

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

TẠ VIỆT HOÀNG

THIẾT KẾ THUẬT TOÁN TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ
CHO THIẾT BỊ IOT SỬ DỤNG NGUỒN TÍCH HỢP

LUẬN VĂN THẠC SĨ
KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HOÁ

Đà Nẵng – Năm 2026

**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

TẠ VIỆT HOÀNG

**THIẾT KẾ THUẬT TOÁN TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ
CHO THIẾT BỊ IOT SỬ DỤNG NGUỒN TÍCH HỢP**

Chuyên ngành : Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 8.52.02.16

**LUẬN VĂN THẠC SĨ
KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HOÁ**

Người hướng dẫn khoa học: TS. NGÔ ĐÌNH THANH

Đà Nẵng – Năm 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả luận văn ký và ghi rõ họ tên



Tạ Việt Hoàng

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành chương trình Cao học và thực hiện luận văn tốt nghiệp với đề tài này, bên cạnh sự nỗ lực của bản thân, tôi đã nhận được rất nhiều sự quan tâm, động viên và giúp đỡ quý báu từ quý Thầy Cô, gia đình, bạn bè và đồng nghiệp.

Trước hết, tôi xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc và chân thành nhất tới Thầy **TS. Ngô Đình Thanh**. Thầy đã tận tình hướng dẫn, chỉ bảo và định hướng cho tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thiện luận văn. Những kiến thức, kinh nghiệm và sự động viên của Thầy là hành trang vô cùng quý giá, giúp tôi vượt qua những khó khăn, đặc biệt khi chuyên môn công tác của tôi không liên quan nhiều đến lĩnh vực nghiên cứu này.

Tôi cũng xin trân trọng gửi lời cảm ơn tới các Thầy, Cô là cán bộ, giảng viên trong bộ môn Tự động hóa - Khoa Điện đã truyền đạt cho tôi những kiến thức nền tảng quý báu trong suốt chương trình học.

Xin chân thành cảm ơn các anh chị, bạn bè học viên lớp Cao học lớp K44.TĐH đã luôn kề vai sát cánh, chia sẻ tài liệu và cùng nhau vượt qua những thử thách trong học tập và nghiên cứu.

Cuối cùng, tôi xin dành lời cảm ơn sâu sắc nhất đến gia đình, bạn bè và các đồng nghiệp. Mọi người đã luôn là hậu phương vững chắc, động viên về mặt tinh thần, tạo mọi điều kiện thuận lợi và cảm thông cho những thiếu sót của tôi trong suốt thời gian qua để tôi có thể tập trung hoàn thành tốt luận văn.

Mặc dù đã rất cố gắng, nhưng do hạn chế về kiến thức và kinh nghiệm, luận văn không thể tránh khỏi những thiếu sót. Tôi rất mong nhận được những ý kiến đóng góp quý báu từ quý Thầy Cô để đề tài được hoàn thiện hơn.

Xin chân thành cảm ơn!

Đà Nẵng, ngày 13 tháng 11 năm 2025



Tạ Việt Hoàng

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
TÓM TẮT LUẬN VĂN.....	v
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU	vi
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	viii
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	xi
DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH.....	xii
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG I: TỔNG QUAN ĐỀ TÀI.....	5
1.1. Tổng quan về WSN	5
1.2. Thách thức trong WSN.....	6
1.3. Kiến trúc của hệ thống.....	8
1.4. Nguyên nhân gây tiêu tốn năng lượng trong WSN	10
1.5. Các giải pháp và nghiên cứu liên quan	12
1.6. Tổng kết Chương I.....	14
CHƯƠNG II: CÁC THUẬT TOÁN TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ.....	15
2.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu về thuật toán TKNL	15
2.1.1. Thuật toán điều chỉnh điện áp và tần số động (DVFS)	15
2.1.2. Áp dụng chế độ ngủ sâu	16
2.1.3. Thuật toán Amount và Slope.....	17
2.1.4. Thuật toán nén và gộp dữ liệu	19
2.1.5. Kỹ thuật định tuyến.....	20
2.1.6. Thuật toán lập lịch.....	22
2.1.7. Thuật toán học tăng cường sâu (DRL).....	23
2.1.8. Thuật toán LOKA	24
2.2. So sánh, đề xuất thuật toán tối ưu	26
2.3. Tổng kết Chương II.....	31
CHƯƠNG III: THUẬT TOÁN LOKA PLUS	32
3.1. Giới thiệu về thuật toán	32
3.2. Thiết kế thuật toán	37
3.3. Tổng kết Chương III	43

CHƯƠNG IV: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ	44
4.1. Mục tiêu và phương pháp thực nghiệm	44
<i>4.1.1. Mục tiêu.....</i>	<i>44</i>
<i>4.1.2. Kịch bản và phương pháp đo</i>	<i>45</i>
4.2. Tính toán	46
<i>4.2.1. Kịch bản 1 - Hoạt động định kỳ trong điều kiện bình thường</i>	<i>47</i>
4.2.1.1. Không áp dụng LOKA Plus	47
4.2.1.2. Áp dụng LOKA Plus	47
<i>4.2.2. Kịch bản 2 - Hoạt động trong điều kiện vận hành có mưa lớn.....</i>	<i>48</i>
4.2.2.1. Gửi dữ liệu ngay khi có mưa	48
4.2.2.2. Áp dụng LOKA Plus	49
4.3. Kết quả đo đạc thực nghiệm	51
<i>4.3.1. Kết quả đo dòng tiêu thụ theo các kịch bản</i>	<i>51</i>
4.3.1.1. Kịch bản 1	51
4.3.1.2. Kịch bản 2	53
<i>4.3.2. Tính toán hiệu quả năng lượng trên số liệu đo đạc.....</i>	<i>54</i>
4.3.2.1. Kịch bản 1	54
4.3.2.2. Kịch bản 2	55
4.4. Phân tích và đánh giá.....	56
<i>4.4.1. Phân tích hiệu quả TKNL của thuật toán</i>	<i>56</i>
4.4.1.1. Kịch bản 1	56
4.4.1.2. Kịch bản 2	57
<i>4.4.2. Đánh giá độ ổn định và độ tin cậy của hệ thống.....</i>	<i>58</i>
4.4.2.1. Về độ trễ	58
4.4.2.2. Về mất gói tin và độ tin cậy của dữ liệu.....	58
4.5. Tổng kết Chương IV	59
KẾT LUẬN CHUNG.....	61
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	63

TÓM TẮT LUẬN VĂN

THIẾT KẾ THUẬT TOÁN TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ CHO THIẾT BỊ IOT SỬ DỤNG NGUỒN TÍCH HỢP

Học viên: Tạ Việt Hoàng - Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số: 8520216 - Khóa: 44.TĐH - Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQGHN

Tóm tắt – Các thiết bị IoT trạm quan trắc khí tượng thủy văn quy mô lớn được triển khai để thu thập dữ liệu, phục vụ công tác dự báo và ứng phó thiên tai đối mặt với thách thức về đảm bảo hoạt động ổn định, cung cấp dữ liệu liên tục trong điều kiện thời tiết thiên tai. Chính vì thế các thiết bị IoT này yêu cầu về tiêu thụ năng lượng thấp để duy trì hoạt động dài hạn trong mùa mưa bão. Việc duy trì hoạt động của các thiết bị sử dụng nguồn tích hợp trong điều kiện thiên tai đòi hỏi các giải pháp tối ưu hóa năng lượng hiệu quả. Luận văn đề xuất LOKA Plus, một thuật toán tối ưu năng lượng dựa trên các ưu điểm của LOKA và có những cải tiến: (1) Cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên, (2) Cơ chế lập lịch và gộp dữ liệu tối ưu và (3) giám sát điện áp nguồn.

Thuật toán được triển khai và kiểm chứng trên nguyên mẫu thiết bị IoT quan trắc lượng mưa với 02 kịch bản được xây dựng. Kết quả đo đạc thực nghiệm cho thấy, trong điều kiện hoạt động bình thường (không có mưa), LOKA Plus giúp giảm tới 66% năng lượng tiêu thụ, qua đó kéo dài tuổi thọ pin của thiết bị từ 12.34 ngày lên 36.18 ngày, gấp 2.93 lần so với phương pháp không tối ưu năng lượng. Trong điều kiện mùa mưa, LOKA Plus TKNL lên đến 79.21% so với thuật toán tham chiếu, giúp thời gian hoạt động thiết bị được duy trì ở mức 35.76 ngày, cao hơn gần gấp 4.8 lần, trong khi các chỉ số khác cũng được tối ưu gần như tương đương với khi thiết bị hoạt động trong điều kiện bình thường.

Những kết quả này khẳng định tính hiệu quả và khả thi của LOKA Plus trong việc giải quyết thách thức tiêu thụ năng lượng mà vẫn đảm bảo độ tin cậy về dữ liệu cho thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp khi xảy ra thiên tai.

Từ khóa - Mạng cảm biến không dây (WSN), Internet vạn vật (IoT), tối ưu hoá năng lượng, chu kỳ nhiệm vụ, thuật toán LOKA Plus.

DESIGN OF AN ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION ALGORITHM FOR IOT DEVICES USING INTEGRATED POWER SOURCES

Abstract - Large-scale hydrometeorological (Hydro-Met) IoT monitoring devices deployed to collect environmental data for forecasting and disaster-response operations face significant challenges in maintaining stable operation and continuous data availability under severe weather conditions. Therefore, these IoT devices must operate with ultra-low energy consumption to ensure long-term functionality during storm and flood seasons. Sustaining the operation of battery-powered devices during natural disasters requires effective and adaptive energy-optimization strategies. This thesis proposes LOKA Plus, an enhanced energy-optimization algorithm built upon the strengths of the original LOKA framework with three key improvements: (1) a priority event handling mechanism, (2) an adaptive scheduling mechanism and optimal data aggregation, and (3) dynamic power-source voltage monitoring.

The algorithm was implemented and validated on a prototype rainfall-monitoring IoT device across two defined test scenarios. Experimental measurements show that, under normal operating conditions (no rainfall), LOKA Plus reduces energy consumption by up to 66%, extending device lifetime from 12.34 days to 36.18 days, equivalent to a 2.93× improvement compared with non-optimized operation. During the rainy season scenario, LOKA Plus achieves up to 79.21% energy savings compared with the reference algorithm, enabling a device lifetime of 35.76 days, nearly 4.8× longer, while maintaining other performance indicators nearly identical to normal operation.

These results confirm the effectiveness and feasibility of LOKA Plus in addressing energy-consumption challenges while ensuring reliable data continuity for battery-powered IoT devices operating under extreme weather and disaster conditions.

Keywords - Wireless Sensor Network, Internet of Things, energy consumption optimization, Dual Duty Cycling, LOKA Plus algorithm.

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

E	Năng lượng tiêu thụ	J, Wh, mWh
E_{cycle}	Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ nhiệm vụ	J, mWh
E_{day}	Năng lượng tiêu thụ trong một ngày	J, mWh
$E_{\text{truyềnthông}}$	Năng lượng tiêu thụ cho truyền thông	J, mWh
E_{MCU}	Năng lượng tiêu thụ của vi điều khiển	J, mWh
$E_{\text{khác}}$	Năng lượng tiêu thụ của các thành phần khác	J, mWh
P	Công suất tiêu thụ	W, mW
V, U	Điện áp	V
I	Dòng điện	A, mA
L	Tuổi thọ của thiết bị	ngày
L_{LOKA}	Tuổi thọ thiết bị (kịch bản LOKA)	ngày
$L_{\text{LOKA+}}$	Tuổi thọ thiết bị (kịch bản LOKA Plus)	ngày
$L_{\text{NOLOKA+}}$	Tuổi thọ thiết bị (kịch bản không áp dụng LOKA Plus)	ngày
D	Chu kỳ nhiệm vụ kép (Dual Duty Cycling)	%
C_{bat}	Dung lượng pin	mAH
t	Thời gian	s (giây)
f	Tần số	Hz
t_{ACT}	Thời gian thiết bị ở trạng thái hoạt động	s (giây)
t_{SLP}	Thời gian thiết bị ở trạng thái tiết kiệm năng lượng	s (giây)
t_{idle}	Thời gian thiết bị ở trạng thái Idle	s (giây)
t_{cycle}	Tổng thời gian một chu kỳ	s (giây)
P_{ACT}	Công suất tiêu thụ ở trạng thái hoạt động	mW
P_{SLP}	Công suất tiêu thụ ở trạng thái tiết kiệm năng lượng	mW
P_{Idle}	Công suất tiêu thụ ở chế độ Idle	mW
P_{avg}	Công suất tiêu thụ trung bình	mW
I_{avg}	Dòng điện tiêu thụ trung bình	mA
I_{ACT}	Dòng điện tiêu thụ ở trạng thái hoạt động của thiết bị	mA
I_{ACTMCU}	Dòng điện tiêu thụ ở trạng thái hoạt động của vi điều khiển	mA
I_{SLP}	Dòng điện tiêu thụ ở trạng thái tiết kiệm năng lượng	mA
I_{idle}	Dòng điện ở trạng thái chờ (Idle)	mA

$I_{IC_{nguồn}}$	Dòng tiêu thụ của IC nguồn	mA
R	Tổng lượng mưa	mm
O	Cường độ mưa	mm/h
N	Số xung đếm được từ cảm biến TBR	xung
Vt	Hệ số chuyển đổi lượng mưa	mm/xung
T	Khoảng thời gian đo	h (giờ)

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

ACK	Acknowledgement	Xác nhận
ACT	Active	Trạng thái hoạt động
ADC	Analog-to-Digital Converter	Bộ chuyển đổi tương tự-số
ALDC	Adaptive Lossless Data Compression	Nén dữ liệu thích ứng không mất mát
BS	Base Station	Trạm gốc
BLE	Bluetooth Low Energy	Bluetooth năng lượng thấp
CH	Cluster Head	Nút trưởng cụm
CPU	Central Processing Unit	Đơn vị xử lý trung tâm
CSS	Chirp Spread Spectrum	Điều chế trải phổ dạng tần số quét
DQN	Deep Q-Network	Mạng Q-Learning sâu
DRL	Deep Reinforcement Learning	Học tăng cường sâu
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	Điều chế trải phổ chuỗi trực tiếp
DVFS	Dynamic Voltage and Frequency Scaling	Điều chỉnh điện áp và tần số động
EH	Energy Harvesting	Thu hoạch năng lượng
EXTI	External Interrupt	Ngắt ngoài
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum	Điều chế trải phổ nhảy tần
GPIO	General-Purpose Input/Output	Chân vào/ra đa dụng
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	Giao thức truyền tải siêu văn bản
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering	Giao thức phân cụm phân tán hiệu quả năng lượng
ICT	Information & Communication Technology	Công nghệ Thông tin và Truyền thông
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
IRQ	Interrupt Request	Yêu cầu ngắt
ISR	Interrupt Service Routine	Chương trình con phục vụ ngắt
I2C	Inter-Integrated Circuit	Giao thức giao tiếp I2C
KTTV	Khí tượng thủy văn	Khí tượng thủy văn
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy	Giao thức phân cụm thích ứng năng lượng thấp

