, Bluetooth
Kết nối không dây tích hợp	Không	Wi-Fi 2.4 GHz	Wi-Fi 2.4 GHz, Bluetooth, BLE
Điện áp hoạt động	2.0 – 3.6 V (thường 3.3 V)	3.0 – 3.6 V	3.0 – 3.6 V

Dòng tiêu thụ (Active)	10 – 25 mA ở 72 MHz	70 – 170 mA khi Wi-Fi TX	80 – 260 mA khi Wi-Fi/BLE hoạt động
Dòng tiêu thụ (Sleep)	2 µA (Standby), 20 µA (Stop Mode), 20 mA(Sleep Mode)	20 µA (Deep Sleep)	10 µA (Deep Sleep)
Tiết kiệm năng lượng	Sleep, Stop, Standby	Deep Sleep, Modem Sleep	Light Sleep, Deep Sleep, Dynamic
Phù hợp với	Điều khiển động cơ, relay, cảm biến, truyền thông LoRa, RS485	IoT Wi-Fi giá rẻ, truyền dữ liệu cơ bản	IoT Wi-Fi/BLE mạnh, nhiều kết nối, AI nhẹ

2.5.2 Khởi truyền thông và tính toán phạm vi truyền thông



Hình 2-15. Mô hình truyền thông LoRa giữa 2 nút cảm biến

RFS_L125_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3, 125 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	- - - - - - -	-121 -125 -128 -131 -134 -136 -137	- - - - - - -	dBm dBm dBm dBm dBm dBm dBm
-------------	--	---	---------------------------------	--	---------------------------------	---

Hình 2-16. Độ nhạy SX1278

Theo bảng 10 trang 19 trong datasheet của SX1278, ta xác định được độ nhạy của SX1278 tại tần số 433 MHz, băng thông 125 kHz, SF=6 là -121 dBm.

- Công thức Friis:

$$\frac{P_R}{P_T} = e_{0t} \cdot e_{0r} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot D_t \cdot D_r \cdot PLF \quad (1)$$

Trong đó:

P_T : công suất phát từ anten phát

P_R : công suất nhận được tại anten thu

e_{0t} : hiệu suất của anten phát

e_{0r} : hiệu suất của anten thu

D_t : độ định hướng của anten phát

D_r : độ định hướng của anten thu

PLF : hệ số suy hao do phân cực

Lấy logarit cơ số 10 hai vế (1) ta có:

- TH1: $PLF = 1$

$$P_R = P_F + e_{0t} + e_{0r} + D_t + D_r - 20 \log(f) - 20 \log(R) + 147.5$$

Tại $PR = Sensitivity$, khoảng cách truyền đạt giá trị cực đại:

$$\begin{aligned} R_{max} &= 10^{(P_F - PR + e_{0t} + e_{0r} + D_t + D_r - 20 \log(f) + 147.5)/20} \\ &= 10^{(P_F - PR + G_t + G_r - 20 \log(f) + 147.5)/20} \end{aligned}$$

(G_t, G_r lần lượt là độ lợi của anten phát và anten thu)

$$\approx 43.5 \text{ (km)}$$

- TH2: $PLF = 0.7$

Tương tự ta tính được $R_{max} \approx 30.4 \text{ (km)}$

2.5.3 Khối cảm biến nhiệt độ - độ ẩm

Bảng 2-4: Một số lựa chọn linh kiện cảm biến nhiệt độ - độ ẩm

Đặc điểm	DHT11	DHT22	SHT31	AM2320
Loại cảm biến	Cảm biến nhiệt độ & độ ẩm			
Dải đo nhiệt độ (°C)	0 ÷ 50	-40 ÷ 80	-40 ÷ 125	-40 ÷ 80
Độ chính xác nhiệt độ (°C)	±2	±0.5	±0.3	±0.5
Dải đo độ ẩm (%RH)	20 ÷ 90	0 ÷ 100	0 ÷ 100	0 ÷ 100
Độ chính xác độ ẩm (%RH)	±5	±2	±2	±3
Độ phân giải	1°C / 1%RH	0.1°C / 0.1%RH	0.015°C / 0.01%RH	0.1°C / 0.1%RH

Thời gian đáp ứng	~6–10 s	~2 s	~1 s	~2 s
Điện áp hoạt động (V)	3.3–5.5	3.3–6.0	2.4–5.5	3.1–5.5
Giao tiếp	1-Wire (digital)	1-Wire (digital)	I ² C	I ² C / 1-Wire
Dòng tiêu thụ	~500 μA (ước lượng)	~1 mA (ước lượng)	450 μA (đo), ~0.4 μA (sleep)	450 μA (đo) / 0.14 μA (sleep)

Đối với việc giám sát môi trường không khí trên cánh đồng, nhóm lựa chọn module cảm biến DHT22. Đây là sự lựa chọn tối ưu dựa trên sự cân bằng giữa độ chính xác và chi phí đầu tư.

So với cảm biến giá rẻ DHT11, module DHT22 có dải đo rộng hơn hẳn (nhiệt độ từ -40 đến 80 độ C và độ ẩm từ 0 đến 100% RH), đáp ứng hoàn toàn điều kiện thời tiết khắc nghiệt ngoài trời, trong khi DHT11 không thể đo được nhiệt độ ẩm hoặc độ ẩm dưới 20%. Về độ sai số, DHT22 đạt mức +/- 0.5 độ C và +/- 2% RH, phù hợp với các tiêu chuẩn canh tác nông nghiệp công nghệ cao.

Mặc dù các dòng cảm biến cao cấp hơn như SHT31 hay AM2320 có độ chính xác cao hơn và giao tiếp qua chuẩn I2C tốc độ cao, nhưng giá thành của chúng thường đắt gấp nhiều lần so với DHT22. Hơn nữa, với bài toán nông nghiệp, sự thay đổi nhiệt độ và độ ẩm diễn ra chậm, do đó tốc độ lấy mẫu 2 giây/lần của DHT22 là hoàn toàn chấp nhận được. Giao thức giao tiếp 1-wire của DHT22 cũng giúp tiết kiệm chân GPIO cho vi điều khiển STM32.

2.5.4 Khôi cảm biến độ ẩm đất

Bảng 2-5: Một số lựa chọn linh kiện cảm biến đo độ ẩm đất

Đặc điểm	Cảm biến điện trở (HW-080/YL-69)	Cảm biến điện dung (Capacitive v1.2)	Cảm biến công nghiệp (RS485 - JXBS)
Loại cảm biến	Đo dựa trên tính dẫn điện của đất (Resistive)	Đo dựa trên sự thay đổi điện dung (Capacitive)	Đo dựa trên tần số/điện từ trường (FDR)
Dải đo độ ẩm (%Vol)	0 đến 100% (Giá trị tương đối)	0 đến 100% (Giá trị tương đối)	0 đến 100% (Đã hiệu chuẩn)
Độ chính xác	Thấp, phụ thuộc nhiều vào độ nén của đất	Trung bình, ít bị ảnh hưởng bởi độ nén	Cao, sai số +/- 3%

Độ bền (Ăn mòn)	Thấp (Bị ăn mòn điện hóa nhanh chóng)	Cao (Bề mặt phủ sơn cách điện, chống ăn mòn)	Rất cao (Que đo bằng thép không gỉ 316L)
Điện áp hoạt động (V)	3.3V - 5V	3.3V - 5.5V	12V - 24V DC
Tín hiệu ngõ ra	Analog (0-Vcc) & Digital (qua LM393)	Analog (0-3.0V)	Digital (Giao thức Modbus RTU)
Mạch đệm/Xử lý	Cần module so sánh ngoài (như LM393)	Tích hợp sẵn trên mạch cảm biến	Tích hợp sẵn trong vỏ bảo vệ
Giá thành	Rất thấp	Trung bình	Rất cao

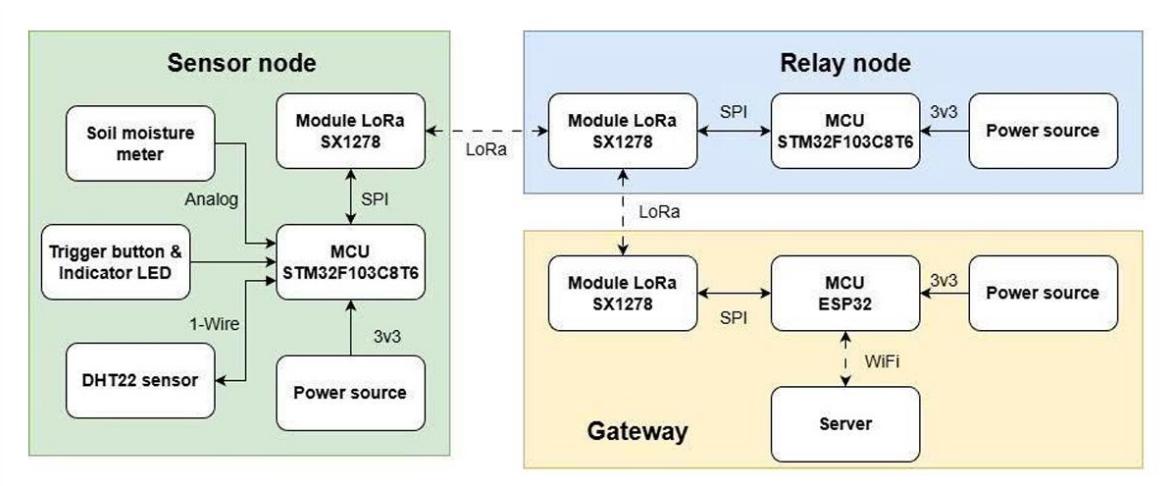
Để đo độ ẩm đất, nhóm quyết định sử dụng cảm biến nguyên lý điện trở HW-080 (hoặc mã tương đương YL-69) kết hợp với module so sánh LM393.

Lý do chính cho sự lựa chọn này là tính sẵn có, giá thành thấp và khả năng tích hợp linh hoạt. Cảm biến HW-080 hoạt động dựa trên nguyên lý đo trở kháng giữa hai cực kim loại cảm vào đất; đất càng ẩm thì tính dẫn điện càng cao và điện trở càng giảm. Điểm đặc biệt của giải pháp này là sự hỗ trợ của mạch tích hợp LM393. Mạch này cung cấp đồng thời hai ngõ ra:

- Ngõ ra Analog (AO): Cho phép vi điều khiển đọc giá trị điện áp biến thiên liên tục, từ đó tính toán ra phần trăm độ ẩm đất cụ thể phục vụ cho việc giám sát chi tiết.
- Ngõ ra Digital (DO): Cho phép cài đặt ngưỡng so sánh bằng biến trờ ngay trên mạch. Khi độ ẩm đất vượt qua hoặc thấp hơn ngưỡng này, ngõ ra sẽ đổi trạng thái mức logic, giúp vi điều khiển có thể xử lý ngắt (interrupt) để cảnh báo tức thời mà không cần liên tục đọc dữ liệu Analog, góp phần tiết kiệm tài nguyên xử lý.

Tuy cảm biến loại điện trở có nhược điểm về độ bền do hiện tượng ăn mòn điện hóa, nhưng trong phạm vi dự án môn học và các ứng dụng thử nghiệm (prototype), đây là giải pháp kinh tế và hiệu quả nhất để xây dựng mô hình. Nhóm cũng đề xuất phương án cấp nguồn ngắn quãng (chỉ cấp điện cho cảm biến khi đo) để giảm thiểu tối đa hiện tượng ăn mòn và kéo dài tuổi thọ thiết bị.

2.6 Sơ đồ khái tổng thể của hệ thống



Hình 2-17: Sơ đồ khái niệm tổng thể của hệ thống

Tổng kết lại chương 2, nhóm thực hiện đã hoàn thành việc phân tích các yêu cầu kỹ thuật và đưa ra những quyết định quan trọng về mặt công nghệ cho hệ thống giám sát nông nghiệp. Cụ thể, kiến trúc mạng hình cây (Tree Topology) kết hợp với công nghệ truyền thông LoRa đã được lựa chọn để giải quyết bài toán phủ sóng trên diện tích 100 hecta. Bên cạnh đó, các thiết bị phần cứng nòng cốt như vi điều khiển STM32F103, module thu phát SX1278 và các cảm biến DHT22, HW-080 cũng đã được xác định dựa trên sự cân bằng giữa hiệu năng và chi phí. Những lựa chọn này đóng vai trò là cơ sở tiền đề vững chắc để nhóm bước vào giai đoạn hiện thực hóa hệ thống trong chương tiếp theo.

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN PHẦN CỨNG

Sau khi hoàn thành việc phân tích yêu cầu kỹ thuật và lựa chọn được các giải pháp công nghệ nền tảng như kiến trúc mạng hình cây, công nghệ truyền thông LoRa cùng các linh kiện nòng cốt tại Chương 2, nhiệm vụ tiếp theo là hiện thực hóa những thiết kế lý thuyết này thành các mô đun phần cứng cụ thể. Chương 3 sẽ đi sâu vào quá trình thiết kế và phát triển phần cứng chi tiết cho hệ thống, bao gồm việc xây dựng khái xô lý trung tâm, khái cảm biến, khái nguồn và khái truyền thông cho cả ba đối tượng: Sensor Node, Relay Node và Gateway. Đồng thời, chương này cũng trình bày các tính toán thông số kỹ thuật, sơ đồ nguyên lý, thiết kế mạch in (PCB) và quy trình đóng gói sản phẩm nhằm đảm bảo các nút mạng hoạt động ổn định, tiết kiệm năng lượng và đáp ứng được điều kiện môi trường thực tế tại cánh đồng.

3.1 Thiết kế tổng thể

3.1.1 Sensor node

Sensor node là đơn vị cơ bản và quan trọng nhất trong mạng cảm biến không dây, được bố trí phân tán trên toàn bộ khu vực cánh đồng. Mỗi node đảm nhiệm chức năng thu thập các thông số môi trường như nhiệt độ, độ ẩm không khí và độ ẩm đất; sau đó xử lý, đóng gói dữ liệu và truyền bản tin về Relay node để tổng hợp và điều phối.

Mỗi Sensor node sử dụng vi điều khiển STM32F103C8T6 làm bộ xử lý trung tâm, kết hợp với module LoRa Ra-02 (chip SX1278) để thực hiện truyền thông không dây khoảng cách xa. Các cảm biến được tích hợp bao gồm:

- DHT22: đo nhiệt độ và độ ẩm không khí
- Cảm biến độ ẩm đất HW-080 kết hợp mạch so sánh LM393: đo mức độ ẩm của đất

Nguồn cấp cho Sensor node là pin Li-Po ..., được sạc và bảo vệ thông qua mạch TP4056, đảm bảo kích thước nhỏ gọn và độ an toàn khi triển khai thực nghiệm.

Các Sensor node hoạt động độc lập, không giao tiếp ngang hàng (peer-to-peer); thay vào đó chỉ thực hiện truyền dữ liệu và nhận phản hồi từ Relay node theo mô hình Master–Slave, giúp tối ưu năng lượng và đảm bảo truyền dẫn

3.1.2 Relay node

Relay node là thành phần trung gian trong kiến trúc mạng cảm biến, chịu trách nhiệm tiếp nhận dữ liệu từ các Sensor node và chuyển tiếp thông tin đến Gateway. Mỗi Relay node được xây dựng với cấu hình tối giản nhưng tối ưu, bao gồm vi

điều khiển STM32F103C8T6 làm bộ xử lý trung tâm và module truyền thông LoRa Ra-02 (chip SX1278) đảm nhiệm liên lạc không dây tầm xa.

Relay node thực hiện các chức năng chính sau:

- Nhận dữ liệu từ các Sensor node thông qua kết nối LoRa.
- Kiểm tra, tổng hợp và xử lý bản tin, đảm bảo tính toàn vẹn và định dạng dữ liệu trước khi truyền đi.
- Gửi gói dữ liệu đã tổng hợp lên Gateway, đóng vai trò cầu nối trong toàn bộ hệ thống giám sát.

Relay node được cấp nguồn bằng pin Li-Po, đồng thời tích hợp mạch sạc TP4056 để hỗ trợ nạp lại năng lượng và bảo vệ pin trong quá trình vận hành ngoài thực địa. Các Relay node không giao tiếp trực tiếp với nhau, nhằm tránh xung đột dữ liệu và giảm phức tạp giao thức. Mỗi node chỉ trao đổi hai chiều với Sensor node (nhận bản tin và phản hồi khi cần) và truyền dữ liệu lên Gateway theo mô hình Master-Slave.

3.1.3 Gateway

Gateway node đóng vai trò trung tâm trong hệ thống, chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu từ các Relay node và truyền tải thông tin đến máy chủ để lưu trữ, phân tích và hiển thị. Gateway được xây dựng là sự kết hợp của 2 module: ESP32-Wroom làm nhiệm vụ kết nối server, module STM32F103C8T6 kết nối module truyền thông LoRa Ra-02 để nhận bản tin từ Relay, 2 module ESP32 và STM32 này giao tiếp với nhau thông qua UART. Sự kết hợp này tạo nên một thiết bị có khả năng giao tiếp đa giao thức, phù hợp cho các ứng dụng IoT quy mô lớn.

Gateway hỗ trợ hai công nghệ truyền thông chính:

- LoRa (SX1278 – 433 MHz): dùng để nhận dữ liệu tầm xa từ các Relay node.
- Wi-Fi 4 (802.11 b/g/n): tích hợp sẵn trong ESP32, dùng để truyền dữ liệu lên Server hoặc hệ thống Cloud.

Các chức năng chính của Gateway node bao gồm:

- Tiếp nhận bản tin từ Relay node qua kết nối LoRa.
- Xử lý, giải mã và kiểm tra tính hợp lệ của dữ liệu trước khi chuyển tiếp.
- Gửi dữ liệu lên Server thông qua Wi-Fi, đảm bảo thông tin được cập nhật liên tục và chính xác.

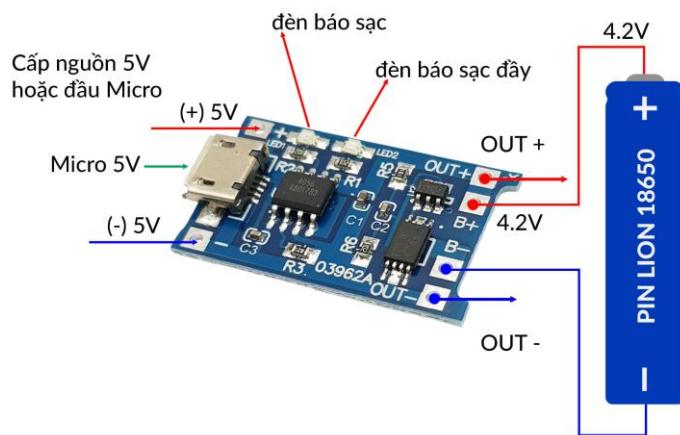
Với khả năng kết hợp LoRa và Wi-Fi, Gateway node giúp hệ thống hoạt động linh hoạt, cho phép thu thập dữ liệu diện rộng (qua LoRa) đồng thời truyền tải nhanh và ổn định (qua Wi-Fi) mà không cần thêm thiết bị trung gian.

Vì thực hiện chức năng nghe trong gần như toàn bộ thời gian nên Gateway sẽ được đặt ở vị trí gần nguồn điện và có Wi-Fi gửi lên server, vị trí đó đặt ngoài cảnh đồng những vẫn đảm bảo khả năng truyền nhận.

3.2 Thông số kỹ thuật nguồn hệ thống

3.2.1 Nguồn đầu vào và mạch sạc pin Li-ion TP4056

TP4056 là một IC quản lý sạc tuyến tính (Li-ion Linear Charger) chuyên dùng cho pin Lithium-ion và Lithium-polymer 1 cell (3.7V). IC hoạt động ổn định với điện áp đầu vào từ 4V đến 8V và hỗ trợ dòng sạc tối đa 1A, phù hợp cho các thiết bị dung lượng nhỏ đến trung bình. Nhờ thiết kế đơn giản, chi phí thấp và độ tin cậy cao, TP4056 được ứng dụng rộng rãi trong các mạch sạc pin Li-ion/Lipo 1 cell trong các thiết bị IoT, đồ chơi điện tử, thiết bị cầm tay và các hệ thống năng lượng thu nhỏ.



Hình 3-1: Mạch sạc xả TP4056

Về nguyên lý hoạt động, TP4056 sử dụng thuật toán sạc chuẩn CC – CV. Ở giai đoạn đầu, khi điện áp pin thấp, IC hoạt động ở chế độ dòng không đổi (CC) để sạc nhanh với dòng được xác định qua điện trở Rprog. Khi điện áp pin tiệm cận mức định danh 4.2V, TP4056 chuyển sang chế độ điện áp không đổi (CV), giữ điện áp ổn định và tự động giảm dòng sạc xuống còn 1/10 giá trị ban đầu để tránh quá nhiệt và tăng tuổi thọ cho pin. Khi dòng sạc giảm tới ngưỡng cắt, TP4056 tự động ngừng sạc và chuyển sang trạng thái chờ.

Để đảm bảo an toàn, mạch TP4056 tích hợp nhiều chức năng bảo vệ như: bảo vệ quá nhiệt nhờ cơ chế giảm dòng sạc khi IC quá nóng, bảo vệ quá áp và kiểm soát dòng chật chẽ trong toàn bộ quá trình sạc. Các chân báo trạng thái CHRG và STDBY cho phép hiển thị pin đang sạc hoặc đã đầy thông qua đèn LED. Bên

cạnh đó, chân TEMP hỗ trợ kết nối cảm biến nhiệt độ NTC giúp giám sát nhiệt độ pin và tạm dừng sạc khi phát hiện bất thường.

Thông thường, trong các module TP4056 phổ biến hiện nay, IC sạc được kết hợp với mạch bảo vệ pin gồm DW01A và cặp MOSFET kép 8205A, tạo thành hệ thống sạc – xả an toàn. Phần bảo vệ xả có khả năng ngắt kết nối tải khi pin thấp ($<2.4-2.7V$), đồng thời bảo vệ quá dòng và ngắn mạch trong quá trình xả. Khi sạc qua TP4056, khói bảo vệ này cũng đảm bảo pin không bị quá áp ($>4.3V$) hoặc dòng nạp quá lớn. Nhờ đó, mạch sạc-xả TP4056 có thể hoạt động liên tục như một hệ pin hoàn chỉnh, vừa sạc vừa đảm bảo an toàn khi cấp nguồn cho tải. Thiết kế mạch sạc – xả với TP4056 thường bao gồm:

- Điện trở Rprog ($1.2\text{ k}\Omega \rightarrow$ sạc 1A; giá trị lớn hơn để giảm dòng sạc),
- Tụ lọc đầu vào và đầu ra ($1-10\text{ }\mu\text{F}$) để ổn định điện áp,
- Mạch bảo vệ DW01A + MOSFET kép 8205A cho chức năng xả an toàn,
- Các LED hiển thị trạng thái sạc.

Bảng 3-1: Thông số mạch sạc xả TP4056

Thông số	Giá trị / Mô tả
Loại pin	Li-Polymer (Li-Po) / Li-ion polymer
Điện áp danh định	$\sim 3.7\text{ V}$
Điện áp sạc đầy	4.2 V
Dung lượng	$\sim 2000\text{ mAh}$
Trở kháng trong	$< 60\text{ m}\Omega$ (theo datasheet DNK)
Dòng sạc đề nghị	$0.2\text{ C} \approx 400\text{ mA}$ (với một số loại)
Dòng sạc tối đa	$0.5\text{ C} \approx 1000\text{ mA}$ với một số cell
Dòng xả tối đa (continuous)	$1\text{ C} = \sim 2000\text{ mA}$
Dải điện áp xả	thường khoảng 2.5 V tới 4.2 V (datasheet)
Số chu kỳ sạc-xả	Tuổi thọ pin phụ thuộc nhà sản xuất; theo DNK là khoảng 500 chu kỳ (0.2C)
Nhiệt độ làm việc	-20°C đến $+60^\circ\text{C}$

Với độ an toàn cao, cấu trúc gọn nhẹ và hiệu quả sạc ổn định, mạch TP4056 là lựa chọn tối ưu cho các hệ thống sử dụng pin Li-ion 1 cell yêu cầu chức năng sạc – xả đầy đủ, tin cậy và dễ ứng dụng trong thực tế.

3.2.2 Pin Lithium YDL 7565121 3.7V 8000mAh



Hình 3-2 Pin Li-ion 113450P

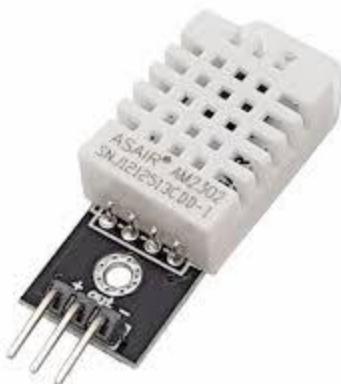
Để cung cấp năng lượng cho Sensor Node hoạt động độc lập ngoài cảnh đồng, nhóm lựa chọn dòng pin Lithium YDL 7565121. Đây là loại pin sạc phổ biến trong các thiết bị di động nhờ mật độ năng lượng cao, kích thước nhỏ gọn và an toàn hơn pin Li-ion vỏ cứng trong các va đập cơ học.

Bảng 3-2: Thông số Pin Li-ion 113450P

Thông số (Parameter)	Giá trị (Value)
Mã sản phẩm (Model)	7565121
Kích thước (Size)	75 x 65 x 123 mm
Điện áp tiêu chuẩn (Standard Voltage)	3.7 V
Dung lượng danh định (Nominal Capacity)	8000 mAh
Điện áp sạc (Charging Voltage)	4.2 V
Điện áp xả (Discharge Voltage)	2.75 V
Dòng sạc (Charging Current)	Tiêu chuẩn: 4A, Tối đa: 8A
Dòng xả (Discharge Current)	Tiêu chuẩn: 4A, Tối đa: 8A
Nhiệt độ sạc (Charging Temperature)	\$0^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}
Nhiệt độ lưu trữ (Store Temperature)	\$-20^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}
Chứng nhận (Certification)	MSDS

3.3 Thông số kỹ thuật các cảm biến

3.3.1 Cảm biến DHT22 - Nhiệt độ độ ẩm



Hình 3-3 Module cảm biến DHT22

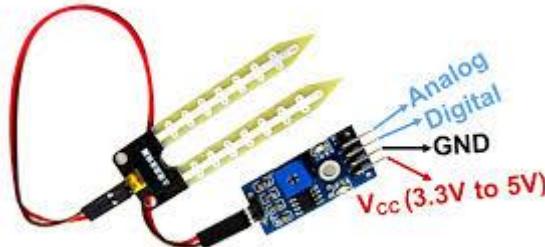
DHT22 (AM2302) là cảm biến đo nhiệt độ và độ ẩm kỹ thuật số có độ chính xác cao, được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống IoT, thiết bị nhúng và ứng dụng kiểm soát môi trường.

Bảng 3-3: Thông số của cảm biến DHT22

Đặc điểm	DHT22
Loại cảm biến	Cảm biến nhiệt độ & độ ẩm
Dải đo nhiệt độ (°C)	-40 ÷ 80
Độ chính xác nhiệt độ (°C)	±0.5
Dải đo độ ẩm (%RH)	0 ÷ 100
Độ chính xác độ ẩm (%RH)	±2
Độ phân giải	0.1°C / 0.1%RH
Thời gian đáp ứng	~2 s
Dòng điện tiêu thụ	Dòng lúc đo ~1 mA, Dòng khi idle <150 μA, Dòng đỉnh ~1.5 mA
Cấu trúc dữ liệu ra	5 byte(2 byte độ ẩm + 2byte nhiệt độ + 1byte check sum)
Điện áp hoạt động (V)	3.3–6.0
Giao tiếp	1-Wire (digital)

DHT22 sử dụng giao tiếp 1-Wire, sử dụng sự thay đổi của mức logic và thời gian tồn tại của mức logic cao trước khi bị kéo xuống để đọc dữ liệu. MCU sử dụng các yếu tố này để xác định thời điểm bắt đầu đo, thời điểm đọc dữ liệu và mức logic.

3.3.2 Que đo độ ẩm đất, mạch chuyển đổi



Hình 3-4 Cảm biến độ ẩm đất HW-080 và mạch chuyển đổi LM393

Que đo độ ẩm đất HW-080

Module HW-080 là loại cảm biến hoạt động dựa trên nguyên lý điện trở . Cảm biến bao gồm hai đầu dò kim loại được cắm trực tiếp vào đất. Độ dẫn điện giữa hai đầu dò này tỷ lệ thuận với hàm lượng nước có trong đất:

- Khi đất ẩm (độ ẩm cao): Nước trong đất đóng vai trò chất dẫn điện, làm giảm điện trở giữa hai đầu dò, dẫn đến điện áp đầu ra giảm.
- Khi đất khô (độ ẩm thấp): Độ dẫn điện kém, điện trở giữa hai đầu dò tăng cao, dẫn đến điện áp đầu ra tăng.

Thông số kỹ thuật chi tiết:

- Điện áp hoạt động (VCC): 3.3V – 5V DC.
- Dòng điện tiêu thụ: ~15mA.

Mạch chuyển đổi module LM393: có trách nhiệm so sánh ngưỡng điện áp đầu vào để chuyển đổi các tín hiệu đầu ra từ HW-080.

Bảng 3-4: Thông số của mạch chuyển đổi LM393

Tên chân	Loại tín hiệu	Mô tả chức năng
VCC	Nguồn	Cấp nguồn dương (3.3V - 5V DC).
GND	Nguồn	Nối đất (0V).
DO	Digital Output	Ngõ ra số: Xuất mức Logic 0 hoặc 1. Dùng để kết nối với chân GPIO của vi điều khiển hoặc kích Relay module trực tiếp.
AO	Analog Output	Ngõ ra tương tự: Kết nối trực tiếp với cầu phân áp của đầu dò. Giá trị điện áp tại đây (0V - VCC) tỷ lệ với độ dẫn điện của đất. Dùng để kết nối với bộ ADC của vi điều khiển để đo chính xác độ ẩm.

Chức năng của đo độ ẩm đất:

IC LM393 chịu trách nhiệm so sánh điện áp thực tế từ đầu dò cảm biến V_{hw} với một điện áp tham chiếu V_{ref} được thiết lập sẵn bởi người dùng.

Thiết lập ngưỡng: Điện áp tham chiếu Vref được điều chỉnh thông qua biến trở (Potentiometer) tích hợp trên mạch. Đây chính là điểm "ngưỡng" để định nghĩa thế nào là đất "khô" hay "ẩm".

Dựa vào sự thay đổi của điện áp giữa 2 chân của HW-080, LM393 chuyển đổi thành tín hiệu Analog qua chân AO.

3.4 Thông số kỹ thuật Module truyền thông

3.4.1 Module LoRa SX1278

Ra-02 là module truyền thông không dây sử dụng công nghệ LoRa, được phát triển bởi Ai-Thinker và tích hợp chip SX1278 của Semtech, tương tự như Ra-01 nhưng được thiết kế tối ưu hơn về khả năng chống nhiễu và hỗ trợ anten ngoài thông qua cổng IPEX, giúp cải thiện hiệu suất truyền và mở rộng khoảng cách liên lạc. Module hoạt động ở dải tần 433 MHz, nổi bật với khả năng truyền dữ liệu khoảng cách xa lên đến 5–10 km trong điều kiện lý tưởng, độ nhạy thu rất cao (tối đa -139 dBm), đồng thời vẫn duy trì mức tiêu thụ năng lượng thấp, phù hợp cho các ứng dụng IoT, nông nghiệp thông minh, mạng cảm biến không dây và các hệ thống truyền dữ liệu từ xa.



Hình 3-5 Module LoRa Ra-02

Ra-02 hỗ trợ tốc độ truyền từ 0.018 kbps đến 37.5 kbps, sử dụng giao thức SPI để giao tiếp với vi điều khiển, giúp dễ dàng tích hợp vào các hệ thống nhúng như STM32, ESP32 hoặc Arduino. Với thiết kế nhỏ gọn, độ ổn định cao và khả năng truyền tốt trong môi trường nhiễu nhiều, module Ra-02 là một lựa chọn tối ưu cho các ứng dụng cần truyền tín hiệu ở khoảng cách xa và yêu cầu độ tin cậy cao.

Bảng 3-5: Thông số của module LoRa RA-02

Danh mục	Thông số
Tần số hoạt động	433 MHz
Vi xử lý	Semtech SX1278
Công nghệ truyền	LoRa™ Spread Spectrum
Khoảng cách truyền	5–10 km (lý tưởng), 1–3 km (thực tế)
Giao tiếp	SPI (Mode 0 & 3)
Tốc độ dữ liệu	0.018 kbps – 37.5 kbps
Độ nhạy thu	Tối đa –139 dBm
Công suất phát	Lên đến +20 dBm
Điện áp hoạt động	1.8V – 3.7V (khuyên dùng 3.3V)
Dòng tiêu thụ	Khi phát (TX), ~120 mA Khi thu (RX), ~10–12 mA Chế độ standby, ~1.6 mA Chế độ ngủ, 0.2–1 μA
Tốc độ lan truyền SF	SF6 – SF12
Băng thông	7.8 kHz – 500 kHz
Kiểu anten	IPEX (u.FL)
Kích thước	17 × 16 mm
Nhiệt độ hoạt động	–20°C → +70°C

3.4.2 Anten LoRa (433MHz)

Ăng-ten lò xo 433 MHz là loại ăng-ten thu phát không dây dạng cuộn lò xo mini được thiết kế dành cho các module sử dụng chip SX1278/1276 như Ra-01, Ra-02 và nhiều thiết bị LoRa khác. Với cấu trúc cuộn dây đồng mạ vàng có đặc tính cộng hưởng tại tần số 433 MHz, ăng-ten này giúp tối ưu hóa khả năng bức xạ sóng, tăng cường độ nhạy thu phát và cải thiện đáng kể khoảng cách truyền dữ liệu của các module LoRa.