LOKA	Low power Consumption Algorithm	Thuật toán tiêu thụ điện năng thấp
LOKA +	Low power Consumption Algorithm Plus	Phiên bản cải tiến của LOKA
LORA	Long Range	Công nghệ truyền thông không dây tầm xa
LOWBATT	Low Battery (Flag/Event/Callback)	Cờ/Sự kiện/Hàm xử lý ngắt khi pin yếu
LPM	Low Power Mode	Chế độ TKNL
LSA	Lazy Scheduling Algorithm	Thuật toán lập lịch lười
LSTM	Long Short-Term Memory	Bộ nhớ ngắn dài hạn
LTE	Long-Term Evolution	Chuẩn mạng 4G
MAC	Media Access Control	Điều khiển truy cập môi trường
MCU	Microcontroller Unit	Vi điều khiển
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems	Giao thức thu thập thông tin cảm biến hiệu quả
PPK2	Power Profiler Kit II	Bộ đo lường công suất
QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
RTC	Real-Time Clock	Đồng hồ thời gian thực
SDGs	Sustainable Development Goals	Các mục tiêu phát triển bền vững
SIM	Subscriber Identity Module	Mô-đun mạng di động
SLA	Service Level Agreement	Thỏa thuận mức độ dịch vụ
SLP	Sleep	Trạng thái tiết kiệm năng lượng
SMS	Short Message Service	Dịch vụ tin nhắn ngắn
SD	Secure Digital	Thẻ nhớ ngoài
TBR	Tipping Bucket Rain Gauge	Cảm biến đo mưa kiểu gầu lật
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol	Giao thức điều khiển truyền vận / Giao thức liên mạng
TKNL	Tiết kiệm năng lượng	Tiết kiệm năng lượng
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter	Giao tiếp nối tiếp không đồng bộ
WFI	Wait For Interrupt	Chế độ chờ sự kiện ngắt

Wi-Fi	Wireless Fidelity	Chuẩn kết nối mạng không dây
WSN	Wireless Sensor Network	Mạng cảm biến không dây
ZigBee	ZigBee Protocol	Chuẩn truyền thông không dây công suất thấp, phạm vi ngắn
3G/4G	3rd Generation / 4th Generation	Mạng di động thế hệ thứ 3 / thứ 4

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1.1: Các phương pháp tối ưu năng lượng của thiết bị IoT.....	13
Bảng 2.1: So sánh các thuật toán TKNL.....	28
Bảng 3.1: Bảng phân loại các sự kiện.....	33
Bảng 3.2: Mã giả của thuật toán LOKA Plus.....	42
Bảng 4.2: Các kịch bản đánh giá tối ưu năng lượng tiêu thụ.....	46
Bảng 4.3: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 1.....	48
Bảng 4.4: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 2.....	50
Bảng 4.5: So sánh các thông số dựa vào kết quả đo đạc thực tế - Kịch bản 1....	55
Bảng 4.6: So sánh các thông số dựa vào kết quả đo đạc thực tế - Kịch bản 2....	56
Bảng 4.7: Bảng thống kê thực nghiệm truyền dữ liệu.....	59

DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Các ứng dụng của WSN [3]	5
Hình 1.2: Mạng lưới các trạm quan trắc trên toàn quốc	7
Hình 1.3: Thiết bị IoT bố trí ngoài trời và các khu vực khó tiếp cận	7
Hình 1.4: Kiến trúc của trạm quan trắc KTTV.....	8
Hình 1.5: Hình ảnh thực tế của thiết bị đo mưa Vrain	10
Hình 1.6: Nút A gửi dữ liệu đến nút B và các nút lân cận đang nghe lén thông tin [1].	11
Hình 2.1: Cấu trúc TKNL dựa trên DVFS [10]	15
Hình 2.2: Chuyển đổi giữa các chế độ hoạt động của thiết bị [13].....	17
Hình 2.3. Thiết bị giám sát nhiệt độ áp dụng thuật toán Slope [14]	18
Hình 2.4: Kết quả mô phỏng thời gian hoạt động của thiết bị trong chu kỳ 60 ngày [14].....	18
Hình 2.5: Mô hình nén dữ liệu [15]	19
Hình 2.6: Các kỹ thuật nén dữ liệu [15].....	19
Hình 2.7: Kiến trúc giao thức LEACH [1].....	20
Hình 2.8: Kiến trúc giao thức HEED [1]	21
Hình 2.9: Kiến trúc giao thức PEGASIS [1].....	21
Hình 2.10: Thuật toán LSA [18].....	22
Hình 2.11: Mô hình DQN dựa trên LSTM [20].....	23
Hình 2.12: Cơ chế Dual Duty Cycling của thuật toán LOKA [21].....	24
Hình 2.13: Cơ chế Dual Duty Cycling của LOKA khi áp dụng vào thiết bị quan trắc KTTV	29
Hình 3.1: Cơ chế Dual Duty Cycling kết hợp với cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên, lập lịch và gộp dữ liệu của LOKA Plus.....	32
Hình 3.2: Lưu đồ phân loại sự kiện.....	33
Hình 3.3: Xử lý sự kiện từ cảm biến và RTC.....	34

Hình 3.4: Xử lý tin nhắn SMS từ users	35
Hình 3.5: Quy trình giám sát điện áp nguồn	36
Hình 3.7: Trường hợp xử lý tin nhắn SMS từ users.....	38
Hình 3.9: Trình tự giao tiếp trên HTTP [22]	40
Hình 4.1: PPK2 đo dòng tiêu thụ trên thiết bị IoT quan trắc lượng mưa	44
Hình 4.2: Sơ đồ kết nối PPK2 ở chế độ Ampe kế.....	45
Hình 4.3: Giao diện phần mềm Power Profiler.....	46
Hình 4.4: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 1	48
Hình 4.5: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 2	50
Hình 4.6: Dòng trung bình giai đoạn chờ – Trường hợp không áp dụng LOKA Plus	51
Hình 4.7: Dòng trung bình giai đoạn hoạt động – Trường hợp không áp dụng LOKA Plus	52
Hình 4.8: Dòng trung bình giai đoạn chờ - Trường hợp áp dụng LOKA Plus ...	52
Hình 4.9: Dòng trung bình giai đoạn hoạt động - Trường hợp áp dụng LOKA Plus	53
Hình 4.10: Dòng trung bình - Thuật toán LOKA trường hợp có mưa lớn.....	53
Hình 4.11: Dòng trung bình - Thuật toán LOKA Plus trường hợp có mưa lớn..	54
Hình 4.12: So sánh số liệu thực tế - Kịch bản 1.....	57
Hình 4.13: So sánh số liệu thực tế - Kịch bản 2.....	58

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong kỷ nguyên của Cách mạng công nghiệp lần thứ tư, IoT và WSN đã phát triển vượt bậc và trở thành công nghệ cốt lõi, ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như giám sát môi trường, y tế, quản lý an ninh, nông nghiệp, đô thị thông minh..... Trong lĩnh vực quan trắc KTTV, WSN đóng vai trò then chốt trong việc thu thập dữ liệu thời gian thực, hỗ trợ dự báo và cảnh báo sớm thiên tai, góp phần vào các mục tiêu phát triển bền vững.

Tuy nhiên, việc triển khai các trạm quan trắc KTTV trên quy mô lớn, đặc biệt tại các khu vực vùng sâu, vùng xa, nơi tập trung hàng nghìn trạm quan trắc đang phải đối mặt với những thách thức nghiêm trọng. Trong số đó, bài toán năng lượng được xác định là rào cản lớn nhất đối với tính bền vững và khả năng vận hành của hệ thống [1]. Hầu hết các thiết bị IoT trong mạng lưới này được đặt tại những địa điểm khó tiếp cận, khiến cho công tác bảo trì, thay thế pin khi xảy ra sự cố trở nên cực kỳ tốn kém và nhiều khi bất khả thi.

Thách thức này càng trở nên cấp thiết trong bối cảnh biến đổi khí hậu và thiên tai diễn biến phức tạp tại Việt Nam. Sự cố mất điện diện rộng và kéo dài, như minh chứng từ cơn bão Yagi (tháng 9/2024) đã gây tê liệt hệ thống điện tại nhiều tỉnh thành, đặt ra yêu cầu sống còn về khả năng tự vận hành của các trạm quan trắc bằng nguồn pin dự phòng. Kịch bản thách thức lớn nhất cũng chính là tại thời điểm này, nếu không có một cơ chế quản lý năng lượng hiệu quả, thiết bị sẽ nhanh chóng cạn kiệt năng lượng dẫn đến mất dữ liệu và ngừng hoạt động vào đúng thời điểm vai trò cảnh báo của nó là quan trọng nhất, gây ra những hậu quả khôn lường về con người, kinh tế và xã hội. Hơn nữa, việc tối ưu hóa năng lượng còn mang ý nghĩa môi trường sâu sắc. Một giải pháp giúp kéo dài tuổi thọ pin cho thiết bị sẽ trực tiếp giảm nhu cầu năng lượng, giảm tần suất thay thế linh kiện, từ đó góp phần giảm thiểu rác thải điện tử và bảo vệ môi trường.

Trên thế giới, bài toán tối ưu năng lượng cho WSN đã được nghiên cứu rộng rãi thông qua các hướng tiếp cận đa dạng [2]. Thứ nhất là tối ưu về phân cứng thông qua việc sử dụng các linh kiện điện tử tiêu thụ ít điện năng và hỗ trợ các chế độ TKNL. Thứ hai là các giải pháp ở cấp độ mạng và giao thức, bao gồm việc thiết kế các giao thức định tuyến hiệu quả năng lượng (energy-efficient routing), kỹ thuật phân cụm (clustering) để cân bằng tải năng lượng giữa các nút mạng, và các cơ chế quản lý tô-pô mạng (topology control). Ngoài ra, các xu hướng mới như sử dụng bộ thu thập dữ liệu di động cũng đang được nghiên cứu để giảm tải truyền dẫn đa chặng. Tuy nhiên, việc sử dụng mạng LTE đối với các hệ thống đòi hỏi truyền tải dữ liệu với khoảng cách xa sẽ tiêu tốn rất nhiều năng lượng của thiết bị, các giải pháp phân cứng hay giao thức truyền thống là chưa đủ. Khi đó, việc nghiên cứu, ứng dụng các thuật toán tối ưu năng lượng cho các trạm quan trắc sử dụng mạng LTE chính là chìa khóa then chốt để kéo dài tuổi thọ hệ thống mà vẫn đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu.

Xuất phát từ những yêu cầu cấp thiết đó, đề tài “**Thiết kế thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp**” được thực hiện nhằm nghiên cứu và đề xuất một giải pháp thuật toán hiệu quả. Mục tiêu của luận văn là giải quyết

triệt để bài toán năng lượng, qua đó kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị, đảm bảo thiết bị hoạt động ổn định, đáp ứng độ tin cậy ngay cả trong những điều kiện khắc nghiệt nhất, đồng thời góp phần giảm thiểu chi phí và hướng tới sự phát triển bền vững.

2. Mục đích, mục tiêu nghiên cứu

2.1. Mục đích: Mục đích của nghiên cứu là phát triển và tối ưu hóa thuật toán để giảm tiêu thụ năng lượng cho các thiết bị IoT trong mạng WSN, cụ thể là hệ thống quan trắc KTTV tự động, nhằm kéo dài tuổi thọ của thiết bị mà vẫn đáp ứng được yêu cầu về dữ liệu.

2.2. Mục tiêu:

- Tổng quan và phân tích sâu các thách thức về năng lượng trong mạng WSN, đặc biệt là trong hệ thống quan trắc KTTV quy mô lớn và được đặt tại các khu vực vùng sâu vùng xa. Nghiên cứu, so sánh và đánh giá các thuật toán tối ưu năng lượng hiện có để xác định các ưu điểm, hạn chế và khoảng trống nghiên cứu, từ đó làm cơ sở cho việc đề xuất giải pháp mới.

- Thiết kế chi tiết và triển khai thuật toán trên nguyên mẫu phần cứng thực tế của một thiết bị IoT trong hệ thống quan trắc KTTV nhằm giải quyết các hạn chế trong các nghiên cứu trước đây.

- Thực hiện đo đạc, phân tích và đánh giá hiệu quả TKNL của thuật toán thông qua so sánh thực nghiệm với nguyên mẫu không có thuật toán nào được áp dụng và nguyên mẫu khi áp dụng thuật toán tham chiếu. Định lượng mức độ cải thiện về công suất tiêu thụ trung bình và ước tính tuổi thọ pin của thiết bị để chứng minh tính hiệu quả của thuật toán đề xuất.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu của đề tài:

Thuật toán tối ưu hóa năng lượng cho các thiết bị IoT trong ứng dụng quan trắc KTTV.

3.2. Phạm vi nghiên cứu của đề tài:

- Nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa năng lượng ở lớp Things (lớp thiết bị IoT). Toàn bộ logic và cơ chế TKNL được thiết kế và triển khai bên trong firmware của thiết bị.

- Quá trình đánh giá hiệu quả được giới hạn trong việc đo lường và phân tích mức tiêu thụ năng lượng của nguyên mẫu phần cứng. Các chỉ số chính được sử dụng để đánh giá là dòng điện tiêu thụ trung bình, công suất tiêu thụ trung bình, năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ, trong ngày và thời gian hoạt động của thiết bị.

- Luận văn còn đánh giá các yếu tố ở cấp độ mạng như độ trễ, tỷ lệ mất gói tin, lỗi kết nối mạng.

- Luận văn chỉ thực hiện so sánh trực tiếp với thuật toán tham chiếu (LOKA) mà không thực hiện so sánh thực nghiệm với các thuật toán khác được đề cập trong các tài liệu tham khảo. Lý do chính là sự khác biệt về nền tảng phần cứng, công nghệ truyền thông được sử dụng, và việc các nghiên cứu đó thường không cung cấp đủ thông tin chi tiết để có thể tái tạo một cách chính xác cho mục đích so sánh.

4. Phương pháp nghiên cứu

- Nghiên cứu lý thuyết dựa trên các tài liệu khoa học, bài báo, sách, báo cáo liên quan đến: Năng lượng tiêu thụ của các thiết bị IoT, thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ, thiết bị IoT dùng nguồn tích hợp,... thông qua các công trình nghiên cứu liên quan từ Google Scholar, IEEE Explore,...

- Phân tích mô hình tiêu thụ năng lượng của các thiết bị IoT, xác định các yếu tố ảnh hưởng đến năng lượng tiêu thụ, lựa chọn mô hình phù hợp để phân tích, đánh giá hiệu quả của thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ.

- Thiết kế và áp dụng thuật toán vào hệ thống.

- Tiến hành thí nghiệm trên nguyên mẫu phần cứng để thu thập dữ liệu và đánh giá hiệu quả của thuật toán. Dữ liệu thu thập từ nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng để tiến hành phân tích so sánh định lượng giữa hệ thống khi áp dụng thuật toán và khi không áp dụng.

- Kết quả đo đạc thực tế cũng được đối chiếu với các kết quả tính toán dựa trên lý thuyết để đánh giá sự khác biệt và rút ra những kết luận sâu sắc hơn về hiệu quả của thuật toán trong điều kiện vận hành thực tế.

5. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn của đề tài

- **Về khoa học:** Đề tài mang đến một thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho các thiết bị trong mạng WSN. Xây dựng mô hình phân tích định lượng chi tiết mối quan hệ giữa chu kỳ nhiệm vụ, dòng tiêu thụ trung bình và tuổi thọ thiết bị, cung cấp cơ sở lý thuyết để các nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển trong tương lai.

- **Về thực tiễn:** Thuật toán giúp giảm thiểu đáng kể mức tiêu thụ năng lượng và giúp kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị, mang lại nhiều giá trị thực tiễn cộng đồng và xã hội. Giải pháp có tính linh hoạt cao và có khả năng ứng dụng vào thực tiễn để giải quyết các bài toán về năng lượng, góp phần nâng cao độ tin cậy và tính liên tục của dữ liệu để phục vụ công tác dự báo, ứng phó thiên tai và các ứng dụng WSN quy mô lớn khác, trực tiếp làm giảm thiệt hại về kinh tế, xã hội. Ngoài ra, việc thiết bị tiêu thụ ít điện năng cũng góp phần bảo vệ môi trường, giảm rác thải điện tử và tiêu thụ năng lượng hoá thạch, giảm lượng điện năng tiêu thụ, góp phần bảo vệ an ninh năng lượng quốc gia. Cuối cùng, thuật toán LOKA Plus có khả năng mở rộng ứng dụng cho nhiều hệ thống IoT khác hoạt động bằng pin, góp phần giảm thiểu chi phí vận hành, bảo trì, thay thế hệ thống, đặc biệt tại các khu vực khó tiếp cận.

6. Cấu trúc đề tài:

Ngoài phần mở đầu, phần kết luận, tài liệu tham khảo và phụ lục, luận văn gồm 4 chương

Chương I: Tổng quan đề tài

Trình bày cái nhìn tổng thể về WSN, nêu bật vai trò và các ứng dụng đa dạng của WSN. Chương đi sâu phân tích các thách thức mà WSN phải đối mặt, trong đó nhấn mạnh bài toán năng lượng là rào cản lớn nhất, đặc biệt trong bối cảnh triển khai tại các khu vực khó khăn và chịu ảnh hưởng của thiên tai. Chương thiết lập bối cảnh nghiên cứu là hệ thống quan trắc KTTV, làm rõ kiến trúc hệ thống cùng các thành phần phần cứng liên quan. Các nguyên nhân gây tiêu hao năng lượng được phân tích, cùng với việc

điêm qua các hướng giải quyết đã có, từ đó khẳng định việc tập trung vào tối ưu hóa bằng thuật toán là hướng tiếp cận chiến lược và hiệu quả nhất.

Chương II: Các thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ

Chương tổng quan, phân tích sâu và so sánh một cách có hệ thống các công trình nghiên cứu về các thuật toán TKNL. Dựa trên đánh giá về ưu, nhược điểm của từng thuật toán, từ đó xác định khoảng trống nghiên cứu và đề xuất thuật toán LOKA Plus được phát triển dựa trên nền tảng chu kỳ nhiệm vụ kép (Dual Duty Cycling) và thuật toán lập lịch lai của LOKA đồng thời có những cải tiến phù hợp để giải quyết các thách thức đã đặt ra.

Chương III: Thuật toán LOKA Plus

Chương này tập trung hoàn toàn vào việc thiết kế chi tiết thuật toán LOKA Plus đã được đề xuất. Các nguyên lý hoạt động cốt lõi được trình bày cặn kẽ, bao gồm cơ chế chu kỳ nhiệm vụ kép, thuật toán lập lịch lai và gộp dữ liệu tối ưu, cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên để cân bằng giữa hiệu quả năng lượng và độ tin cậy của dữ liệu, tính năng giám sát điện áp nguồn và cuối cùng là triển khai có hiệu quả, khoa học trên phần cứng gồm MCU và module truyền thông hỗ trợ các

Chương IV: Kết quả thực nghiệm và đánh giá

Chương cuối cùng của phần nội dung chính trình bày quá trình triển khai và kiểm chứng thực nghiệm thuật toán, cung cấp các kết quả tính toán trên lý thuyết và số liệu đo đạc thực tế từ thiết bị chuyên dụng. Dựa trên các dữ liệu này, chương tiến hành phân tích, so sánh và đánh giá một cách định lượng hiệu quả TKNL mà thuật toán LOKA Plus mang lại, qua đó chứng minh giá trị của đề tài.

CHƯƠNG I: TỔNG QUAN ĐỀ TÀI

1.1. Tổng quan về WSN

Trong hai thập kỷ qua, WSN đã phát triển nhanh chóng và trở thành một công nghệ then chốt trong nhiều lĩnh vực ứng dụng thực tiễn. WSN hiện diện ở khắp mọi nơi trong mọi khía cạnh của cuộc sống hàng ngày của con người từ giám sát môi trường, chăm sóc sức khỏe, giải trí, quản lý an ninh, nông nghiệp, đô thị thông minh, ứng dụng quân sự... (Hình 1.1) [3].



Hình 1.1: Các ứng dụng của WSN [3]

Với đặc điểm nổi bật như triển khai nhanh, chi phí thấp, khả năng tự tổ chức và tính chịu lỗi cao, WSN đặc biệt thích hợp cho những khu vực thiếu hạ tầng viễn thông hoặc khó tiếp cận, chẳng hạn như vùng sâu, vùng xa, miền núi, hải đảo, hay những nơi thường xuyên chịu ảnh hưởng nặng nề bởi thiên tai.

Trong lĩnh vực giám sát môi trường và quan trắc KTTV, WSN đóng vai trò quan trọng trong việc thu thập dữ liệu theo thời gian thực về nhiều thông số vật lý: tốc độ và hướng gió, nhiệt độ, độ ẩm, áp suất khí quyển, lượng mưa, mực nước sông hồ, cũng như các chỉ số môi trường khác. Dữ liệu từ các thiết bị IoT được truyền về trạm gốc để phân tích, từ đó hỗ trợ dự báo, phát hiện bất thường và cung cấp cảnh báo sớm. Khả năng hoạt động liên tục trong điều kiện khắc nghiệt giúp WSN trở thành một công cụ tin cậy cho việc giám sát các hiện tượng tự nhiên và biến đổi khí hậu.

Ở góc độ khoa học và xã hội, WSN không chỉ mở ra cơ hội phát triển các mô hình phân tích dữ liệu lớn (big data), góp phần nâng cao độ chính xác trong dự báo thiên tai mà còn giúp tăng cường khả năng chống chịu của cộng đồng, giảm thiểu thiệt hại về người và tài sản. Hơn nữa, việc ứng dụng WSN còn đóng góp trực tiếp vào các mục tiêu phát triển bền vững (SDGs), nhất là trong quản lý tài nguyên nước và ứng phó biến đổi khí hậu.

Đối với một quốc gia chịu ảnh hưởng nặng nề của biến đổi khí hậu như Việt Nam, việc ứng dụng WSN mang ý nghĩa chiến lược. Các hệ thống quan trắc tự động dựa trên WSN đang được triển khai rộng rãi để giám sát mực nước tại các lưu vực sông, hồ chứa,

phục vụ công tác dự báo mưa lũ. Nhờ khả năng hoạt động độc lập và truyền dữ liệu qua các mạng tầm xa (LoRa, 3G/4G LTE), các trạm quan trắc đảm bảo thông tin được duy trì liên tục ngay cả trong điều kiện khắc nghiệt nhất. Bên cạnh đó, việc tích hợp WSN vào hạ tầng thành phố thông minh cũng đang mở ra hướng tiếp cận mới trong quản lý đô thị, từ việc xây dựng bản đồ ngập lụt thời gian thực đến tối ưu hóa hệ thống cảnh báo sớm cho người dân.

Như vậy, có thể khẳng định WSN không chỉ là một giải pháp kỹ thuật tiên tiến mang tính toàn cầu, mà còn là một công cụ thiết thực, không thể thay thế, phục vụ nhu cầu cấp bách về giám sát môi trường và KTTV tại Việt Nam, góp phần hiện thực hóa Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu và phát triển bền vững.

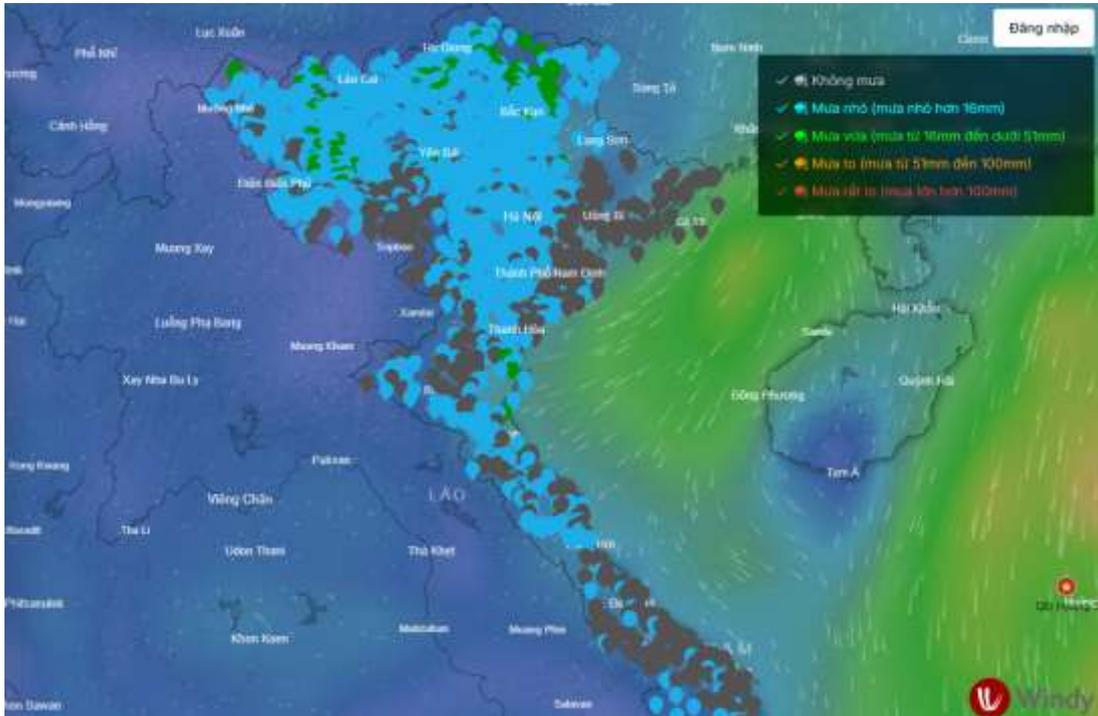
1.2. Thách thức trong WSN

Mặc dù sở hữu nhiều ưu điểm nổi bật, WSN cũng phải đối diện với nhiều thách thức kỹ thuật và vận hành, ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất cũng như khả năng ứng dụng thực tiễn của hệ thống. Một trong những vấn đề then chốt là khả năng mở rộng quy mô mạng. Khi số lượng thiết bị tăng từ hàng trăm lên đến hàng nghìn, việc duy trì tính ổn định của truyền thông, đồng bộ dữ liệu, cũng như phân bổ tài nguyên trở thành một nhiệm vụ phức tạp. Các nghiên cứu, điển hình như của Bedi [4] và cộng sự, chỉ ra rằng mật độ thiết bị cao dễ dẫn đến tình trạng tắc nghẽn kênh truyền, nhiễu tín hiệu, và suy giảm hiệu năng mạng.

Bên cạnh đó, việc thiếu một kiến trúc chuẩn cho WSN cũng là một rào cản quan trọng. Một kiến trúc mạng lý tưởng cần đảm bảo tính bền vững, có khả năng mở rộng và tính linh hoạt để đáp ứng nhiều kịch bản ứng dụng khác nhau. Hơn nữa, kiến trúc phải tách biệt giữa tốc độ xử lý dữ liệu và tốc độ truyền thông vô tuyến nhằm tránh tình trạng tiêu thụ năng lượng kém hiệu quả, vốn là nguyên nhân phổ biến dẫn đến suy giảm tuổi thọ pin trong thiết bị. Ngoài ra, WSN cũng phải đối mặt với thách thức về sự không ổn định trong truyền thông. Điều kiện môi trường phức tạp như địa hình núi cao, rừng rậm hoặc khu vực công nghiệp dễ làm tăng tỷ lệ mất gói tin, trễ tín hiệu, và giảm chất lượng dịch vụ truyền thông [5].

Trong số các thách thức nêu trên, bài toán năng lượng được xem là rào cản lớn nhất đối với tính bền vững và khả năng triển khai quy mô lớn của WSN [1]. Đặc biệt, nhiều ứng dụng khí tượng thủy văn trong đó có quan trắc môi trường, hoặc giám sát an toàn đập thủy điện đòi hỏi triển khai hàng nghìn trạm với hàng triệu thiết bị IoT, phần nhiều trong số đó được đặt tại các khu vực hẻo lánh, khó tiếp cận như vùng núi, vùng sâu vùng xa, những nơi có điều kiện địa hình và giao thông đi lại gặp nhiều khó khăn (Hình 1.2, 1.3). Việc thay thế, kiểm tra định kỳ hay bảo trì nguồn năng lượng cho thiết bị tại các khu vực này là gần như bất khả thi, cả về thời gian lẫn chi phí. Hơn nữa, các thiết bị IoT được đặt ngoài trời cũng phải chịu tác động khắc nghiệt của điều kiện khí hậu, bao gồm nhiệt độ cao, độ ẩm lớn, bão, lũ quét, hay sạt lở đất – những yếu tố có thể phá hủy hạ tầng cấp điện và làm gián đoạn hoạt động của mạng. Minh chứng thực tế là cơn bão Yagi (tháng 9/2024) đã gây tổn thất nghiêm trọng cho hệ thống lưới điện tại 15 tỉnh, thành phố phía Bắc Việt Nam, trong đó riêng Quảng Ninh ghi nhận hơn 95% khách hàng mất điện, hệ thống điện 110 kV gần như tê liệt hoàn toàn. Những sự cố mất điện kéo dài như vậy không chỉ ảnh hưởng đến sản xuất và đời sống xã hội, mà còn làm gián đoạn hoạt động của WSN trong các khu vực trọng yếu. Tình trạng mất điện kéo dài lên

đến hằng tháng có thể gây mất dữ liệu, gián đoạn hoạt động của hệ thống với những hậu quả không mong muốn có thể xảy ra đối với WSN.