Hình 3-6 Antene LoRa

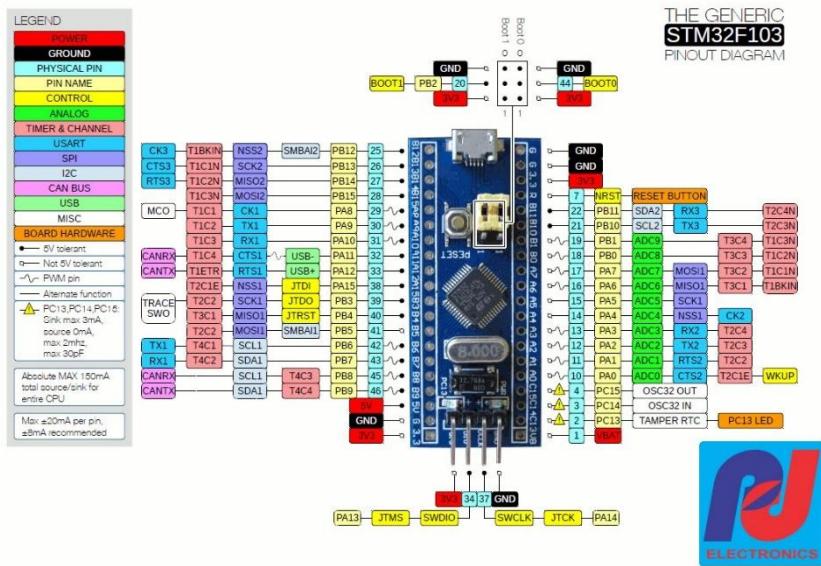
3.5 Module STM32F103C8T6

3.5.1 Tổng quan về dòng vi điều khiển STM32

Dòng vi điều khiển STM32 do **STMicroelectronics** phát triển là một trong những họ vi điều khiển 32-bit phổ biến nhất hiện nay, được xây dựng trên nền kiến trúc ARM Cortex-M. Các dòng STM32 được thiết kế hướng đến hiệu năng xử lý cao, tiêu thụ năng lượng thấp và mức độ tích hợp ngoại vi phong phú, đáp ứng đa dạng nhu cầu từ thiết bị dân dụng, IoT, thiết bị y tế cho đến các hệ thống tự động hóa công nghiệp. STM32 nổi bật bởi độ ổn định, độ tin cậy và được cộng đồng phát triển hỗ trợ mạnh với nhiều thư viện và công cụ dành riêng cho việc lập trình.

Các dòng STM32 được tổ chức thành nhiều họ nhỏ như STM32F (hiệu năng cao), STM32L (siêu tiết kiệm năng lượng), STM32H (hiệu năng rất cao), STM32G (hiệu năng trung bình – tiêu thụ thấp)... Mỗi dòng được tối ưu cho một nhóm ứng dụng cụ thể. Người phát triển có thể lựa chọn dòng vi điều khiển phù hợp dựa trên yêu cầu về tốc độ xử lý, số lượng ngoại vi, dung lượng bộ nhớ và mức tiêu thụ năng lượng.

3.5.2 Chi tiết về module STM32F103C8T6



Hình 3-7: Datasheet STM32F103C8T6

STM32F103C8T6 là một vi điều khiển thuộc họ STM32 của hãng STMicroelectronics, sử dụng lõi xử lý ARM Cortex-M3 với tần số hoạt động lên đến 72 MHz. STM32F103C8T6 tích hợp nhiều ngoại vi như ADC 12-bit, các bộ định thời (Timer) 16/32-bit, giao tiếp USART, SPI, I2C, USB và CAN, đáp ứng tốt các ứng dụng trong lĩnh vực điều khiển nhúng, IoT, công nghiệp và tự động hóa. Với bộ nhớ Flash 64 KB và SRAM 20 KB, vi điều khiển này đủ khả năng triển khai các thuật toán điều khiển thời gian thực và xử lý tín hiệu ở mức trung bình. Nhờ được hỗ trợ bởi hệ sinh thái phát triển mạnh mẽ như STM32CubeIDE, thư viện HAL/LL và cộng đồng lớn, STM32F103C8T6 trở thành lựa chọn phổ biến trong nghiên cứu, học tập và phát triển sản phẩm nhúng.

Bảng 3-6: Thông số của module STM32F103C8T6

Đặc điểm	Mô tả
Kiến trúc CPU	ARM Cortex-M3
Tần số hoạt động	72 MHz
Bộ nhớ Flash	64 KB
SRAM	20 KB
GPIO	Tối đa 37 chân I/O
ADC	10 kênh, độ phân giải 12-bit
Timer	3 timer 16-bit, 1 timer 32-bit
Giao tiếp	USART, SPI, I2C, CAN, USB FS
Điện áp hoạt động	2.0 – 3.6V
Nhiệt độ hoạt động	-40°C đến +85°C

3.5.3 Các chế độ hoạt động của module STM32F103C8T6

Để đảm bảo yêu cầu về năng lượng cho các node chạy pin trong thời gian dài (2 năm), việc lựa chọn chế độ hoạt động phù hợp là tối quan trọng. STM32F103 hỗ trợ 3 chế độ tiết kiệm năng lượng chính ngoài chế độ chạy bình thường (Run mode).

Dưới đây là bảng so sánh chi tiết các chế độ hoạt động, mức dòng điện, và công suất tiêu thụ tương ứng:

Bảng 3-7: Các chế độ hoạt động của STM32F103C8T6

Chế độ (Mode)	Mô tả trạng thái	Dòng tiêu thụ	Công suất tiêu thụ	Cách thức đánh thức (Wake-up)
Run Mode	CPU và các ngoại vi hoạt động bình thường. Tất cả các xung clock đều chạy.	20 - 50 mA	66 - 165 mW	Không áp dụng
Sleep Mode	Chỉ CPU ngừng hoạt động, các ngoại vi (ADC, SPI, Timer...) vẫn chạy. Nội dung RAM và thanh ghi được giữ nguyên.	10 - 15 mA	33 - 50 mW	Bất kỳ ngắt nào (Interrupt)
Stop Mode	Toàn bộ xung clock 1.8V (HSE, HSI, PLL) bị tắt. Bộ ổn áp (Voltage regulator) hoạt động ở chế độ công suất thấp. Nội dung SRAM và thanh ghi vẫn được giữ.	15 - 25 μ A	~ 50 - 85 μ W	Ngắt ngoài (EXTI line)..
Standby Mode	Chế độ tiết kiệm nhất. Bộ ổn áp tắt hoàn toàn. Toàn bộ nội dung SRAM và thanh ghi bị mất (trừ Backup registers).	~ 2 μ A	~ 6.6 μ W	Chân WKUP, RTC Reset, hoặc IWDG.

Kết luận lựa chọn:

Nhóm quyết định sử dụng chế độ Stop Mode cho cả Sensor Node và Relay Node.

- Lý do lựa chọn : Mặc dù Standby Mode tiết kiệm điện hơn (2μ A so với 25μ A), nhưng Stop Mode có ưu điểm vượt trội là thời gian đánh thức (wake-up time) nhanh (chỉ mất vài μ s để khởi động lại bộ dao động HSI, so với việc phải Reset lại toàn bộ hệ thống như Standby). Ngoài ra, Stop Mode giữ nguyên nội dung RAM, giúp chương trình tiếp tục chạy ngay tại điểm bị

dùng mà không cần khởi tạo lại các biến hệ thống, giúp đơn giản hóa logic code và giảm thời gian CPU phải chạy ở chế độ Run

- Kết hợp sử dụng RTC Wake-up interrupt để đánh thức module.

3.6 Module ESP32



Hình 3-8 Module Esp32 WROOM

ESP32-WROOM là một module vi điều khiển mạnh mẽ, tích hợp cả công nghệ Wi-Fi và Bluetooth (bao gồm Bluetooth cổ điển và Bluetooth Low Energy - BLE). Module này được phát triển bởi Espressif Systems, nhằm đến các ứng dụng Internet of Things (IoT) đòi hỏi hiệu suất cao, khả năng xử lý đa nhiệm và tiết kiệm năng lượng. Vi điều khiển là ESP32-D0WDQ6, một vi xử lý 32-bit lõi kép (Dual-core), cho phép xử lý các tác vụ phức tạp một cách độc lập với việc duy trì kết nối mạng.

Bảng 3-8: Thông số của module ESP32 WROOM

Đặc tính (Feature)	Thông số kỹ thuật (Specification)
Vi điều khiển trung tâm (SoC)	ESP32-D0WDQ6
Kiến trúc xử lý (CPU)	Xtensa® 32-bit LX6 Dual-core (Lõi kép)
Tần số xung nhịp	Có thể điều chỉnh từ 80 MHz đến 240 MHz
Hiệu năng xử lý	Lên đến 600 DMIPS
Flash SPI (Tích hợp trên module)	4 MB (Có thể hỗ trợ lên tới 16MB tùy phiên bản)
Kết nối không dây (Wireless)	
Tiêu chuẩn Wi-Fi	802.11 b/g/n (802.11n lên tới 150 Mbps)
Dải tần số Wi-Fi	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR và Bluetooth Low Energy (BLE)

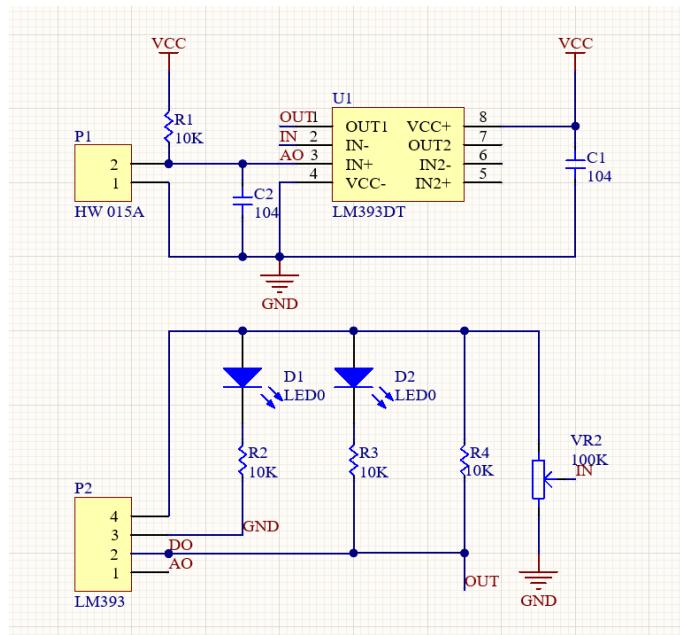
Điện áp & Dòng điện	Điện áp hoạt động 2.2 V – 3.6 V DC (Khuyên dùng 3.3 V) Dòng điện tiêu thụ trung bình ~80 mA Dòng điện đỉnh (khi phát RF) ~500 mA (Yêu cầu nguồn cấp ổn định)
Giao tiếp ngoại vi (Peripherals)	Số chân GPIO 38 chân (Lưu ý: Một số chân chỉ dùng làm Input hoặc dùng cho Flash) Giao tiếp kỹ thuật số 3 x UART, 3 x SPI, 2 x I2C, 2 x I2S Bộ chuyển đổi Analog (ADC) 12-bit SAR ADC (lên tới 18 kênh) Bộ chuyển đổi Digital (DAC) 2 kênh 8 bit
Cảm biến khác	10 x Cảm biến chạm điện dung (Touch Sensor), Cảm biến Hall

3.7 Bảng tổng hợp chi phí linh kiện

3.8 Sơ đồ nguyên lý và ghép nối Module

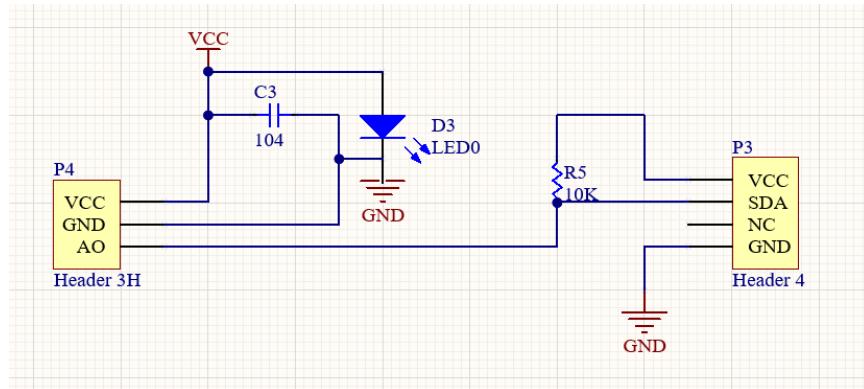
3.8.1 Sơ đồ nguyên lý các khối trong hệ thống mạng

Khối cảm biến độ ẩm đất: bao gồm cảm biến điện trở HW-080 và mạch chuyển đổi LM393



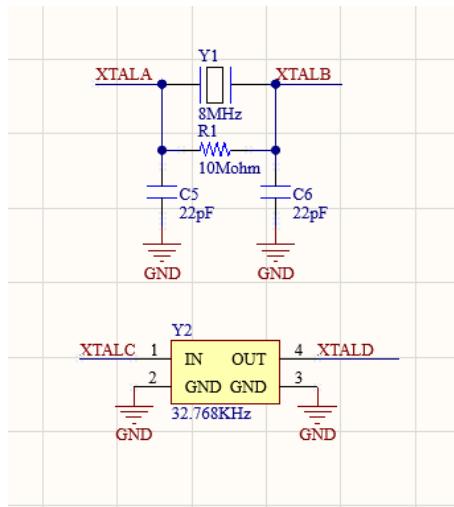
Hình 3-9 Module LM393 và HW-080

Cảm biến đo nhiệt độ và độ ẩm không khí DHT22.



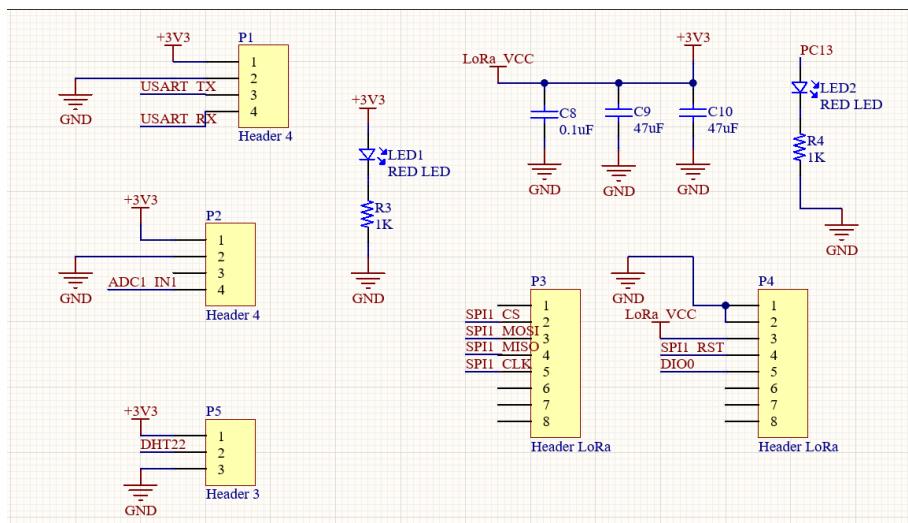
Hình 3-10 Mạch chuyển đổi của DHT22

Xung thạch anh



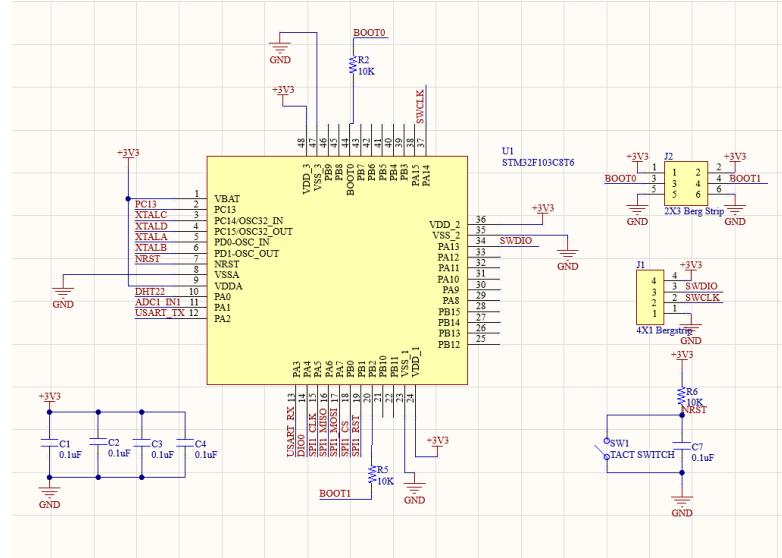
Hình 3-11 Xung thạnh anh của STM32F103C8T6

Kết nối ngoại vi với STM32F103C8T6



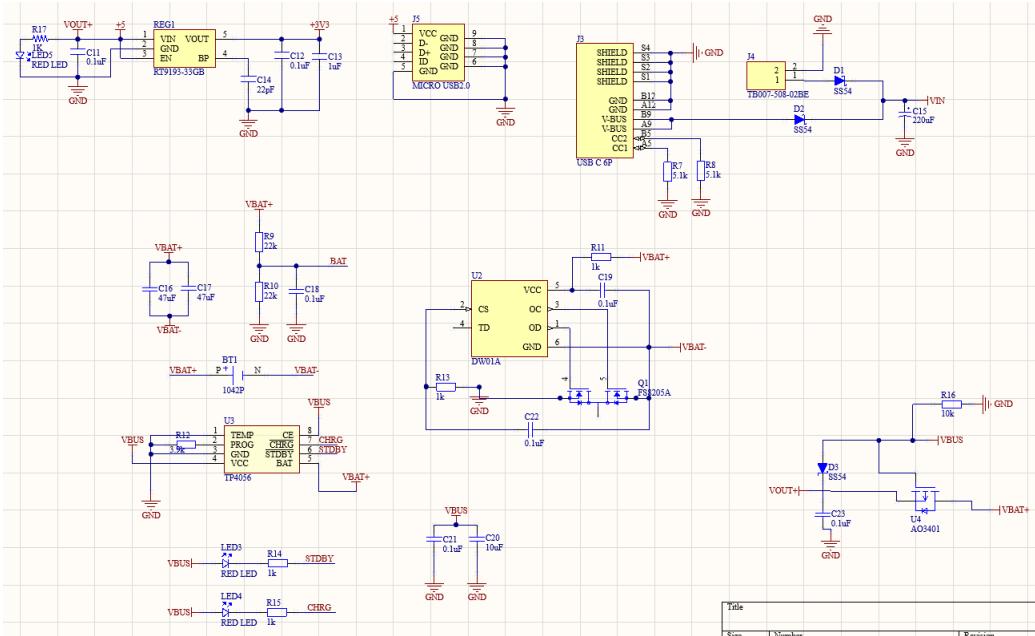
Hình 3-11 Các chân kết nối ngoại vi của STM32F103C8T6

Vì điều khiển STM32F103C8T6



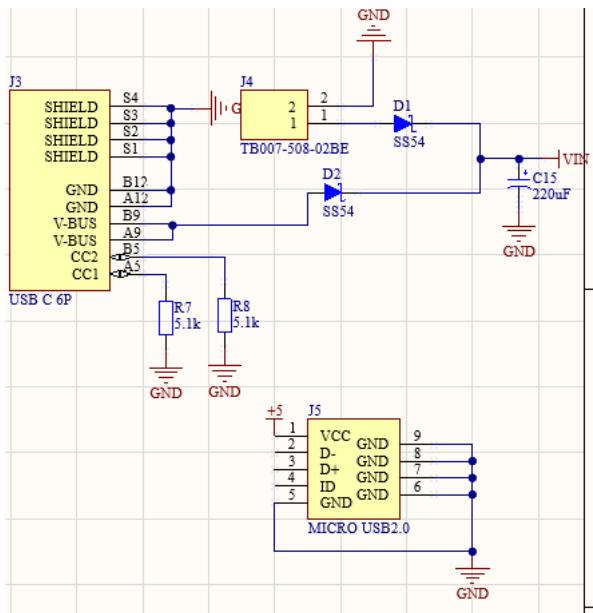
Hình 3-12 Vì điều khiển STM32F103C8T5

Khối nguồn và bảo vệ pin: Bao gồm module xác sá pin TP4056 và ôn áp 3.3V RT9193-33GB. Mạch sử dụng pin Lithium Polymer (Li-Po) mã 113450P có điện áp đầu ra ở 3.7 V

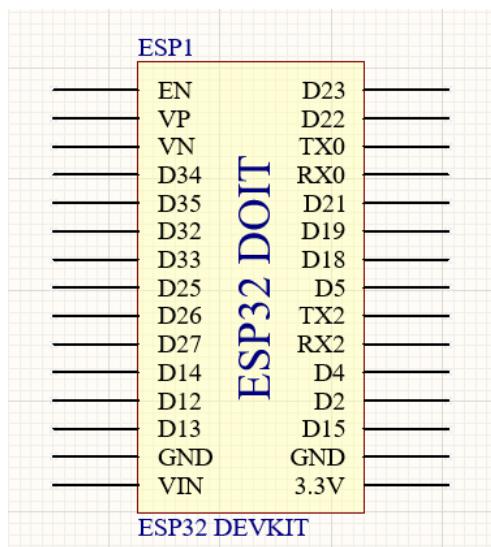


Hình 3-12 Khối nguồn và bảo vệ pin

Cổng kết nối: trang bị một cổng Micro USB và một cổng Type-C hỗ trợ kết nối với nhiều loại nguồn



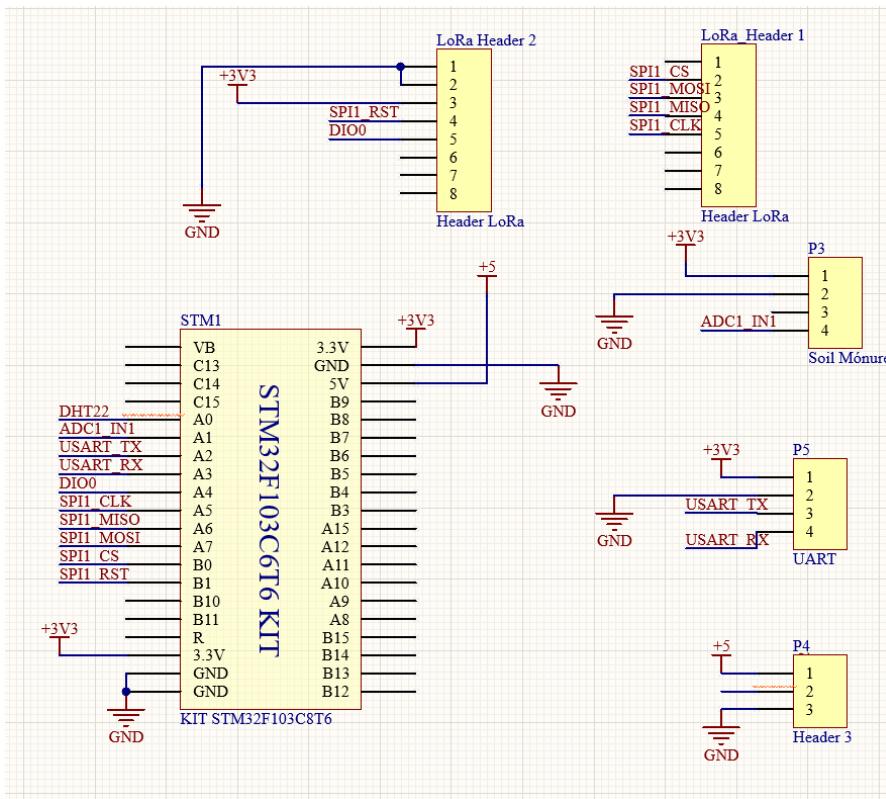
Khối Module ESP32-Wroom: Có hỗ trợ công nghệ Wi-Fi, truyền thông lên Server



Hình 3-13 sơ đồ nguyên lý Module ESP32 Wroom

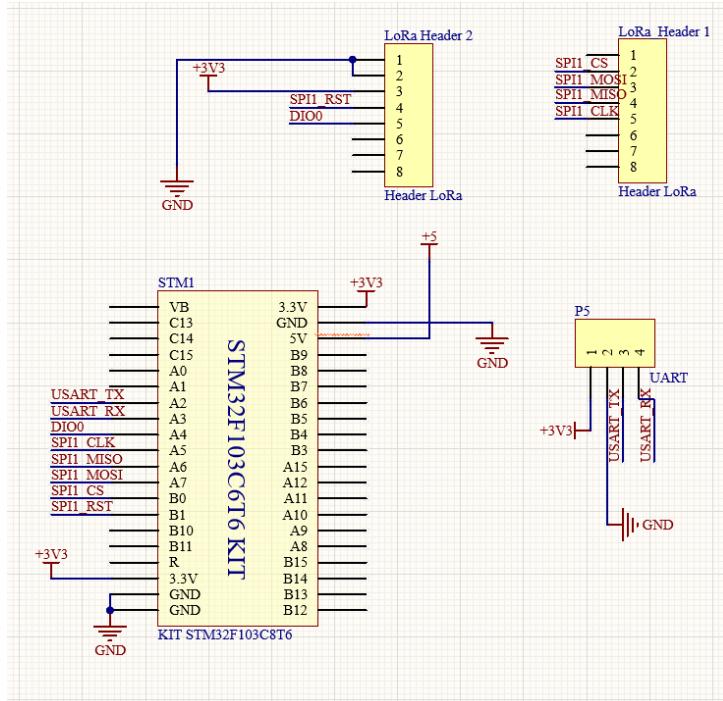
3.8.2 Ghép nối module thử nghiệm

Khối Sensor Node



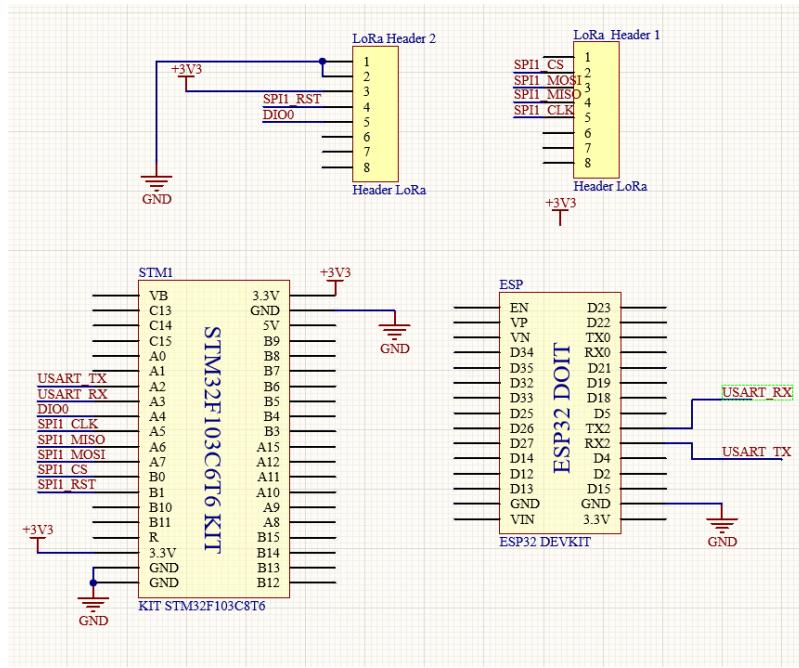
Hình 3-14 Ghép nối ngoại vi khỏi Sensor Node

Khối Relay Node



Hình 3-15 Ghép nối ngoại vi khỏi Relay Node

Khối Gateway



Hình 3-16 Sơ đồ nguyên lý ghép nối khói Gateway

3.9 Sơ đồ PCB

3.9.1 Lựa chọn tiết diện dây

Dây nguồn của STM32 và ngoại vi: kích thước trung bình 15mil dùng để cáp nguồn cho cảm biến.

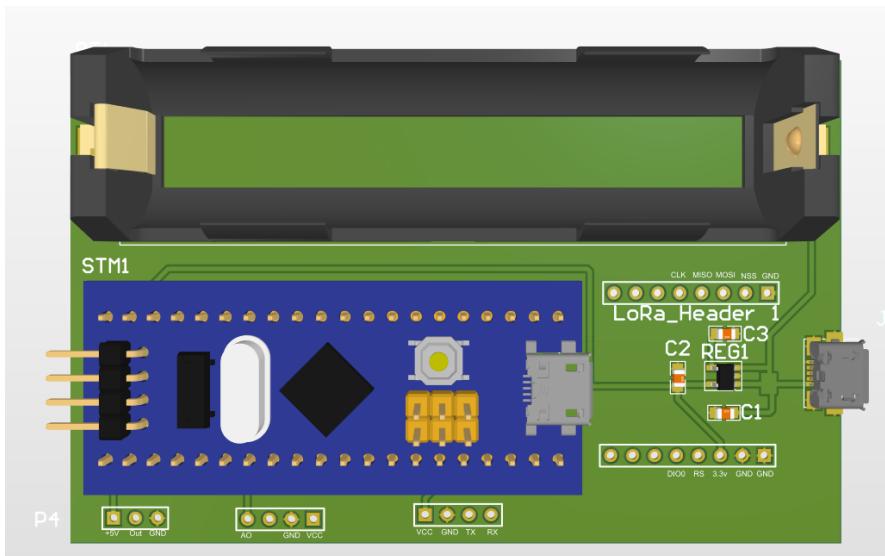
Dây tín hiệu: Kích thước trung bình 10mil dùng để nối các chân GPIO với các chân tín hiệu thiết bị ngoại vi.

Dây nguồn pin: Kích thước trung bình 25mil, dùng để kết nối pin qua các mạch bảo vệ và IC ổn áp rồi cung cấp cho STM32.

3.9.2 Lựa chọn tụ điện và điện trở

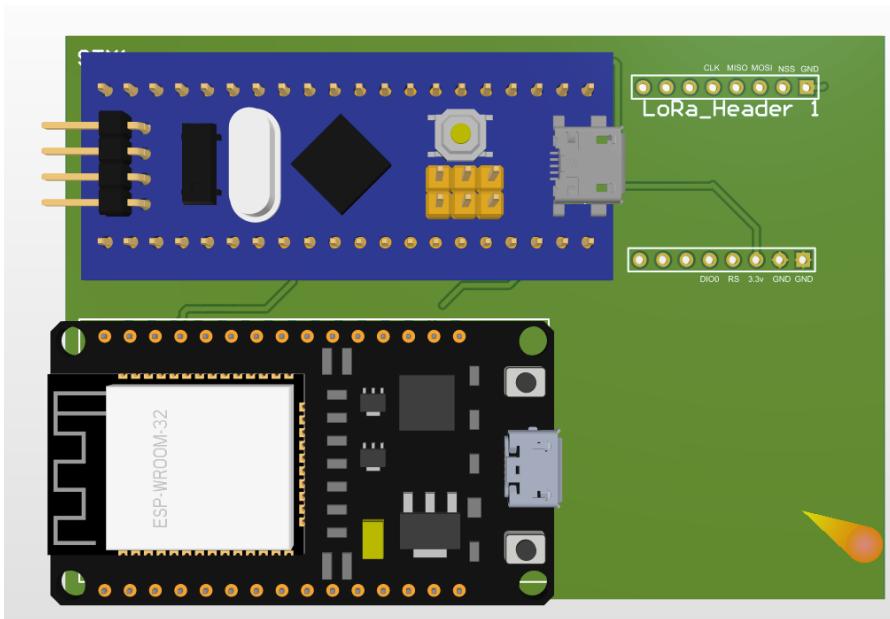
3.10 Đóng gói các node và đánh giá

Sơ đồ PCB khói Relay Node và Sensor Node



Hình 3-17 Mạch PCB của Relay node và Sensor Node

Sơ đồ PCB khối Gateway



Tổng kết lại, Chương 3 đã trình bày chi tiết toàn bộ quá trình thiết kế phần cứng từ sơ đồ khối, lựa chọn linh kiện đến hoàn thiện mạch PCB cho các thành phần cốt lõi của hệ thống gồm Sensor Node, Relay Node và Gateway. Nhóm đã giải quyết thành công bài toán về tối ưu hóa năng lượng thông qua việc thiết kế mạch sạc xả pin TP4056 và lựa chọn chế độ hoạt động phù hợp cho vi điều khiển STM32F103. Việc hoàn thiện phần cứng với các kết nối vật lý tin cậy là tiền đề vật chất quan trọng để triển khai các thuật toán điều khiển. Tuy nhiên, để các nút mạng rời rạc này có thể kết nối và phối hợp nhịp nhàng với nhau trong mô hình mạng hình cây, cần có một cơ chế vận hành thông minh. Chương 4 tiếp theo sẽ

đi sâu vào Thiết kế cách thức vận hành hệ thống và giao thức truyền thông, bao gồm việc xây dựng cấu trúc bản tin, quy trình đăng ký mạng và cơ chế phân chia khe thời gian (TDMA) để giải quyết bài toán xung đột dữ liệu.

Để đảm bảo thiết bị hoạt động ổn định trong môi trường nông nghiệp khắc nghiệt (nắng nóng, độ ẩm cao, mưa phun), nhóm quyết định tự thiết kế và gia công vỏ hộp bằng công nghệ In 3D (3D Printing). Phương án này cho phép tùy biến kích thước linh hoạt để chứa pin dung lượng lớn mà vẫn đảm bảo độ gọn nhẹ tối đa.

Dựa trên đặc tả kỹ thuật ban đầu, vỏ hộp cần đáp ứng các tiêu chí sau:

- Tiêu chuẩn bảo vệ: Hướng tới chuẩn IP65 (Chống bụi và nước phun).
- Kích thước tùy biến: Thiết kế vừa khít với kích thước PCB và pin 8000mAh.
- Độ bền: Vật liệu phải chịu được nhiệt độ cao ngoài trời và không bị giòn gãy dưới tia UV.

Vật liệu in :PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) , có *Ưu điểm của là* Khả năng chịu nhiệt tốt (lên đến 70-80°C), kháng tia UV, độ bền và đậm cao và đặc biệt là lớp kết dính (layer adhesion) tốt giúp vỏ hộp kín nước hơn.

Vỏ hộp có kích thước 40x40x60 cm, có thiết kế gồm nhiều ngăn, các ngăn có các dây điện nối với nhau, lỗ thông giữa các ngăn có thêm các nút cao su bịt kín hoặc bôi keo. Phân bố không gian bên trong gồm:

- Ngăn dưới đặt Pin và mạch bảo vệ nguồn, nối dây với ngăn trên qua một lỗ phía trên .
- Ngăn trên bao gồm các module STM32 hoặc ESP32.
- Cảm biến DHT22 và cảm biến độ ẩm đất được nối ra bên ngoài và phần mạch chuyển đổi đặt bên trong hộp. DHT22 gắn bên ngoài vỏ hộp, có thêm một khe cắm các chân DHT22 nối với mạch chuyển đổi, trừ bộ phận đo thì phần còn lại phủ keo epoxi. HW-080 được nối ra ngoài thông qua lỗ cảm xuống đất, các chân nối bằng dây điện chống nước, phủ keo các phần còn lại trừ 2 đầu đo độ ẩm đất. Các chân của cảm biến nối với mạch chuyển đổi thông qua các dây chống nước.

Phía trên thiết kế 1 bộ phần nối ăng-ten qua lỗ trên của vỏ, có nút cao su chống thấm.