Hình 1.2: Mạng lưới các trạm quan trắc trên toàn quốc



Hình 1.3: Thiết bị IoT bố trí ngoài trời và các khu vực khó tiếp cận

Thách thức về năng lượng của WSN cũng cần được nhìn nhận trong mối liên hệ với các vấn đề môi trường toàn cầu. Việc tiêu thụ năng lượng không tối ưu của các hệ thống ICT và mạng WSN tạo ra áp lực lên lưới điện quốc gia. Theo báo cáo giai đoạn quý II – III năm 2023, trên cả nước xảy ra tình trạng thiếu điện trầm trọng, nghiêm trọng nhất là các tỉnh thành phía Bắc, ước tính đạt từ 1.600 MW đến 4.900 MW. Việc các thiết bị IoT hoạt động kém hiệu quả về năng lượng sẽ trực tiếp làm tăng nhu cầu tiêu thụ điện, phần lớn trong số đó vẫn được sản xuất từ quá trình đốt nhiên liệu hóa thạch. Quá trình này giải phóng một lượng lớn khí nhà kính, góp phần làm trầm trọng thêm tình trạng

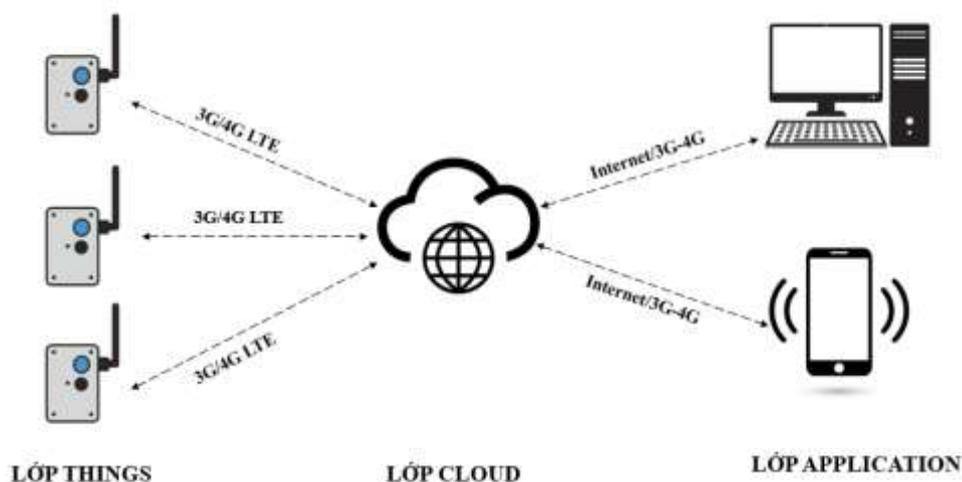
biến đổi khí hậu và ô nhiễm không khí. Theo nghiên cứu của Haider Ali [6] chỉ ra rằng khoảng 4,7% lượng điện năng toàn cầu được tiêu thụ bởi hệ thống ICT và góp phần tạo ra khoảng 2% tổng lượng khí thải carbon vào bầu khí quyển. Con số này dự kiến sẽ tiếp tục tăng nhanh cùng với sự bùng nổ của hàng tỷ thiết bị IoT trong tương lai. Do đó, việc tối ưu hóa năng lượng cho từng thiết bị không chỉ là một bài toán kinh tế hay kỹ thuật, mà còn là một trách nhiệm cấp bách trong việc bảo vệ môi trường.

Những thách thức nêu trên đặt ra yêu cầu cấp thiết về *các giải pháp kỹ thuật hiệu quả nhằm tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT trong WSN*. Từ góc độ ứng dụng, các giải pháp tối ưu năng lượng cho WSN mang lại nhiều lợi ích: kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị IoT, bảo đảm tính liên tục của dữ liệu, giảm thiểu chi phí bảo trì và thay thế, đồng thời góp phần hạn chế rác thải điện tử gây ô nhiễm đất và nguồn nước. Việc tối ưu năng lượng giúp đảm bảo tính liên tục của các ứng dụng quan trọng WSN trong những bối cảnh khó khăn như thiên tai gây mất điện trên diện rộng và trong thời gian dài, từ đó giảm thiểu các thiệt hại về kinh tế - xã hội. Hơn nữa, việc TKNL trong các hệ thống này giúp làm giảm phát thải khí carbon, giảm nhu cầu khai thác năng lượng hóa thạch, góp phần bảo vệ môi trường, hướng tới phát triển bền vững trong tương lai. Các thiết bị IoT được thiết kế với khả năng hoạt động bền bỉ và sử dụng năng lượng hiệu quả sẽ làm giảm chi phí sản xuất, bảo trì, thay thế pin và các linh kiện điện tử, góp phần giảm rác thải điện tử thải ra môi trường, giúp bảo vệ môi trường, nguồn đất và nguồn nước ngầm khỏi nguy cơ ô nhiễm bởi kim loại nặng.

1.3. Kiến trúc của hệ thống

Trong phạm vi của luận văn, hệ thống quan trắc KTTV lên đến hàng nghìn thiết bị được triển khai rộng khắp trên cả nước (trong đó có nhiều thiết bị được đặt tại các khu vực địa lý xa xôi, khó tiếp cận) là đối tượng nghiên cứu điển hình cho các thách thức về năng lượng trong mạng WSN quy mô lớn gặp phải.

Kiến trúc của hệ thống quan trắc KTTV được tổ chức gồm 3 lớp: Lớp Things, Lớp Cloud và Lớp Application (Hình 1.4).



Hình 1.4: Kiến trúc của trạm quan trắc KTTV.

Mỗi lớp đóng vai trò quan trọng trong việc thu thập, truyền tải, xử lý và sử dụng dữ liệu nhằm hỗ trợ, phục vụ hệ thống giám sát và phân tích thông tin theo thời gian

thực. Mô hình này đảm bảo hiệu quả trong việc thu thập dữ liệu lượng mưa và cung cấp những thông tin quan trọng phục vụ nhiều mục đích khác nhau.

- Lớp Things (Lớp thiết bị IoT): đóng vai trò là tuyến đầu của hệ thống, bao gồm một mạng lưới các thiết bị IoT được triển khai tại các vị trí quan trắc để thu nhận dữ liệu lượng mưa thông qua cảm biến. Sau khi ghi nhận lượng mưa, mỗi thiết bị sẽ thực hiện các bước xử lý dữ liệu ban đầu, định dạng gói tin và gửi dữ liệu đã thu thập về Lớp Cloud để lưu trữ và xử lý. Một yêu cầu quan trọng đối với lớp thiết bị IoT là phải tiêu thụ năng lượng ở mức tối thiểu, cho phép các thiết bị vận hành liên tục trong thời gian từ 30-45 ngày bằng nguồn pin dự phòng khi xảy ra thiên tai.

- Lớp Cloud (Lớp đám mây): được triển khai trên nền tảng điện toán đám mây (Cloud Computing) hoặc máy chủ (Server), tiếp nhận và thực hiện các tác vụ phức tạp như lưu trữ dữ liệu quy mô lớn (Big Data), xử lý và phân tích dữ liệu được truyền từ các thiết bị IoT. Hệ thống này giúp lưu trữ dữ liệu an toàn, đảm bảo khả năng truy cập từ xa một cách linh hoạt và hiệu quả. Hệ thống cloud cũng có khả năng tích hợp và phân loại dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau để đảm bảo độ chính xác và tính đồng bộ giữa các luồng thông tin.

- Lớp Application (Lớp ứng dụng): Là lớp giao diện trực tiếp với người dùng cuối, nơi các thông tin đã được xử lý và tinh lọc từ lớp Cloud được hiển thị một cách trực quan thông qua bảng điều khiển, ứng dụng di động, hoặc các hệ thống báo cáo. Các tính năng chính bao gồm giao diện giám sát theo thời gian thực qua biểu đồ, bản tin và hệ thống cảnh báo tự động khi một chỉ số lượng mưa vượt ngưỡng an toàn có nguy cơ lũ lụt. Thông tin từ lớp ứng dụng là đầu vào quan trọng, hỗ trợ cho việc ra quyết định trong công tác phòng chống thiên tai hay điều tiết vận hành hồ thủy điện.

Trọng tâm của nghiên cứu về các giải pháp TKNL nằm ở Lớp Things, cụ thể là các giải pháp tối ưu hóa năng lượng cho các thiết bị quan trắc KTTV sử dụng nguồn tích hợp. Trong điều kiện bình thường, khi không xảy ra sự cố, thiết bị sử dụng nguồn điện trực tiếp từ điện lưới. Khi mất điện, thiết bị chuyển qua sử dụng nguồn pin dự phòng để duy trì hoạt động nhằm đảm bảo tính liên tục của dữ liệu. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu về kỹ thuật và tính ứng dụng thực tế, nguồn pin dự phòng thường được thiết kế nhỏ gọn và bị giới hạn nhằm giảm kích thước và chi phí tổng thể của hệ thống. Vì vậy, các giải pháp cần phải đáp ứng được yêu cầu về việc giảm thiểu điện năng tiêu thụ của thiết bị, giúp thiết bị có thể hoạt động trong điều kiện mất điện kéo dài lên đến 30-45 ngày.

Hình 1.5 là hình ảnh thực tế của thiết bị đo mưa tự động vrain, một sản phẩm thương mại của công ty WATEC. Thiết bị này là một khối thống nhất hoàn chỉnh được tích hợp bên trong vỏ hộp chuyên dụng, đảm bảo khả năng hoạt động ổn định ngoài môi trường thực tế.



Hình 1.5: Hình ảnh thực tế của thiết bị đo mưa Vrain

Đối với thiết bị quan trắc KTTV, ba thành phần chính ảnh hưởng đến điện năng tiêu thụ của thiết bị là năng lượng trong quá trình xử lý, truyền thông và thành phần khác. Mỗi thành phần đều có mức tiêu thụ riêng, mức tiêu thụ năng lượng của MCU (E_{MCU}) đến từ quá trình tính toán và xử lý của bộ vi điều khiển. Năng lượng truyền nhận dữ liệu bằng module truyền thông ($E_{TX/RX}$) phụ thuộc vào môi trường truyền, thuật toán định tuyến, lựa chọn đường dẫn, tốc độ truyền dữ liệu và kích thước gói dữ liệu cần truyền. Ngoài ra, hoạt động quản trị hệ thống cũng như tổn hao từ các linh kiện điện tử thụ động của board mạch cũng chiếm một phần năng lượng nhỏ ($E_{khác}$). Dựa vào các nghiên cứu, năng lượng trong quá trình truyền nhận dữ liệu bằng module truyền thông ảnh hưởng lớn nhất đến tổng năng lượng tiêu thụ của thiết bị (chiếm khoảng 80%), tiếp theo là năng lượng trong quá trình tính toán, xử lý của vi điều khiển. Trong khi mức sử dụng năng lượng của các thành phần khác trong hệ thống là không đáng kể.

Tổng lượng điện năng tiêu thụ của các thành phần trong hệ thống được thể hiện công thức: $E_{thiết\ bi} = E_{MCU} + E_{TX} + E_{RX} + E_{khác}$ (1)

$$= \int_0^T [P_{MCU}(t) + P_{TX}(t) + P_{RX}(t) + P_{khác}(t)] dt.$$

1.4. Nguyên nhân gây tiêu tốn năng lượng trong WSN

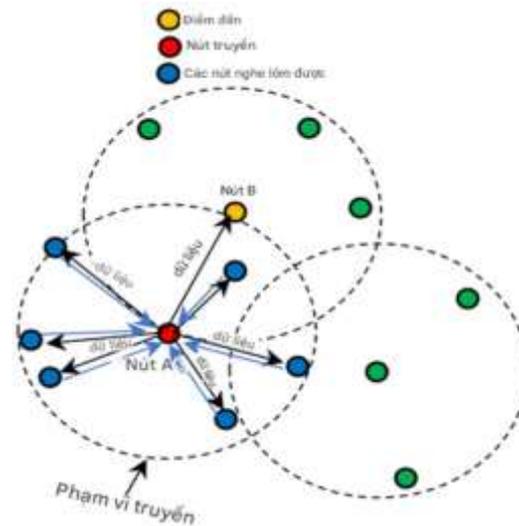
Để đề xuất một giải pháp hiệu quả, việc xác định các nguyên nhân cốt lõi gây hao phí năng lượng là một bước tiên quyết. Trong WSN, năng lượng bị tổn thất qua nhiều hoạt động khác nhau, nhưng có thể được phân loại thành ba nhóm chính: tổn thất năng lượng trong quá trình truyền thông, dòng tiêu thụ trong quá trình xử lý của thiết bị và hao tổn từ logic vận hành của giao thức mạng.

Thứ nhất, về việc tổn thất năng lượng do quá trình truyền thông không hiệu quả của module truyền thông, đây là thành phần tiêu thụ năng lượng nhiều nhất trong hầu hết các thiết bị IoT, không chỉ khi thực hiện truyền và nhận dữ liệu mà còn trong các trạng thái hoạt động trung gian khác. Nghiên cứu [1] chỉ ra rằng, năng lượng bị lãng phí đáng kể trong các trạng thái vận hành không tối ưu như nghe nhàn rỗi (idle listening), va chạm (collisions), phát quá mức (over-emitting) và nghe lén (overhearing).

- Nghe nhầm rồi được xem là nguồn tiêu hao năng lượng lớn và nghiêm trọng nhất của quá trình truyền thông trong WSN. Trạng thái này xảy ra khi bộ thu phát vô tuyến của thiết bị vẫn được bật liên tục để lắng nghe kênh truyền, ngay cả khi không có gói tin nào được gửi đến. Do năng lượng tiêu thụ trong chế độ chờ này gần tương đương với khi thu dữ liệu thực, việc duy trì trạng thái nghe nhầm rồi trong thời gian dài dẫn đến tổn thất đáng kể, đặc biệt trong các mạng có mật độ thiết bị cao hoặc tần suất truyền thông thấp.

- Va chạm là nguyên nhân phổ biến khác gây lãng phí năng lượng, xảy ra khi hai hoặc nhiều thiết bị truyền đồng thời trên cùng một kênh, các gói tin bị chồng lấn dẫn đến hỏng gói tin. Kết quả là tất cả các thiết bị liên quan đều phải truyền lại gói tin đó, gây lãng phí năng lượng cho cả lần truyền hỏng và lần truyền lại;

- Phát quá mức là tình huống xảy ra khi một thiết bị gửi dữ liệu đến một thiết bị đích đang ở trạng thái không sẵn sàng, chẳng hạn như đang ngủ sâu hoặc đang bận xử lý tác vụ khác. Trong trường hợp này, toàn bộ năng lượng dành cho lần phát sóng đó bị lãng phí vì gói tin không được tiếp nhận, đồng thời có thể làm tăng nguy cơ va chạm với các gói tin khác.



Hình 1.6: Nút A gửi dữ liệu đến nút B và các nút lân cận đang nghe lén thông tin [1].

- Nghe lén (Hình 1.6) xảy ra khi thiết bị nhận và xử lý cả những gói tin không dành cho mình. Dù gói tin sẽ bị hủy bỏ sau đó, thiết bị vẫn phải tiêu tốn năng lượng để nhận và phân tích gói tin này một cách vô ích; Trong các mạng có số lượng lớn thiết bị hoạt động trong cùng một vùng phủ sóng, hiện tượng nghe lén có thể làm tăng đáng kể tổng năng lượng tiêu thụ của hệ thống.

Bên cạnh quá trình truyền thông, bản thân các thành phần trên board mạch điều khiển cũng tiêu tốn năng lượng. Năng lượng được tiêu thụ khi vi điều khiển thực hiện các tác vụ như tính toán, xử lý dữ liệu từ cảm biến, thực thi các thuật toán, và quản lý trạng thái của các thiết bị ngoại vi. Các hoạt động này tuy tiêu thụ ít năng lượng hơn việc truyền tin nhưng diễn ra thường xuyên nên tổng năng lượng tiêu thụ vẫn rất đáng kể. Ngoài ra, cảm biến cũng tiêu tốn năng lượng, đặc biệt với các loại cảm biến yêu cầu hoạt động liên tục trong thời gian dài.

Cuối cùng, cách thức vận hành của mạng như tần suất giao tiếp, điều kiện môi trường cũng ảnh hưởng đến tuổi thọ của WSN. Việc truyền dữ liệu với tần suất cao hoặc ở khoảng cách xa qua môi trường nhiễu vật cản đòi hỏi công suất phát lớn hơn. Ngoài ra, việc truyền những dữ liệu không cần thiết, truyền nhiều lần hoặc truyền nhiều gói tin liên tiếp tại cùng một thời điểm cũng là một nguyên nhân gây lãng phí tài nguyên mạng và năng lượng một cách không hiệu quả.

Việc hiểu rõ và phân loại các nguyên nhân này chính là nền tảng cho các giải pháp tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT, tập trung giải quyết các nguồn gây hao tổn năng lượng một cách hiệu quả, qua đó kéo dài thời gian hoạt động của WSN.

1.5. Các công trình nghiên cứu liên quan

Để giải quyết các nguyên nhân gây tiêu tốn năng lượng kể trên, các nhà khoa học đã nghiên cứu nhiều hướng tiếp cận khác nhau để giải quyết bài toán này. Mỗi giải pháp tập trung vào một hoặc nhiều khía cạnh gây tiêu tốn năng lượng, có thể được phân loại thành bốn nhóm chính: tối ưu hóa về phần cứng, sử dụng hệ điều hành chuyên biệt, lựa chọn giao thức truyền thông hiệu quả và phát triển các thuật toán phần mềm thông minh.

Như đã nêu ở phần 1.4, bản thân các thành phần phần cứng như vi điều khiển, cảm biến tiêu thụ một lượng năng lượng đáng kể cho các tác vụ tính toán và thu thập dữ liệu. Để giải quyết vấn đề này, nghiên cứu của P. Ray và cộng sự [7] đã đưa ra các kiến nghị về giải pháp phần cứng nhằm tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng trong các hệ thống IoT giám sát thảm họa, lĩnh vực mà nguồn năng lượng thường xuyên bị gián đoạn và việc bảo trì bị hạn chế. Nghiên cứu nhấn mạnh việc thiết kế các thiết bị IoT công suất thấp bằng việc sử dụng vi điều khiển 8/16-bit tiêu thụ ít năng lượng đóng vai trò then chốt trong việc vận hành hệ thống một cách hiệu quả.

Việc module truyền thông được xác định là thành phần tiêu tốn nhiều năng lượng nhất trong thiết bị IoT, với một lượng lớn năng lượng bị lãng phí trong các trạng thái như nghe nhàn rỗi, va chạm, nghe lén và phát quá mức. Nguyên nhân này phần lớn xuất phát từ lớp MAC, vì vậy các giải pháp trọng tâm là tập trung vào việc lựa chọn giao thức và công nghệ mạng hiệu quả. Theo nghiên cứu của F. Al-Turjman [8], các yếu tố như phạm vi, tốc độ truyền dữ liệu, cùng với thiết kế của giao thức ở lớp MAC và giao thức định tuyến, đều có tác động lớn đến công suất tiêu thụ của thiết bị. Nghiên cứu của Noreen và cộng sự [9] cho thấy sự khác biệt đáng kể về mức tiêu thụ năng lượng giữa các giao thức truyền thông phổ biến hiện nay. Các công nghệ như 3G/4G LTE, mặc dù cung cấp tốc độ dữ liệu cao, ổn định và có phạm vi phủ sóng rộng lại có dòng tiêu thụ định mức lớn (khoảng 400mA ở chế độ truyền nhận dữ liệu). Ngược lại, ZigBee và Bluetooth nổi bật với khả năng TKNL hơn (khoảng 30mA) nhưng độ phủ sóng và khoảng cách truyền lại bị giới hạn (từ 10-100m). Trong khi đó, Wi-Fi cung cấp tốc độ truyền dữ liệu rất cao (lên tới 55 Mbps) trong phạm vi trung bình khoảng 100m, nhưng cũng yêu cầu một mức năng lượng đáng kể (khoảng 100mA).

Bên cạnh việc tối ưu ở tầng giao thức, việc sử dụng các hệ điều hành chuyên biệt cho thiết bị IoT đóng vai trò trong việc quản lý tài nguyên hệ thống một cách hiệu quả để TKNL. Các hệ điều hành như Contiki hay TinyOS được thiết kế để giảm thiểu các tính toán và hoạt động không cần thiết. Ví dụ điển hình là hệ điều hành riêng biệt với tên gọi RIOT-OS được E. Baccelli và cộng sự [10] phát triển, được thiết kế với mục tiêu TKNL bằng cách tạo bộ lập lịch hoạt động mà không cần các sự kiện định kỳ. Khi không

có tác vụ nào đang chờ xử lý, RIOT-OS sẽ chuyển sang luồng rảnh, luồng này sẽ xác định chế độ ngủ sâu nhất có thể tùy thuộc vào các thiết bị ngoại vi đang sử dụng. Hệ thống chỉ được đánh thức bởi các sự kiện (bên ngoài hoặc do hệ thống tạo ra). RIOT cũng giảm thiểu thời gian và tần suất chuyển đổi ngữ cảnh, giúp tăng hiệu quả năng lượng.

Cuối cùng và cũng là quan trọng nhất, việc tối ưu hoá về phần mềm thông qua các thuật toán tối ưu đóng vai trò then chốt trong việc giải quyết đồng thời các nguyên nhân gây lãng phí năng lượng cho các thiết bị trong WSN như đã nêu ở mục 1.4 [1]. Từ các phương pháp tác động trực tiếp lên hoạt động của thiết bị IoT như điều chỉnh chu kỳ nhiệm vụ (duty-cycle) và quản lý điện áp động, cho đến các kỹ thuật tối ưu ở cấp độ mạng như định tuyến thông minh. Hơn nữa, các thuật toán còn giải quyết việc giảm số lần dữ liệu không cần thiết thông qua các kỹ thuật gộp dữ liệu và lập lịch tác vụ, sử dụng học tăng cường sâu để hệ thống có thể tự tối ưu hóa hoạt động.

Dựa vào những phân tích và nghiên cứu kể trên, Bảng 1.1 tóm gọn những giải pháp và nghiên cứu giúp TKNL cho mạng WSN

Phương pháp	Mô tả
Tối ưu về phần cứng	Chọn phần cứng như vi điều khiển, cảm biến và các linh kiện ít tiêu thụ điện năng, hoạt động với công suất thấp nhằm TKNL.
Hệ điều hành chuyên biệt	Sử dụng các hệ điều hành chuyên biệt được thiết kế để giảm thiểu các tác vụ không cần thiết, giúp TKNL
Giao thức mạng và truyền thông	Ứng dụng giao thức truyền thông tiêu thụ năng lượng thấp như BLE, Zigbee, LoRa, cùng các giao thức MAC và định tuyến hiệu quả để giảm năng lượng tiêu thụ trong tác vụ truyền thông.
Tối ưu về phần mềm	Áp dụng các thuật toán, kỹ thuật điều khiển hoạt động TKNL, cho các thiết bị trong WSN

Bảng 1.1. Các phương pháp tối ưu năng lượng của thiết bị IoT

Từ Bảng 1.1, có thể thấy các giải pháp từ tối ưu phần cứng, sử dụng hệ điều hành chuyên biệt đến lựa chọn giao thức truyền thông TKNL đều đóng vai trò nhất định trong việc tối ưu năng lượng cho thiết bị IoT. Tuy nhiên, nếu chỉ được áp dụng riêng lẻ, các phương pháp này không thể giải quyết triệt để các thách thức về năng lượng mà thiết bị quan trắc KTTV gặp phải. Tối ưu phần cứng là nền tảng cho mọi giải pháp nhằm giảm năng lượng tiêu thụ ở cấp độ phần cứng nhưng thiếu tính linh hoạt và chỉ mang lại hiệu quả ở một mức độ nhất định, không thể giải quyết các lãng phí do vận hành không hiệu quả của thiết bị. Trong khi việc lựa chọn giao thức mạng giúp giảm đáng kể năng lượng trong tác vụ truyền thông nhưng chỉ phù hợp với một số hệ thống nhất định (tầm ngắn, vùng phủ sóng nhỏ, tốc độ thấp..). Đặc biệt đối với hệ thống quan trắc KTTV mà luận văn nghiên cứu yêu cầu phải sử dụng mạng 4G LTE để truyền dữ liệu nên việc ứng dụng các giao thức truyền thông TKNL là không khả thi.

Trong khi đó, giải pháp tối ưu phần mềm được xem là nổi bật và phù hợp nhất, giúp khai thác tối đa hiệu quả của cả phần cứng lẫn các giao thức được tối ưu thông qua

các thuật toán TKNL. Giải pháp này cũng mang đến sự linh hoạt, cho phép cập nhật và tinh chỉnh để thích ứng với các yêu cầu vận hành và môi trường triển khai khác nhau mà không phải thay đổi phần cứng hoặc giao thức truyền thông. Do đó, việc tập trung vào thuật toán phần mềm không chỉ giúp giải quyết các nguyên nhân gây lãng phí một cách triệt để mà còn mở ra tiềm năng lớn nhất trong việc tạo ra các hệ thống bền bỉ, linh hoạt và hiệu quả.

Vì vậy, luận văn lựa chọn tối ưu năng lượng dựa trên giải pháp phần mềm làm hướng nghiên cứu trọng tâm. Chương II sẽ trình bày và phân tích các kỹ thuật, thuật toán tiêu biểu đã được công bố, từ đó làm cơ sở đề xuất một thuật toán phù hợp với yêu cầu của hệ thống KTTV.

1.6. Tổng kết Chương I

Chương I đã trình bày một cách tổng quan về WSN, khẳng định vai trò then chốt trong nhiều lĩnh vực. Chương cũng đi sâu phân tích những thách thức mà WSN gặp phải, trong đó nhấn mạnh thách thức về mặt năng lượng khi triển khai trên diện rộng đặc biệt ở vùng sâu, vùng xa, từ đó đặt ra yêu cầu cấp thiết về một giải pháp tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT trong WSN. Để cụ thể hóa bối cảnh thách thức về năng lượng đó, chương tập trung phân tích kiến trúc tổng quan và các thành phần chính của đối tượng nghiên cứu trong luận văn là hệ thống quan trắc KTTV tự động.

Tiếp theo, chương phân tích các nguyên nhân gây tiêu tốn năng lượng và tổng hợp các giải pháp liên quan, từ tối ưu phần cứng, hệ điều hành, giao thức truyền thông cho đến thuật toán phần mềm. Qua đó, khẳng định nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa phần mềm thông qua các thuật toán để TKNL là hướng nghiên cứu chính của luận văn.

Trên cơ sở đó, Chương II đi sâu vào việc giới thiệu các thuật toán TKNL tiêu biểu đã được công bố và nghiên cứu bởi các nhà khoa học để giải quyết các thách thức về mặt năng lượng mà các thiết bị IoT trong mạng WSN gặp phải. Từ đó, tiến hành phân tích và so sánh các thuật toán, làm tiền đề để đề xuất một thuật toán phù hợp với các yêu cầu đặc thù của luận văn.

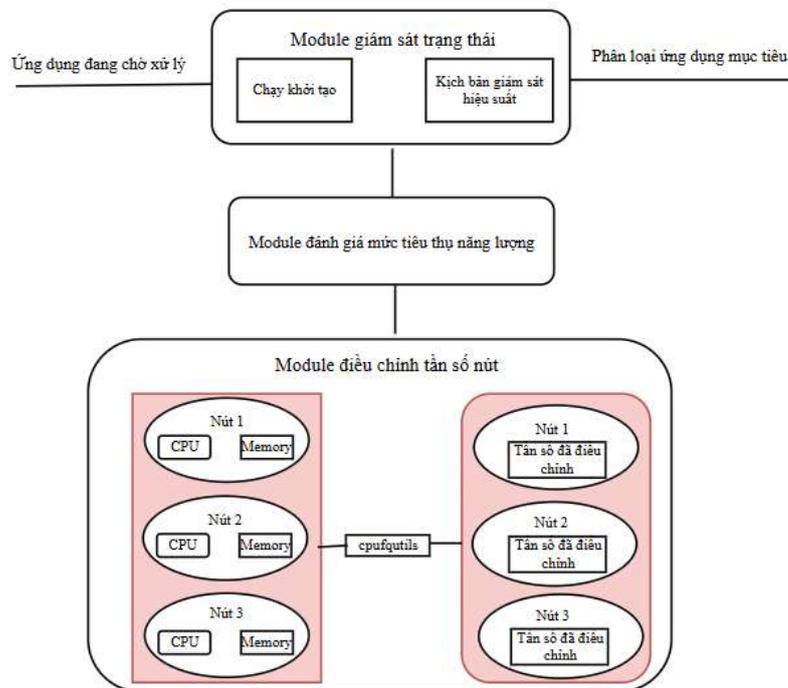
CHƯƠNG II: CÁC THUẬT TOÁN TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ

2.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu về thuật toán TKNL

Trong bối cảnh các thiết bị IoT và WSN ngày càng phát triển, việc tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ trở thành một thách thức lớn. Nhiều nghiên cứu gần đây đã đề xuất các kỹ thuật và thuật toán khác nhau nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng cho các thiết bị IoT và giải quyết các nguyên nhân gây tiêu tốn năng lượng trong WSN đã nêu ở mục 1.4 Chương I. Chương II sẽ giới thiệu, đi sâu phân tích các thuật toán TKNL tiêu biểu đã được các nhà khoa học nghiên cứu và áp dụng.