Kết luận: Việc tự thiết kế và in 3D vỏ hộp bằng vật liệu PETG là giải pháp tối ưu nhất cho dự án, giải quyết được bài toán xung đột giữa việc sử dụng pin dung lượng lớn (kích thước cồng kềnh) và yêu cầu về tính nhỏ gọn, thẩm mỹ của thiết bị IoT nông nghiệp.

CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ CÁCH THỨC VẬN HÀNH HỆ THỐNG VÀ GIAO THỨC TRUYỀN THÔNG

Ở Chương 3, nhóm thực hiện đã hoàn thành việc xây dựng nền tảng vật lý cho hệ thống thông qua việc lựa chọn linh kiện, thiết kế sơ đồ nguyên lý và hoàn thiện các bo mạch phần cứng (Sensor Node, Relay Node và Gateway). Tuy nhiên, để các thành phần phần cứng rời rạc này có thể phối hợp nhịp nhàng, đảm bảo truyền tải dữ liệu ổn định trên diện tích rộng tới 100 hecta mà vẫn tối ưu hóa năng lượng cho các thiết bị chạy pin, cần phải có một cơ chế vận hành thông minh và một giao thức truyền thông được thiết kế chuyên biệt.

Chương 4 sẽ đi sâu vào giải quyết bài toán này thông qua việc thiết lập kiến trúc mạng hình cây (Tree Topology) và xây dựng quy trình vận hành chi tiết theo cơ chế chu kỳ (Duty Cycle). Nội dung chương sẽ tập trung phân tích các pha hoạt động của hệ thống từ giai đoạn đăng ký (Registration Phase) đến giai đoạn báo cáo dữ liệu (Reporting Phase), đồng thời trình bày cấu trúc bản tin và giải thuật đa truy nhập phân chia theo thời gian (TDMA) nhằm loại bỏ xung đột đường truyền và đảm bảo độ tin cậy cao nhất cho mạng cảm biến.

4.1 Kiến trúc mạng

4.1.1 Lựa chọn kiến trúc tổng quan của mạng

Bảng 4-1: So sánh ưu/nhược điểm giữa các kiến trúc mạng không dây phổ biến

Kiến trúc	Ưu điểm	Nhược điểm
Mesh (Lưới)	<ul style="list-style-type: none">- Độ tin cậy cao- Các node có khả năng tự định tuyến và phục hồi khi có node lỗi- Phạm vi phủ sóng rất rộng nhờ truyền đa chặng	<ul style="list-style-type: none">- Rất tốn năng lượng- Cấu hình phức tạp, yêu cầu giao thức định tuyến.
Star (Sao)	<ul style="list-style-type: none">- Rất tiết kiệm năng lượng- Thiết lập và quản lý đơn giản- Chi phí vận hành và bảo trì rẻ	<ul style="list-style-type: none">- Vận hành phụ thuộc hoàn toàn vào Gateway trung tâm.- Khả năng mở rộng kém

Tree (Cây)	<ul style="list-style-type: none"> - Tiết kiệm năng lượng cho node - Phạm vi truyền tốt nhờ các node nhánh. - Dễ dàng mở rộng mạng 	<ul style="list-style-type: none"> - Độ tin cậy trung bình do các cụm node con phụ hoàn toàn thuộc vào các node cha - Phức tạp trong việc đồng bộ hóa giữa các node trong mạng
-----------------------	---	--

Dựa trên những yêu cầu của bài toán, nhóm em lựa chọn kiến trúc mạng phân cấp theo dạng cây (Tree topology) nhằm tối ưu hóa phạm vi phủ sóng và hiệu suất năng lượng. Kiến trúc này phân chia rõ rệt các vai trò và chức năng của từng thành phần trong mạng

Việc lựa chọn kiến trúc này dựa trên sự phân tích và cân nhắc các mô hình phổ biến

- Mô hình Hình sao (Star): Bị loại bỏ do diện tích 100 hecta là quá lớn. Các node ở xa sẽ phải tăng công suất phát (Tx Power) để truyền trực tiếp về Gateway, gây cạn kiệt pin nhanh chóng và không đảm bảo độ tin cậy của đường truyền
- Mô hình Lưới (Mesh): Bị loại bỏ do xung đột trực tiếp với yêu cầu tiết kiệm năng lượng. Trong mạng mesh, các node phải thường xuyên thức để lắng nghe và chuyển tiếp bản tin cho các node khác, tiêu tốn tài nguyên và khiến việc quản lý chu kỳ ngủ/thức (sleep/wake cycle) 1 phút/lần trở nên cực kỳ phức tạp và tốn pin.
- Mô hình Cây (Tree): Là lựa chọn tối ưu, giải quyết được đồng thời cả hai bài toán phạm vi truyền và tối ưu năng lượng

❖ **Ưu điểm của kiến trúc cây:**

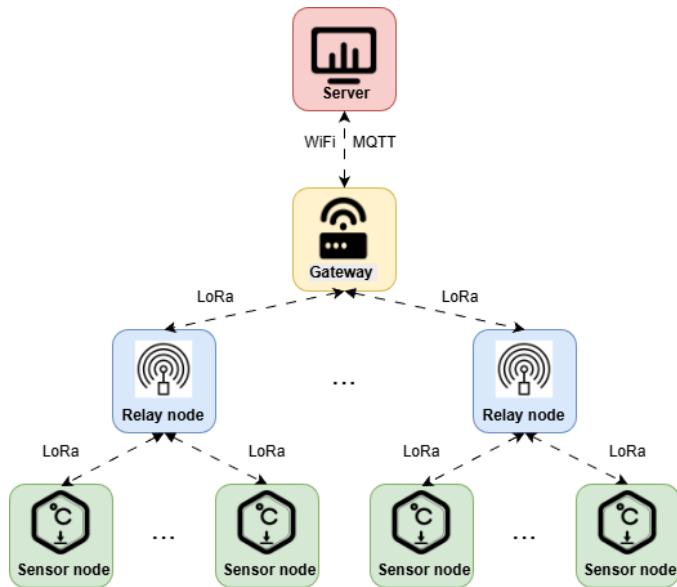
- **Tối ưu năng lượng cho các Sensor node:** Đây là ưu điểm then chốt. Sensor Node chỉ cần giao tiếp ở khoảng cách ngắn, cho phép chúng hoạt động ở mức công suất phát thấp và ngủ gần như toàn bộ thời gian, đảm bảo mục tiêu > 2 năm pin.
- **Mở rộng phạm vi hiệu quả:** Việc triển khai mạng Tree phù hợp cho các ứng dụng diện rộng như nông nghiệp (100 hecta).
- **Dễ dàng mở rộng quy mô:** Khi cần thêm vùng giám sát, chỉ cần bổ sung một cụm Sensor Node mới và một Relay Node tương ứng mà không ảnh hưởng đến toàn bộ mạng lưới hiện có.

❖ **Nhược điểm cần khắc phục:**

- Hệ thống có tính phụ thuộc vào các Relay node. Nếu một Relay node gặp sự cố, toàn bộ các Sensor node kết nối với nó sẽ bị mất liên lạc, gây chết mạng cục bộ 1 vùng

- Để tiết kiệm năng lượng tối đa, các Relay Node và Sensor Node con của nó cần có cơ chế đồng bộ thời gian để cùng thức dậy, trao đổi dữ liệu và đi ngủ, điều này làm tăng độ phức tạp của firmware.

4.1.2 Sơ đồ kiến trúc và thành phần trong mạng



Hình 4-1: Sơ đồ kiến trúc và các thành phần trong mạng

Hệ thống được cấu thành từ 4 thành phần chức năng riêng biệt, tương ứng với các tầng của kiến trúc cây:

1. Sensor Node (Nút Cảm biến)

- Chức năng chính: Là thiết bị đầu cuối thực hiện việc thu thập dữ liệu môi trường.
- Hoạt động: Đây là thành phần ưu tiên tiết kiệm pin cao nhất. Node hoạt động ở chế độ SLEEP trong hầu hết thời gian. Cứ mỗi chu kỳ thiết lập sẵn, Ví dụ khi thức dậy, cấp nguồn cho cảm biến, đọc dữ liệu, đóng gói bản tin và gửi (TX) một bản tin LoRa đến Relay Node chịu trách nhiệm quản lý. Ngay sau khi gửi xong, nó quay lại chế độ ngủ sâu.
- Số lượng: 100 nút.

2. Relay Node (Nút Chuyển tiếp)

- Chức năng: Đóng vai trò là thiết bị trung gian, làm cầu nối giữa các cụm Sensor Node và Gateway trung tâm
- Hoạt động: Hoạt động theo chu kỳ, đồng bộ với các Sensor Node mà nó quản lý. Khi đến chu kỳ, Relay Node thức dậy và chuyển sang chế độ nhận (RX) trong một cửa sổ thời gian ngắn để thu thập bản tin từ tất cả

các Sensor node con của nó. Sau khi thu thập đủ (hoặc timeout), nó tổng hợp dữ liệu và gửi một bản tin LoRa lên Gateway, sau đó quay về chế độ ngủ.

3. Gateway

- Chức năng: Là nút gốc của mạng, tiếp nhận toàn bộ dữ liệu từ mạng WSN LoRa và làm cầu nối dữ liệu đó lên hệ thống Server.
- Trong các kịch bản triển khai thực tế, kết nối giữa Gateway và Server thường yêu cầu các công nghệ truyền thông tốc độ cao, có băng thông lớn và khả năng truy cập Internet như WiFi hoặc LTE. Mục tiêu chính là cho phép người vận hành có thể giám sát và điều khiển hệ thống từ xa. Tuy nhiên, trong phạm vi của dự án này, nhóm đã giản lược mô hình để tập trung vào việc chứng minh các chức năng cốt lõi. Cụ thể, hệ thống demo sử dụng máy tính cá nhân (PC) đóng vai trò là Server cục bộ. Việc trao đổi dữ liệu giữa Gateway và máy tính Server này được thực hiện trực tiếp thông qua giao thức MQTT

4. Server (Máy chủ)

- Chức năng: Là nơi chịu trách nhiệm tiếp nhận, lưu trữ, xử lý và trực quan hóa dữ liệu, giúp người vận hành có công cụ quản lý từ xa
- Như đã đề cập, trong phạm vi dự án, máy tính cá nhân được sử dụng để giả lập vai trò Server, chạy MQTT Broker và các script Python để xử lý, lưu trữ dữ liệu

4.2 Cách thức vận hành hệ thống cần thiết kế

Như đã trình bày từ phần trước. Hệ thống được thiết kế vận hành dựa trên kiến trúc mạng hình cây (Tree Topology) phân cấp, đảm bảo sự đồng bộ chặt chẽ về mặt thời gian và tối ưu hóa năng lượng thông qua cơ chế chu kỳ nhiệm vụ (Duty Cycle). Quá trình vận hành được chia thành hai giai đoạn chính: Giai đoạn Khởi tạo mạng và Giai đoạn Hoạt động ổn định.

4.2.1 Tương tác và thứ tự tương tác của các thành phần trong hệ thống

Quy trình khởi tạo và thiết lập định tuyến thông tin trong mạng diễn ra theo trình tự phân cấp từ thiết bị trung tâm xuống các thiết bị đầu cuối (Top-down Hierarchy), với sự tham gia của ba thành phần chính: Gateway, Relay Node và Sensor Node.

1. Khởi động và cấu hình Gateway: Gateway đóng vai trò là nút gốc (Root Node) của mạng, được cấp nguồn liên tục và luôn duy trì trạng thái sẵn sàng (Active).
 - Ngay sau khi khởi động, Gateway thiết lập kết nối với Server thông qua giao thức MQTT, chuyển sang chế độ lắng nghe để chờ yêu cầu kết nối từ các Relay Node.

- Gateway tiếp nhận các tham số cấu hình mạng quan trọng từ Server, bao gồm: Tổng thời gian chu kỳ mạng (TOTAL_CYCLE_SEC), ngưỡng thời gian chờ và danh sách các Relay được phép gia nhập và TDMA slot của chúng.
 - Sau khi cấu hình hoàn tất, Gateway chuyển sang chế độ lắng nghe để chờ các gói dữ liệu hoặc yêu cầu kết nối từ các Relay Node muốn gia nhập.
2. Cấu hình và Đồng bộ Relay Node (Network Expansion) Relay Node đóng vai trò là điểm nút trung gian, mở rộng vùng phủ sóng của mạng.
- Khi khởi động, Relay Node phát đi bản tin quảng bá REG_ADV để yêu cầu gia nhập mạng.
 - Gateway khi nhận được REG_ADV sẽ kiểm tra tính hợp lệ và phản hồi bằng bản tin GW_REG_ACK. Bản tin này chứa thông tin cấu hình chu kỳ mạng và độ lệch thời gian (Time Offset) cần thiết.
 - Relay Node sử dụng thông tin từ GW_REG_ACK để đồng bộ đồng hồ thời gian thực (RTC) và thiết lập lịch trình hoạt động (Ngủ/Thức) khớp với nhịp của Gateway.
3. Cấu hình và Đồng bộ Sensor Node: Sensor Node là các thiết bị đầu cuối, kết nối vào mạng thông qua Relay Node quản lý trực tiếp (TARGET_RELAY_ID).
- Sensor Node khi khởi động sẽ phát định kỳ bản tin REG_ADV để tìm kiếm Relay Node mục tiêu.
 - Relay Node khi nhận được yêu cầu sẽ cấp phát tài nguyên và phản hồi bằng bản tin REG_ACK. Quan trọng nhất, bản tin này cung cấp chỉ số khe thời gian (Time Slot Index) duy nhất cho Sensor Node trong cơ chế TDMA và tổng chu kỳ mạng.
 - Dựa trên Time Slot được cấp, Sensor Node tự động tính toán thời gian ngủ để đảm bảo thức dậy đúng thời điểm Relay Node mở cửa sổ lắng nghe trong các chu kỳ tiếp theo.
4. Chuyển đổi sang Pha Báo cáo: Sau khi quá trình đăng ký và đồng bộ hoàn tất, toàn bộ hệ thống chuyển sang trạng thái hoạt động chính thức - Pha Báo cáo.
- Tại pha này, các Sensor và Relay Node hoạt động theo cơ chế chu kỳ đã thống nhất ở Pha Đăng ký.
 - Các thiết bị sẽ luôn phiên chuyển đổi giữa trạng thái ACTIVE (để đo đặc, truyền/nhận dữ liệu) và STOP (ngủ sâu tiết kiệm năng lượng)
 - Đối với các Sensor Node hoặc Relay Node mới muốn gia nhập mạng sau thời điểm này, chúng sẽ bắt đầu lại từ quy trình phát bản tin ADV như mô tả ở trên, đảm bảo tính linh hoạt của hệ thống

4.2.2 Trạng thái và điều kiện chuyển đổi trạng thái của các thành phần trong hệ thống

Để đáp ứng yêu cầu về thời gian hoạt động của thiết bị sử dụng pin (≥ 2 năm), hệ thống vận hành theo cơ chế Chu kỳ nhiệm vụ (Duty Cycle). Chiến lược quản lý năng lượng được thiết kế bằng cách đồng bộ hóa trạng thái hoạt động của hai thành phần tiêu thụ năng lượng chính: Vi điều khiển trung tâm (MCU) và Module vô tuyến (LoRa).

a) Các chế độ hoạt động của Vi điều khiển (STM32F103)

Vi điều khiển đóng vai trò "bộ não" điều phối toàn bộ hoạt động, chuyển đổi linh hoạt giữa hai chế độ chính:

1. Chế độ Hoạt động (Run Mode):

- Mô tả: CPU được cấp xung nhịp (Clock) từ bộ dao động thạch anh ngoại, thực thi các mã lệnh chương trình. Các ngoại vi cần thiết như GPIO, SPI, UART, Timer được cấp nguồn để giao tiếp với cảm biến và module LoRa.
- Nhiệm vụ:
 - Khởi tạo hệ thống (System Init).
 - Giao tiếp 1-Wire với cảm biến DHT22 và đọc ADC từ cảm biến độ ẩm đất.
 - Xử lý dữ liệu, đóng gói bản tin.
 - Điều khiển module LoRa qua giao thức SPI (Gửi lệnh TX, đọc FIFO RX).
- Dòng tiêu thụ: Khoảng 4 - 10 mA

2. Chế độ Ngủ sâu (Stop Mode):

- Mô tả: Đây là trạng thái chiếm phần lớn thời gian trong chu kỳ hoạt động. Trong chế độ này, bộ dao động chính (HSI/HSE) và CPU bị ngắt hoàn toàn. Tuy nhiên, nội dung trong bộ nhớ SRAM và các thanh ghi vẫn được duy trì. Chỉ có bộ định thời gian thực (RTC) và bộ dao động tần số thấp (LSE 32.768kHz) hoạt động để đếm thời gian.
- Cơ chế đánh thức: MCU sẽ thoát khỏi chế độ Stop Mode và quay lại Run Mode khi có ngắt từ bộ RTC (RTC Alarm Interrupt) thông qua đường EXTI Line 17.
- Dòng tiêu thụ: Giảm sâu xuống mức xấp xỉ $20\mu A$ đóng vai trò quyết định trong việc kéo dài tuổi thọ pin.

b) Các chế độ hoạt động của Module LoRa (SX1278)

Module SX1278 được điều khiển bởi MCU để chuyển đổi giữa các trạng thái nhằm tối ưu hóa công suất tiêu thụ tại mỗi pha làm việc:

1. Chế độ Ngủ (Sleep Mode):

- Mô tả: Trạng thái tiêu thụ năng lượng thấp nhất của module ($\mu A < 1$).
- Hoạt động: Toàn bộ khối RF (Radio Frequency) và bộ tạo dao động tinh thể bị tắt. Chỉ giao tiếp SPI là hoạt động để nhận lệnh đánh thức từ MCU. Module được đưa vào chế độ này ngay khi MCU chuẩn bị vào Stop Mode.

2. Chế độ Chờ (Standby Mode):

- Mô tả: Trạng thái trung gian, sẵn sàng chuyển sang thu hoặc phát.
- Hoạt động: Bộ tạo dao động tinh thể hoạt động, bộ đệm dữ liệu (FIFO) có thể truy xuất. MCU chuyển module sang chế độ này để nạp dữ liệu vào FIFO trước khi phát hoặc đọc dữ liệu sau khi thu.

3. Chế độ Phát (TX Mode - Transmit):

- Mô tả: Trạng thái tiêu thụ năng lượng cao nhất (lên tới 120 mA ở công suất $+20 \text{ dBm}$).
- Hoạt động: Module kích hoạt bộ khuếch đại công suất (Power Amplifier) để đẩy tín hiệu ra anten. Ngay sau khi hoàn tất việc gửi gói tin (sự kiện TxDone), module tự động chuyển về trạng thái Standby để tiết kiệm năng lượng.

4. Chế độ Thu (RX Mode - Receive Continuous):

- Mô tả: Trạng thái lắng nghe tín hiệu trên kênh truyền (tiêu thụ khoảng $10.8 - 12 \text{ mA}$).
- Hoạt động: Mạch LNA (Low Noise Amplifier) và bộ giải điều chế hoạt động liên tục để tìm kiếm mã mào đầu (Preamble) của gói tin LoRa. Trạng thái này được duy trì trong suốt "Cửa sổ lắng nghe" (RX Window) của Relay Node.

c) **Điều kiện và Quy trình chuyển đổi trạng thái**

Quy trình chuyển đổi trạng thái diễn ra tự động trong mỗi chu kỳ TOTAL_CYCLE_SEC như sau:

1. Thức dậy (Wake-up): Ngắt RTC Alarm kích hoạt MCU chuyển từ Stop Mode -> Run Mode. MCU ngay lập tức đánh thức LoRa từ Sleep -> Standby.
2. Thực thi nhiệm vụ (Active Phase):
 - MCU thực hiện đo đạc hoặc xử lý dữ liệu.

- Khi cần truyền tin: MCU nạp dữ liệu vào LoRa và kích hoạt chế độ TX Mode.
 - Khi cần nhận tin (đối với Relay): MCU kích hoạt LoRa sang RX Mode trong khoảng thời gian quy định.
3. Ngủ (Sleep Entry): Sau khi hoàn thành nhiệm vụ truyền/nhận hoặc hết thời gian chờ (Timeout), MCU tính toán thời gian ngủ bù trừ:

$$T_{sleep} = T_{total\ cycle} - T_{active}$$

MCU cài đặt thời gian này cho RTC Alarm, ra lệnh cho LoRa vào Sleep Mode, và cuối cùng tự đưa mình vào Stop Mode.

4.2.3 Cấu trúc bản tin và Opcode

Để đảm bảo tối ưu hóa băng thông và năng lượng cho các thiết bị chạy pin, hệ thống sử dụng một khung truyền dữ liệu (Frame Structure) gọn nhẹ, loại bỏ các overhead phức tạp của giao thức LoRaWAN tiêu chuẩn. Mỗi bản tin được định danh bằng một byte đầu tiên gọi là Mã chức năng (Function Code) do nhóm tự quyết định.

Bảng 4-2: Bảng tổng hợp các Function code sử dụng trong hệ thống

Mã Function	Hướng truyền	Mô tả chức năng
0x01	Sensor → Relay	Bản tin quảng bá yêu cầu gia nhập mạng.
0x02	Relay → Sensor	Xác nhận đăng ký thành công, cung cấp thông tin thiết lập hệ thống và cấp phát khe thời gian (Time Slot).
0x03	Sensor → Relay	Bản tin dữ liệu dữ liệu cảm biến đo (Nhiệt độ, Độ ẩm, Độ ẩm đất).
0x04	Relay → Gateway	Bản tin chuyển tiếp dữ liệu đã tổng hợp từ nhiều cảm biến lên Gateway.
0x05	Gateway → Relay	Xác nhận Gateway đã nhận gói dữ liệu thành công.
0x06	Relay → Gateway	Yêu cầu đăng ký mạng và xin tham số cấu hình từ Gateway.
0x07	Gateway → Relay	Phản hồi cấu hình hệ thống (Chu kỳ hoạt động, độ lệch thời gian).

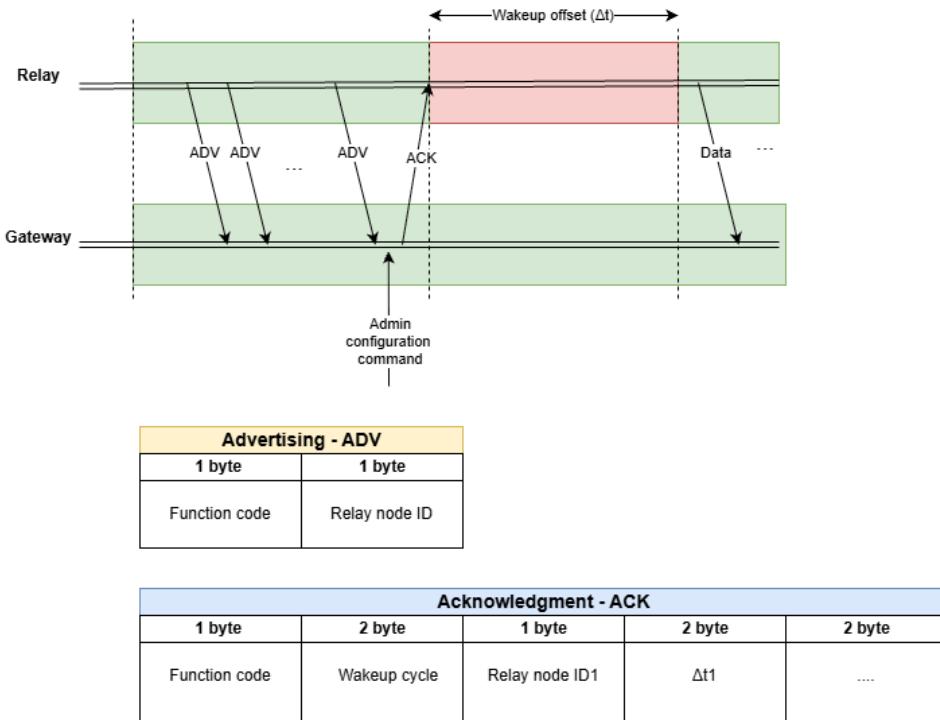
4.3 Pha Đăng ký (registration phase) và các bước thiết lập hệ thống

Pha Đăng ký là giai đoạn khởi tạo thiết yếu nhằm thiết lập liên kết mạng, đồng bộ đồng hồ thời gian thực và phân phối tài nguyên truyền dẫn (khe thời gian). Quá trình này diễn ra theo trình tự từ lớp trên xuống lớp dưới: trước tiên

là kết nối giữa Relay Node và Gateway, sau đó là kết nối giữa Sensor Node và Relay Node.

4.3.1 Quy trình đăng ký giữa Relay Node và Gateway

Quy trình này nhằm mục đích khai báo sự hiện diện của Relay trong mạng và nhận tham số cấu hình thời gian từ Gateway để thiết lập cơ chế TDMA mức mạng (Network-level TDMA).



Hình 4-2: Sequence diagram và cấu trúc bản tin pha đăng ký giữa Relay và Gateway/Server

a) Mô tả luồng hoạt động

Dựa vào hình 4-3 luồng hoạt động của pha đăng ký giữa Relay và Gateway diễn ra như sau:

- Bước 1 - Quảng bá (Advertising): Ngay khi khởi động, Relay Node chưa có thông tin về chu kỳ mạng. Nó phát đi liên tục các gói tin quảng bá ADV (Function Code: 0x06) với chu kỳ ngắn để yêu cầu gia nhập mạng.
- Bước 2 - Cấu hình từ Quản trị viên: Gateway nhận được các gói tin ADV nhưng chưa phản hồi ngay. Gateway chờ lệnh cấu hình từ Server hoặc Quản trị viên (qua giao thức UART/MQTT). Lệnh này chứa danh sách các Relay được phép gia nhập và tham số lệch thời gian (Δt) cho từng Relay.
- Bước 3 - Xác nhận và Đồng bộ (Acknowledgment): Sau khi nhận lệnh cấu hình, Gateway phát gói tin ACK (Function Code: 0x07). Đây là gói tin quan trọng chứa thông tin đồng bộ cho toàn mạng.

- Bước 4 - Thiết lập trạng thái: Relay Node nhận được ACK sẽ trích xuất tham số Wakeup Cycle (Tổng chu kỳ) và (Độ lệch thời gian khởi động). Relay thiết lập bộ đếm thời gian thực (RTC) để thức dậy lệch pha so với mốc 0 của Gateway đúng bằng khoảng Δt sau đó chuyển sang trạng thái hoạt động chính thức.

b) Cấu trúc bản tin

Với bản tin quảng bá (ADV) giữa Relay với Gateway:

- Function code (1 byte): Mã lệnh 0x06, bản tin yêu cầu đăng ký.
- Relay node ID (1 byte): Địa chỉ định danh duy nhất của Relay (ví dụ: 0x01)

Với bản tin Xác nhận (ACK) - Gateway gửi Relay: Gói tin này có kích thước động, chứa cấu hình cho nhiều Relay cùng lúc

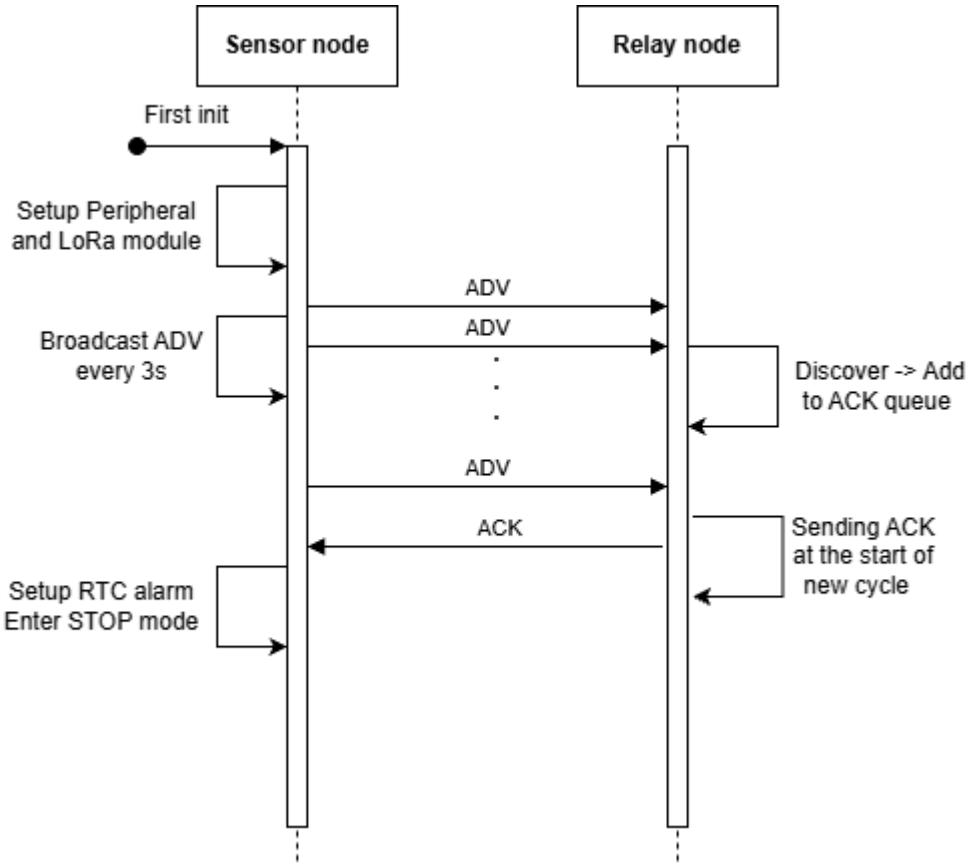
- Function code (1 byte): Mã lệnh 0x07, bản tin phản hồi cấu hình mạng
- Wakeup cycle (2 byte): Tổng thời gian của một chu kỳ chính mạng (tính bằng giây).
- Relay ID 1 (1 byte): ID của Relay thứ nhất được cấu hình
- Δt_1 (2 byte): Thời gian trễ thức dậy (Wakeup Offset) của Relay thứ nhất

Tương tự như vậy, Các cặp ID, Δt cho các Relay tiếp theo.

4.3.2 Quy trình đăng ký giữa Sensor Node và Relay Node

Sau khi Relay Node đã đồng bộ với Gateway, nó bắt đầu chấp nhận các Sensor Node. Quy trình này nhằm cấp phát khe thời gian (Time Slot) cho Sensor để tránh xung đột dữ liệu cục bộ.

a) Mô tả luồng hoạt động



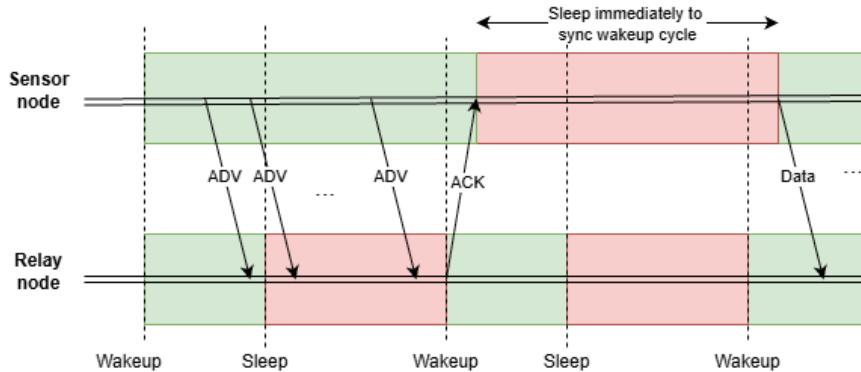
Hình 4-4: Sequence diagram cho pha đăng ký giữa Sensor node và Relay node

Dựa trên sequence diagram ở hình trên, chu trình diễn ra pha đăng ký giữa Relay node và Sensor node diễn ra như sau:

- Bước 1 - Tìm kiếm Relay: Sensor Node khởi động và phát gói tin ADV (Function Code: 0x01) chứa ID của bản thân và ID của Relay mục tiêu (Target Relay ID) để thể hiện mong muốn gia nhập mạng.
- Bước 2 - Lắng nghe và Xử lý: Relay Node trong trạng thái thức (Wakeup) sẽ lắng nghe kênh truyền. Khi nhận được ADV hợp lệ thuộc danh sách mình quản lý. Relay không phản hồi ngay mà đưa Sensor vào hàng đợi xử lý để tránh làm gián đoạn việc thu nhận các node khác.
- Bước 3 - Cấp phát và Phản hồi: Đầu mỗi duty cycle, Relay sẽ dành khoảng thời gian đầu tiên ngay thức dậy để gửi đi gói tin ACK (Function Code: 0x02) tới Sensor. Gói tin này chứa chỉ số khe thời gian (TDMA Slot) mà Relay cấp phát cho Sensor đó.
- Bước 4 - Đồng bộ tức thời: Ngay sau khi nhận được ACK, Sensor Node thực hiện ngủ ngay lập tức. Hành động này nhằm đồng bộ hóa điểm bắt đầu chu kỳ của Sensor với Relay. Sensor tính toán thời gian ngủ dựa trên

Wakeup Cycle nhận được để đảm bảo nó sẽ thức dậy đúng vào đầu pha Báo cáo tiếp theo.

b) Cấu trúc bản tin:



Advertising - ADV		
1 byte	1 byte	1 byte
Function code	Sensor node ID	Relay node ID

Acknowledgment - ACK				
1 byte	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte
Function code	Sensor node ID	Relay node ID	Wakeup Cycle	TDMA slot

Hình 4-5: Chu trình hoạt động và cấu trúc các trường bản tin trong pha đăng ký ký giữa Sensor node và Relay node

Bản tin Quảng bá (ADV) - Sensor gửi Relay:

- Function code (1 byte): Mã lệnh 0x01, bản tin yêu cầu đăng ký.
- Relay node ID (1 byte): Địa chỉ định danh duy nhất của Sensor
- Relay Node ID (1 Byte) Địa chỉ của Relay node quản lý mà Sensor muốn kết nối

Bản tin Xác nhận (ACK) - Relay gửi Sensor:

- Function code (1 byte): Mã lệnh 0x02, bản tin phản hồi yêu cầu đăng ký
- Relay node ID (1 byte): Địa chỉ định danh duy nhất của Sensor gửi đăng ký (xác nhận lại)
- Relay Node ID (1 Byte): Địa chỉ của Relay node gửi
- Wakeup Cycle (2 Bytes): Tổng chu kỳ mạng hiện tại
- TDMA Slot (1 Byte) Số thứ tự khe thời gian Relay cấp phát cho sensor. Dữ liệu này sẽ được dùng để tính toán thời gian chờ để gửi dữ liệu mỗi duty cycle (trình bày kỹ hơn ở phần Cơ chế đa truy nhập phân chia theo thời gian TDMA)

4.4 Pha Báo cáo và định tuyến dữ liệu trong mạng

Pha Báo cáo là giai đoạn hoạt động chính của hệ thống, diễn ra định kỳ theo chu kỳ TOTAL_CYCLE đã được đồng bộ. Mục tiêu của pha này là thu thập dữ liệu môi trường từ các nút biên (Sensor Node) và chuyển tải về trung tâm (Gateway) thông qua các nút trung gian (Relay Node) với độ tin cậy cao nhất.