2.1.1. Thuật toán điều chỉnh điện áp và tần số động (DVFS)

Nghiên cứu của H. Li và các cộng sự [11] sử dụng kỹ thuật điều chỉnh điện áp và tần số động (DVFS) để cân bằng giữa tiêu thụ năng lượng và hiệu suất xử lý (Hình 2.1).



Hình 2.1: Cấu trúc TKNL dựa trên DVFS [10]

DVFS là phương pháp tối ưu năng lượng dựa trên việc điều chỉnh động tần số và điện áp hoạt động của bộ vi xử lý. Mục tiêu chính của DVFS là điều chỉnh tần số xử lý của CPU sao cho phù hợp với mức độ tải công việc hiện tại, từ đó giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng mà không làm giảm quá nhiều hiệu suất.

Công thức lý thuyết về công suất tiêu thụ của CPU có thể được mô tả như sau:

$$E = P.t = \alpha CV^2 f_t \quad (2)$$

Trong đó năng lượng (E) tỉ lệ thuận với công suất (P), tần số (f) và bình phương điện áp (V).

Dựa trên công thức này, có thể thấy rằng khi giảm tần số f, công suất tiêu thụ P sẽ giảm theo bình phương của điện áp V trên mỗi đơn vị thời gian. Trong thiết bị IoT, DVFS giúp giảm năng lượng tiêu thụ bằng cách điều chỉnh tần số CPU sao cho phù hợp với yêu cầu tính toán thực tế của hệ thống. Cụ thể, khi không có yêu cầu tính toán nặng,

hệ thống có thể giảm tần số hoạt động của vi điều khiển để TKNL mà không làm giảm hiệu suất quá nhiều. Khi có tác vụ phức tạp hoặc yêu cầu tính toán cao, tần số sẽ được điều chỉnh lại để đảm bảo hiệu suất hệ thống.

Kết quả cho thấy, DVFS có thể đạt được mức TKNL đáng kể, lên tới 29.5% so với thuật toán mặc định đồng thời vẫn đáp ứng được các ràng buộc SLA (Service Level Agreement). Khi so sánh với thuật toán điều chỉnh tần số hoạt động tĩnh, DVFS giúp giảm tiêu thụ năng lượng tới 7.37%.

Tuy nhiên, trong nghiên cứu, tác giả cũng thẳng thắn chỉ ra một hạn chế và đánh đổi cố hữu của phương pháp này. Việc tối thiểu hóa mức tiêu thụ năng lượng trong hầu hết các trường hợp sẽ dẫn đến sự gia tăng thời gian thực thi của tác vụ. Mặc dù trong các thử nghiệm, thời gian thực thi của DVFS vẫn đáp ứng được các ràng buộc về SLA (không quá 10% thời gian tối thiểu), thuật toán này vẫn có thể dẫn đến việc tăng nhẹ thời gian thực thi so với các thuật toán mặc định (tăng 4.28% so với các thuật toán mặc định).

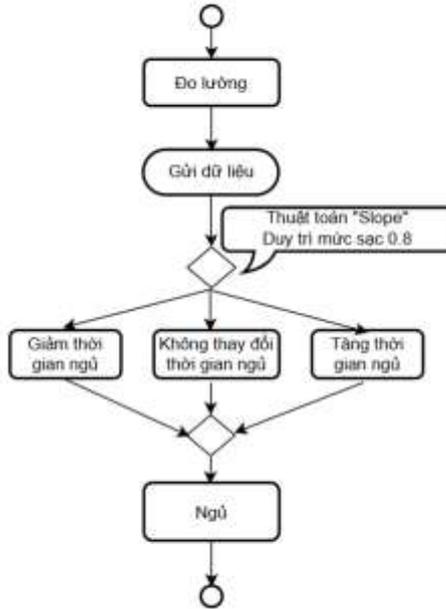
Nghiên cứu của H. Chen và cộng sự [12] tập trung vào việc giảm mức xung nhịp của vi điều khiển nhằm cải thiện thời gian hoạt động của thiết bị. Tuy vậy, cách tiếp cận này cũng gặp phải một nhược điểm là làm giảm độ chính xác của dữ liệu thu thập vì khi xung nhịp giảm, tốc độ thực hiện các tác vụ của vi điều khiển cũng sẽ giảm theo, làm chậm quá trình xử lý. Việc dữ liệu lượng bị sai sót có thể gây ảnh hưởng lớn đến toàn bộ hệ thống. Hơn nữa, thành phần tiêu tốn năng lượng nhất trong thiết bị là module truyền thông, vì vậy cần tập trung vào các thuật toán giải quyết vấn đề mà module này gặp phải.

2.1.2. Áp dụng chế độ ngủ sâu

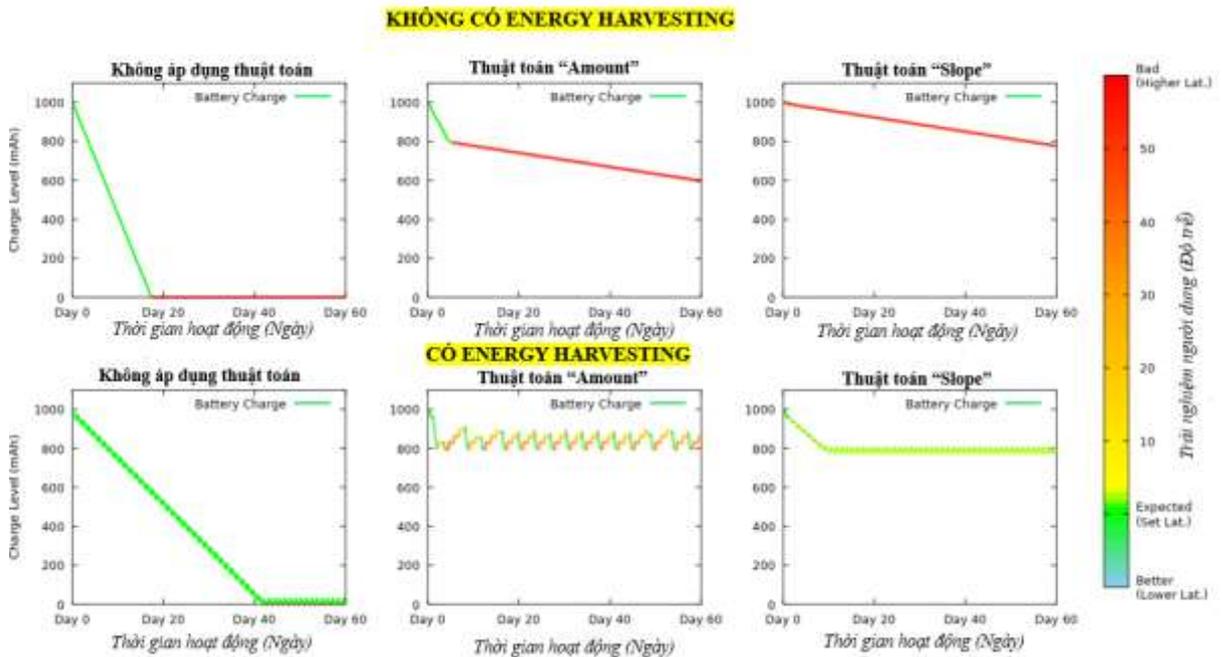
Một nghiên cứu khác được tác giả L. Wang đề xuất là áp dụng chế độ ngủ sâu (deep sleep) [13]. Chế độ ngủ sâu là một trong những phương pháp tối ưu hóa năng lượng quan trọng trong các hệ thống IoT và WSN.

Nguyên tắc TKNL cốt lõi được nghiên cứu xuyên suốt nghiên cứu là việc thiết lập các chu kỳ làm việc/ngủ (Hình 2.2). Theo đó, thay vì hoạt động liên tục, thiết bị sẽ được chuyển sang chế độ ngủ sâu để TKNL ở mức tối thiểu.

Khi thiết bị được chuyển sang chế độ ngủ sâu, bộ vi xử lý, cảm biến và module truyền thông đều được tắt, chỉ còn lại một bộ hẹn giờ (timer) nhỏ hoạt động để đánh thức thiết bị vào một thời điểm xác định vì vậy mức năng lượng ở chế độ này là tối thiểu, có thể lên đến 1% hoặc thậm chí thấp hơn so với mức năng lượng tiêu thụ khi thiết bị ở trạng thái hoạt động. Ngoài ra, khi so sánh với các chế độ ngủ khác (ví dụ: chế độ Monitor hoặc Observe), nơi một số thành phần phần cứng vẫn được bật để nhận tín hiệu đánh thức từ bên ngoài, việc áp dụng chế độ ngủ sâu có mức tiêu thụ năng lượng thấp hơn đáng kể.



Hình 2.3. Thiết bị giám sát nhiệt độ áp dụng thuật toán Slope [14]



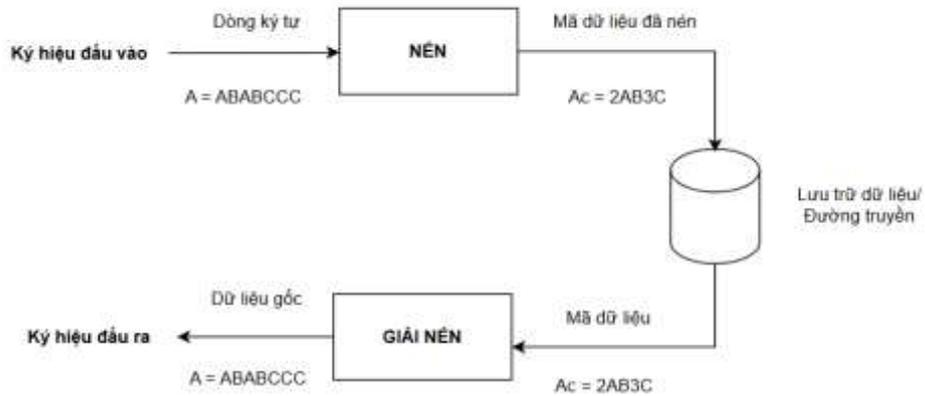
Hình 2.4: Kết quả mô phỏng thời gian hoạt động của thiết bị trong chu kỳ 60 ngày [14]

Mặc dù cả hai thuật toán đều cho thấy hiệu quả trong việc quản lý năng lượng (Hình 2.4), chúng vẫn tồn tại những nhược điểm riêng. Thuật toán “Amount” làm tăng khoảng thời gian gửi dữ liệu để kéo dài thời gian hoạt động của hệ thống, dẫn đến gây nên độ trễ cao và làm suy giảm trải nghiệm của người dùng. Ngoài ra, việc xác định ngưỡng năng lượng hợp lý để chuyển đổi giữa các chế độ hoạt động có thể gặp khó khăn, đặc biệt trong các hệ thống có đặc tính thay đổi môi trường liên tục. Trong khi đó, thuật toán “Slope” thể hiện sự tối ưu hơn trong việc duy trì trạng thái cân bằng năng lượng và trải nghiệm người dùng khi có EH, nhưng nhược điểm lớn nhất của nó nằm ở yêu cầu về phần cứng, có thể làm tăng chi phí và độ phức tạp của hệ thống. Hơn nữa, hiệu quả của

Slope phụ thuộc nhiều vào việc thiết lập chính xác các tham số độ dốc, đòi hỏi nhà sản xuất phải tinh chỉnh và mô phỏng kỹ lưỡng cho từng ứng dụng cụ thể.

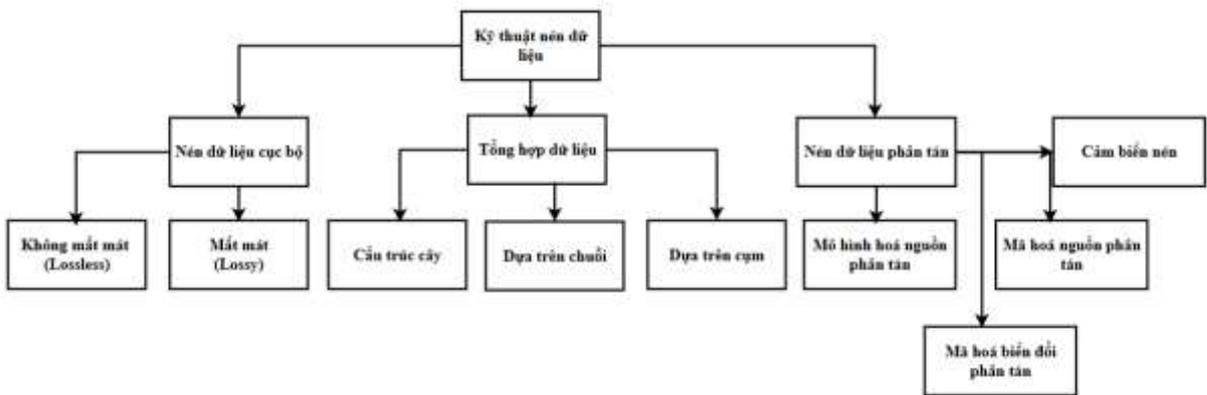
2.1.4. Thuật toán nén và gộp dữ liệu

Một vấn đề khác gây tiêu tốn năng lượng trong mạng WSN là việc truyền tải dữ liệu không cần thiết hoặc dư thừa và để giải quyết vấn đề này, nhiều nghiên cứu đã đề xuất sử dụng các thuật toán tập hợp dữ liệu và nén dữ liệu (Hình 2.5). Mục tiêu của thuật toán này là giảm bớt tổng năng lượng tiêu thụ cho việc truyền thông bằng hai cách: giảm số lần phải kích hoạt module truyền thông và giảm kích thước của gói tin cần truyền tải giữa thiết bị IoT và trung tâm điều khiển.



Hình 2.5: Mô hình nén dữ liệu [15]

Nghiên cứu của nhóm tác giả K. L. Ketshabetswe và cộng sự [15] đã thực hiện một bài tổng quan, so sánh các kỹ thuật nén dữ liệu hiện có, đồng thời phân tích sâu và đề xuất cải tiến cho một thuật toán cụ thể. Các kỹ thuật nén dữ liệu trong WSN được phân loại thành ba nhóm chính (Hình 2.6): Kỹ thuật nén dữ liệu cục bộ, Kỹ thuật tổng hợp dữ liệu và Kỹ thuật nén dữ liệu phân tán.



Hình 2.6: Các kỹ thuật nén dữ liệu [15]

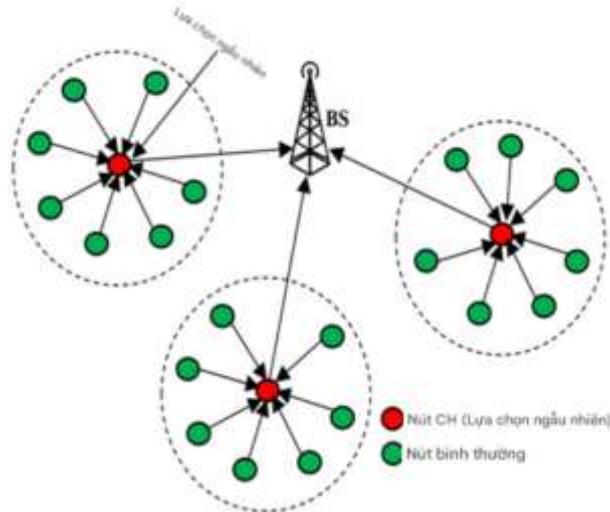
Nghiên cứu [15] tập trung phân tích thuật toán ALDC là một nhánh của Kỹ thuật nén dữ liệu cục bộ. Phân tích này cho thấy thay vì mã hóa dữ liệu thô, việc mã hóa các mẫu dư giúp giảm đáng kể kích thước dòng bit. Ví dụ, với một khối dữ liệu cụ thể, kích thước đã giảm từ 112 bit xuống chỉ còn 30 đến 36 bit, giúp TKNL từ 67.8% đến 73.2%. Dựa trên phân tích này, nhóm tác giả đã đề xuất một thuật toán cải tiến sử dụng các bảng mã Huffman của ALDC một cách linh hoạt hơn để tối ưu hóa quá trình mã hóa. Thuật

toán được đề xuất đã giảm luồng bit đầu ra xuống còn 26 bit cho tất cả các kích thước khối mẫu dư so với luồng bit đầu ra từ 30 đến 36 bit của thuật toán ALDC gốc, giúp TKNL từ 4 đến 10 bit, dẫn đến tổng mức TKNL là 76,78%. Các kết quả mô phỏng trên Matlab cho thấy việc TKNL tăng lên khi số bit được lưu từ luồng bit ALDC ban đầu tăng lên, chứng tỏ hiệu suất nén dữ liệu được cải thiện.

Mặc dù các thuật toán nén và gộp dữ liệu đóng vai trò quan trọng trong việc kéo dài thời gian hoạt động cho các thiết bị IoT trong WSN nhưng về cơ bản, quá trình nén và giải nén đòi hỏi tài nguyên xử lý, vốn tiêu thụ một phần năng lượng của bộ vi điều khiển và làm tăng độ trễ của mạng. Thêm vào đó, một sự đánh đổi phổ biến là giữa tỷ lệ nén và độ trung thực của dữ liệu. Các kỹ thuật nén mất mát (lossy), dù đạt hiệu quả nén cao, phải hy sinh một phần thông tin gốc. Ngoài ra, thuật toán ALDC được đề xuất trong bài báo chỉ được nhóm tác giả triển khai trên mô hình mô phỏng chứ không phải từ các thí nghiệm thực tế. Trong phần kết luận, nhóm tác giả cũng đề cập rằng trong tương lai, phương pháp đề xuất có thể được mở rộng bằng cách áp dụng để nén các tập dữ liệu trong thế giới thực. Điều này ngụ ý rằng tại thời điểm công bố, thuật toán đề xuất chưa được kiểm chứng rộng rãi trên dữ liệu thực tế.

2.1.5. Kỹ thuật định tuyến

Trong nghiên cứu [1] đề cập đến việc sử dụng kỹ thuật định tuyến để TKNL. Giao thức LEACH (Hình 2.7) áp dụng giao thức định tuyến với cơ chế phân cụm động.

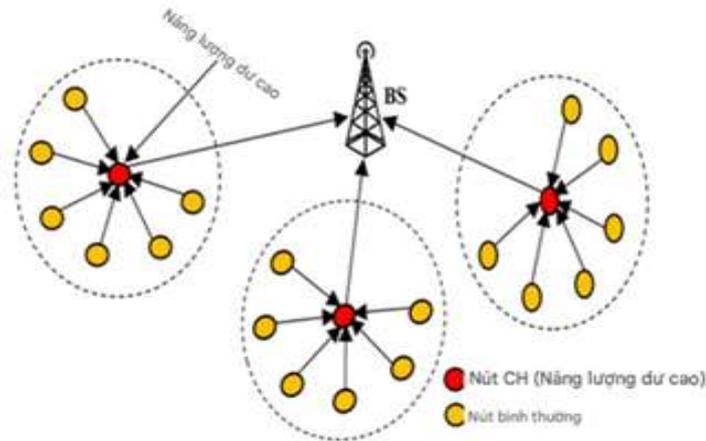


Hình 2.7: Kiến trúc giao thức LEACH [1]

Nguyên lý của LEACH dựa trên việc chia toàn bộ WSN thành các cụm, trong đó mỗi cụm có một nút chủ cụm (CH) chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu từ các nút thành viên, xử lý sơ bộ và truyền gói dữ liệu tổng hợp về trạm gốc (BS). Việc lựa chọn CH được thực hiện ngẫu nhiên và luân phiên theo chu kỳ để đảm bảo phân bố đều mức tiêu thụ năng lượng giữa các nút. Nhờ đó, LEACH giảm đáng kể số lần truyền trực tiếp tới BS, đồng thời hạn chế hiện tượng cạn kiệt năng lượng cục bộ.

Tuy nhiên, LEACH vẫn còn một số hạn chế, đặc biệt là việc lựa chọn CH ngẫu nhiên có thể dẫn tới phân bố không đồng đều giữa các cụm, ảnh hưởng đến hiệu quả truyền thông ở quy mô mạng lớn.

Khắc phục điểm yếu của LEACH, giao thức HEED (Hình 2.8) được đề xuất như một thuật toán phân cụm lai (hybrid) kết hợp giữa mức năng lượng còn lại của nút và chi phí truyền thông trong việc lựa chọn CH.

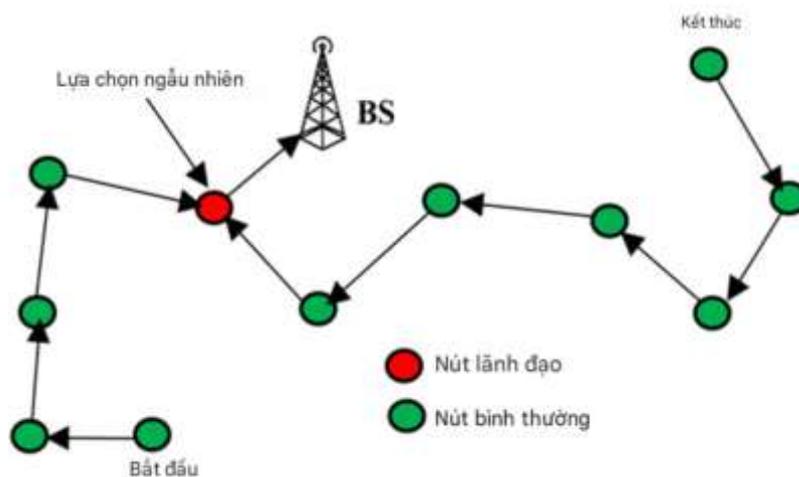


Hình 2.8: Kiến trúc giao thức HEED [1]

Trong quá trình phân cụm, mỗi nút cảm biến ước lượng năng lượng dư thừa của chính nó để xác suất trở thành CH tỷ lệ thuận với lượng năng lượng hiện có, đồng thời xét thêm yếu tố khoảng cách truyền thông đến các nút lân cận để tối ưu chi phí giao tiếp trong cụm. HEED hoạt động theo cơ chế phân tán, không cần thông tin toàn cục của mạng, giúp tăng khả năng mở rộng và giảm chi phí điều khiển.

So với LEACH, HEED cho hiệu quả cân bằng năng lượng cao hơn và thời gian sống mạng dài hơn, tuy nhiên quá trình hội tụ có thể tốn nhiều vòng lặp, đặc biệt trong mạng có mật độ lớn, đòi hỏi chi phí khởi tạo và độ phức tạp cao.

Giao thức PEGASIS (Hình 2.9) được xem là sự mở rộng và cải tiến của LEACH, với cơ chế liên kết chuỗi giữa các nút cảm biến. Thay vì phân cụm, PEGASIS sắp xếp các nút thành một chuỗi liên tiếp, trong đó mỗi nút chỉ giao tiếp với hai nút lân cận gần nhất. Dữ liệu cảm biến được truyền dọc theo chuỗi, mỗi nút thực hiện việc tổng hợp dữ liệu trước khi gửi đến nút kế tiếp, cho đến khi toàn bộ thông tin được truyền tới một nút được chọn làm leader, nút này sau đó gửi dữ liệu cuối cùng đến trạm gốc.



Hình 2.9: Kiến trúc giao thức PEGASIS [1]

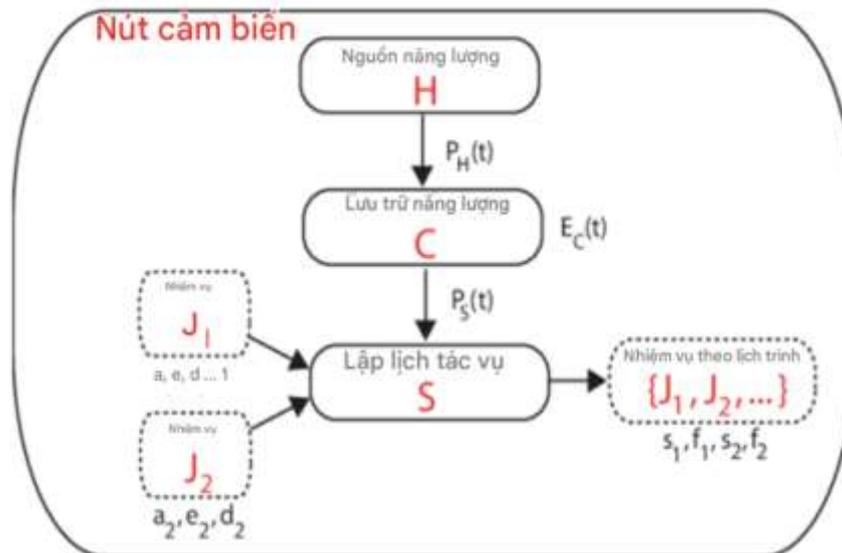
Việc luân phiên chọn leader theo chu kỳ giúp cân bằng năng lượng giữa các nút trong mạng. PEGASIS giúp giảm đáng kể số lần truyền trực tiếp và tổng khoảng cách truyền dữ liệu, do đó TKNL hơn LEACH và HEED. Tuy nhiên, nhược điểm của PEGASIS là độ trễ truyền dữ liệu tăng lên đáng kể, tính dễ bị tổn thương khi chỉ một nút trong chuỗi hồng có thể phá vỡ toàn bộ mạng.

Hơn nữa, cả ba giao thức đều bộc lộ hạn chế khi triển khai ở quy mô lớn; chúng thường giả định nút đầu cụm có thể liên lạc trực tiếp với trạm gốc, một điều không thực tế và tạo ra các lỗ hổng về mặt năng lượng. Điều này khiến chúng ít phù hợp cho các ứng dụng WSN quy mô lớn, động, hoặc yêu cầu đáp ứng thời gian thực.

2.1.6. Thuật toán lập lịch

Nghiên cứu [16] của C. Jandaeng và cộng sự đã thảo luận việc sử dụng thuật toán lập lịch trình cho các tác vụ trong thiết bị, đặc biệt trong môi trường với nhiều thiết bị và tác vụ khác nhau. Thuật toán lập lịch giúp giảm tổng lượng điện năng tiêu thụ của các thiết bị bằng cách tối ưu hóa lịch trình hoạt động của chúng. Dựa vào mô phỏng có thể thấy thuật toán lập lịch giúp cải thiện thời gian hoạt động của thiết bị. Cụ thể, việc sử dụng thuật toán lập lịch tiết kiệm đến 800 J năng lượng so với một hệ thống không sử dụng thuật toán này [16].

Trong bài báo [17], tác giả M. Severini đã giới thiệu thuật toán tổng hợp số liệu theo trình tự, tương tự như phương pháp trong nghiên cứu [16], nhưng sử dụng “mô hình LSA - thuật toán lập lịch lười” (Hình 2.10) cho các thiết bị với nhiệm vụ được giới hạn. Bằng cách tạo ra lịch trình cố định, cho phép các tác vụ thực hiện song song. Khối chức năng lập lịch tác vụ sẽ sắp xếp thứ tự cho các tác vụ dựa trên chỉ số lưu trữ năng lượng. Thuật toán LSA tạo ra một danh sách cố định các nhiệm vụ, được thực thi lần lượt và bất biến trong suốt quá trình hoạt động của thiết bị.



Hình 2.10: Thuật toán LSA [18]

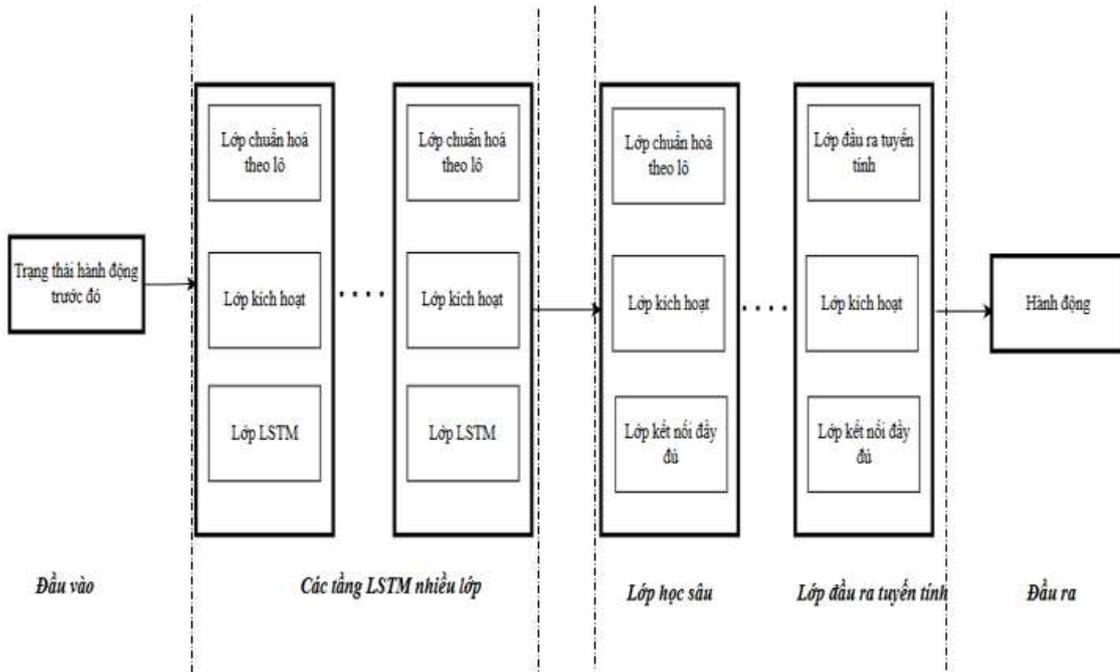
Đây cũng là hạn chế của thuật toán, vì nó không cho phép điều chỉnh lịch trình khi xảy ra thay đổi, đồng nghĩa với việc lịch trình đã lên không thể hủy ngang hoặc bổ sung thêm tác vụ trong quá trình thực hiện làm giảm khả năng thích nghi của hệ thống trước những yếu tố bất định. Nhằm khắc phục những mặt hạn chế của phương pháp lập lịch

cổ định, nghiên cứu [19] của tác giả G. Manimaran và C. Murphy đã giới thiệu phương pháp lập lịch động dựa trên thời gian đến và thời gian sẵn sàng thực thi của tác vụ. Ưu điểm lớn nhất của thuật toán lập lịch động khả năng thích ứng với các tác vụ đến một cách bất ngờ, không được biết trước các đặc điểm của chúng. Tuy nhiên, việc lập lịch động đòi hỏi chi phí tính toán cao, có thể làm tăng độ trễ trong quá trình lập lịch. Thuật toán lập lịch động gây kéo dài thời gian thực thi thuật toán vì độ phức tạp cũng như khối lượng cần phải tính toán lớn, làm bộ nhớ tăng lên từ đó sẽ bị mất kiểm soát trong quá trình hoạt động, có thể dẫn đến tình trạng bị treo, ngừng phản hồi hoặc khởi động lại, buộc vi điều khiển phải thực hiện lại toàn bộ quá trình tính toán.