4.4.1 Chu trình pha Báo cáo

Quy trình hoạt động được chia thành 3 giai đoạn nhỏ diễn ra tuần tự:

1. Giai đoạn Thu thập (Sensor Node tới Relay Node):

- **Thức dậy và Đo đặc:** Tại thời điểm bắt đầu pha báo cáo, Sensor Node và Relay node thức dậy đồng bộ từ chế độ STOP Mode. Nhiệm vụ đầu tiên của Relay luôn là gửi tin phản hồi gia nhập mạng cho các Sensor đăng ký ở pha trước. Do đó, phía Sensor node sẽ phải có một khoảng chờ đầu chu kỳ (timeout 1s)
- **Đợi khe thời gian (TDMA Wait):** Để tránh xung đột đường truyền (Collision) khi nhiều Sensor cùng gửi về một Relay, mỗi Sensor sẽ chờ một khoảng thời gian chờ tương ứng với Slot ID đã được cấp phát ở pha đăng ký
- Sau khi hết thời gian chờ, Sensor gửi bản tin SS_DATA chứa dữ liệu đo được. Để đảm bảo Relay nhận được tin trong môi trường có nhiều, Sensor thực hiện gửi lặp lại bản tin này 3 lần liên tiếp trong khe thời gian của mình trước khi quay lại chế độ ngủ.
- Đối với sensor node, trong mỗi 7 chu kỳ, nó sẽ tiến hành đo để cập nhật bộ dữ liệu cảm biến hiện tại. Đối với các chu kỳ cần đo, sau khi đợi TDMA slot của mình và gửi được dữ liệu, nó sẽ thực hiện thêm chu trình đo trong vòng với timeout trong vòng 3s -> lưu dữ liệu rồi mới tiến hành vào Stop mode. Các chu kỳ còn lại sẽ sử dụng lại dữ liệu cũ để gửi, sau đó tiến hành vào Stop mode ngay lập tức. Mục đích để tiết kiệm duty cycle, giảm thời gian hoạt động của các node cảm biến nhằm mục tiêu tiết kiệm thời lượng pin cho mạng.

2. Giai đoạn Tổng hợp và Xử lý (Tại Relay Node):

- **Lắng nghe (Listening):** Relay Node mở cửa sổ lắng nghe trong vòng 8s để thu tín hiệu từ các Sensor.
- **Lọc và Lưu trữ:** Khi nhận được gói tin, Relay thực hiện:
 - Kiểm tra Target Relay ID để loại bỏ các gói tin từ cụm mạng khác
 - Kiểm tra danh sách quản lý (Managed List).
 - Cơ chế khử trùng lặp (De-duplication): Do Sensor gửi lặp lại 3 lần, Relay chỉ lưu bản tin hợp lệ đầu tiên nhận được trong chu kỳ và bỏ qua các bản tin sau đó để tối ưu hóa bộ nhớ đệm.

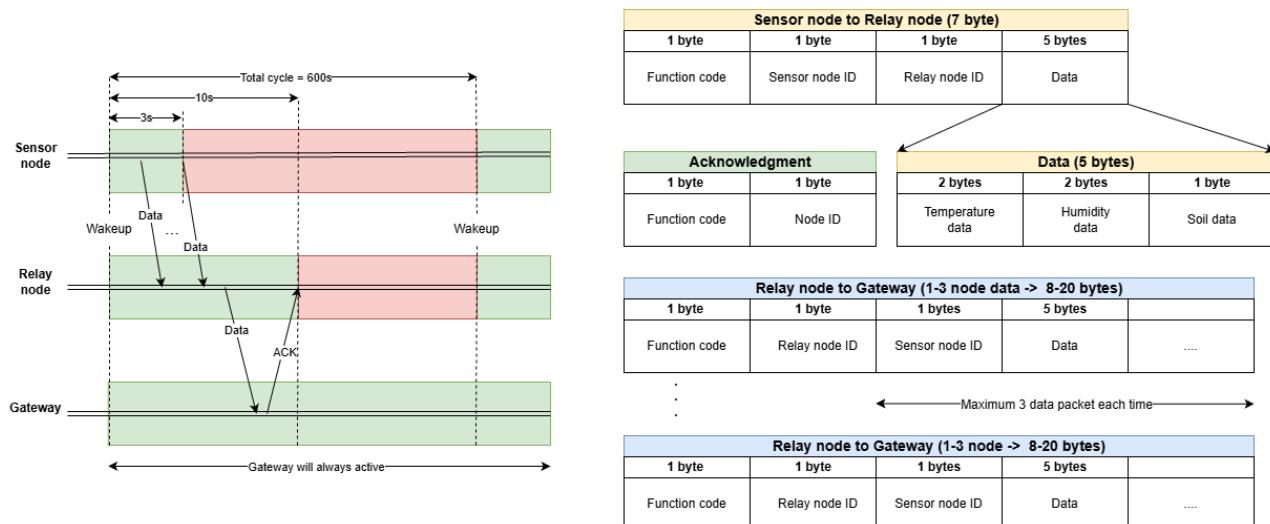
3. Giai đoạn Chuyển tiếp (Relay Node -> Gateway):

- Đây là điểm cải tiến quan trọng của hệ thống. Thay vì gom toàn bộ dữ liệu của 10-20 Sensor vào một gói tin khổng lồ (khiến gói tin dài, dễ bị lỗi bit và mất toàn bộ dữ liệu nếu truyền hỏng), Relay thực hiện Cơ chế Đóng gói chia theo đợt
- Dữ liệu được chia thành các gói tin nhỏ, mỗi gói chứa dữ liệu của tối đa 3 Sensor Node.
- Relay lần lượt gửi từng gói nhỏ lên Gateway và chờ xác nhận (ACK). Việc này giúp giảm thiểu rủi ro: nếu một gói tin bị mất, chỉ dữ liệu của 3 sensor bị ảnh hưởng thay vì toàn bộ mạng lưới.

Ví dụ: Nếu Relay quản lý 10 Sensor, nó sẽ gửi 4 bản tin liên tiếp về Gateway:

- Gói 1: Sensor 1, 2, 3
- Gói 2: Sensor 4, 5, 6
- Gói 3: Sensor 7, 8, 9
- Gói 4: Sensor 10

4.4.2 Cấu trúc bản tin pha Báo cáo:



Hình 4-6: Sequence diagram các bản tin gửi trong pha báo cáo và cấu trúc các trường

a) Bản tin Dữ liệu Cảm biến (Sensor Data Packet)

Được gửi từ Sensor Node tới Relay Node. Tổng độ dài: 8 Bytes.

Bảng 4-3: Mô tả các trường trong cấu trúc bản tin dữ liệu Sensor node gửi cho Relay quản lý

Byte Index	Tên trường	Giải thích
------------	------------	------------

0	Function Code	Giá trị 0x03 (SS_DATA). Định danh loại bản tin báo cáo.
1	Sensor ID	Địa chỉ định danh của Sensor gửi (VD: 0xFE).
2	Target Relay ID	Địa chỉ Relay đích. Giúp Relay lọc bỏ các gói tin nhiễu từ các cụm lân cận.
3-4	Temperature	Giá trị nhiệt độ đo được. Để gửi số thực dưới dạng byte, giá trị được nhân 10
5-6	Humidity	Giá trị độ ẩm không khí, nhân 10
7	Soil Moisture	Giá trị độ ẩm đất, đơn vị % (0-100).

b) Bản tin Chuyển tiếp (Forward Data Packet)

Được gửi từ Relay Node tới Gateway. Đây là bản tin có độ dài động, phụ thuộc vào số lượng sensor trong lô (Batch), tối đa 3 sensor. Cấu trúc: [Header] + [Payload Sensor 1] + [Payload Sensor 2] + ...

Công thức độ dài: $L = 3 + (6 \times N)$ (bytes), ví dụ:

- *Nếu gửi 1 Sensor:* 9 Bytes.
- *Nếu gửi 3 Sensor:* 21 Bytes.

Bảng 4-4: Mô tả các trường bản tin chuyển tiếp dữ liệu từ Relay lên Gateway

STT	Thành phần	Mô tả chi tiết
1	Function Code	0x04 (FUNC_CODE_RL_DATA) Mã lệnh định danh loại bản tin là dữ liệu chuyển tiếp từ Relay.
2	Relay ID	Địa chỉ định danh của Relay Node đang gửi báo cáo (ví dụ: 0x01). Giúp Gateway biết dữ liệu đến từ cụm nào.
3	Payload Sensor 1	Dữ liệu của Sensor thứ nhất trong lô. Cấu trúc chi tiết gồm 5 byte như bảng phụ dưới
4	Payload Sensor 2	(Tùy chọn) Dữ liệu của Sensor thứ hai (nếu $N = 2$)
5	Payload Sensor 3	(Tùy chọn) Dữ liệu của Sensor thứ ba (nếu $N = 3$).

Trong đó, Mỗi khối Payload đại diện cho dữ liệu của một Sensor Node, được sắp xếp liền kề nhau trong bản tin chính:

Bảng 4-5: Cấu trúc payload dữ liệu của mỗi Sensor node
Cấu trúc payload dữ liệu của mỗi Sensor node

Byte Index	Thành phần	Mô tả chi tiết
0	Sensor ID	Địa chỉ định danh của Sensor gốc (ví dụ: 0xFE).
1	Temp (High)	Byte cao của giá trị Nhiệt độ.
2	Temp (Low)	Byte thấp của giá trị Nhiệt độ. (Giá trị thực = $\text{Temp} / 10$).
3	Hum (High)	Byte cao của giá trị Độ ẩm.
4	Hum (Low)	Byte thấp của giá trị Độ ẩm. (Giá trị thực = $\text{Hum} / 10$).

Ví dụ minh họa bản tin (Hex):

Giả sử Relay 0x01 gửi dữ liệu của 2 Sensor:

1. Sensor 0xFE: 25 độ C (255), 60.5% (605), Độ ẩm đất 45%.
2. Sensor 0xFD: 26.0 độ C (260), 61.0% (610), Độ ẩm đất 50%.

Bản tin thực tế mà Relay chuyển tiếp lên Gateway(15 Bytes):

04 01 02 FE 00 FF 02 5D 2D FD 01 04 02 62 32

- Header: 04 (Func), 01 (RelayID), 02 (Count = 2).
- Payload 1: FE (ID), 00 FF (255), 02 5D (605), 2D (45).
- Payload 2: FD (ID), 01 04 (260), 02 62 (610), 32 (50).

4.5 Cơ chế đa truy nhập phân chia theo thời gian (TDMA)

Hệ thống áp dụng kỹ thuật TDMA (Time Division Multiple Access) ở hai cấp độ để giải quyết triệt để vấn đề xung đột dữ liệu khi nhiều thiết bị cùng phát sóng.

4.5.1 Sensor Node với Relay Node (Chia khe thời gian)

Trong một cụm mạng do Relay quản lý, các Sensor Node không được phép gửi dữ liệu cùng lúc. Thay vào đó, mỗi Sensor được cấp một "số thứ tự" hay còn gọi là chỉ số khe thời gian (Time Slot Index) ngay sau khi đăng ký thành công.

- Cấp phát: Khi Sensor gửi yêu cầu đăng ký, Relay kiểm tra danh sách quản lý. Nếu Sensor có ID hợp lệ (ví dụ: 0xFE), Relay sẽ tra cứu vị trí của ID đó trong mảng quản lý cố định (ví dụ: vị trí số 0). Số 0 này chính là Time Slot của Sensor.

- Tại Pha Báo cáo, sau khi thức dậy, Sensor không gửi ngay mà thực hiện trễ (delay) một khoảng thời gian T_{wait} được tính theo công thức:

$$T_{wait} = T_{base} + (T_{slot width} \times Time slot index)$$

- T_{base} : Thời gian bảo vệ, chờ cho Relay khởi động xong hoàn toàn và hoàn thành task gửi ACK cho sensor node đăng ký chu kỳ trước (sẽ trình bày ở các phần sau)
- $T_{slot width}$: Thông số độ rộng mỗi khe thời gian, thiết lập là 100ms.

Ví dụ: Sensor có Slot 0 sẽ gửi lúc T=1500ms. Sensor có Slot 1 sẽ gửi lúc T=1600ms .

4.5.2 Relay Node với Gateway (Phân phát độ lệch thời gian thức dậy)

Vì hệ thống có thể có nhiều Relay Node cùng gửi về một Gateway duy nhất, Gateway thực hiện điều phối bằng cách quy định thời điểm thức dậy (Wake-up Offset) khác nhau cho từng Relay.

- Cấu hình: Gateway nhận lệnh từ Server (thông qua UART) chứa thông tin cấu hình mạng: [Tổng chu kỳ, Relay 1 dậy sau 5s, Relay 2 dậy sau 10s...].
- Vận hành:
 - Gateway phát bản tin cấu hình này xuống cho các Relay (Broadcast).
 - Relay 1 nhận được lệnh "Offset = 5000ms", nó sẽ cài đặt bộ đếm thời gian thực (RTC) để thức dậy chậm hơn mốc 0 của hệ thống là 5 giây.
 - Relay 2 nhận được lệnh "Offset = 10000ms", nó sẽ thức dậy chậm hơn 10 giây.
- Kết quả: Các Relay hoạt động lệch pha nhau hoàn toàn, đảm bảo khi Relay 1 đang gửi dữ liệu thì Relay 2 vẫn đang ngủ hoặc chưa gửi, giúp Gateway không bao giờ bị nghẽn.

Như vậy, Chương 4 đã trình bày chi tiết về kiến trúc vận hành và giao thức truyền thông của hệ thống. Nhóm đã xác lập được mô hình mạng hình cây phân cấp giúp mở rộng vùng phủ sóng, đồng thời thiết kế thành công cơ chế TDMA và quy trình đồng bộ thời gian chia nhỏ giữa Sensor Node, Relay Node và Gateway. Việc tối ưu hóa cấu trúc bản tin và áp dụng chiến lược 'ngủ sâu' (Stop Mode) trong phần lớn chu kỳ hoạt động là những giải pháp then chốt được đề xuất để giải quyết mâu thuẫn giữa hiệu năng truyền tin và giới hạn năng lượng.

Tuy nhiên, những thiết kế logic và giao thức nêu trên cần được kiểm chứng thông qua các tính toán định lượng cụ thể để khẳng định độ tin cậy khi triển khai thực

té. Liệu quỹ đường truyền có đủ để vượt qua các vật cản trên cánh đồng? Và liệu chiến lược Duty Cycle có thực sự đảm bảo tuổi thọ pin trên 2 năm như yêu cầu đặt ra? Những câu hỏi này sẽ được giải đáp chi tiết trong Chương 5: Đánh giá tính khả thi hệ thống, thông qua các mô hình toán học về Link Budget và bài toán năng lượng tiêu thụ.

CHƯƠNG 5. ĐÁNH GIÁ TÍNH KHẢ THI HỆ THỐNG

Tại Chương 4, hệ thống đã được định hình rõ nét về mặt logic vận hành thông qua kiến trúc mạng hình cây, cơ chế phân chia khe thời gian TDMA và các quy trình đồng bộ hóa giữa các node. Tuy nhiên, để khẳng định những thiết kế này có thể đáp ứng được các yêu cầu khắt khe của bài toán thực tế – cụ thể là phủ sóng toàn bộ diện tích 100 hecta và duy trì tuổi thọ pin trên 2 năm – cần phải có những đánh giá định lượng chính xác.

Chương 5 sẽ tập trung vào việc phân tích và tính toán tính khả thi của hệ thống dựa trên hai khía cạnh vật lý cốt lõi: Quỹ đường truyền (Link Budget) và Năng lượng tiêu thụ. Thông qua các mô hình toán học và thông số kỹ thuật thực tế của linh kiện, chương này sẽ chứng minh khả năng kết nối ổn định của công nghệ LoRa trong môi trường cánh đồng, đồng thời kiểm chứng xem kịch bản vận hành Duty Cycle đã thiết kế có đảm bảo được cân bằng năng lượng cho cả Sensor Node và Relay Node hay không.

5.1 Tính toán và đánh giá quỹ đường truyền – Link Budget:

5.1.1 Cơ sở lý thuyết và Mô hình toán học

Quỹ đường truyền (Link Budget) là một công cụ quan trọng trong thiết kế hệ thống thông tin vô tuyến, cho phép tính toán tổng năng lượng thu được tại phía thu sau khi đã trừ đi các suy hao trên đường truyền và cộng thêm các hệ số lợi ích từ anten. Mục đích của việc tính toán này là xác định xem tín hiệu tại điểm thu có đủ mạnh để bộ giải điều chế khôi phục lại dữ liệu gốc hay không.

Phương trình Link Budget cơ bản (tính theo đơn vị logarit dB) được biểu diễn như sau:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FS} - L_M$$

Trong đó:

- P_{RX} : Công suất thu tại điểm đến (dBm)
- P_{TX} : Công suất phát (dBm)
- G_{TX}, G_{RX} : Độ lợi anten phát và thu (dBi)
- L_{FS} : Suy hao đường truyền (Pathloss) (dB)
- L_M : Các suy hao môi trường khác (cáp nối, connectors, suy hao do vật cản/môi trường,...)

Công thức tính suy hao đường truyền L_{FS} - suy hao đường truyền đặc trưng cho sự giảm cường độ tín hiệu khi lan truyền trong không gian theo khoảng cách d và tần số f . Công thức xấp xỉ thực nghiệm được sử dụng là:

$$L_{FS}(dB) = 32,45 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f$$

Trong đó:

- d : Khoảng cách truyền (km).
- f : Tần số hoạt động (MHz).

5.1.2 Thiết lập tham số bài toán và tính toán Link Budget:

Dựa trên yêu cầu kỹ thuật của bài toán giám sát cánh đồng diện tích 100 hecta và thông số kỹ thuật của module LoRa SX1278 đã lựa chọn, các tham số đầu vào cho bài toán Link Budget được thiết lập như sau:

RFS_L125_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 125 kHz bandwidth	SF = 6	-	-118	-	dBm
		SF = 7	-	-123	-	dBm
		SF = 8	-	-126	-	dBm
		SF = 9	-	-129	-	dBm
		SF = 10	-	-132	-	dBm
		SF = 11	-	-133	-	dBm
		SF = 12	-	-136	-	dBm

Hình 5-1: Thông số độ nhạy thu tại các Spreading Factor (SF) của module LoRa SX1278

- Tần số hoạt động f : 433 MHz (Băng tần ISM).
- Công suất phát $P_{TX}+20$ dBm (Cấu hình tối đa trên SX1278).
- Độ nhạy thu (S_{RX}): -123 dBm (Tại cấu hình SF7, BW 125kHz).
- Độ lợi Anten G_{TX} và G_{RX} : Giả sử sử dụng anten lò xo/anten ngoài cơ bản với độ lợi $G_{anten} = 2$ dBi.
- Suy hao môi trường (L_M): Để đảm bảo tính thực tế và an toàn cho thiết kế, hệ thống dự trù mức suy hao do vật cản (cây trồng), đầu nối và nhiễu môi trường là 25 dB.
- Yêu cầu khoảng cách (d):
 - Liên kết từ Sensor Node đến Relay Node: $d_1 = 100m = 0.2$ km\$.
 - Liên kết Relay Node đến Gateway: $d_2 = 1000m = 1$ km.

Từ đó ta tính được suy hao truyền đường truyền đối với:

- Sensor node:

$$L_{FS_{Sensor}} = 32.45 dB + 20 \log_{10} 0.2 + 20 \log_{10} 433 = 71.18 dB$$

- Relay node:

$$L_{FS_{relay}} = 32.45 dB + 20 \log_{10} 1 + 20 \log_{10} 433 = 85.18 dB$$

Điều kiện tiên quyết để hệ thống truyền thông không dây hoạt động được là công suất thu phải lớn hơn độ nhạy thu của thiết bị: $P_{RX} > S_{RX}$ với S_{RX} là độ nhạy thu.

Tuy nhiên, trong thực tế triển khai ngoài trời (cánh đồng), để đảm bảo kết nối ổn định trước các yếu tố thời tiết (mưa, sương mù) và vật cản thay đổi, một hệ thống LoRa tiêu chuẩn thường yêu cầu Link Margin từ 10 dB đến 20 dB. Với công thức độ nhạy thu đã trình bày phần trước

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FS} - L_M$$

Ta tính toán được Link Budget của các node trong mạng:

- **Sensor node:** $P_{RX_{Sensor}} \approx -71.18 \text{ (dB)}$

=> Biên dũ trũ (Link margin): $LM_{Sensor} = P_{RX_{Sensor}} - S_{RX} = 47.82 \text{ dB}$

- **Relay node:** $P_{RX_{Sensor}} \approx -89.18 \text{ (dB)}$

=> Biên dũ trũ (Link margin): $LM_{Relay} = P_{RX_{Sensor}} - S_{RX} = 33.82 \text{ dB}$

5.1.3 Đánh giá Link Budget:

Dựa vào các thông số biên dự trù đã tính toán, có thể khẳng định tính khả thi của hệ thống khi triển khai thực tế:

1. Độ tin cậy cao: Kết quả tính toán cho thấy biên dự trù của cả hai liên kết đều rất lớn (lần lượt là >50dB và >30dB), vượt xa ngưỡng an toàn tiêu chuẩn (10-20dB).
2. Khả năng mở rộng: Với biên dự trù lớn như vậy, hệ thống hoàn toàn có khả năng hoạt động tốt ở khoảng cách xa hơn yêu cầu hoặc trong điều kiện môi trường xấu hơn dự kiến (ví dụ: cây trồng phát triển dày đặc gây suy hao lớn hơn 25dB).
3. Khẳng định tính khả thi: Thiết kế phần cứng sử dụng module SX1278 với cấu hình SF7, BW 125kHz và Anten thông dụng hoàn toàn đáp ứng tốt yêu cầu bài toán giám sát trên diện tích 100 hecta.

5.2 Tính toán năng lượng tiêu thụ của Sensor node

5.2.1 Kích bản vận hành và thông số năng lượng phần cứng

Dựa trên tài liệu đặc tả kỹ thuật và kết quả đo đạc thực tế, dòng tiêu thụ của các thành phần chính được xác định như sau:

Bảng 5-1: Dòng tiêu thụ của các linh kiện phần cứng

Thiết bị	Chế độ	Dòng tiêu thụ (mA)
STM32F103C8T6	Active	4

	Stop	0.02
DTH22	Active	0.5
	IDLE	0.06
HS0163	Active	5
	IDLE	0.5
SX1278	TX	120
	IDLE	1.2

Bài toán đưa ra dựa theo kịch bản vận hành của hệ thống:

- Tổng chu kỳ hoạt động: 15 phút = 900 giây
- Nguồn nuôi: Pin Lithium với dung lượng lý thuyết $C_{pin} = 8000mah$
- Duty cycle của Sensor node là: 3s với chu kỳ không cần đo cảm biến và 6s với chu kỳ cần đo cảm biến. Sensor node sẽ tiến hành đo mỗi 5 chu kỳ
- Duty cycle của Relay node cố định là 10s với chu trình
 - Timeout 1s cho nhiệm vụ gửi bản tin ACKs đầu chu kỳ
 - Timeout 8s cho chế độ lắng nghe các gói tin tới
 - Timeout 1s cho nhiệm vụ chuyển tiếp dữ liệu lên Gateway
- Mục tiêu: Thời gian hoạt động ≥ 2 năm

5.2.2 Tính toán năng lượng tiêu thụ và tuổi thọ cho Sensor node

Phản tích kịch bản:

1. Chu kỳ thường (Type A - 4 lần): Chỉ thức dậy 3s để đồng bộ/gửi theo TDMA. Không đo cảm biến. LoRa ở chế độ RX toàn duty cycle
2. Chu kỳ đo (Type B - 1 lần): Thức dậy 6s để đo đặc và gửi dữ liệu. Cảm biến bật. LoRa ở chế độ RX toàn duty cycle

Bước 1: Tính điện lượng tiêu thụ trong Chu kỳ thường (Type A)

- Thời gian Active: $T_A = 3s$
- Dòng Active $I_{active_A} = I_{MCU_{active}} + I_{LoRa_{RX}} = 4 + 12 = 16$ mA.
- Điện lượng Active $Q_A = 16$ mA x 3s = 48 mAs.

Bước 2: Tính điện lượng tiêu thụ trong Chu kỳ đo (Type B)

- Thời gian Active: $T_B = 6s$.
- Dòng Active $I_{active_B} = I_{MCU} + I_{LoRa_{RX}} = 4 + 12 + 5.5 = 21.5$ mA.
- Điện lượng Active $Q_B = 21.5$ mA x 6s = 129 mAs.

Bước 3: Tính dòng tiêu thụ trung bình toàn trình

- Tổng thời gian ngủ: $4500s - (4 \times 3s + 6s) = 4482s$.
- Tổng điện lượng tiêu thụ trong 5 chu kỳ:

$$\begin{aligned}
Q_{total} &= (4 \times Q_A) + (1 \times Q_B) + Q_{sleep} \\
&= (4 \times 48) + 129 + (4482 \times 0.02) = 410.64 \text{ mAs}
\end{aligned}$$

- Dòng trung bình:

$$I_{Avg_Sensor} = \frac{410.64}{4500} \approx 0.0913 \text{ m (hay } 91.3 \mu\text{A})$$

Bước 4: Uớc tính tuổi thọ pin Sensor

$$T_{Life_Sensor} = \frac{C_{Pin}}{I_{Avg_Sensor}} = \frac{8000}{0.0913} \approx 87,623 \text{ giờ } \approx 10 \text{ năm}$$

5.2.3 Tính toán năng lượng tiêu thụ và tuổi thọ cho Relay node

Relay Node chịu tải nặng hơn do phải lắng nghe (RX) thời gian dài và phát lại (TX) dữ liệu cho Gateway. Phân tích kịch bản chu trình hoạt động

- Gửi ACK (TX): Timeout 1s.
- Lắng nghe Sensor (RX): Timeout 8s.
- Chuyển tiếp Server (TX): Timeout 1s.
- Ngủ (Sleep): 900s - 10s = 890s.

Bước 1: Tính điện lượng pha Active

- Pha TX (Tổng 2s): Dòng $I_{TX_Total} = I_{MCU_Run} + I_{LoRa_TX} = 124 \text{ mA}$
 $\Rightarrow Q_{TX} = 124 \text{ mA} \times 2 \text{ s} = 248 \text{ mAs}$
- Pha RX (8s): Dòng $I_{RX_Total} = I_{MCU_Run} + I_{LoRa_RX} = 4 + 12 = 16 \text{ mA}$
 $\Rightarrow Q_{RX} = 16 \text{ mA} \times 8 \text{ s} = 128 \text{ mAs}$
- Tổng Active: $Q_{Active} = 248 + 128 = 376 \text{ mAs}$

Bước 2: Tính dòng tiêu thụ trung bình

$$\begin{aligned}
I_{Avg_Relay} &= \frac{Q_{Active} + Q_{Sleep}}{T_{Cycle}} = \frac{376 + 17.8}{900} \\
I_{Avg_Relay} &= \frac{393.8}{900} \approx 0.4376 \text{ m}
\end{aligned}$$

Bước 3: Uớc tính tuổi thọ pin Relay

$$\begin{aligned}
T_{Life_Relay} &= \frac{C_{Pin}}{I_{Avg_Relay}} = \frac{8000}{0.4376} \approx 18,281 \text{ giờ} \\
&\Rightarrow T_{Life_Relay} \approx 2.08 \text{ năm}
\end{aligned}$$

5.2.4 Nhận xét và Đánh giá tính khả thi:

Đối với Sensor Node:

- Hệ thống hoàn toàn khả thi và dư thừa năng lượng rất lớn.

- Sensor Node có thể hoạt động ổn định tới 10 năm, vượt xa yêu cầu 2 năm. Điều này cho phép mở rộng tính năng (như tăng tần suất đo) nếu cần thiết trong tương lai mà không lo ngại về pin.

Đối với Relay Node:

- Về mặt lý thuyết, Relay Node đạt chỉ tiêu ($2.08 \text{ năm} > 2 \text{ năm}$).
- Tuy nhiên, biên độ dự trữ năng lượng rất thấp (chỉ dư khoảng 0.08 năm đến 1 tháng). Trong thực tế, các yếu tố như pin tự xả (self-discharge), hiệu suất mạch nguồn không đạt 100%, và sự lão hóa linh kiện có thể làm giảm thời gian thực tế xuống dưới 2 năm.

Khuyến nghị kỹ thuật:

Để đảm bảo Relay Node hoạt động an toàn và chắc chắn trên 2 năm, nhóm đề xuất các phương án tối ưu:

- Phương án 1 (Phần cứng): Tăng dung lượng pin cho riêng Relay Node (ví dụ: ghép song song 2 cell pin 18650 để đạt 16000mAh, hoặc dùng pin 10000mAh), nâng tuổi thọ lên > 4 năm.
- Phương án 2 (Phần mềm): Giảm thời gian cửa sổ lắng nghe (RELAY_RX_WINDOW) từ 8s xuống 6s nếu đồng bộ thời gian đủ tốt, giúp tiết kiệm khoảng 20% năng lượng Active.
- Phương án 3 (Vận hành): Tăng chu kỳ tổng (TOTAL_CYCLE) lên 20 phút thay vì 15 phút, giúp giảm tần suất thức dậy của Relay.

KẾT LUẬN: Với cấu hình hiện tại và pin 8000mAh, hệ thống ĐÁP ỨNG ĐƯỢC yêu cầu bài toán về mặt năng lượng, tuy nhiên cần lưu ý kiểm soát chặt chẽ quy trình sản xuất và chất lượng pin cho các Relay Node.

Tổng kết lại Chương 5, các kết quả tính toán lý thuyết đã cung cấp những bằng chứng vững chắc về tính khả thi của hệ thống. Về mặt truyền thông, quỹ đường truyền cho thấy biên dự trữ năng lượng rất lớn (trên 30dB), đảm bảo kết nối LoRa hoạt động tin cậy ngay cả khi môi trường có nhiều vật cản và biến động. Về mặt năng lượng, Sensor Node thể hiện hiệu suất vượt trội với tuổi thọ pin ước tính lên tới 10 năm, trong khi Relay Node cũng đáp ứng được yêu cầu cơ bản là trên 2 năm vận hành, dù biên độ dự trữ còn thấp và cần các biện pháp tối ưu bổ sung.

Những con số khả quan này là cơ sở quan trọng để khẳng định thiết kế phần cứng và kịch bản vận hành là hợp lý. Ké thừa các tham số về thời gian (timing) và chế độ hoạt động (sleep/wake) đã được kiểm chứng tại đây, Chương 6: Thiết kế và phát triển phần mềm nhúng sẽ đi sâu vào việc hiện thực hóa các giải thuật điều khiển này lên vi điều khiển STM32 và ESP32, biến các mô hình tính toán thành mã lệnh thực thi

CHƯƠNG 6. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN PHẦM MỀM NHÚNG

Kết quả đánh giá từ Chương 5 đã khẳng định tính khả thi của hệ thống về mặt lý thuyết, chứng minh rằng cấu hình phần cứng lựa chọn hoàn toàn đáp ứng được các yêu cầu khắt khe về quỹ đường truyền và năng lượng tiêu thụ. Tuy nhiên, để biến các khối linh kiện rời rạc và các kịch bản vận hành Duty Cycle tính toán trên giấy thành một hệ thống hoạt động thực tế, cần phải có sự điều phối chính xác của phần mềm nhúng (Firmware).

Chương 6 sẽ đi sâu vào chi tiết thiết kế và phát triển phần mềm cho ba thành phần cốt lõi: Sensor Node, Relay Node và Gateway. Nội dung chương sẽ trình bày cụ thể các lưu đồ thuật toán (Flowchart) điều khiển luồng hoạt động, cách thực hiện thực hóa các giao thức giao tiếp mức thấp (Low-level drivers) để đọc dữ liệu từ cảm biến DHT22, cảm biến độ ẩm đất, cũng như các cơ chế xử lý lỗi (Error Handling) nhằm đảm bảo hệ thống vận hành ổn định và bền bỉ trong môi trường thực địa.

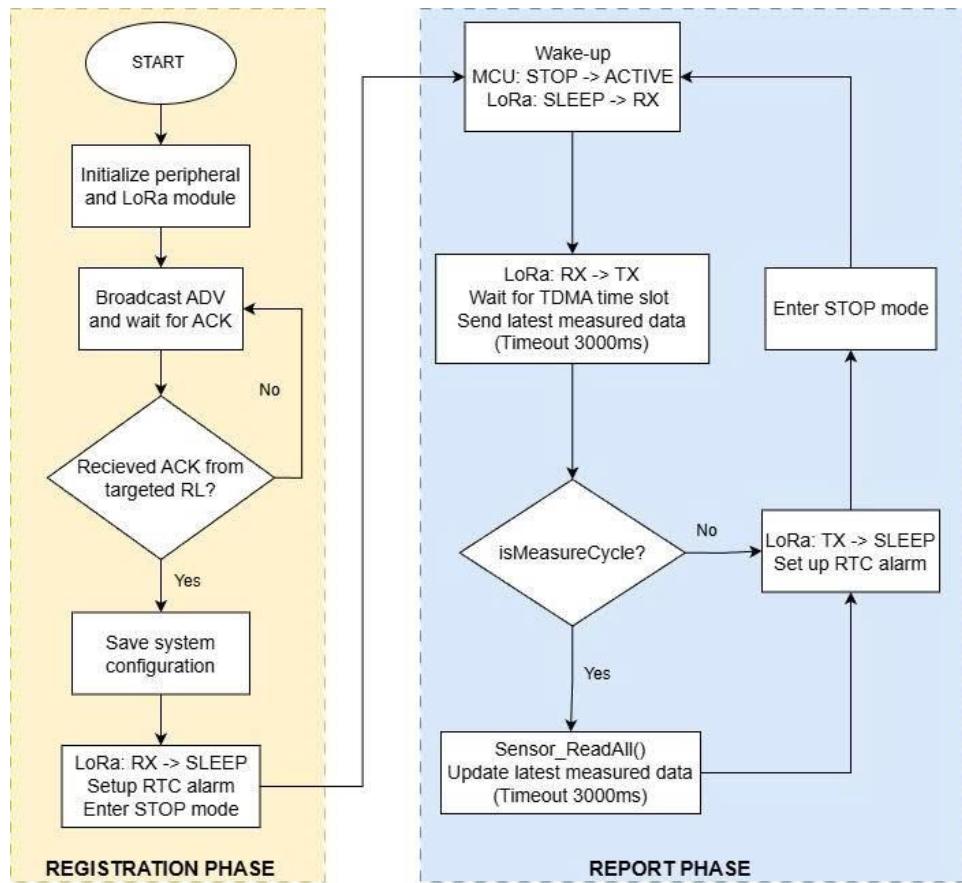
6.1 Thiết kế tổng thể

6.1.1 Sensor node

Phần mềm cho Sensor node được thiết kế với mục tiêu tối ưu hóa năng lượng, đảm bảo thiết bị có thể hoạt động bền bỉ bằng nguồn pin giới hạn ngoài thực địa. Để đạt được điều này, kiến trúc firmware không hoạt động liên tục mà được xây dựng theo cơ chế Chu kỳ hoạt động ngắn quãng (Duty-cycling). Về cơ bản, vi điều khiển STM32 sẽ dành hơn phần lớn thời gian ở trạng thái "Ngủ sâu" (Stop Mode) để giảm dòng tiêu thụ xuống mức micro-ampere. Hệ thống chỉ được đánh thức (Wake-up) định kỳ bởi bộ định thời gian thực (RTC) để thực hiện nhanh chuỗi tác vụ thiết yếu.

Flowchart hoạt động của Sensor node

Sensor node được thiết kế bao gồm 2 pha: pha đăng ký và pha báo cáo.



Hình 6-1: Flowchart chu trình làm việc của Sensor Node

Pha Đăng ký (Registration Phase):

- Nhiệm vụ: Thiết lập kết nối với Relay Node để hình thành cấu trúc mạng hình cây (Cluster-Tree).
- Hoạt động: Khi khởi động, Sensor Node liên tục gửi các bản tin quảng bá (Advertising) tìm kiếm mạng. Khi nhận được phản hồi từ Relay, nó sẽ phân tích gói tin để lưu các thông số cấu hình mạng quan trọng: Relay ID, thời gian ngủ (Stop Mode), chu kỳ đọc cảm biến và Cài đặt RTC Alarm. Sau khi cấu hình xong, Sensor lập tức chuyển sang chế độ Stop Mode.

Pha Báo cáo (Reporting Phase):

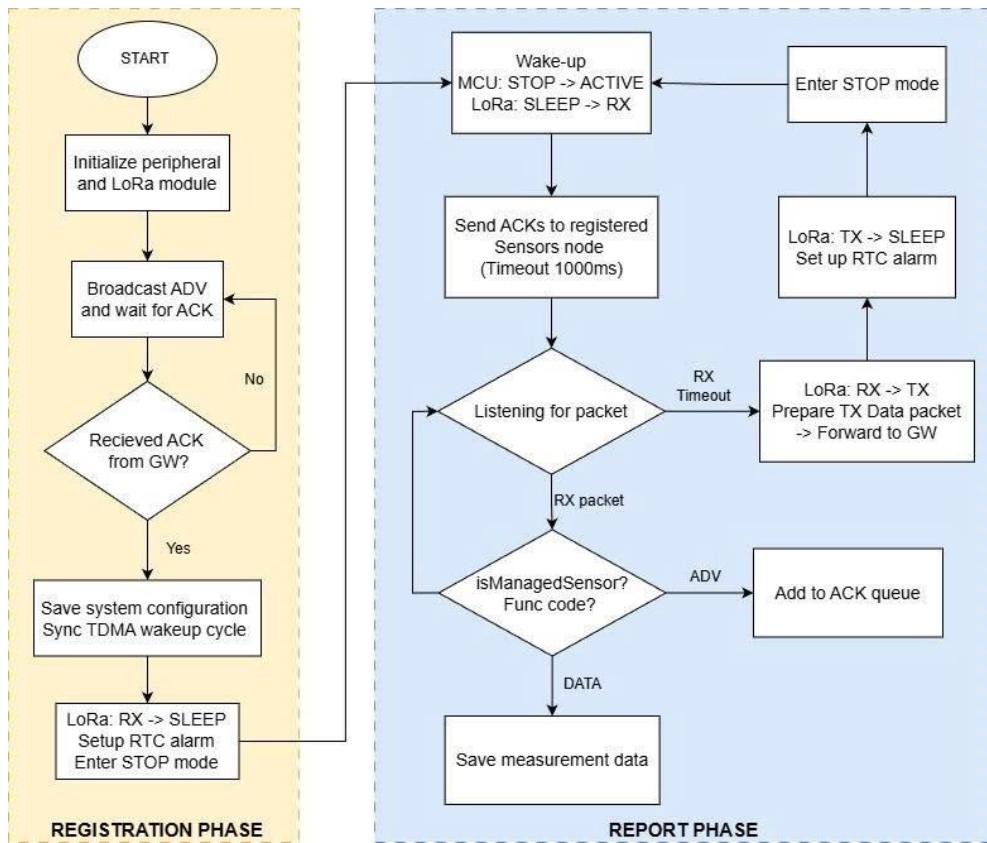
- Cơ chế đánh thức: bắt đầu chu kỳ Sensor Node được đánh thức khỏi Stop Mode bởi ngắt RTC Alarm theo thời gian đã định.
- Cơ chế "Gửi trước - Đo sau": Để đảm bảo khe thời gian TDMA (tối đa 3s), ngay khi thức dậy, Node sẽ gửi ngay bản tin dữ liệu đã được lưu từ chu kỳ trước đó. Trong lần thức dậy đầu tiên, bản tin này mang giá trị 0, đóng vai trò là gói tin xác thực (Heartbeat).

- Đo đặc & Tái chế dữ liệu: Sau khi gửi xong, Sensor mới tiến hành đọc cảm biến cho chu kỳ sau và việc đọc chỉ được phép đọc trong thời gian được quy định. Do đặc thù môi trường nông nghiệp (nhiệt độ/độ ẩm thay đổi chậm), hệ thống áp dụng "Tái chế bản tin", Sensor Node chỉ đọc cảm biến trong những chu kỳ được quy định và sẽ giữ nguyên bản tin cũ để gửi cho các chu kỳ tiếp theo nhằm tăng thời gian ở trạng thái ngủ (Stop Mode). Kết quả đo được lưu vào bộ nhớ đệm (Backup Register) để chuẩn bị cho lần thức dậy sau. Cuối cùng, Node cài đặt lại RTC và quay về Stop Mode.
- Cài đặt chế độ tiết kiệm năng lượng: Sau khi hoàn thành các nhiệm vụ, Sensor Node sẽ tiến hành kích hoạt lại RTC Alarm và đi vào trạng thái ngủ.
- Bù thời gian: Sensor node có quy định chặt chẽ về thời gian hoạt động nhằm mục đích đồng bộ thời gian và đảm bảo TDMA giữa các Sensor và giữa Sensor - Relay. Nếu thời gian hoạt động vượt quá thì tiến hành cưỡng chế đi vào chế độ ngủ, còn nếu sau khi thực thi mà còn dư thời gian thì tiến hành bù thời gian (tiến hành chờ trong 1 khoảng nhất định).

6.1.2 Relay node

Relay Node đóng vai trò là "Trưởng cụm" (Cluster Head) trong mô hình mạng. Khác với Sensor Node chỉ thức dậy trong thời gian rất ngắn, Relay Node có thời gian thực thi dài hơn trong mỗi chu kỳ để phục vụ việc lắng nghe và xử lý dữ liệu từ nhiều nguồn. Tuy nhiên, hoạt động này bị ràng buộc bởi các quy định nghiêm ngặt về đồng bộ thời gian nhằm đảm bảo khe thời gian TDMA khớp nối chính xác giữa việc nhận dữ liệu từ Sensor và gửi dữ liệu lên Gateway. Mỗi Relay được cấu hình để quản lý tối đa 12 Sensor Node.

Mô tả quy trình vận hành và Flowchart



Hình 6-2: Flowchart chu trình làm việc của Relay Node

Pha Đăng ký (Registration Phase):

- Nhiệm vụ: Thiết lập kết nối với Gateway để hình thành cấu trúc mạng hình cây hoàn chỉnh (Cluster-Tree).
- Hoạt động: Khi khởi động, Relay Node liên tục phát các bản tin quảng bá (Advertising) để tìm kiếm mạng. Khi nhận được phản hồi từ Gateway, nó tiến hành phân tích gói tin để lưu các thông số cấu hình mạng quan trọng: thời gian ngủ và khe thời điểm thức dậy trong chu kỳ tổng. Sau khi hoàn tất cấu hình, Relay lập tức chuyển sang chế độ ngủ (Stop Mode) để tiết kiệm năng lượng.

Pha Báo cáo (Reporting Phase):

Cơ chế đánh thức: Relay được đánh thức bởi ngắt RTC Wake-up Interrupt. Trong mỗi chu kỳ thức, Relay thực hiện tuần tự 3 Nhiệm vụ (Tasks) trước khi ngủ lại:

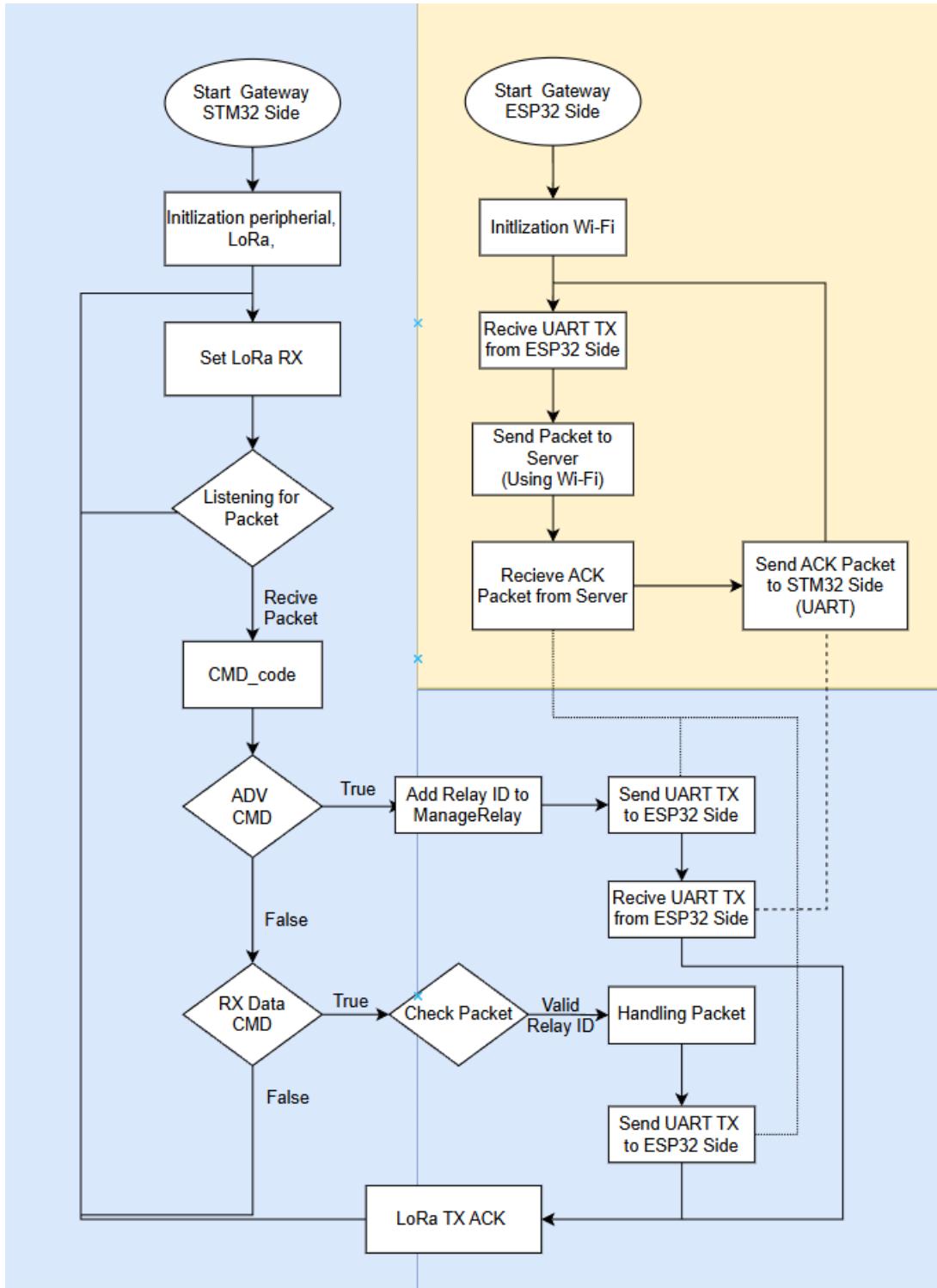
- Task 1 - Quản lý thành viên (Listening for Registration): Relay mở công lắng nghe các bản tin đăng ký từ các Sensor Node mới (nếu có). Nếu nhận được yêu cầu hợp lệ, Relay gửi phản hồi chứa thông tin cấu hình (Setup) và thêm ID của Sensor đó vào Danh sách quản lý (Managed List). Khi hết thời gian quy định cho pha này (Timeout), hệ thống tự động chuyển sang Task 2.

- Task 2 - Thu thập dữ liệu (Data Collection): Relay chuyển sang trạng thái lắng nghe các bản tin dữ liệu đo đạc. Với mỗi bản tin nhận được, Relay kiểm tra tính hợp lệ từ thông tin địa chỉ đích và Sensor ID có nằm trong danh sách quản lý. Nếu dữ liệu hợp lệ, lưu vào bộ nhớ đệm (Buffer). Nếu không thì hủy bản tin. Task 2 cũng chỉ thực hiện trong thời gian nhất định, khi hết thời gian thì chuyển sang task 3
- Task 3 - Tổng hợp và Chuyển tiếp (Aggregation & Forwarding): Relay tổng hợp toàn bộ dữ liệu thu được từ các Sensor thành một gói tin lớn. Do kích thước dữ liệu tổng hợp lớn, để đảm bảo tính toàn vẹn của một bản tin LoRa, Relay sẽ chia nhỏ dữ liệu thành các bản tin con. Các bản tin này được gửi liên tục tới Gateway trong một khoảng thời gian giới hạn (vài ms). Quá trình kết thúc khi nhận được tín hiệu xác nhận (ACK) từ Gateway hoặc khi hết thời gian chờ (Timeout). Sau đó, Relay cài đặt lại RTC và quay về Stop Mode.

6.1.3 Gateway

Gate là phần quan trọng nhất của mạng cảm biến, đóng vai trò là gốc của mô hình Tree Network. Thay vì phải cài đặt chế độ ngủ, Gateway luôn ở chế độ thức và luôn lắng nghe các bản tin LoRa từ Relay node gửi đến, nên Gateway được đặt bên ngoài cánh đồng nơi được luôn được cấp nguồn điện. Vì là sự kết hợp của 2 module STM32F103C8T6 và ESP32WROOM phần mềm nhúng của Gateway bao gồm

Mô tả quy trình vận hành và Flowchart



Hình 6-3: Flowchart chu trình làm việc của Gateway

Gateway là sự kết hợp của 2 Module bao gồm Module STM32F103C8T6 giữ vai trò xử lý các bản tin LoRa và Module ESP32 Wroom giữ nhiệm vụ kết nối với server bằng Wi-Fi. Hai phần tử của Gateway giao tiếp với nhau thông qua UART, dựa vào function code nhận được, một bản tin sẽ được xử lý theo các

khác nhau. Sau khi Gateway khởi tạo các thành phần thành công, chu trình làm việc bắt đầu.

Trong Gateway, phía STM32F103C8T6 luôn ở trạng thái lắng nghe các bản LoRa gửi tới, khi nhận được bản tin, STM32F103C8T6 kiểm tra function code và phân loại bản tin để đưa cách xử lý thích hợp.

- Bản tin quảng bá (ADV Packet): lập tức gửi bản tin đó về phía ESP32 và lưu lại Relay ID vào danh sách quản lý, nếu Relay ID đó có sẵn trong danh sách, thực hiện ghi đè vào ID đã tồn tại. Sau đó 1 bản tin ACK mà Server gửi đến thông từ phía ESP32 sẽ tới.
- Bản tin dữ liệu (Data Packet): kiểm tra Relay ID, nếu Relay ID thuộc danh sách quản lý thì xử lý đơn giản bản tin (lưu tạm thời) và gửi luôn cho ESP32 rồi gửi thẳng lên server.

Với bất kì bản tin nào Gateway đều sẽ gửi lại một bản tin ACK phù hợp: Với bản tin quảng bá là thông tin liên quan đến các thông tin cho Relay Node cài đặt (Thời điểm thức dậy trong chu kỳ tổng, thời gian ngủ), còn bản tin dữ liệu là bản tin ACK xác nhận.

Bên phía ESP32 luôn ở trạng thái nhận bản tin UART từ phía STM32 rồi mới thực thi các nhiệm vụ. Khi nhận được bản tin thì ESP32 gửi thẳng đến Server, rồi chờ bản tin ACK từ server về và chuyển nó về thẳng phía STM32 để gửi tới Relay Node.

Gateway là một khối gồm 2 module khác nhau nhưng chức năng chính là truyền thông với các phần tử trong mạng, sự kết hợp này sẽ tăng khả năng xử lý cho Gateway.

6.2 Thiết kế đọc dữ liệu từ DHT22

Để thu thập dữ liệu nhiệt độ và độ ẩm không khí, nhóm sử dụng cảm biến DHT22 (AM2302). Khác với các chuẩn giao tiếp đồng bộ thông dụng như I2C hay SPI có dây xung nhịp (Clock) riêng, DHT22 sử dụng giao thức Giao tiếp đơn dây (Single-bus) không đồng bộ.

6.2.1 Đặc điểm tín hiệu

Yêu cầu định thời nghiêm ngặt: Do không có dây Clock, việc phân biệt bit 0 và bit 1 hoàn toàn phụ thuộc vào độ rộng của xung (Pulse Width).

- Bit 0: Mức cao kéo dài ~26-28 µs.
- Bit 1: Mức cao kéo dài ~70 µs.

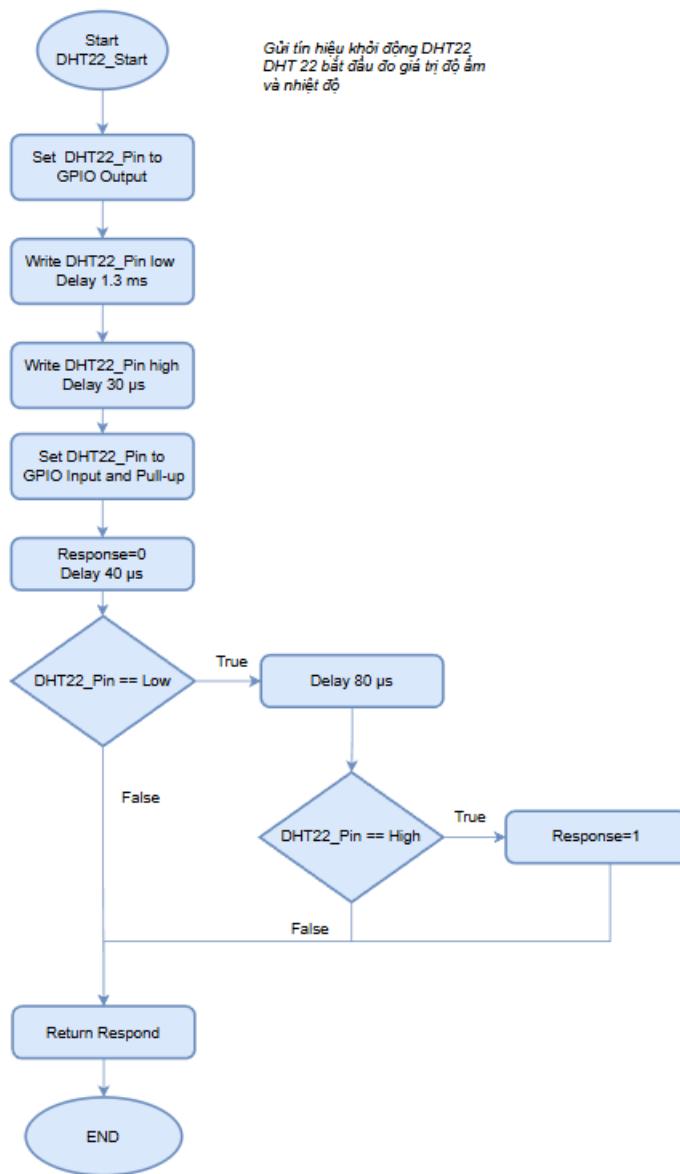
Cấu trúc dữ liệu: Mỗi lần đọc sẽ nhận về 40 bit (5 bytes), bao gồm:

- Byte 1 & 2: Dữ liệu độ ẩm (High & Low).
- Byte 3 & 4: Dữ liệu nhiệt độ (High & Low).

- Byte 5: Parity Byte (Checksum) để kiểm tra lỗi

6.2.2 Lưu đồ thuật toán, phân tích chi tiết

DHT22 sử dụng giao tiếp 1-Wire cần phải thay đổi cấu hình chân liên tục, sử dụng 1 chân của STM32F103C8T6 để truyền các tín hiệu đến DHT22, cài đặt chân đó là DHT22_PIN. Trước khi đọc cảm biến DHT22, cần gửi một tín hiệu từ Module STM32F103C8T6 đến DHT22.



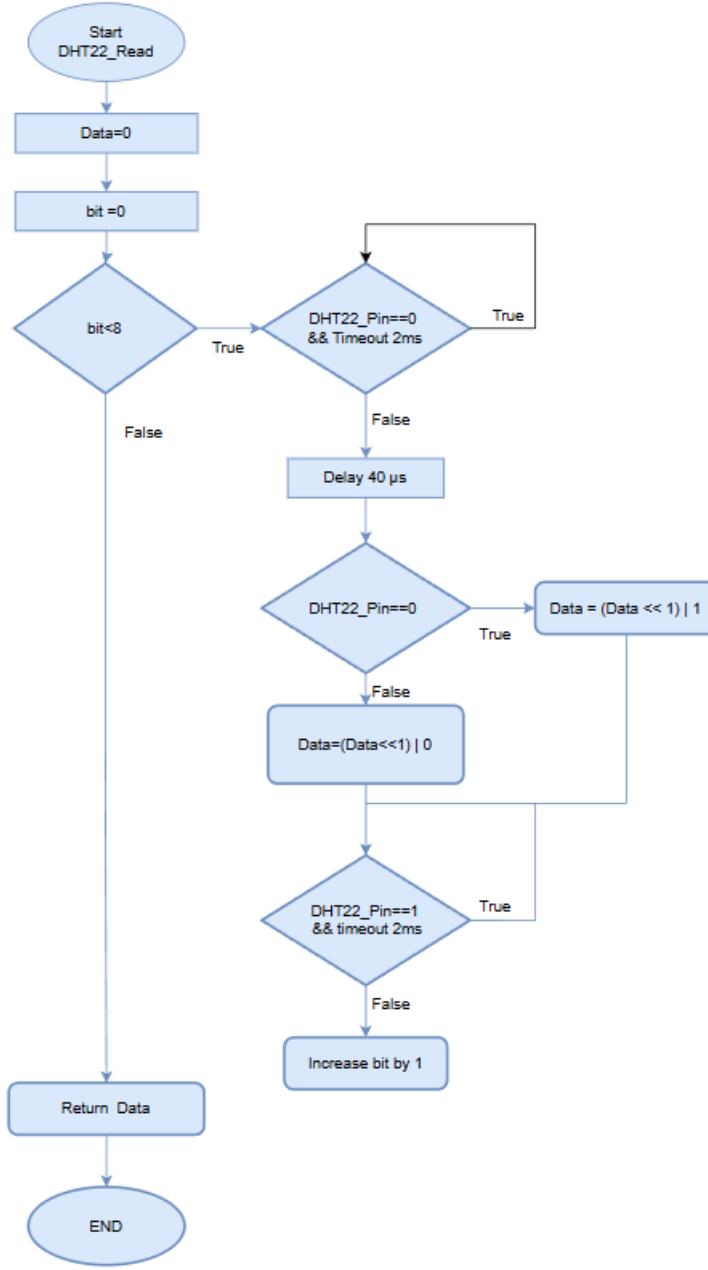
Hình 6-4: Flowchart của STM32F103C8T6 gửi tín hiệu bắt đầu đọc cảm biến DHT22

Theo Datasheet, STM32F103C8T6 thay đổi cấu hình chân DHT22_PIN thành GPIO Output và gửi tín hiệu các tín hiệu cho DHT22. Gửi một tín low trong ổn định khoảng 1,3 ms, tiếp theo sẽ gửi một tín hiệu high trong khoảng 30 μ s. Khi hoàn thành gửi tín hiệu bắt đầu cho DHT22, thì STM32F103C8T6 chuyển đổi chân DHT22_PIN thành GPIO Input và chờ 40 μ s để bắt đầu nhận tín hiệu sẵn sàng từ DHT22. Tạo một cờ phản hồi Respond để cho STM32F103C8T6 xác định trạng thái sau khi nhận được tín hiệu sẵn sàng từ DHT22.

- Respond = 1: STM32F103C8T6 chuyển sang chế độ đọc cảm biến DHT22
- Respond= 0: DHT22 thất bại khi đo nhiệt độ và độ ẩm.

STM32F103C8T6 nhận một xung vào chân bao gồm low trong khoảng 80 sau đó là tín hiệu High (tín hiệu bắt đầu), lúc đó trả về Respond = 1.

Khi có cờ phản hồi thì STM32F103C8T6 bắt đầu việc đọc các dữ liệu từ DHT22 theo từng byte.



Hình 6-5: Flowchart STM32F103C8T6 đọc từng bit của DHT22

Hàm đọc dữ liệu cảm biến sẽ đọc từ DHT22 theo từng bit qua DHT22_PIN, lúc này sẽ tạo để lưu dữ liệu đọc được khi đọc hoàn thành 1 byte, các bit sẽ được đọc từ MSB cho đến LSB. STM32F103C8T6 chờ start bit (low) trong tối đa 2ms, nếu quá thời gian thì đọc bit thất bại, chuyển sang đọc bit sau. Khi tín hiệu được kéo lên high, tức là bắt đầu đọc và lưu từng bit. Dựa vào khoảng thời gian DHT22_PIN ở high, có thể xác định bit dữ liệu là high hay low.

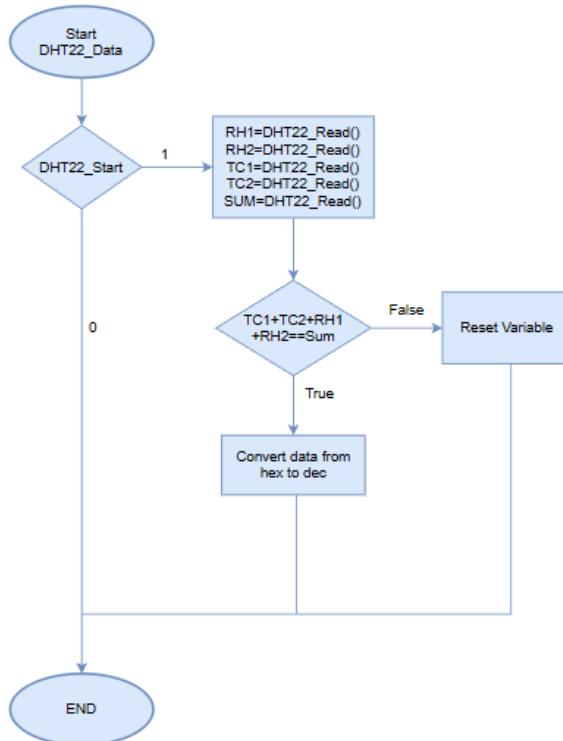
- DHT22_PIN lên high, sau 40 μs thì DHT22_PIN xuống low mức logic trả về là 0.

- DHT22_PIN lên high, sau 40 μ s thì DHT22_PIN là high mức logic trả về là 1.

Dịch Data sang 1 bit và thực hiện phép or với tín hiệu logic trả về để lưu bit đọc được. Sau đó là bit kết thúc để chuyển sang đọc bit sau. Hoàn thành đọc được đầy đủ 1 byte thì sẽ trả về kết quả Data đó.

Việc đọc cảm biến DHT22 của STM32F103C8T6 đầy đủ bao gồm quá trình kiểm tra trạng thái sẵn sàng của cảm biến và đọc đầy đủ 5 byte dữ liệu rồi lưu vào các biến tương ứng. Trong 5 byte đó có 1 byte check sum để kiểm tra tính đúng đắn từ kết quả đọc được bằng cách so sánh với tổng 4 byte còn lại.

- Nếu kết quả là bằng nhau thì tiếp tục quá trình biến đổi xử lý dữ liệu chuyển thành dạng thập phân
- Kết quả không bằng nhau thì việc đo thất bại, sẽ xóa hết các byte được đọc.



Hình 6-6: Flow chart đọc đầy đủ dữ liệu của DHT22

6.3 Thiết kế đọc dữ liệu từ que đo độ ẩm đất và mạch chuyển đổi

HW-080 là một cảm biến điện trở, làm cho điện áp thay đổi giữa 2 chân ra, 2 chân này kết nối với Module LM393 có nhiệm vụ dựa vào sự thay đổi điện áp chuyển thành các tín hiệu ADC phù hợp.

Thông qua việc đo đạc thực tế, đưa ra vài giá trị hiệu chỉnh và tham chiếu khi chuyển đổi từ giá trị ADC sang phần trăm độ ẩm đất.

- Khi ở ngoài không khí (Khô nhất): Giá trị ADC xấp xỉ 4095 (hoặc mức MAX tùy mạch phân áp), vượt quá mức này kết quả độ ẩm trả về là 0%.
- Khi ngâm trong đất nhiều nước (Ướt nhất): Giá trị ADC giảm xuống mức MIN 1500, giá trị ADC mà dưới mức này thì độ ẩm đất trả về là 100%.

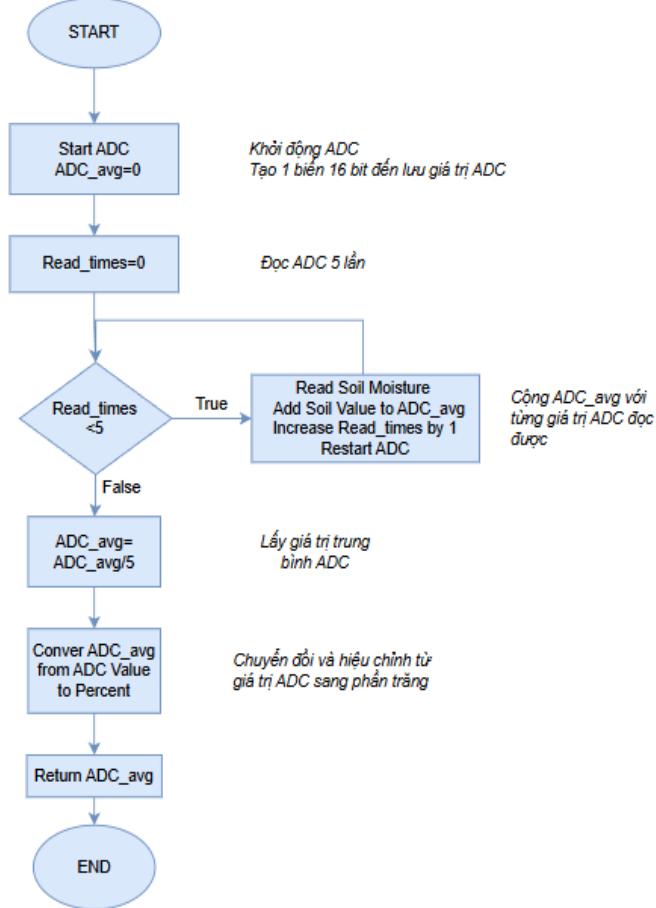
Công thức quy đổi từ giá trị ADC sang phần trăm độ ẩm đất.

$$SoilValue (\%) = 100 - \frac{ADC.Soil - 1500}{4095 - 1500}$$

Do môi trường đất thường không đồng nhất và tín hiệu analog dễ bị nhiễu đường dây, thuật toán cần thực hiện lấy mẫu nhiều lần và tính trung bình trước khi quy đổi sang phần trăm.

Lưu đồ thuật toán, phân tích chi tiết

Lưu đồ dưới đây mô tả quy trình đọc dữ liệu analog, lọc nhiễu bằng phương pháp trung bình cộng và ánh xạ (map) sang thang đo phần trăm.



Hình 6-7: Flowchart đọc cảm biến độ ẩm đất và xử lý số liệu

Quy trình đọc cảm biến đo độ ẩm đất bắt đầu từ việc khởi động ADC và tạo 1 biến để lưu lại các giá trị đã đo (ADC_avg). Tiếp theo sẽ thực hiện đọc liên tiếp 5 lần giá trị đầu ra, mỗi lần đọc giá trị đó đều được cộng thêm vào biến ADC_avg, vì sau mỗi lần đọc thành công thì ADC sẽ tắt nên cần phải khởi động lại mỗi khi hoàn thành một lần đọc. Hoàn thành 5 lần đọc thì sẽ tắt ADC và tính giá trị trung bình của ADC trong 5 lần đọc và lưu vào ADC_avg. Cuối cùng chuyển đổi giá trị ADC đọc được thành phần trăm độ ẩm đất rồi trả kết quả về.

6.4 Báo lỗi và phương pháp xử lý

6.4.1 Xử lý báo lỗi cho Relay Node

Khi thiết kế phần mềm cho Sensor node, một số lỗi đã được xác định và nhóm đã lập trình các biện pháp xử lý đối với các trường hợp lỗi phần mềm khi Sensor node hoạt động.

Lỗi do cảm biến không phản hồi tín hiệu sẵn sàng: Lỗi này thường do thời gian cảm biến phản hồi xung từ STM32F103C8T6 qua thời gian quy định hoặc không phản hồi. Biện pháp xử lý là cài đặt thời gian thực thi, khi hết (timeout) tự động trả kết quả về để tránh tình trạng blocking, việc đọc cảm biến sẽ được thực hiện ở chu kỳ sau.

Lỗi do đọc cảm biến sai dữ liệu: biện pháp xử lý được đưa ra là so sánh với giá trị checksum (đối với DHT22) và so sánh ngưỡng đối với (đo độ ẩm đất), kết quả này sẽ bị hủy và việc đo sẽ được thực hiện và chu kỳ sau.

Lỗi thất bại khi truyền LoRa trong pha báo cáo: đây thường là lỗi phần cứng do nhiễu hoặc nguồn có vấn đề, một số do phần mềm bị block tại đoạn này đó. Biện pháp là thực hiện khởi động cứng (reset) hoặc sửa lại mạch sensor và nạp lại code.

Xác định lỗi Sensor node từ Sever: Khi sensor gửi các bản tin lỗi (tất cả bộ giá trị đọc từ cảm biến đều là 0) hoặc không thể gửi bản tin đến Relay, từ đó Relay gửi bản tin thiếu SensorID của sensor node tới server quá nhiều lần (nhóm quyết định số lượng là 5). Server kiểm tra thấy thiếu SensorID hoặc dữ liệu của trong SensorID đó bằng 0 quá nhiều lần, hệ thống nhận định đó là Node bị lỗi, yêu cầu ra cảnh đồng xử lý.

6.4.2 Xử lý báo lỗi cho Relay Node

Đối với Relay, lỗi phần mềm thường xảy ra đối với việc truyền nhận các bản tin LoRa, dưới đây là một số lỗi và nhóm đã đưa ra vài lập trình vài hướng giải quyết.

Lỗi thất bại khi quảng bá: yêu cầu relay phải gửi nhiều bản tin quảng bá đến gateway cho đến khi được chấp nhận.

Lỗi nhận bản tin LoRa: lỗi này gồm nhận nhầm bản tin LoRa mà relay không quản lý và phân loại sai bản tin quảng bá với bản tin dữ liệu. Nhóm đã cấu hình lại bản tin, quy định các mã lệnh thực thi, khi nhận 1 bản tin Relay sẽ tiến hành kiểm tra:

- Kiểm tra mã lệnh thực thi phù hợp với task.
- Kiểm tra địa chỉ tới có phải RelayID.
- Kiểm tra SensorID để xác nhận Sensor node trong danh sách quản lý

Khi kiểm tra xong bản tin và kết quả là hợp lệ thì Relay mới thực hiện lưu bản tin.

Lỗi mất bản tin khi bản tin quá dài: để đảm bảo tính toàn vẹn của bản tin, chia bản tin thành 2 hoặc 3 bản tin nhỏ hơn và lần lượt gửi tới gateway trong khe thời gian TMDA được quy định, mỗi vài trăng ms gửi một lần.

Server kiểm tra các Relay gửi về trong mỗi chu kì, khi hết chu kì thực thi mà Relay không gửi bản tin về cho Gateway thì kết quả Relay lỗi, yêu cầu xử lý ngay lập tức vì liên quan đến 1 nhánh của hệ thống.

Tổng kết lại Chương 6, nhóm thực hiện đã hoàn tất việc xây dựng 'bộ não' điều khiển cho toàn bộ hệ thống mạng cảm biến. Các lưu đồ thuật toán cho Sensor Node và Relay Node đã được thiết kế chặt chẽ để tuân thủ nghiêm ngặt cơ chế tiết kiệm năng lượng (Stop Mode) và khung truyền thông TDMA đã đề ra. Bên cạnh đó, các driver giao tiếp với cảm biến DHT22 và mạch đo độ ẩm đất cũng đã được xây dựng và tối ưu hóa để đảm bảo độ chính xác của dữ liệu đầu vào.

Đến thời điểm này, hệ thống phần cứng và phần mềm nhúng đã hoàn thiện chức năng thu thập, đóng gói và truyền tải dữ liệu về điểm tập trung là Gateway. Tuy nhiên, dữ liệu thô tại Gateway cần được lưu trữ, xử lý và trực quan hóa để trở thành thông tin hữu ích cho người quản lý. Chương 7: Thiết kế và phát triển Server sẽ trình bày về mảnh ghép cuối cùng của hệ thống, bao gồm việc xây dựng cơ sở dữ liệu, cấu hình MQTT Broker và thiết kế giao diện Dashboard giám sát từ xa.

CHƯƠNG 7. THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN SERVER

Sau khi hoàn thiện firmware cho các node mạng và Gateway ở Chương 6, hệ thống đã có khả năng thu thập và đóng gói dữ liệu từ môi trường. Tuy nhiên, để chu trình IoT được khép kín, dữ liệu này cần một điểm đến cuối cùng để lưu trữ, xử lý và hỗ trợ người dùng ra quyết định.

Chương 7 sẽ trình bày quá trình xây dựng hệ thống Server trung tâm (Local IoT Server), bao gồm việc thiết lập môi trường truyền dẫn MQTT Broker, xây dựng Backend xử lý bằng Flask Framework, và tổ chức cơ sở dữ liệu dạng tệp (CSV) để đảm bảo tính gọn nhẹ và linh hoạt. Bên cạnh đó, chương này cũng mô tả việc thiết kế giao diện Dashboard để giám sát trực quan và cơ chế đồng bộ dữ liệu lên nền tảng đám mây (ThingsBoard Cloud). Nội dung sẽ tập trung minh họa kết quả hiện thực hóa thông qua cấu trúc luồng dữ liệu, giao diện phần mềm và các giải thuật xử lý trung tâm.

7.1 Tổng quan và vai trò của Server

Trong kiến trúc tổng thể của hệ thống mạng cảm biến không dây giám sát nông nghiệp diện tích lớn (100 hecta), Server đóng vai trò là trạm trung tâm là bộ não xử lý thông tin. Server được thiết kế để vận hành như một máy chủ biên tại khu vực quản lý, đảm bảo tính ổn định và khả năng phản hồi nhanh ngay cả khi kết nối Internet bị gián đoạn.

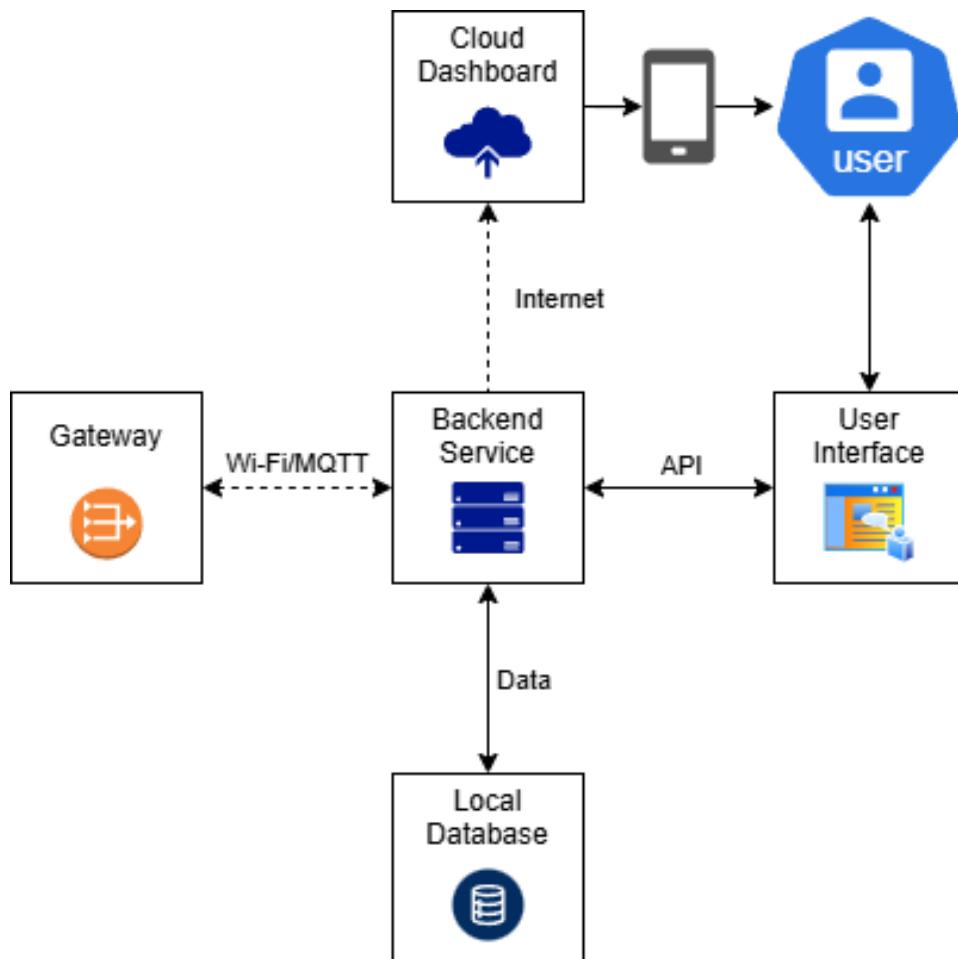
Dựa trên yêu cầu hệ thống và thiết kế thực tế, Server đảm nhận bốn vai trò cốt lõi sau:

- Trung tâm thu thập dữ liệu: Server là điểm tập kết cuối cùng của các gói tin dữ liệu từ Gateway gửi về thông qua giao thức MQTT. Hệ thống được thiết kế để xử lý đồng thời luồng dữ liệu từ tối thiểu 100 nút cảm biến và có khả năng mở rộng lên hàng nghìn nút mà không làm tắc nghẽn đường truyền.
- Lưu trữ và Quản lý cơ sở dữ liệu: Toàn bộ dữ liệu môi trường (nhiệt độ, độ ẩm không khí, độ ẩm đất) cần được lưu trữ an toàn để phục vụ cho việc truy xuất lịch sử và phân tích xu hướng canh tác. Server thực hiện nhiệm vụ làm sạch dữ liệu (data cleaning), loại bỏ các bản tin trùng lặp (deduplication) và tổ chức lưu trữ dưới dạng các tệp tin cấu trúc CSV, đảm bảo tính toàn vẹn và dễ dàng trích xuất báo cáo dạng Excel.
- Giao diện người máy: Server cung cấp một giao diện Web Dashboard trực quan, cho phép người quản lý giám sát trạng thái hoạt động của từng node mạng theo thời gian thực. Hệ thống tự động phân tích dữ liệu nhận được

và so sánh với các ngưỡng an toàn để đưa ra các cảnh báo tức thời trên giao diện khi các chỉ số môi trường vượt mức cho phép.

- Điều khiển và Cấu hình hệ thống: Không chỉ nhận dữ liệu một chiều (Uplink), Server còn cung cấp kênh điều khiển chiều xuống (Downlink). Người dùng có thể cấu hình từ xa các tham số vận hành như chu kỳ lấy mẫu (Sampling Cycle) hoặc cập nhật ngưỡng cảnh báo cho các node mạng thông qua giao diện web mà không cần thao tác vật lý trực tiếp tại thiết bị.
- Cầu nối điện toán đám mây: Để mở rộng khả năng giám sát từ xa qua Internet, Server tích hợp module đồng bộ hóa dữ liệu lên nền tảng ThingsBoard Cloud. Chức năng này cho phép hệ thống vừa hoạt động cục bộ (Local) với độ trễ thấp, vừa tận dụng được sức mạnh lưu trữ và truy cập toàn cầu của công nghệ Cloud.

7.2 Kiến trúc hệ thống và Môi trường triển khai

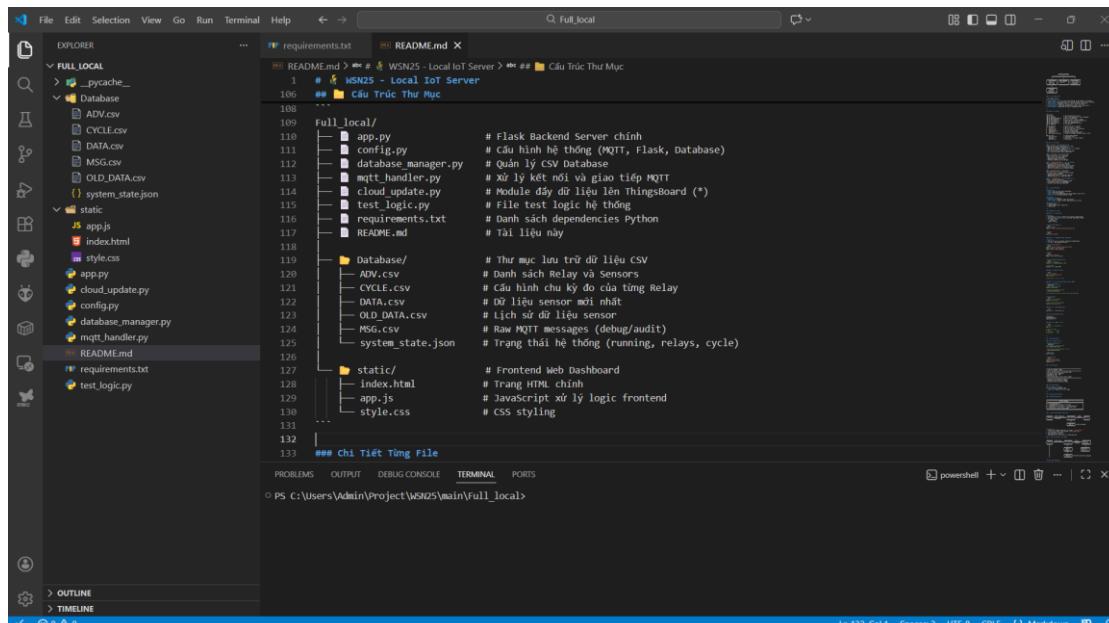


Hình 7-1: Tổng quan kiến trúc hệ thống

7.2.1 Kiến trúc phần mềm tổng thể

Kiến trúc của Server được thiết kế theo mô hình 3 lớp (Three-tier Architecture), tách biệt rõ ràng giữa chức năng truyền nhận, xử lý nghiệp vụ và lưu trữ dữ liệu. Các thành phần hoạt động độc lập nhưng liên kết chặt chẽ với nhau:

- Lớp Giao tiếp (Communication Layer): Sử dụng MQTT Broker (Mosquitto) làm trung gian. Lớp này chịu trách nhiệm duy trì kết nối với Gateway và các thiết bị ngoại vi, đảm bảo dữ liệu được phân phối chính xác thông qua cơ chế Publish/Subscribe.
- Lớp Ứng dụng (Application Layer): Được phát triển trên nền tảng Python kết hợp với Flask Framework. Đây là trung tâm xử lý logic, thực thi các thuật toán cốt lõi như: tự động phát hiện thiết bị (Auto-discovery), lọc dữ liệu trùng lặp (Deduplication), kiểm tra ngưỡng cảnh báo và cung cấp API cho giao diện người dùng.
- Lớp Dữ liệu (Data Persistence Layer): Thay vì sử dụng các hệ quản trị cơ sở dữ liệu quan hệ phức tạp (như MySQL, SQL Server), hệ thống sử dụng cấu trúc tệp CSV (Comma-Separated Values). Lựa chọn này giúp giảm tải tài nguyên hệ thống, tăng tốc độ ghi dữ liệu dạng chuỗi thời gian (Timeseries) và thuận tiện cho việc sao lưu hoặc mở trực tiếp bằng Excel theo yêu cầu đề bài.



Hình 7-2: Cấu trúc thư mục hệ thống

7.2.2 Lựa chọn giao thức truyền thông

Giao thức MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) được lựa chọn làm giao thức truyền thông xương sống cho hệ thống thay vì HTTP/REST truyền thông, dựa trên các ưu điểm kỹ thuật phù hợp với bài toán giám sát diện rộng:

- Mô hình Publish/Subscribe: Giúp tách biệt hoàn toàn giữa Gateway (Publisher) và Server (Subscriber). Gateway không cần biết Server có đang hoạt động hay không và ngược lại, giúp hệ thống hoạt động bất đồng bộ và tin cậy hơn.
- Tối ưu băng thông: Header của gói tin MQTT rất nhỏ (tối thiểu 2 byte), phù hợp với hạ tầng mạng có thể không ổn định tại khu vực nông nghiệp 100 hecta.
- Phân loại bản tin: Hệ thống định nghĩa rõ ràng các Topic để phân luồng dữ liệu:
 - Topic Advertise: Dành cho việc đăng ký và cập nhật topo mạng.
 - Topic Data: Dành cho việc truyền tải dữ liệu cảm biến.
 - Topic Cycle: Dành cho chiều điều khiển từ Server xuống thiết bị.

7.2.3 Môi trường và quy trình cài đặt hệ thống

Hệ thống được thiết kế theo hướng đa nền tảng (Cross-platform), có thể vận hành trên Windows, Linux (Ubuntu/Debian) hoặc macOS.

➤ Yêu cầu cấu hình

Để đảm bảo hiệu năng xử lý cho tối thiểu 100 node mạng hoạt động liên tục, máy chủ cần đáp ứng các yêu cầu cấu hình sau:

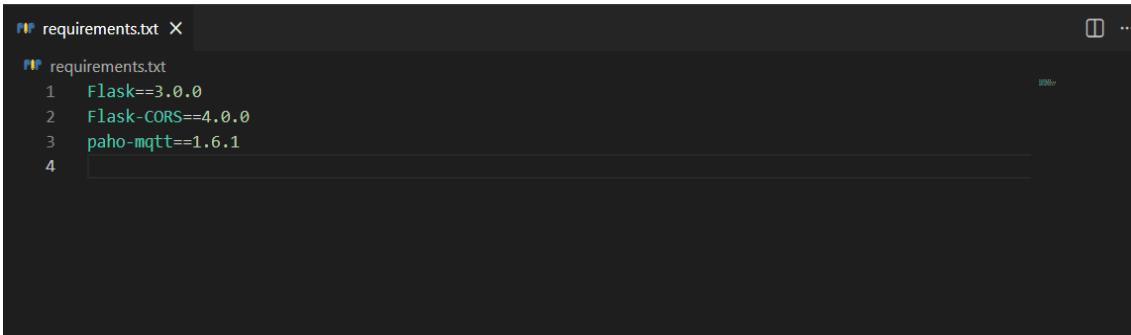
Bảng 7-1: Yêu cầu cấu hình phần cứng và phần mềm cho Server

Thành phần	Yêu cầu tối thiểu	Khuyến nghị
CPU	Kiến trúc x86 hoặc ARM (Dual Core)	Core i3 hoặc tương đương
RAM	2 GB	4 GB trở lên
Lưu trữ	500 MB trống	SSD để tăng tốc độ truy xuất file
Mạng	LAN/WiFi ổn định	Kết nối có dây (Ethernet)
Phần mềm	Python 3.8+, Mosquitto Broker	Python 3.10+, Môi trường ảo (venv)

➤ Các thư viện phụ thuộc và Quy trình cài đặt

Phần mềm Server được xây dựng dựa trên các thư viện Python mã nguồn mở, bao gồm Flask (cho Web Server), Flask-CORS (xử lý truy cập chéo) và paho-mqtt (MQTT Client). Quy trình triển khai hệ thống tuân theo 3 bước chính:

- Thiết lập Broker: Cài đặt dịch vụ Mosquitto và cấu hình lắng nghe tại cổng tiêu chuẩn 1883.
- Chuẩn bị môi trường: Thiết lập môi trường ảo (Virtual Environment) để cài đặt các gói thư viện, sau đó cài đặt các gói phụ thuộc thông qua tệp requirements.txt.
- Khởi chạy dịch vụ: Server được khởi động thông qua tệp app.py. Khi khởi chạy, hệ thống sẽ tự động thực hiện trình tự: Kết nối tới MQTT Broker -> Nạp cấu hình hệ thống -> Kiểm tra/Khởi tạo các file CSV -> Bắt đầu lắng nghe dữ liệu.



```
requirements.txt
1 Flask==3.0.0
2 Flask-CORS==4.0.0
3 paho-mqtt==1.6.1
4
```

Hình 7-3: Thư viện yêu cầu

7.3 Thiết kế cơ sở dữ liệu

Khác với các hệ thống backend thương mại thường sử dụng các hệ quản trị cơ sở dữ liệu quan hệ (RDBMS) phức tạp, Server trong dự án này sử dụng kiến trúc lưu trữ dựa trên hệ thống tệp tin cấu trúc (Structured CSV Files).

Quyết định thiết kế này xuất phát trực tiếp từ yêu cầu cốt lõi của môn học: hệ thống phải có khả năng xuất báo cáo dạng Excel một cách nhanh chóng và đơn giản. Việc sử dụng định dạng .csv (Comma-Separated Values) cho phép người dùng truy cập trực tiếp vào thư mục dữ liệu và mở các tệp tin này bằng Microsoft Excel để xem, vẽ biểu đồ hoặc in báo cáo mà không cần thông qua bất kỳ bước chuyển đổi định dạng (Export/Convert) hay truy vấn SQL phức tạp nào. Điều này giúp giảm thiểu độ trễ thao tác và phù hợp với người dùng không chuyên về kỹ thuật.

7.3.1 Tổ chức lưu trữ dữ liệu

Toàn bộ dữ liệu của hệ thống được quản lý tập trung trong thư mục Database/ và được phân chia thành các tệp chuyên biệt theo chức năng. Module DatabaseManager chịu trách nhiệm điều phối mọi thao tác đọc/ghi vào các tệp này.

Cấu trúc và chức năng của các tệp dữ liệu chính được mô tả như sau:

Bảng 7-2: Cấu trúc các tệp dữ liệu trong hệ thống

Tên tệp tin	Vai trò và Chức năng	Cấu trúc dữ liệu chính
ADV.csv	Quản lý Topo mạng: Lưu trữ danh sách các Relay đang hoạt động và các Node cảm biến trực thuộc. Tệp này được cập nhật động mỗi khi có bản tin Advertise từ Gateway.	relay_id, sensor_ids (danh sách ID cảm biến phân cách bởi dấu phẩy)
DATA.csv	Dữ liệu Thời gian thực (Snapshot): Lưu trữ giá trị đo mới nhất của tất cả các cảm biến. Khi có dữ liệu mới, hệ thống sẽ ghi đè lên dòng tương ứng, đảm bảo bảng luôn hiển thị trạng thái hiện tại của toàn mạng.	relay_id, sensor_id, temp, humid, soil, timestamp
OLD_DATA.csv	Dữ liệu Lịch sử (Historical Log): Lưu trữ toàn bộ lịch sử biến thiên của môi trường. Cơ chế ghi là nối đuôi (Append-only), phục vụ cho việc vẽ biểu đồ lịch sử và phân tích xu hướng canh tác dài hạn.	Tương tự DATA.csv nhưng chứa nhiều bản ghi theo chuỗi thời gian.
CYCLE.csv	Cấu hình Pha hoạt động (Wake-up Offset): Lưu trữ tham số độ lệch thời gian (Δt) cho từng Relay. Tham số này quy định thời điểm thức dậy khác nhau cho từng Relay trong chu kỳ tổng, giúp phân chia khe thời gian truyền tin.	relay_id, delta_t (giây)
MSG.csv	Nhật ký bản tin thô (Raw Message Log): Lưu trữ nguyên bản mọi bản tin MQTT nhận được từ Gateway trước khi qua bước xử lý. Tệp này đóng vai trò như một "hộp đen" giúp debug lỗi, kiểm tra tính toàn vẹn của gói tin và phân tích nguyên nhân nếu có sự cố.	topic, message (payload thô), timestamp

Dưới đây là một số hình ảnh về hệ thống cơ sở dữ liệu, và cấu trúc dữ liệu của từng file lưu trữ

```

Database > ADV.csv > data
1 relay_id,sensor_ids
2 0x01,"0xFE,0xFD"
3 0x02,0xFC
4 |

```

Hình 7-4: ADV.csv

```

Database > CYCLE.csv > data
1 relay_id,delta_t
2 0x01,5
3 0x02,20
4 |

```

Hình 7-5: CYCLE.csv

```

Database > DATA.csv > data
1 relay_id,sensor_id,temp,humid,soil,timestamp
2 0x01,0xFE,14.5,39.1,62.0,2026-01-24 19:20:55
3 0x01,0xFD,14.2,38.9,63.0,2026-01-24 19:20:55
4 0x02,0xFC,14.4,38.9,37.0,2026-01-24 19:21:11

```

Hình 7-6: DATA.csv

```

Database > MSG.csv > data
1 topic,message,timestamp
2 Data,"0x01,0xFE,14.2,38.3,42.0,0x01,0xFD,14.2,38.5,43",2026-01-24 19:16:26
3 Data,"0x02,0xFC,14.5,38.5,38",2026-01-24 19:16:40
4 Data,"0x02,0xFC,14.5,38.5,38",2026-01-24 19:16:40
5 Data,"0x01,0xFE,14.2,38.3,42.0,0x01,0xFD,14.2,38.5,43",2026-01-24 19:16:56
6 Data,"0x02,0xFC,14.8,38.8,38",2026-01-24 19:17:10
7 Data,"0x02,0xFC,14.8,38.8,38",2026-01-24 19:17:10
8 Data,"0x01,0xFE,14.2,38.3,42.0,0x01,0xFD,14.2,38.5,43",2026-01-24 19:17:26
9 Data,"0x02,0xFC,14.8,38.8,38",2026-01-24 19:17:41
10 Data,"0x01,0xFE,14.7,38.4,42.0,0x01,0xFD,14.8,38.6,43",2026-01-24 19:17:55
11 Data,"0x02,0xFC,14.8,38.8,38",2026-01-24 19:18:11
12 Data,"0x01,0xFE,14.7,38.4,42.0,0x01,0xFD,14.8,38.6,43",2026-01-24 19:18:25
13 Data,"0x02,0xFC,14.8,39.0,38",2026-01-24 19:18:40
14 Data,"0x01,0xFE,14.7,38.4,42.0,0x01,0xFD,14.8,38.6,43",2026-01-24 19:18:56
15 Data,"0x02,0xFC,14.8,39.0,38",2026-01-24 19:19:10
16 Data,"0x01,0xFE,14.6,38.2,64.0,0x01,0xFD,14.2,38.6,64",2026-01-24 19:19:26
17 Data,"0x02,0xFC,14.8,39.0,38",2026-01-24 19:19:40
18 Data,"0x01,0xFE,14.6,38.2,64.0,0x01,0xFD,14.2,38.6,64",2026-01-24 19:19:55
19 Data,"0x02,0xFC,14.4,38.9,37",2026-01-24 19:20:11
20 Data,"0x02,0xFC,14.4,38.9,37",2026-01-24 19:20:11
21 Data,"0x01,0xFE,14.6,38.2,64.0,0x01,0xFD,14.2,38.6,64",2026-01-24 19:20:25
22 Data,"0x02,0xFC,14.4,38.9,37",2026-01-24 19:20:41
23 Data,"0x01,0xFE,14.5,39.1,62.0,0x01,0xFD,14.2,38.9,63",2026-01-24 19:20:55
24 Data,"0x02,0xFC,14.4,38.9,37",2026-01-24 19:21:11

```

Hình 7-7: MSG.csv

```

Database > OLD_DATA.csv > data
1 relay_id,sensor_id,temp,humid,soil,timestamp
2 0x01,0xFE,14.2,38.3,42.0,2026-01-24 19:16:26
3 0x01,0xFD,14.2,38.5,43.0,2026-01-24 19:16:26
4 0x02,0xFC,14.5,38.5,38.0,2026-01-24 19:16:40
5 0x02,0xFC,14.5,38.5,38.0,2026-01-24 19:16:40
6 0x01,0xFE,14.2,38.3,42.0,2026-01-24 19:16:56
7 0x01,0xFD,14.2,38.5,43.0,2026-01-24 19:16:56
8 0x02,0xFC,14.8,38.8,38.0,2026-01-24 19:17:10
9 0x02,0xFC,14.8,38.8,38.0,2026-01-24 19:17:10
10 0x01,0xFE,14.2,38.3,42.0,2026-01-24 19:17:26
11 0x01,0xFD,14.2,38.5,43.0,2026-01-24 19:17:26
12 0x02,0xFC,14.8,38.8,38.0,2026-01-24 19:17:41
13 0x01,0xFE,14.7,38.4,42.0,2026-01-24 19:17:55
14 0x01,0xFD,14.8,38.6,43.0,2026-01-24 19:17:55
15 0x02,0xFC,14.8,38.8,38.0,2026-01-24 19:18:11
16 0x01,0xFE,14.7,38.4,42.0,2026-01-24 19:18:26
17 0x01,0xFD,14.8,38.6,43.0,2026-01-24 19:18:26
18 0x02,0xFC,14.8,39.0,38.0,2026-01-24 19:18:40
19 0x01,0xFE,14.7,38.4,42.0,2026-01-24 19:18:56
20 0x01,0xFD,14.8,38.6,43.0,2026-01-24 19:18:56
21 0x02,0xFC,14.8,39.0,38.0,2026-01-24 19:19:10
22 0x01,0xFE,14.6,38.2,64.0,2026-01-24 19:19:26
23 0x01,0xFD,14.2,38.6,64.0,2026-01-24 19:19:26
24 0x02,0xFC,14.8,39.0,38.0,2026-01-24 19:19:41

```

Hình 7-8: OLD_DATA.csv

7.3.2 Cơ chế đảm bảo toàn vẹn dữ liệu (Thread Safety)

Do Server hoạt động trong môi trường đa luồng (Multi-threading) – với luồng MQTT liên tục ghi dữ liệu đến và các luồng Flask Server liên tục đọc dữ liệu hiển thị lên Web – vấn đề xung đột tài nguyên (Race Condition) là rủi ro hiện hữu.

Để giải quyết vấn đề này, lớp DatabaseManager tích hợp cơ chế khóa luồng (Locking Mechanism) sử dụng thư viện threading.Lock(). Mỗi tệp CSV được bảo vệ bởi một khóa riêng biệt (ví dụ: _msg_lock cho MSG.csv, _data_lock cho DATA.csv). Nguyên lý hoạt động:

1. Khi một luồng cần ghi bản tin mới vào MSG.csv, nó phải xin cấp khóa.
2. Trong thời gian ghi, mọi luồng khác muốn truy cập tệp này sẽ được đưa vào hàng đợi (block).
3. Sau khi hoàn tất, khóa được giải phóng để luồng tiếp theo xử lý.

Cơ chế này đảm bảo dữ liệu trong các file Excel luôn nhất quán, không bị lỗi cấu trúc (corruption) ngay cả khi hệ thống chịu tải cao từ hàng trăm node cảm biến.

7.4 Giải thuật và luồng xử lý dữ liệu

Để quản lý hiệu quả mạng lưới cảm biến diện rộng với số lượng nút lớn, Server không chỉ đơn thuần thực hiện nhiệm vụ ghi chép dữ liệu mà phải vận hành các giải thuật xử lý logic phức tạp. Các giải thuật này được thiết kế để đảm bảo tính động của mạng (Dynamic Topology), tính toàn vẹn của dữ liệu (Data Integrity) và khả năng giám sát từ xa (Remote Monitoring).

7.4.1 Cơ chế tự động phát hiện mạng

Trong các hệ thống WSN truyền thông, việc thêm mới hoặc thay thế một node mạng thường yêu cầu kỹ sư phải cấu hình lại mã nguồn Server (Hard-coding). Để khắc phục hạn chế này, hệ thống sử dụng cơ chế "Quảng bá" (Advertise) để xây dựng topo mạng động.

Quy trình xử lý bản tin Advertise diễn ra như sau:

1. Khởi tạo: Khi một Gateway khởi động hoặc định kỳ quét mạng, nó sẽ gửi một bản tin chứa danh sách các Relay ID mà nó quản lý lên topic Advertise với định dạng chuỗi: "ID1,ID2,ID3...".
2. Lắng nghe: Server liên tục lắng nghe tại topic này. Khi nhận được bản tin, module xử lý sẽ phân tích chuỗi (parsing) để tách các ID.
3. Cập nhật: Hệ thống đổi chiều danh sách mới với tệp cơ sở dữ liệu ADV.csv. Nếu phát hiện Relay ID mới chưa tồn tại, Server sẽ tự động

đăng ký Relay đó vào hệ thống, khởi tạo danh sách sensor trực thuộc là rỗng và cấp phát các tài nguyên theo dõi cần thiết.

Cơ chế này cho phép hệ thống mở rộng quy mô lên hàng nghìn nút một cách linh hoạt mà không gián đoạn hoạt động của các nút hiện hữu.

7.4.2 Quy trình xử lý và làm sạch dữ liệu

Trong môi trường thực tế với diện tích 100 hecta, tín hiệu truyền dẫn không dây thường xuyên gặp phải các vấn đề như nhiễu, mất gói tin hoặc hiện tượng trùng lặp do cơ chế tự động gửi lại (Auto-Retransmission) của Gateway để đảm bảo QoS. Do đó, Server không chỉ đơn thuần lưu trữ mọi dữ liệu nhận được mà phải hoạt động như một bộ lọc thông minh nhiều tầng.

Quy trình xử lý dữ liệu được thiết kế gồm 4 giai đoạn liên tiếp nhằm đảm bảo tính chính xác (Accuracy), tính nhất quán (Consistency) và khả năng thích ứng (Adaptability) của hệ thống.

a. Cơ chế lọc trùng lặp hai lớp (Two-layer Deduplication Strategy)

Để giải quyết vấn đề Gateway gửi lặp lại cùng một gói tin nhiều lần (Duplicate Messages), hệ thống triển khai chiến lược lọc kép tại hai tầng khác nhau của kiến trúc phần mềm:

- Lớp 1: Lọc nhanh tại bộ nhớ đệm (In-Memory Fast Reject): Đây là hàng phòng thủ đầu tiên nằm ngay tại lớp giao tiếp (MQTTHandler). Hệ thống duy trì một bộ đệm trên RAM lưu trữ trạng thái của bản tin cuối cùng nhận được (bao gồm Topic, Payload và Timestamp).
 - Nguyên lý: Khi một bản tin mới đến, hệ thống so sánh ngay lập tức với bản tin trong bộ đệm. Nếu nội dung Payload giống hệt nhau và khoảng thời gian giữa hai lần nhận nhỏ hơn ngưỡng an toàn (Time Delta < 2.0 giây), Server sẽ xác định đây là bản tin trùng lặp do trễ mạng và loại bỏ ngay lập tức.
 - Hiệu quả: Giảm thiểu tối 90% các thao tác ghi đĩa (I/O) không cần thiết, tăng tốc độ phản hồi của Server.
 - Lớp 2: Lọc sâu tại cơ sở dữ liệu (Persistent Storage Verification): Các bản tin vượt qua lớp 1 sẽ được chuyển xuống lớp lưu trữ (DatabaseManager). Tại đây, hệ thống thực hiện kiểm tra đối chiếu với lịch sử 5 bản tin gần nhất được lưu trong tệp nhật ký MSG.csv. Cơ chế này đảm bảo rằng ngay cả khi Server bị khởi động lại (mất bộ nhớ đệm RAM), hệ thống vẫn không ghi trùng dữ liệu cũ đã tồn tại trong ổ cứng.
- b. Phân tích cú pháp theo lô và Xác thực cấu trúc (Batch Parsing & Validation)

Hệ thống hỗ trợ cơ chế "Batch Processing" – cho phép một bản tin MQTT chứa dữ liệu của nhiều cảm biến cùng lúc (nối tiếp nhau) để tối ưu hóa băng thông truyền tải.

- Phân rã chuỗi (String Tokenization): Payload nhận được là một chuỗi dài các giá trị phân cách bởi dấu phẩy. Server sẽ cắt chuỗi này thành mảng các phần tử dữ liệu.
- Kiểm tra tính toàn vẹn (Integrity Check): Mỗi đơn vị dữ liệu cảm biến được định nghĩa gồm 5 trường thông tin bắt buộc: [Relay_ID, Sensor_ID, Nhiệt độ, Độ ẩm KK, Độ ẩm đất]. Thuật toán xác thực sử dụng phép chia lấy dư (Modulo operation): Tổng số phần tử của mảng dữ liệu phải chia hết cho 5. Nếu kích thước không hợp lệ, toàn bộ gói tin bị hủy bỏ để ngăn chặn việc ghi dữ liệu lệch pha (misaligned data) vào cơ sở dữ liệu.
- Chuẩn hóa dữ liệu (Type Casting): Các giá trị đo lường dạng chuỗi được chuyển đổi sang định dạng số thực (float) để phục vụ tính toán; các ID được loại bỏ khoảng trắng thừa (trim) để đảm bảo tính nhất quán khi truy vấn.

c. Cơ chế cập nhật an toàn đa luồng (Thread-safe Concurrency Control)

Server vận hành trong môi trường đa luồng (Multi-threading): luồng MQTT liên tục ghi dữ liệu đến, trong khi các luồng Flask Web Server liên tục đọc dữ liệu để hiển thị Dashboard. Điều này dẫn đến nguy cơ xung đột tài nguyên (Race Condition) – nơi dữ liệu có thể bị hỏng nếu hai luồng cùng thao tác trên một file cùng lúc.

Để giải quyết triệt để, hệ thống áp dụng cơ chế Khóa tài nguyên (Resource Locking):

- Sử dụng thư viện threading.Lock() để tạo ra các khóa riêng biệt cho từng tệp dữ liệu (_data_lock, _adv_lock, _msg_lock).
 - Nguyên tắc "Độc quyền ghi" (Mutual Exclusion): Khi luồng xử lý dữ liệu cần cập nhật vào DATA.csv, nó phải xin cấp khóa (acquire lock). Trong thời gian này, mọi luồng đọc/ghi khác đều bị chặn (block) cho đến khi thao tác hoàn tất và khóa được giải phóng. Điều này đảm bảo tính toàn vẹn tuyệt đối cho các file CSV.
- d. Cập nhật topo mạng động dựa trên dữ liệu (Data-driven Topology Update)

Hệ thống sở hữu khả năng "tự học" cấu trúc mạng (Auto-mapping) dựa trên luồng dữ liệu thực tế mà không phụ thuộc hoàn toàn vào quá trình khai báo thủ công. Server phân tích cặp thông tin định tuyến Relay_ID và Sensor_ID trong mỗi gói tin dữ liệu để cập nhật tệp ADV.csv.

Quy trình xử lý logic topo mạng bao gồm hai trường hợp:

1. Trường hợp cảm biến thông thường: Nếu Server phát hiện Sensor_A gửi dữ liệu thông qua Relay_1 nhưng trong cơ sở dữ liệu Sensor_A chưa tồn tại hoặc đang thuộc Relay_2, hệ thống sẽ tự động cập nhật lại mối quan hệ này: gán Sensor_A vào danh sách quản lý của Relay_1. Tính năng này hỗ trợ việc di dời cảm biến vật lý giữa các vùng mà không cần cấu hình lại Server.
2. Trường hợp Relay tích hợp cảm biến (Relay Node with Sensors): Trong thiết kế phần cứng, bản thân các node Relay cũng được trang bị cảm biến để đo đặc tại vị trí đặt trạm. Khi đó, bản tin gửi lên sẽ có Relay_ID trùng với Sensor_ID. Hệ thống nhận diện trường hợp đặc biệt này và ghi nhận rằng Relay đó đang tự quản lý chính dữ liệu cảm biến của mình, đảm bảo hiển thị đúng vai trò kép (vừa là trạm trung chuyển, vừa là trạm đo) trên giao diện giám sát.

7.4.3 Cơ chế đồng bộ dữ liệu lên cloud

Để mở rộng khả năng giám sát từ xa và lưu trữ dữ liệu dài hạn, hệ thống tích hợp module `cloud_update.py`. Module này đóng vai trò là một "Cầu nối MQTT" (MQTT Bridge), thực hiện chuyển tiếp dữ liệu từ mạng cục bộ lên nền tảng ThingsBoard Cloud theo thời gian thực.

Hình 7-9: Giao diện theo dõi trên Thingsboard

- a. Giao thức kết nối và Định danh

Thay vì mỗi node cảm biến phải kết nối trực tiếp đến Cloud (điều không thể thực hiện được do giới hạn phần cứng và năng lượng), Server đóng vai trò là một IoT Gateway.

- Phương thức kết nối: Module sử dụng thư viện paho-mqtt để thiết lập hai kết nối song song:
 - Local Client: Kết nối đến Mosquitto Broker nội bộ (localhost:1883) để lắng nghe dữ liệu thô.
 - Cloud Client: Kết nối đến ThingsBoard Broker (mqtt.thingsboard.cloud:1883).
- Cơ chế xác thực: Hệ thống sử dụng phương thức Access Token Authentication. Toàn bộ hệ thống (bao gồm Gateway và hàng trăm node con) chỉ sử dụng duy nhất một mã token định danh Gateway (ví dụ: ROkgAvt5tf...). ThingsBoard sẽ phân biệt dữ liệu của từng node con thông qua tên thiết bị trong gói tin payload.

```
11
12 # ===== CẤU HÌNH =====
13 LOCAL_BROKER = "localhost"
14 LOCAL_PORT = 1883
15 LOCAL_TOPIC_DATA = "Data"
16 LOCAL_TOPIC_JOIN = "Advertise"
17
18 TB_BROKER = "mqtt.thingsboard.cloud"
19 TB_PORT = 1883
20 TB_TOKEN = "ROkgAvt5tfHlM85TjkPe"
21 TB_TOPIC = "v1/gateway/telemetry"
22 TB_TOPIC_ATTRS = "v1/gateway/attributes"
23
```

Hình 7-10: Cấu hình kết nối Thingsboard

b. Cấu trúc dữ liệu và Giao diện Gateway API

Để gửi dữ liệu của nhiều thiết bị qua một kết nối duy nhất, module sử dụng ThingsBoard MQTT Gateway API. Quy trình xử lý dữ liệu diễn ra như sau:

1. Lắng nghe (Listening): Module đăng ký (Subscribe) vào các topic nội bộ như WSN25_ss_data (dữ liệu cảm biến) và WSN25_ss_join (sự kiện gia nhập mạng).
2. Phân tích (Parsing): Khi nhận được gói tin thô (ví dụ: 0xAB 25.5 60.2...), hệ thống tách chuỗi để lấy ra ID thiết bị và các thông số môi trường.
3. Đóng gói Telemetry (Telemetry Upload): Dữ liệu đo lường được chuyển đổi sang định dạng JSON mảng theo chuẩn Gateway API và gửi lên topic v1/gateway/telemetry:

```
{
  "Sensor_18": [
    {
      "ts": 1706281200000,
      "values": {
        "temperature": 25.5,
        "humidity": 60.2,
        "soil_moisture": 450
      }
    }
  ]
}
```

4. Cập nhật thuộc tính (Attributes Update): Bên cạnh giá trị đo, hệ thống còn gửi các thông tin mô tả thiết bị lên topic v1/gateway/attributes. Điều này giúp định nghĩa loại thiết bị (device_type: Sensor/Relay) ngay trên Cloud.

Last update time	Key ↑	Value
2026-01-05 13:36:49	humidity	60.2
2026-01-05 13:36:49	soil_moisture	45.3
2026-01-05 13:36:49	temperature	25.5

Hình 7-11: Dữ liệu của một cảm biến theo thời gian thực

c. Quản lý Topo mạng phân cấp (Hierarchical Topology Mapping)

Một tính năng nâng cao được hiện thực hóa trong module này là khả năng đồng bộ cấu trúc mạng vật lý lên giao diện Cloud. Hệ thống sử dụng thuộc tính parent_device để xây dựng mô hình phân cấp: Gateway → Relay → Sensor.

- Logic ánh xạ: Hệ thống duy trì một biến trạng thái SENSOR_RELAY_MAP. Khi một sensor gửi dữ liệu hoặc gửi bản tin "Join" kèm theo ID của Relay quản lý nó, module sẽ cập nhật thông tin này và gửi bản tin Attribute lên Cloud:

```
{
  "Sensor_72": {
    "device_type": "Sensor",
    "parent_device": "Relay_36"
  }
}
```

The screenshot shows the ThingsBoard Cloud interface. On the left, there's a sidebar with various navigation options: Home, Plan and billing, Alarms, Dashboards, Reporting, Solution templates, Entities, Devices (selected), Assets, Entity views, Gateways, Profiles, Customers, Users, Integrations center, Calculated fields, Rule chains, and Edge management. The main area shows a list of devices under the 'Devices' tab. One device, 'Sensor_72', is selected and shown in a detailed view. The 'Attributes' tab is active, showing the following data:

Last update time	Key	Value
2026-01-05 12:56:08	device_id	72
2026-01-05 12:56:08	device_type	Sensor
2026-01-05 13:55:50	parent_device	36

Hình 7-12: Attribute của cảm biến đã khai báo Relay

- Tác dụng: Trên Dashboard của ThingsBoard, người quản trị có thể nhìn thấy trực quan sensor nào đang thuộc vùng quản lý của Relay nào. Nếu topo mạng thay đổi (ví dụ: sensor chuyển vùng), thông tin parent_device sẽ được cập nhật tự động, đảm bảo mô hình trên Cloud luôn phản ánh đúng hiện trạng thực tế tại cảnh đồng.5

7.5 Thiết kế Giao diện Giám sát

Để đảm bảo tính thân thiện với người dùng (User-friendly) và khả năng truy cập linh hoạt từ nhiều thiết bị (PC, Tablet, Smartphone), giao diện giám sát được xây dựng trên nền tảng Web Application. Server Flask đóng vai trò cung cấp tài nguyên tĩnh (Static Files Server) để hiển thị giao diện Frontend.

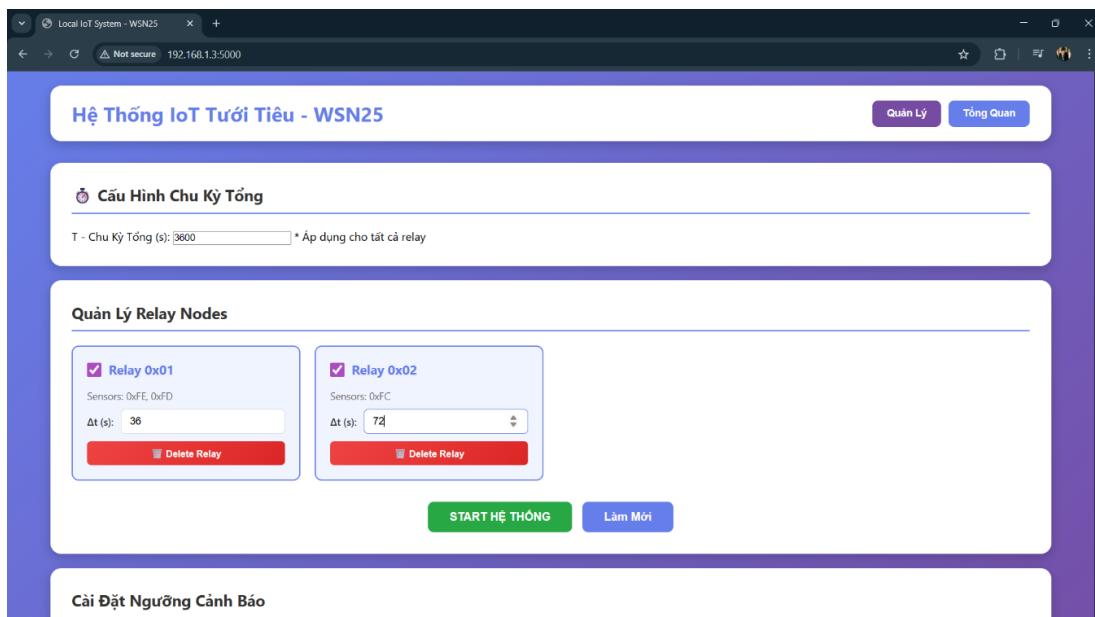
7.5.1 Công nghệ Frontend và Bộ cục tổng thể

Giao diện được phát triển dựa trên bộ công nghệ Web tiêu chuẩn và các thư viện mã nguồn mở nhẹ, tối ưu cho tốc độ tải trang:

- HTML5 & CSS3: Xây dựng khung xương và định dạng giao diện với thiết kế đáp ứng (Responsive Design), đảm bảo hiển thị tốt trên các kích thước màn hình khác nhau.
- JavaScript (ES6+): Xử lý logic phía máy khách (Client-side logic), thực hiện gọi AJAX/Fetch API đến Server để lấy dữ liệu mà không cần tải lại toàn bộ trang.
- Chart.js (v4.4.0): Thư viện đồ họa mạnh mẽ được sử dụng để vẽ các biểu đồ đường (Line Chart) thể hiện sự biến thiên của nhiệt độ và độ ẩm theo thời gian.

Hệ thống điều hướng được tổ chức thành 3 khu vực chức năng chính (View), cho phép người dùng chuyển đổi nhanh chóng giữa các tác vụ cấu hình và giám sát.

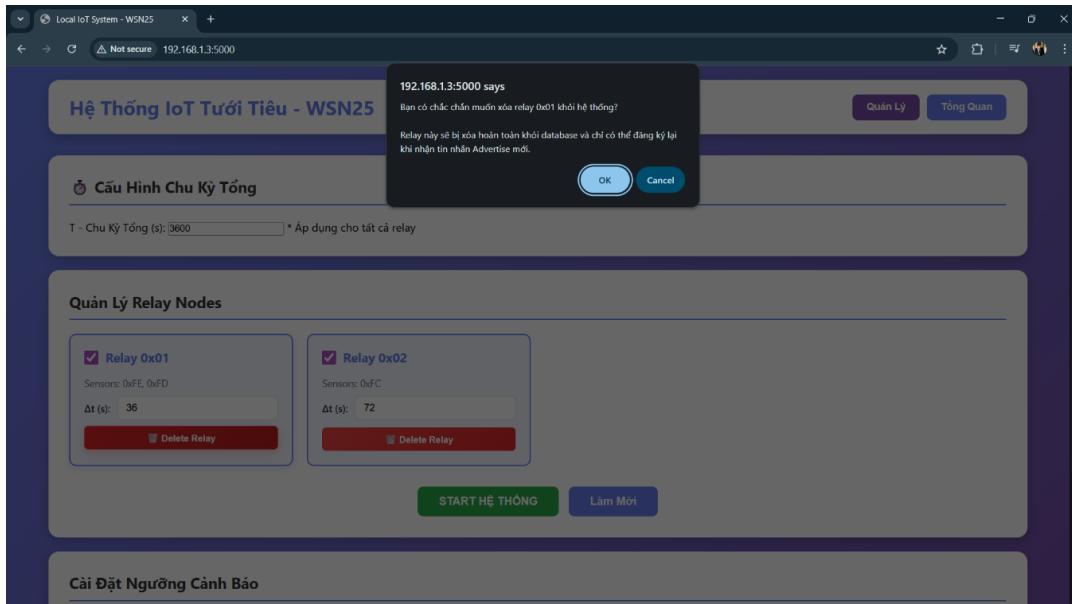
7.5.2 Chức năng Quản lý cấu hình (Manager View)



Hình 7-13: Màn hình quản lý

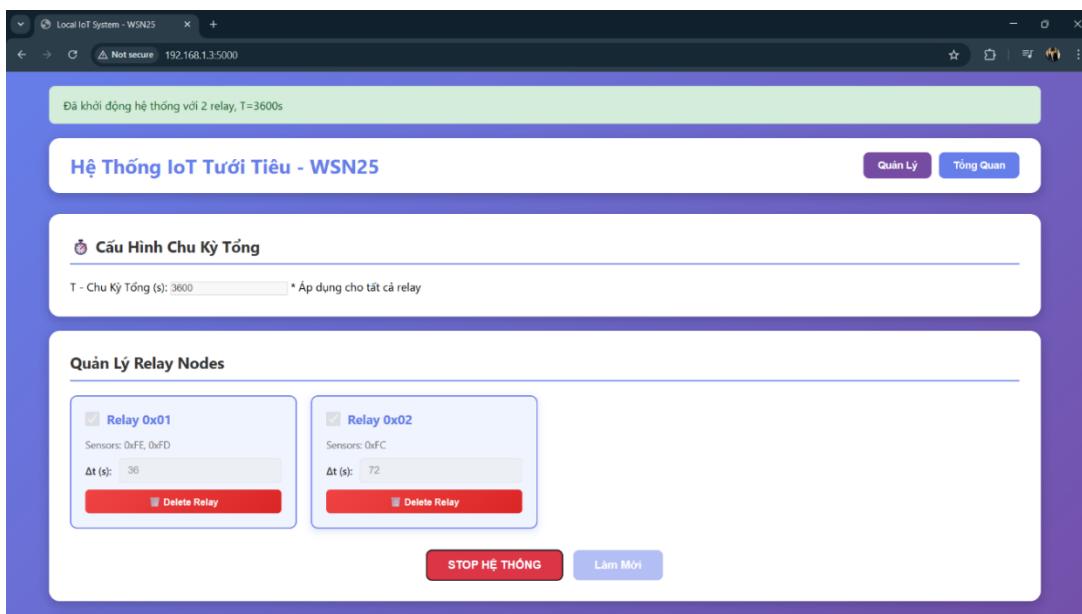
Đây là khu vực dành cho người quản trị hệ thống thiết lập các tham số vận hành mạng lưới. Thay vì phải nạp lại code cho vi điều khiển (Hard-coding), người dùng có thể can thiệp trực tiếp vào hệ thống đang chạy thông qua các công cụ:

- Lựa chọn Relay giám sát: Giao diện hiển thị danh sách tất cả các Relay đã đăng ký (lấy từ ADV.csv). Người dùng có thể tích chọn các Relay cụ thể để tham gia vào chu trình mạng hoặc xóa hoàn toàn khỏi hệ thống.



Hình 7-14: Xóa bỏ Relay khỏi hệ thống

- Cấu hình chu kỳ mạng (T): Cho phép thiết lập tổng thời gian của một chu kỳ thu thập dữ liệu (ví dụ: 3600 giây).
- Thiết lập tham số thời gian thực (Δt): Người dùng có thể nhập giá trị độ lệch thời gian đánh thức cho từng Relay riêng biệt. Khi nhấn "Start hệ thống", Server sẽ gửi lệnh xuống Gateway để đồng bộ lại nhịp hoạt động của các nút.



Hình 7-15: Tùy chỉnh tham số và khởi động hệ thống

- Cài đặt ngưỡng cảnh báo: Hệ thống cho phép định nghĩa các khoảng an toàn cho Nhiệt độ ($T_{min} - T_{MAX}$) , Độ ẩm không khí ($H_{min} - H_{MAX}$) và Độ ẩm đất ($S_{min} - S_{MAX}$).

The screenshot displays two separate browser windows of the Local IoT System - WSN25 interface.

Top Window: This window is titled "Quản Lý Relay Nodes". It lists two relay nodes: "Relay 0x01" and "Relay 0x02". Each relay entry includes its sensor ID (0xFE, 0xFD or 0xFC), a threshold value (Δt in seconds), and a "Delete Relay" button. Below the relay list are two buttons: "STOP HỆ THỐNG" (Stop System) in red and "Làm Mới" (Refresh) in blue.

Bottom Window: This window is titled "Cài Đặt Ngưỡng Cảnh Báo" (Configure Alarm Thresholds). It contains three input fields for setting temperature, humidity, and soil moisture thresholds. Each field has a range from 10 to 70. A "Lưu Ngưỡng" (Save Thresholds) button is located below the fields.

Hình 7-16: Cấu hình ngưỡng cảnh báo

7.5.3 Chức năng Giám sát Tổng quan (General View)

Màn hình này cung cấp cái nhìn toàn cảnh (Bird's-eye view) về trạng thái của toàn bộ cánh đồng 100 hecta. Dữ liệu được hiển thị dưới dạng bảng trực quan (Data Grid) với các tính năng:

- Cập nhật thời gian thực: Giao diện tự động làm mới (Auto-refresh) mỗi 5 giây để cập nhật các giá trị đo mới nhất từ file DATA.csv mà người dùng không cần thao tác F5.
- Phân cấp hiển thị: Các dòng dữ liệu được nhóm theo Relay quản lý, giúp dễ dàng xác định vị trí địa lý của các cụm cảm biến.
- Cảnh báo bằng màu sắc (Visual Alert): Hệ thống tự động so sánh giá trị đo nhận được với ngưỡng cài đặt. Nếu giá trị vượt ngưỡng (ví dụ: nhiệt độ quá cao), ô dữ liệu tương ứng sẽ chuyển sang màu đỏ hoặc vàng để thu hút sự chú ý tức thì của người giám sát.

Relay	Sensor	Nhiệt độ (°C)	Độ ẩm (%)	Độ ẩm đất (%)	Thời gian	Trạng thái
0x01	0x01	18.6	40.1	41.0	2026-01-20 14:22:51	NORMAL
0x01	0xFE	18.5	39.8	43.0	2026-01-20 14:22:51	NORMAL
0x01	0xFD	18.3	39.5	42.0	2026-01-20 14:22:51	NORMAL
0x02	0x02	19.0	43.0	45.0	2026-01-20 14:23:03	NORMAL
0x02	0xFC	19.1	32.9	46.0	2026-01-20 14:23:03	NORMAL

Hình 7-17: Màn hình giám sát tổng quát trạng thái bình thường

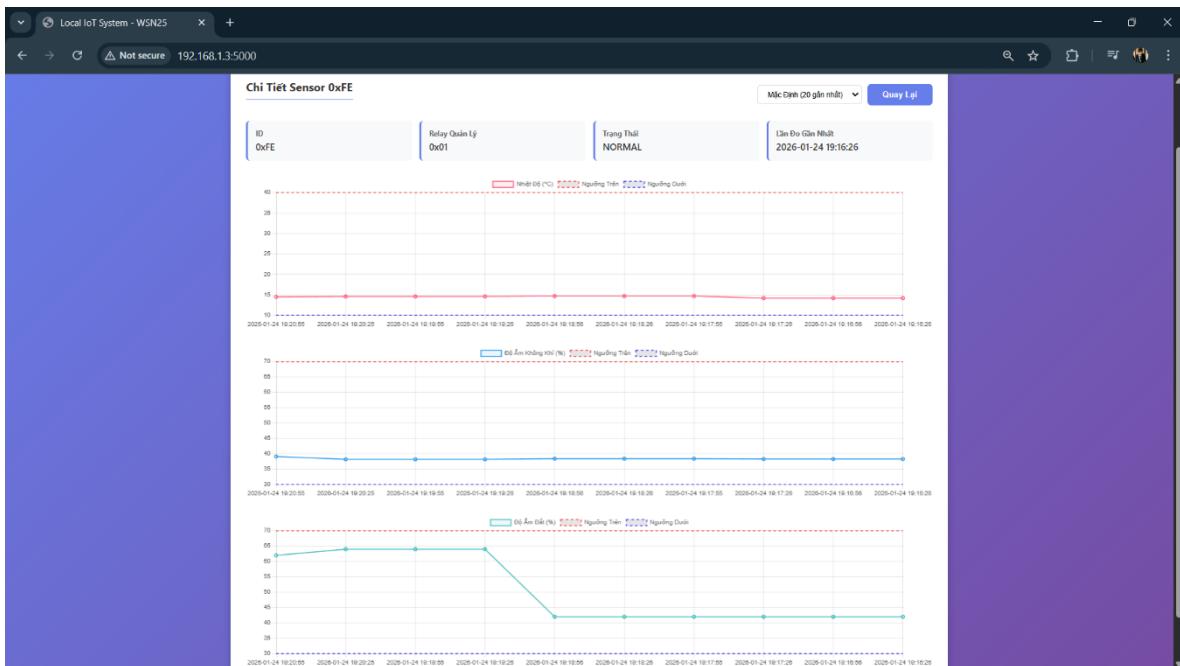
Relay	Sensor	Nhiệt độ (°C)	Độ ẩm (%)	Độ ẩm đất (%)	Thời gian	Trạng thái
0x01	0x01	13.9	40.1	41.0	2026-01-23 09:13:23	CẢNH BÁO: Nhiệt độ
0x01	0xFE	14.1	39.8	43.0	2026-01-23 09:13:23	CẢNH BÁO: Nhiệt độ
0x01	0xFD	14.0	39.5	42.0	2026-01-23 09:13:23	CẢNH BÁO: Nhiệt độ
0x02	0x02	14.2	43.0	45.0	2026-01-23 09:13:53	CẢNH BÁO: Nhiệt độ
0x02	0xFC	14.1	32.9	46.0	2026-01-23 09:13:53	CẢNH BÁO: Nhiệt độ

Hình 7-18: Màn hình giám sát tổng quát cảnh báo nhiệt độ

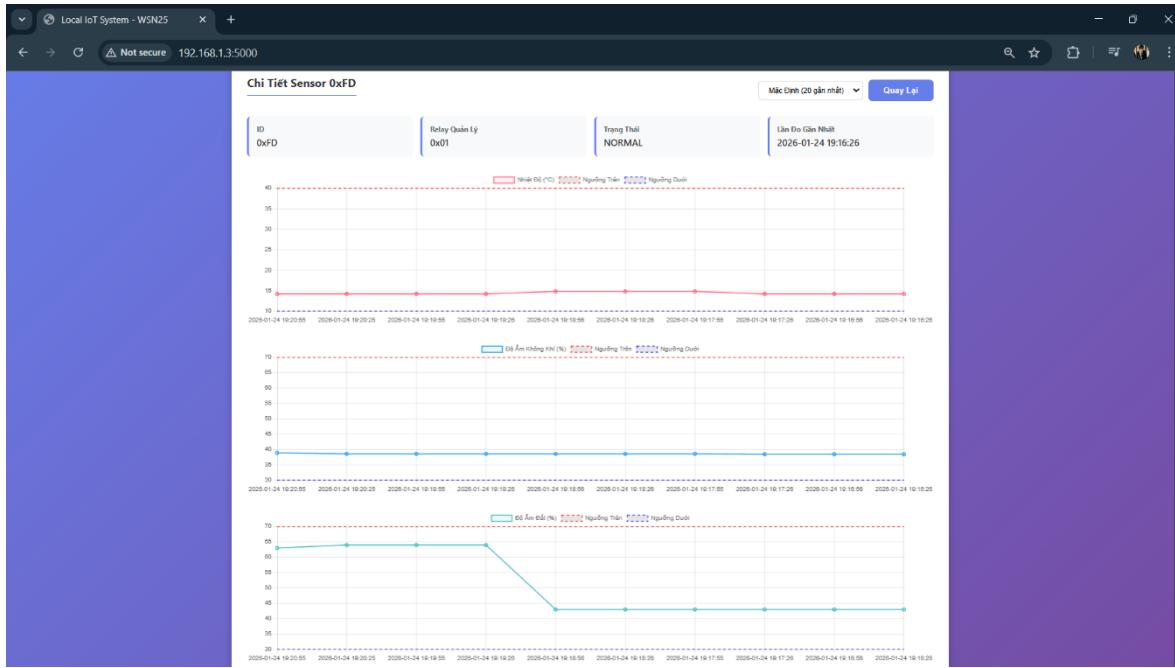
7.5.4 Chức năng Giám sát Chi tiết và Lịch sử (Detail View)

Khi người dùng cần phân tích sâu hơn về một điểm đo cụ thể, họ có thể nhập vào ID của cảm biến bất kỳ trên bảng tổng quan để mở giao diện chi tiết.

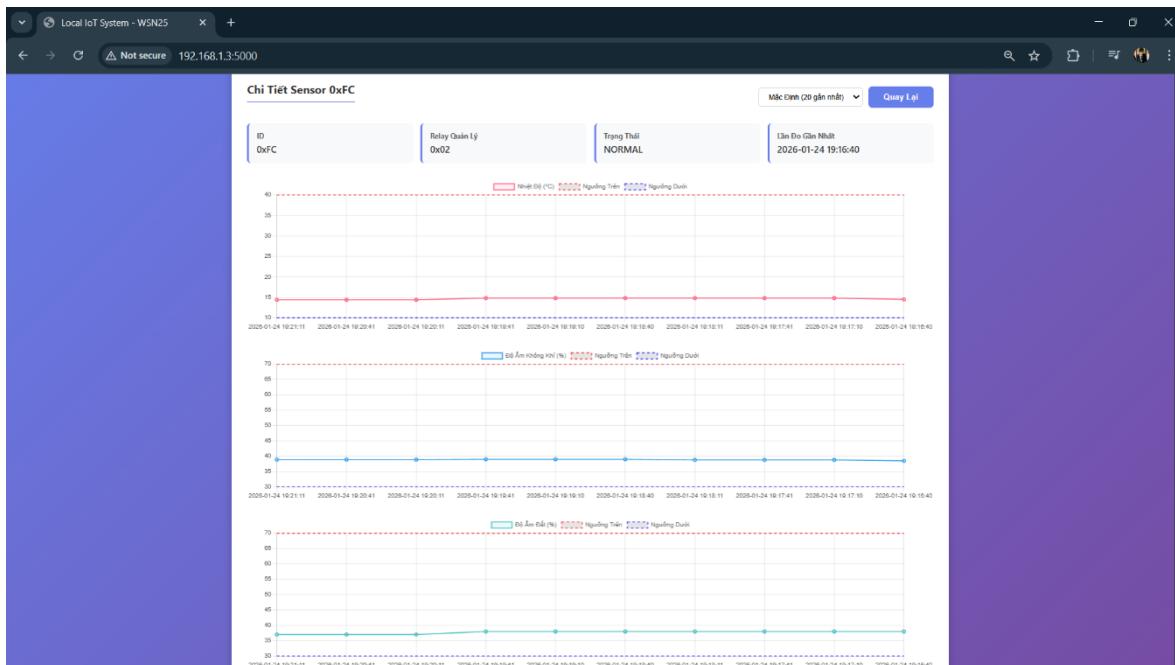
- Biểu đồ chuỗi thời gian (Time-series Charts): Hệ thống vẽ 3 biểu đồ riêng biệt cho Nhiệt độ, Độ ẩm không khí và Độ ẩm đất. Trục hoành là thời gian, trục tung là giá trị đo. Trên biểu đồ có các đường kẻ ngang thể hiện ngưỡng trên/dưới (Threshold lines), giúp người dùng dễ dàng nhận biết các thời điểm vi phạm ngưỡng.
- Bộ lọc thời gian (Time Range Filter): Người dùng có thể chọn xem dữ liệu trong các khoảng thời gian khác nhau (1 giờ qua, 1 ngày qua, 1 tháng qua) để phân tích xu hướng biến đổi ngắn hạn hoặc dài hạn.
- Truy xuất lịch sử: Dữ liệu hiển thị trên biểu đồ được trích xuất từ file OLD_DATA.csv, đảm bảo tính đầy đủ của thông tin ngay cả khi cảm biến đó tạm thời mất kết nối.



Hình 7-19: Màn hình giám sát chi tiết cảm biến 0xFE



Hình 7-20: Màn hình giám sát chi tiết cảm biến 0xFD



Hình 7-21: Màn hình giám sát chi tiết cảm biến 0xFC

7.6 Giao diện lập trình ứng dụng (RESTful API)

Để đảm bảo tính module hóa và khả năng mở rộng trong tương lai (ví dụ: phát triển thêm Mobile App hoặc tích hợp với hệ thống bên thứ ba), Server không trả về giao diện HTML cứng nhắc mà cung cấp dữ liệu thông qua các API chuẩn RESTful. Giao diện Frontend (Web Dashboard) và Backend giao tiếp hoàn toàn thông qua các API này, sử dụng định dạng dữ liệu JSON.

Các điểm cuối (Endpoints) quan trọng được định nghĩa trong app.py và mô tả chi tiết trong bảng dưới đây:

Bảng 7-3: Danh sách các RESTful API chính của hệ thống

Phương thức	API Endpoint	Chức năng và Mô tả
GET	/api/data	Lấy dữ liệu thời gian thực: Trả về danh sách toàn bộ giá trị đo mới nhất của các sensor từ DATA.csv để hiển thị lên bảng tổng quan.
GET	/api/relays	Lấy cấu trúc mạng: Trả về danh sách các Relay đang hoạt động và các Sensor ID trực thuộc (từ ADV.csv) kèm theo cấu hình thời gian hiện tại.
GET	/api/sensor/<r_id>/<s_id>	Truy xuất lịch sử: Lấy dữ liệu chi tiết của một cảm biến cụ thể từ OLD_DATA.csv phục vụ việc vẽ biểu đồ biến thiên. Hỗ trợ tham số lọc theo thời gian (time range).
POST	/api/start	Khởi động hệ thống: Gửi lệnh bắt đầu thu thập dữ liệu. Payload bao gồm danh sách Relay được chọn và tổng chu kỳ mạng (T).
POST	/api/stop	Dừng hệ thống: Gửi lệnh dừng hoạt động và ngắt các quy trình thu thập dữ liệu nền.
POST	/api/update_cycle	Cấu hình thời gian: Cập nhật tham số độ lệch thời gian (Δt) cho một Relay cụ thể nhằm điều chỉnh khe thời gian truyền tin.
GET/POST	/api/thresholds	Quản lý cảnh báo: Lấy giá trị hiện tại hoặc cập nhật các ngưỡng an toàn mới cho nhiệt độ và độ ẩm.
DELETE	/api/relay/<relay_id>	Xóa thiết bị: Loại bỏ hoàn toàn một Relay ra khỏi cơ sở dữ liệu hệ thống (chỉ thực hiện được khi hệ thống đang ở trạng thái dừng).

Việc thiết kế API rõ ràng giúp tách biệt hoàn toàn lớp hiển thị và lớp xử lý logic, cho phép đội ngũ phát triển dễ dàng nâng cấp giao diện người dùng mà không ảnh hưởng đến phần lõi vận hành của Server.

Chương 7 đã trình bày chi tiết quy trình xây dựng hệ thống Server trung tâm đóng vai trò là "bộ não" điều phối toàn bộ mạng cảm biến. Hệ thống đã hiện thực hóa thành công các yêu cầu kỹ thuật phức tạp bao gồm: thiết lập hạ tầng truyền dẫn MQTT hiệu năng cao, xây dựng cơ sở dữ liệu CSV an toàn đa luồng, tích hợp giải thuật tự động phát hiện mạng và cơ chế đồng bộ hóa dữ liệu lên nền tảng đám mây ThingsBoard.

Với việc hoàn thiện Server và giao diện Dashboard, các thành phần rời rạc (Node cảm biến, Gateway, Server) đã được liên kết thành một chu trình IoT khép kín. Đây là cơ sở quan trọng để tiến hành các thử nghiệm thực tế. Chương 8: Xây dựng thực nghiệm và Kết quả sẽ trình bày chi tiết quá trình triển khai phối hợp các thành phần này, cũng như các kịch bản kiểm thử (Test Cases) nhằm đánh giá độ ổn định, khả năng chịu lỗi và độ trễ của toàn hệ thống trong điều kiện vận hành thực tế.

CHƯƠNG 8. XÂY DỰNG THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

8.1 Thủ nghiệm linh kiện

8.1.1 Kiểm thử cảm biến

Trước khi ghép nối toàn bộ hệ thống, nhóm tiến hành kiểm thử chức năng của từng linh kiện để đảm bảo chúng hoạt động đúng thông số kỹ thuật. Kiểm thử linh kiện trước thuận tiện trong việc xây dựng phần mềm nhúng khi xác định các xung đột có thể xảy ra và thời gian phản hồi.

Linh kiện kiểm thử	Phương pháp thực hiện	Nội dung kiểm thử	Kết quả thực tế	Đánh giá
Kiểm tra cảm biến DHT22	Đọc nhiệt độ/độ ẩm không khí	Đặt DHT22 cạnh nhiệt kế phòng trong 10 phút. Đọc Serial Monitor.	Sai số nhiệt độ $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, độ ẩm $< \pm 5\%$.	Nhiệt độ: 24.5°C Độ ẩm: 42.8%
Kiểm tra cảm biến DHT22	Phản hồi với hơi ẩm	Thổi hơi vào cảm biến.	Độ ẩm tăng nhanh và giảm dần khi ngừng thổi.	Độ ẩm tăng lên 17% sau 2s
Đọc độ ẩm đất	Đọc độ ẩm đất (Môi trường khô)	Để que đo ngoài không khí.	Giá trị ADC tiệm cận Max (4095) -> Độ ẩm ~0%.	ADC: 4095 Độ ẩm: 0%
Đọc độ ẩm đất	Đọc độ ẩm đất (Môi trường ướt)	Nhúng que đo vào cốc nước.	Giá trị ADC giảm sâu	ADC: 0 - 5
Đọc độ ẩm đất	Đọc độ ẩm đất (Môi trường ướt)	Nhúng vào đất bùn	Giá trị ADC xuống nhưng vẫn > 1000	ADC: 1495 Hiệu chỉnh coi độ ẩm 100%

8.1.2 Kiểm thử module truyền thông

8.1.3 Kiểm thử các chế độ STM32

Kiểm tra khả năng thức dậy khỏi chế độ tiết kiệm năng lượng của STM32F103C8T6, bằng cách đưa MCU vào chế độ ngủ.

Chế độ	Đánh thức	Kết quả	Tình trạng khi thức dậy
Sleep Mode	Internal Clock	Thành công	Trạng thái của MCU không khác gì so với trước khi ngủ. Vẫn lưu được dữ liệu trong RAM
	RTC Wake up	Thành công	
	EXTI	Thành công	Vẫn lưu được dữ liệu trong RAM
Stop Mode	Internal Clock	Thất bại	Internal Clock bị reset.
	RTC Wake up	Thành công	Vẫn lưu được dữ liệu trong RAM
	EXTI	Thành công	Ngoại vi vẫn hoạt động khi ở Stop Mode
Stand by Mode	Internal Clock	Thất bại	MCU bị Reset.
	RTC Wake up	Thành công	Toàn bộ dữ liệu lưu trong RAM bị mất.
	EXTI	Thành công	

8.1.4 Kiểm thử mạch sạc và mức tiêu thụ pin

8.2 Thủ nghiệm truyền thông

8.2.1 Thủ nghiệm lỗi truyền thông 1 (mô tả rõ)

8.2.2 Thủ nghiệm lỗi truyền thông 2 (mô tả rõ)

8.2.3 Thủ nghiệm thêm node vào mạng

8.2.4 Thủ nghiệm chu kỳ thu dữ liệu và cảnh báo

8.3 Thực nghiệm cuối kì

8.3.1 Mô tả hệ thống thực nghiệm

Hệ thống thực nghiệm được thiết kế để kiểm tra toàn diện khả năng giao tiếp và phối hợp hoạt động giữa các phần tử trong mạng: Sensor Node, Relay Node và Gateway. Quy trình kiểm tra tập trung vào các cặp liên kết chính: Sensor-Relay và Relay-Gateway.

Mục tiêu: Đảm bảo khả năng truyền tải dữ liệu ổn định và tin cậy theo sơ đồ hình cây (Cluster-Tree Topology), trong đó Gateway đóng vai trò là nút Gốc (Root), kết nối xuống các nút trung gian Relay và cuối cùng là các nút lá Sensor.

Phương pháp thực hiện: Quá trình thực nghiệm sẽ kiểm tra hoạt động của hệ thống trên 2 pha chính (Pha Đăng ký và Pha Báo cáo) theo trình tự tích hợp dần:

- Kiểm thử cặp Sensor - Relay: Đảm bảo Sensor có thể gia nhập mạng và gửi báo cáo đến Relay đúng khe thời gian.
- Kiểm thử cặp Relay - Gateway: Đảm bảo Relay nhận, tổng hợp và chuyển tiếp dữ liệu thành công lên Gateway.

Kiểm thử toàn trình: Xác minh luồng dữ liệu thông suốt từ Sensor-Relay rồi tới Relay-Gateway và hiển thị lên Server.

8.3.2 Kịch bản thực nghiệm

Để đánh giá toàn diện hệ thống, nhóm xây dựng 3 kịch bản thực nghiệm chi tiết tương ứng với các giai đoạn vận hành của mạng:

Kịch bản 1: Thiết lập mạng trực (Relay gia nhập mạng)

Mục đích: Kiểm tra quy trình đăng ký giữa Relay Node và Gateway, đảm bảo Server nhận diện được Relay mới.

Các bước thực hiện:

1. Cấp nguồn cho Gateway, đảm bảo Gateway đã kết nối WiFi và MQTT Broker.
2. Bật nguồn Relay Node. Relay bắt đầu phát các bản tin quảng bá (Advertising Packet) tìm kiếm mạng.
3. Gateway thu nhận bản tin từ Relay và chuyển tiếp thông tin định danh lên Server.
4. Kiểm tra: Trên giao diện Dashboard của Server, quan sát danh sách thiết bị chờ duyệt.
5. **Thao tác:** Người quản trị tích chọn (Check) vào ID của Relay trên Dashboard để chấp nhận cho phép gia nhập mạng. Gateway gửi phản hồi cấu hình về cho Relay.

Kịch bản 2: Mở rộng mạng cảm biến (Sensor gia nhập cụm)

Mục đích: Kiểm tra khả năng quản lý của Relay đối với các Sensor Node con.

Các bước thực hiện:

1. Sau khi Relay đã gia nhập mạng thành công (Kịch bản 1).
2. Bật nguồn Sensor Node. Sensor phát bản tin quảng bá tìm kiếm Relay gần nhất.
3. Kiểm tra Terminal (Log UART):
 - Tại Relay: Hiển thị thông báo nhận được yêu cầu từ Sensor ID tương ứng.
 - Tại Sensor: Hiển thị thông báo nhận được gói tin chấp nhận (Join Accept) và lưu cấu hình thời gian/khe TDMA.
4. Relay cập nhật danh sách quản lý thành viên (Member List).

Kịch bản 3: Vận hành toàn trình (End-to-End Data Flow)

Mục đích: Xác minh luồng dữ liệu đi từ điểm cuối (Sensor) đến trung tâm giám sát (Server) một cách chính xác và đúng chu kỳ.

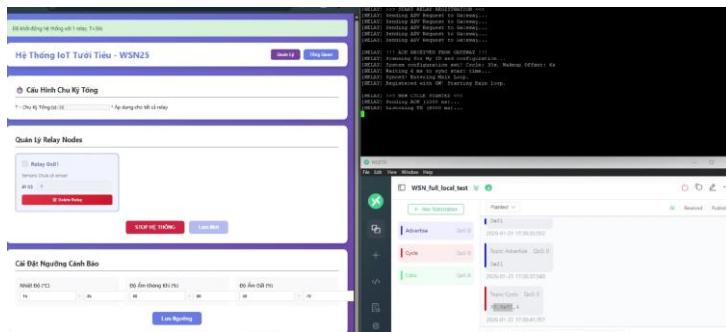
Các bước thực hiện:

1. Dụng toàn bộ hệ thống đã kết nối.
2. Sensor Node thực hiện đo đặc nhiệt độ/độ ẩm.
3. Chờ đến chu kỳ gửi (theo khe thời gian đã cấp): Sensor gửi gói tin dữ liệu đến Relay.
4. Kiểm tra Terminal 2 thiết bị: Xác nhận Sensor báo "Send OK" và Relay báo "Data Received".
5. Relay tổng hợp dữ liệu và chuyển tiếp lên Gateway.
6. Kiểm tra Server & Dashboard:
 - Đánh giá Gateway có nhận được dữ liệu từ Relay không.
 - Quan sát biểu đồ trên Dashboard: Dữ liệu nhiệt độ/độ ẩm mới có xuất hiện đúng với giá trị thực tế đang đo hay không.

8.3.3 Kết quả thực nghiệm

Kết quả kiểm thử kịch bản 1:

Relay gửi thành công các bản tin tới Gateway, người dùng có thể sử dụng Server Dashboard để kiểm tra các bản tin gửi tới, đồng thời cũng quyết định Relay nào được đăng kí vào mạng. Khi được xác nhận và gửi bản tin ACK đến Relay và nhận được, thì Relay thực hiện thành công pha đăng kí và gia nhập vào mạng.



Kết quả kiểm thử kịch bản 2

Relay node thành công nhận được quảng bá từ Sensor Node, phả hồi bản tin ACK thành công. Sensor node thành công gia nhận mạng.

```
[COM3] Putty - www.BANDICAM.com
```

[RELAY] >>> NEW CYCLE STARTED <<<
[RELAY] Sending ACK (1000 ms)...
[RELAY] Received TX (8000 ms)...
[RELAY] No Data to Forward.
[RELAY] Sleep time: 15 s.

[RELAY] >>> NEW CYCLE STARTED <<<
[RELAY] Sending ACK (1000 ms)...
[RELAY] Listening TX (8000 ms)...
[RELAY] Received ADV form Managed Sensor: 0x0E --> ACCEPTED
[RELAY] Added Sensor 0x0E to ACK Queue. Count: 1
[RELAY] Received ADV form Managed Sensor: 0x0E --> ACCEPTED
[RELAY] Received ADV form Managed Sensor: 0x0E --> ACCEPTED
[RELAY] Received data to Forward.
[RELAY] Sleep time: 15 s.

[RELAY] >>> NEW CYCLE STARTED <<<
[RELAY] Sending ACK (1000 ms)...
[RELAY] Sending 1 ACKs...
[RELAY] Listening TX (8000 ms)...
[RELAY] Received DATA from 0x0E: T=0, H=0, S=0
[RELAY] Received DATA from 0x0E: T=0, H=0, S=0

[SENSEOR] Sending ADV Request to Relay 0x01...
[SENSEOR] ADV sent. Waiting for ACK...
[SENSEOR] Reg Timeout. Retrying...

[SENSEOR] Sending ADV Request to Relay 0x01...
[SENSEOR] ADV sent. Waiting for ACK...
[SENSEOR] Reg Timeout. Retrying...

[SENSEOR] Sending ADV Request to Relay 0x01...
[SENSEOR] ADV sent. Waiting for ACK...
[SENSEOR] Reg Timeout. Retrying...

[SENSEOR] Sending ADV Request to Relay 0x01...
[SENSEOR] ADV sent. Waiting for ACK...
[SENSEOR] Reg Timeout. Retrying...

[SENSEOR] !!! ACT RECEIVED FROM RELAY 0x01!!!
[SENSEOR] Assigned TMMA Slot: 0
[SENSEOR] Syncing cycle: Sleeping 25 seconds to match Relay Start...
[SENSEOR] Woke up! Registration Complete. Entering Main Loop.

[SENSEOR] >>> NEW CYCLE STARTED <<<
[SENSEOR] Wait for TMMA slot to sent DATA: 1500 ms

Kết quả kiểm thử kịch bản 3

Server hiển thị thành công các giá trị đo của Sensor node trên Server Broker.

```

[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Forwarding to GW (8 bytes)...
[HEX] 04 01 FB 00 CB 02 5B 2F
[RELAY] Sleep time: 15 s.

[RELAY] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[RELAY] Sending ACK (1000 ms)...
[RELAY] Listening TX (8000 ms)...
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Forwarding to GW (8 bytes)...
[HEX] 04 01 FB 00 CB 02 5B 2F
[RELAY] Sleep time: 15 s.

[RELAY] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[RELAY] Sending ACK (1000 ms)...
[RELAY] Listening TX (8000 ms)...
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Forwarding to GW (8 bytes)...
[HEX] 04 01 FB 00 CB 02 5B 2F
[RELAY] Sleep time: 15 s.

[RELAY] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[RELAY] Sending ACK (1000 ms)...
[RELAY] Listening TX (8000 ms)...
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Received DATA from 0x8E: T=203, H=690, S=47
[RELAY] Forwarding to GW (8 bytes)...
[HEX] 04 01 FB 00 CB 02 5B 2F
[RELAY] Sleep time: 15 s.

[SENSOR] Wait for TDM4 slot to sent DATA: 1500 ms
[SENSOR] Data Sent: T=203, H=690
[SENSOR] Measuring sensor data ... (Timeout: 3000 ms)
[SENSOR] Measured: 20.3 C, 60.0 %
[SENSOR] Active: 6000 ms. Enter STOP mode: 19 s.

[SENSOR] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[SENSOR] Wait for TDM4 slot to sent DATA: 1500 ms
[SENSOR] Data Sent: T=203, H=690
[SENSOR] Skip Measure phase.
[SENSOR] Active: 3000 ms. Enter STOP mode: 22 s.

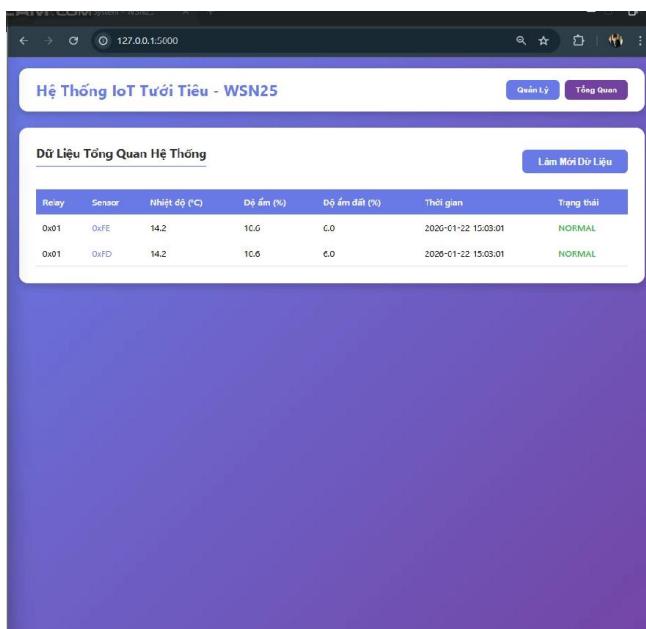
[SENSOR] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[SENSOR] Wait for TDM4 slot to sent DATA: 1500 ms
[SENSOR] Data Sent: T=203, H=690
[SENSOR] Skip Measure phase.
[SENSOR] Active: 3000 ms. Enter STOP mode: 22 s.

[SENSOR] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[SENSOR] Wait for TDM4 slot to sent DATA: 1500 ms
[SENSOR] Data Sent: T=203, H=690
[SENSOR] Skip Measure phase.
[SENSOR] Active: 3000 ms. Enter STOP mode: 22 s.

[SENSOR] >>> NEW CYCLE STARTED <<
[SENSOR] Wait for TDM4 slot to sent DATA: 1500 ms
[SENSOR] Data Sent: T=203, H=690
[SENSOR] Measuring sensor data ... (Timeout: 3000 ms)
[SENSOR] Measured: 20.1 C, 59.5 %

```

Hình 8-1 Terminal của Relay node và Sensor Node



Hình 8-2 Server Broker

CHƯƠNG 9. ĐÁNH GIÁ VÀ KẾT LUẬN

9.1 Đánh giá kết quả thực nghiệm cuối cùng

Tổng hợp các kết quả đo đạc và kịch bản kiểm thử (Test Cases) đã thực hiện ở Chương 8, nhóm thực hiện đưa ra những đánh giá khách quan về hiệu quả hoạt động của toàn hệ thống trên các khía cạnh sau:

- Về khả năng thu thập và độ chính xác của cảm biến (Node Level): Các Node cảm biến hoạt động ổn định tại thực địa. Dữ liệu nhiệt độ và độ ẩm thu được từ cảm biến (như DHT22/DHT11 và cảm biến độ ẩm đất) có độ chính xác nằm trong dải sai số cho phép phục vụ sản xuất nông nghiệp ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ với nhiệt độ và $\pm 2\text{-}5\%$ với độ ẩm).
- Về hiệu năng mạng truyền thông không dây (Network Level): Công nghệ LoRa (SX1278) đã chứng minh được ưu thế vượt trội trong bài toán giám sát diện rộng. Kết quả thực nghiệm cho thấy bán kính truyền dẫn đáp ứng tốt yêu cầu phủ sóng cho các điểm nút cách xa Gateway hàng trăm mét trong điều kiện có vật cản (cây cối). Tỷ lệ mất gói tin (Packet Loss Rate) duy trì ở mức thấp ($< 5\%$) nhờ cơ chế điều chế mạnh mẽ của LoRa và thuật toán truyền lại (Retransmission) được cài đặt trong Firmware.
- Về mức tiêu thụ năng lượng và thời gian hoạt động (Energy Efficiency): Chiến lược quản lý năng lượng (Power Management) áp dụng trên vi điều khiển STM32 và các module ngoại vi đã phát huy hiệu quả. Dòng tiêu thụ của Node ở chế độ ngủ (Sleep Mode) giảm xuống mức thấp đáng kể so với chế độ hoạt động. Dựa trên tính toán từ dữ liệu đo thực tế, hệ thống đảm bảo khả năng vận hành lâu dài với nguồn pin độc lập, đáp ứng yêu cầu triển khai tại các khu vực xa nguồn điện lưới.
- Về tính tích hợp và độ trễ toàn trình (System Integration): Sự phối hợp giữa các thành phần phần cứng (Gateway, Node) và phần mềm (Server, Cloud) diễn ra liền mạch. Gateway thực hiện tốt vai trò chuyển đổi giao thức (Protocol Converter) từ LoRa sang WiFi/MQTT mà không tạo ra nút thắt cỏ chai. Độ trễ toàn trình (End-to-End Latency) từ lúc cảm biến đo đến khi dữ liệu hiển thị trên Dashboard nằm trong giới hạn yêu cầu ($< 30\text{s}$), đảm bảo tính giám sát thời gian thực.
- Về khả năng giám sát và điều khiển: Giao diện Web Dashboard và ThingsBoard Cloud hoạt động ổn định, cập nhật thời gian thực (Real-time). Các tính năng điều khiển chiều xuống (Downlink) như thay đổi chu kỳ đo, cập nhật ngưỡng cảnh báo được thực thi chính xác tại các Node, khẳng định tính tương tác hai chiều của hệ thống.

9.2 Đánh giá mức độ hoàn thành dự án

TT	Nội dung	/10
1	Yêu cầu đo lường: - Dải đo: -10°C ÷ 50°C với nhiệt độ, 0–100 %RH (độ ẩm không khí) và 0–60% Vol (độ ẩm đất). - Độ chính xác: ±0.5 °C và ±2% RH (không khí), ±3% Vol (độ ẩm đất). - Độ phân giải hiển thị: 0.1°C và 0.1 %RH. - Thời gian đo một mẫu : <60s. (nâng cao < 10s)	10/10
2	Yêu cầu nguồn và năng lượng tiêu thụ: - Thiết bị sử dụng pin (Nâng cao: sử dụng năng lượng mặt trời để tăng thời gian hoạt động). - Tuổi thọ pin/nút: ≥ 2 năm (với chế độ tiết kiệm năng lượng). Pin có thể thay thế, sạc lại qua năng lượng tái tạo.	9/10
3	Yêu cầu kích thước và trọng lượng: - Kích thước (dự kiến): 50 cm x 80 cm (nhỏ gọn, có tiềm năng phục vụ chuẩn chống nước IP65) - Trọng lượng (dự kiến): <150g.	7/10
4	Yêu cầu truyền thông và mạng: - Công nghệ RF ưu tiên có vùng phủ rộng, - Bán kính truyền nhận mỗi nút: ≥ 100 m để phủ 100 hecta. - Gateway trung tâm có thể có kết nối Internet qua WiFi/4G.	10/10
5	Yêu cầu truyền thông và mạng: - Độ trễ thấp nhất thu thập dữ liệu: < 30 s (nâng cao: < 5 s). - Quản lý tối thiểu: 100 nút cảm biến (nâng cao: mở rộng hàng nghìn nút).	10/10
6	Yêu cầu phần mềm & giao diện Phần mềm máy tính: - Thu thập giá trị đo từ thiết bị đo, quản lý dữ liệu, xuất báo cáo dạng excel. - Giao diện theo mẫu thống nhất.	10/10
7	Yêu cầu phần mềm & giao diện Phần mềm máy tính: - Cảnh báo vượt ngưỡng: LED tại nút + thông báo qua server. - Có thể cấu hình ngưỡng nhiệt độ, độ ẩm và chu kỳ đo từ xa.	10/10
8	Yêu cầu mở rộng & nâng cao Update firmware OTA (Over The Air) (tính năng nâng cao) Tích hợp thuật toán tiết kiệm năng lượng thông minh (adaptive duty cycle). Hỗ trợ phân tích dữ liệu cho ứng dụng nông nghiệp chính xác (ví dụ: dự báo tưới tiêu...).	0/10
9	Ràng buộc triển khai - Mỗi nhóm tối đa 3 sinh viên . - Cần lập kế hoạch triển khai 13 tuần: khảo sát – thiết kế – lập trình – thử nghiệm – báo cáo.	10/10

9.3 Kết luận cuối và hướng phát triển, mở rộng

9.3.1 Kết luận chung

Dự án "Thiết kế mạng cảm biến không dây giám sát nhiệt độ và độ ẩm trên các cánh đồng diện tích 100 hecta" là một nỗ lực nghiên cứu toàn diện, kết hợp kiến thức liên ngành từ Kỹ thuật Điện tử, Viễn thông đến Công nghệ thông tin. Sau quá trình thiết kế, thi công và kiểm thử thực nghiệm, nhóm thực hiện đã hoàn thành trọn vẹn các mục tiêu đề ra ban đầu, khẳng định tính khả thi và hiệu quả của giải pháp.

Những thành tựu nổi bật nhất mà dự án đã đạt được bao gồm:

1. Làm chủ công nghệ lõi: Nhóm đã thiết kế và chế tạo thành công các Node cảm biến hoạt động độc lập, sử dụng vi điều khiển STM32 và công nghệ truyền dẫn LoRa (SX1278). Việc này không chỉ giúp tối ưu chi phí so với các giải pháp thương mại nhập khẩu mà còn cho phép tùy biến linh hoạt firmware để phù hợp với điều kiện canh tác cụ thể tại Việt Nam.
2. Xây dựng hệ thống Server trung tâm toàn diện: Hệ thống Backend được xây dựng bài bản với kiến trúc 3 lớp (Communication - Processing - Storage), giải quyết triệt để bài toán thu thập dữ liệu từ hàng trăm thiết bị cùng lúc. Các cơ chế xử lý thông minh như "Lọc trùng lặp 2 lớp" (Two-layer Deduplication) và "Tự động phát hiện mạng" (Auto-discovery) giúp hệ thống vận hành ổn định, giảm thiểu lỗi và dễ dàng mở rộng quy mô.
3. Mô hình IoT End-to-End khép kín: Dự án đã hiện thực hóa một chu trình dữ liệu hoàn chỉnh: từ cảm biến ngoài thực địa → Gateway → Server cục bộ → Người dùng (Dashboard) → Cloud (ThingsBoard). Sự liền mạch này đảm bảo dữ liệu giám sát luôn sẵn sàng, hỗ trợ đắc lực cho việc ra quyết định trong nông nghiệp chính xác.
4. Tối ưu hóa năng lượng và chi phí: Bằng việc áp dụng các giải thuật tiết kiệm năng lượng (Adaptive Duty Cycle) và lựa chọn linh kiện phù hợp, hệ thống đáp ứng tốt yêu cầu triển khai diện rộng với chi phí vận hành thấp, giải quyết được rào cản lớn nhất khi ứng dụng công nghệ vào nông nghiệp.

9.3.2 Hướng phát triển và mở rộng

Mặc dù hệ thống hiện tại đã đáp ứng tốt các yêu cầu của đồ án môn học và hoạt động ổn định trong các kịch bản thử nghiệm, nhóm nghiên cứu nhận thấy vẫn còn nhiều dư địa để nâng cấp sản phẩm tiệm cận hơn với các tiêu chuẩn công nghiệp. Các hướng phát triển tiếp theo được đề xuất như sau:

- Nâng cao khả năng tự chủ năng lượng (Energy Harvesting) Hiện tại, các Node hoạt động dựa trên nguồn pin Li-ion độc lập. Để đạt được mục tiêu "lắp đặt và quên đi" (Install-and-Forget), hướng phát triển tiếp theo là tích hợp mạch thu thập năng lượng mặt trời (Solar Harvesting) kết hợp với siêu tụ điện (Supercapacitor). Điều này sẽ giúp thiết bị vận hành bền bỉ nhiều năm mà không cần nhân công đi thay pin định kỳ.
- Triển khai mạng Mesh (LoRa Mesh) Mô hình hiện tại đang sử dụng topo mạng hình sao (Star Topology), nơi mọi Node phải kết nối trực tiếp về Gateway. Điều này có thể tạo ra điểm chét (dead-spot) nếu bị vật cản lớn che chắn. Giải pháp nâng cấp là chuyển sang giao thức LoRa Mesh, cho phép các Node tự động chuyển tiếp dữ liệu cho nhau (Multi-hop). Khi đó, phạm vi phủ sóng sẽ được mở rộng linh hoạt mà không phụ thuộc hoàn toàn vào vị trí của Gateway.
- Cập nhật Firmware từ xa (FOTA - Firmware Over-The-Air) Với quy mô 100 hecta và hàng trăm nút mạng, việc thu hồi thiết bị để nạp lại code là bất khả thi. Hướng nghiên cứu quan trọng tiếp theo là phát triển Bootloader hỗ trợ cập nhật phần mềm qua sóng không dây (FOTA). Kỹ thuật này cho phép người quản trị và lỗi, nâng cấp tính năng hoặc thay đổi cấu hình cho toàn bộ mạng lưới chỉ bằng một thao tác trên Server.
- Ứng dụng Trí tuệ nhân tạo (AI/Machine Learning) Tận dụng kho dữ liệu lớn (Big Data) đã được lưu trữ trên Server và Cloud, hệ thống có thể tích hợp thêm các mô hình học máy để phân tích xu hướng. Ví dụ: Dựa trên lịch sử độ ẩm đất và dự báo thời tiết để đưa ra gợi ý lịch tưới tiêu tối ưu, hoặc phát hiện sớm các bất thường về nhiệt độ để cảnh báo nguy cơ sương muối hoặc sâu bệnh hại.
- Phát triển ứng dụng di động (Mobile App) Bên cạnh giao diện Web Dashboard, việc xây dựng một ứng dụng di động chuyên nghiệp (trên nền tảng Android/iOS) sử dụng các API đã thiết kế ở Chương 7 là rất cần thiết. Ứng dụng này sẽ cung cấp trải nghiệm người dùng tốt hơn, hỗ trợ nhận thông báo đầy (Push Notification) tức thì ngay khi có cảnh báo khẩn cấp từ cánh đồng.
- Thiết kế công nghiệp (Industrial Design) Để thương mại hóa, phần vỏ hộp cần được thiết kế lại và gia công bằng khuôn đúc nhựa chất lượng cao, đảm bảo tiêu chuẩn chống nước/bụi IP67. Các bo mạch PCB cũng cần được phủ lớp bảo vệ (Conformal Coating) để chịu được độ ẩm cao và sự ăn mòn của môi trường nông nghiệp nhiệt đới.

Kết lại, dự án này là bước khởi đầu vững chắc, minh chứng cho năng lực làm chủ công nghệ và khả năng giải quyết các bài toán thực tiễn của nhóm sinh viên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

A. Tài liệu nghiên cứu & Giáo trình (Research Papers & Textbooks)

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, vol. 3, New York, NY, USA, 2002, pp. 1567–1576.
- [3] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys)*, Los Angeles, CA, USA, Nov. 2003, pp. 138–149.
- [4] Lê Minh Thùy, *Bài giảng Mạng cảm biến không dây (WSN)*, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [5] Q. Mamun, "A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 12, no. 11, pp. 14887-14913, 2012.
- [6] SGRwin, "Network topology: The key to your operational efficiency," 2025. [Online]. Available: <https://www.sgrwin.com/network-topology-the-key-to-your-operational-efficiency/>.

B. Tài liệu kỹ thuật (Datasheets & Manuals)

- [7] STMicroelectronics, "STM32F103x8/xB Datasheet - Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU," Rev 17, 2015. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- [8] Semtech Corporation, "SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Datasheet," Rev 4, July 2015. [Online]. Available: https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V5.pdf
- [9] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet Version 5.1 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth® + Bluetooth LE SoC," 2025. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf
- [10] Aosong Electronics, "DHT22 (AM2302) Digital Temperature and Humidity Sensor Datasheet," Rev. 1.0, 2014. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- [11] NanJing Top Power ASIC Corp., "TP4056 - 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation," [Online]. Available: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>
- [12] Texas Instruments, "LM393 Low Power Low Offset Voltage Dual Comparators Datasheet," SNOSBJ7F, May 2004 - Revised April 2013. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm393.pdf>

[13] Dongguan Youdalipo New Energy Technology Co., Ltd, "Li-ion Polymer Battery Specification – Model: YDL 7565121," [Online]. Available: https://www.google.com/search?q=https://ydlbattery.com/cdn/shop/files/7565121_800mAh_YDL_datasheet.pdf

PHỤ LỤC

A. Các chuẩn khoa học có đề cập

❖ IEEE 802.11

- Đây là một bộ tiêu chuẩn quốc tế do Viện Kỹ sư Điện và Điện tử Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) phát triển, thiết lập các quy tắc và giao thức cho mạng cục bộ không dây (Wireless Local Area Network - WLAN). Chuẩn IEEE 802.11 là nền tảng của công nghệ Wi-Fi, cho phép các thiết bị truyền tải dữ liệu qua sóng vô tuyến mà không cần sử dụng cáp vật lý.
- Phiên bản đầu tiên của IEEE 802.11 được giới thiệu vào năm 1997, cung cấp tốc độ truyền tải 1 đến 2 Mbps. Từ đó, chuẩn này đã phát triển và mở rộng với nhiều phiên bản như 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, và gần đây nhất là 802.11ax (Wi-Fi 6). Mỗi phiên bản đều có cải tiến vượt bậc về tốc độ, băng thông, phạm vi hoạt động và khả năng bảo mật. Ví dụ, 802.11n hỗ trợ tốc độ lên đến 600 Mbps nhờ sử dụng nhiều ăng-ten (MIMO), trong khi 802.11ac và 802.11ax hỗ trợ tốc độ hàng Gbps, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của các ứng dụng trực tuyến như xem video 4K, chơi game trực tuyến, và IoT.
- Ngoài ra, IEEE 802.11 còn đưa ra các cơ chế bảo mật như WPA (Wi-Fi Protected Access) và WPA2 để bảo vệ thông tin truyền tải trên mạng không dây. Nhờ chuẩn này, Wi-Fi đã trở thành một phần thiết yếu trong cuộc sống hàng ngày và đóng vai trò quan trọng trong các lĩnh vực từ gia đình, giáo dục, cho đến doanh nghiệp và các thành phố thông minh.

❖ ISO 7 Tầng

Đây là một tiêu chuẩn do Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế International Organization for Standardization (ISO) phát triển, chia quá trình truyền thông mạng thành 7 tầng độc lập, đảm bảo dữ liệu truyền tải giữa các thiết bị một cách hiệu quả và đáng tin cậy. Mô hình này bao gồm các tầng sau:

- Tầng 1 - Vật lý (Physical Layer): Xử lý các kết nối vật lý giữa các thiết bị, truyền tải tín hiệu điện hoặc quang qua cáp, sóng radio, hoặc các phương tiện truyền dẫn khác.
- Tầng 2 - Liên kết Dữ liệu (Data Link Layer): Đảm bảo dữ liệu được truyền qua tầng vật lý một cách đáng tin cậy, phát hiện và sửa lỗi, chia dữ liệu thành các khung (frames) và điều khiển truy cập vào các phương tiện truyền dẫn.
- Tầng 3 - Mạng (Network Layer): Định tuyến dữ liệu qua các mạng khác nhau, xử lý địa chỉ logic (như IP) và lựa chọn đường đi tối ưu cho dữ liệu đến đích.

- Tầng 4 - Giao vận (Transport Layer): Đảm bảo dữ liệu truyền tải đáng tin cậy từ điểm gửi đến điểm nhận, chia nhỏ dữ liệu thành các phân đoạn (segments), kiểm soát lỗi và điều khiển lưu lượng.
- Tầng 5 - Phiên (Session Layer): Quản lý các phiên làm việc giữa các ứng dụng, thiết lập, duy trì và kết thúc các phiên kết nối khi cần.
- Tầng 6 - Trình bày (Presentation Layer): Chuyển đổi và mã hóa dữ liệu thành định dạng mà tầng ứng dụng có thể hiểu được, bao gồm nén dữ liệu, mã hóa và giải mã.
- Tầng 7 - Ứng dụng (Application Layer): Cung cấp các dịch vụ và giao thức mà người dùng tương tác trực tiếp, như HTTP, FTP, SMTP, cho các ứng dụng mạng như trình duyệt web, email và truyền tệp.

Mô hình OSI giúp chuẩn hóa các giao thức mạng và đảm bảo tính tương thích giữa các hệ thống và thiết bị từ nhiều nhà cung cấp khác nhau.