2.1.7. Thuật toán học tăng cường sâu (DRL)

Trong nghiên cứu [20], nhóm tác giả đề xuất một mô hình hiệu chuẩn cảm biến IoT TKNL dựa trên phương pháp Học tăng cường sâu (Deep Reinforcement Learning – DRL), cụ thể là kết hợp giữa thuật toán Deep Q-Learning và mạng nơ-ron hồi tiếp LSTM (Hình 2.11). Mục tiêu của phương pháp là tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng trong các thiết bị IoT thông qua một tác tử học có khả năng tự học chính sách điều khiển tối ưu nhằm tối đa hóa hiệu suất năng lượng tổng thể của hệ thống.

Trong mô hình này, tác tử được huấn luyện trong một môi trường mô phỏng năng lượng, nơi các trạng thái được biểu diễn bằng những đặc trưng như mức năng lượng còn lại của pin, năng lượng thu được từ môi trường, hoặc chế độ hoạt động hiện tại của thiết bị. Ở mỗi bước, tác tử lựa chọn một hành động từ không gian hành động xác định trước, chẳng hạn như chuyển đổi giữa các chế độ hoạt động hoặc nguồn năng lượng, với mục tiêu tối đa hóa phần thưởng tích lũy phản ánh hiệu quả sử dụng năng lượng.



Hình 2.11: Mô hình DQN dựa trên LSTM [20]

Điểm độc đáo trong kiến trúc mạng nơ-ron được đề xuất là sự tích hợp của các lớp bộ nhớ dài-ngắn (LSTM), cho phép tác nhân nắm bắt và tận dụng các phụ thuộc tuần tự trong dữ liệu chuỗi thời gian của trạng thái năng lượng. Quy trình học tập diễn ra lặp đi lặp lại: tác tử quan sát trạng thái, thực hiện hành động, nhận về phần thưởng và sử dụng

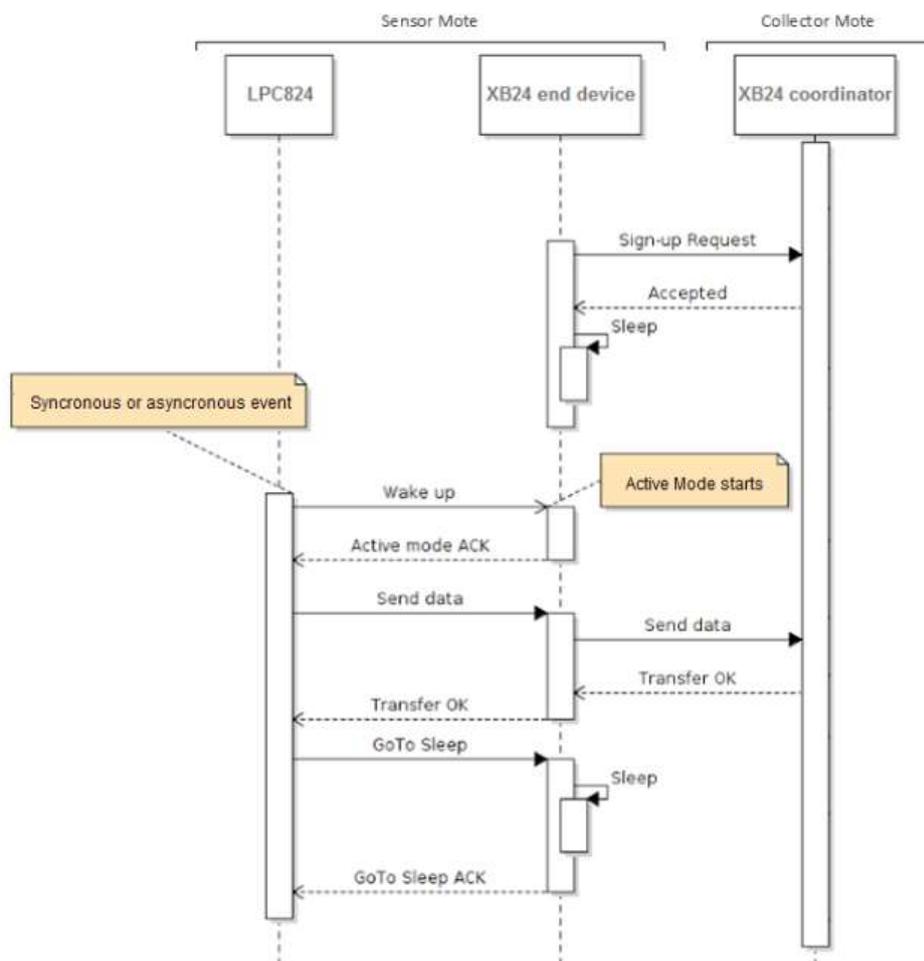
kinh nghiệm này (trạng thái, hành động, phần thưởng, trạng thái kế tiếp) để tinh chỉnh các trọng số của mạng nơ-ron thông qua quá trình huấn luyện. Cơ chế này giúp hệ thống tự động học chiến lược quản lý năng lượng hiệu quả mà không cần lập trình tường minh, qua đó kéo dài tuổi thọ và nâng cao tính bền vững của các thiết bị IoT.

Phương pháp DRL mang lại nhiều ưu điểm, đặc biệt là khả năng tự học, thích nghi động với các điều kiện thay đổi của môi trường và tối ưu hóa hành vi điều khiển theo thời gian thực. Việc DRL kết hợp mạng LSTM giúp hệ thống có khả năng ghi nhớ và liên kết các mẫu thông tin theo thời gian, từ đó đưa ra dự đoán để tối ưu hành động ở mỗi thời điểm dựa trên trạng thái của hệ thống.

Tuy nhiên, DRL yêu cầu lượng dữ liệu đầu vào lớn để huấn luyện mạng dẫn đến thời gian huấn luyện có thể kéo dài và làm tăng độ phức tạp của việc tính toán. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu hiện nay ứng dụng DRL chỉ được các nhà khoa học thực hiện bằng cách mô phỏng trên máy tính và chưa có thử nghiệm phần cứng thực tế.

2.1.8. Thuật toán LOKA

Thuật toán LOKA (Low Power Consumption Algorithm) được đề xuất bởi D. Vaquerizo-Hdez và cộng sự [21] được triển khai trên mạng WSN gồm các end device và bộ thu Collector Node nhằm tối ưu hóa việc tiêu thụ năng lượng trong việc sử dụng giao thức ZigBee tầm ngắn để truyền nhận dữ liệu (Hình 2.12).



Hình 2.12: Cơ chế Dual Duty Cycling của thuật toán LOKA [21].

LOKA hoạt động dựa trên cơ chế Chu kỳ nhiệm vụ kép (Dual Duty Cycling) kết hợp thuật toán lập lịch lai trên sự kiện đồng bộ/bất đồng bộ giúp kiểm soát trạng thái hoạt động của đồng thời hai thành phần quan trọng nhất của các end device là vi điều khiển LPC824 và module ZigBee XB24 dựa trên tác vụ cần thực hiện, trong đó thiết bị chỉ hoạt động khi có nhiệm vụ cần xử lý (khi phát hiện sự kiện từ cảm biến hoặc tới chu kỳ gửi dữ liệu đã định trước), thời gian còn lại thiết bị ở chế độ TKNL. Đối với vi điều khiển, LOKA khai thác chế độ Power-down mode của LPC824, đây là cấu hình tiêu thụ năng lượng thấp hiệu quả nhất trong kịch bản này mà không cần khởi động lại thiết bị. Vi điều khiển chỉ được đánh thức bởi các sự kiện từ cảm biến báo động hoặc bộ định thời để thực hiện các tác vụ. Module ZigBee sử dụng chế độ Pin Sleep Mode của XB24 để TKNL, module này kiểm soát thời điểm chuyển đổi giữa chế độ TKNL sang chế độ hoạt động và ngược lại qua chân “Sleep RQ” được nối với vi điều khiển LPC824.

Ở trạng thái khởi đầu, LPC824 và XB24 đều hoạt động trong chế độ TKNL nhằm hạn chế tối đa năng lượng tiêu thụ. Trong khi đó, XB24 coordinator đóng vai trò điều phối mạng, luôn duy trì ở chế độ hoạt động để bảo đảm kết nối và sẵn sàng nhận dữ liệu từ các thiết bị cuối. Khi có sự kiện kích hoạt (đồng bộ theo chu kỳ định sẵn của RTC, hoặc bất đồng bộ từ cảm biến), LPC824 được đánh thức khỏi chế độ TKNL và chuyển sang chế độ hoạt động. Vi điều khiển xử lý sự kiện, sau đó đọc dữ liệu từ cảm biến và chuẩn bị cho quá trình truyền thông. Tiếp theo, LPC824 gửi tín hiệu đánh thức tới XB24 thông qua chân điều khiển “Sleep_RQ”. Khi nhận được tín hiệu này, XB24 chuyển sang trạng thái hoạt động và gửi phản hồi xác nhận trở lại cho vi điều khiển. Sau khi cả hai thành phần đều hoạt động, LPC824 tiến hành truyền dữ liệu cảm biến qua giao thức UART đến XB24 coordinator. Bộ thu coordinator luôn duy trì ở trạng thái hoạt động để đảm bảo mạng ổn định, nhận dữ liệu và gửi phản hồi xác nhận khi quá trình truyền hoàn tất. Khi việc truyền dữ liệu kết thúc, LPC824 ra lệnh cho XB24 quay trở lại chế độ TKNL, đồng thời, LPC824 cũng tự đưa mình trở lại chế độ Power-down Mode cho đến khi một sự kiện mới được kích hoạt.

Nhờ cơ chế phối hợp linh hoạt giữa các chế độ TKNL hiệu quả của các thành phần phần cứng, thuật toán LOKA giúp hệ thống duy trì hiệu suất truyền dữ liệu ổn định trong khi giảm đáng kể năng lượng tiêu thụ. Việc giới hạn thời gian hoạt động của từng thành phần chỉ trong giai đoạn thực sự cần thiết không những kéo dài thời gian vận hành của thiết bị mà còn đảm bảo tính tin cậy và khả năng phản hồi thời gian thực của hệ thống.

Kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu [21] cho thấy LOKA giúp thiết bị tiết kiệm đến hơn 55% mức tiêu thụ điện của thiết bị so với khi không sử dụng thuật toán, điều này giúp kéo dài thời gian hoạt động của các thiết bị IoT trong WSN. Ngoài ra, LOKA hoạt động độc lập trên từng thiết bị và không phụ thuộc vào cấu trúc của mạng.

Tuy nhiên, cơ chế Dual Duty Cycling của LOKA sẽ đánh thức toàn bộ thiết bị mỗi khi có sự kiện được kích hoạt để xử lý và truyền dữ liệu, điều này dẫn đến nguy cơ nếu có nhiều sự kiện diễn ra liên tục thì hệ thống phải thực hiện tác vụ xử lý và gửi dữ liệu nhiều lần gây tiêu tốn năng lượng. Ngoài ra, việc duy trì hoạt động liên tục của bộ thu coordinator để nhận dữ liệu từ end device và gửi về server cũng làm tiêu tốn một lượng lớn năng lượng, làm giảm kết quả TKNL của thuật toán.

2.2. So sánh, đề xuất thuật toán tối ưu

Các phương pháp kể trên tuy có những ưu điểm về TKNL nhưng đồng thời cũng tồn tại một số hạn chế nhất định. “Thuật toán DVFS” điều chỉnh tần số và điện áp động để giảm lượng điện tiêu thụ. Tuy nhiên, phương pháp này gặp phải vấn đề, khi áp dụng DVFS thì sẽ làm tăng thời gian thực thi tác vụ. Tương tự, việc giảm xung nhịp của vi điều khiển dù mang lại hiệu quả về năng lượng đáng kể nhưng lại làm giảm độ tin cậy và tính chính xác của dữ liệu thu thập. Việc áp dụng chế độ ngủ sâu cũng mang lại hiệu quả TKNL nhưng nguy cơ bỏ lỡ những sự kiện quan trọng, ảnh hưởng tới quá trình thu thập dữ liệu phục vụ dự báo. “Thuật toán Amount” giúp TKNL qua việc điều chỉnh tần suất gửi dữ liệu, nhưng gây ra độ trễ cao vì làm tăng thời gian giữa các lần gửi dữ liệu nếu lượng pin còn lại thấp, làm suy giảm trải nghiệm người dùng. “Thuật toán Slope” tối ưu hơn nhờ tích hợp thêm EH nhưng đòi hỏi phần cứng bổ sung dẫn đến làm tăng chi phí và tăng độ phức tạp của hệ thống. Thuật toán nén và gộp dữ liệu cũng được áp dụng rộng rãi để giảm lượng dữ liệu cần truyền tải, qua đó TKNL một cách đáng kể. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi chi phí xử lý, gây thêm độ trễ, và có nguy cơ làm giảm độ chính xác của dữ liệu. Thêm vào đó, thuật toán ALDC chỉ được kiểm chứng qua mô phỏng, đặt ra câu hỏi về tính khả thi và hiệu suất khi ứng dụng trong thực tế. Việc sử dụng các phương pháp, kỹ thuật định tuyến thông minh dựa trên mô hình phân cụm giúp cải thiện tiêu thụ năng lượng, nhưng việc chọn CH ngẫu nhiên gây khó khăn, có thể dẫn đến vị trí CH phân bố bất hợp lý. Hơn hết, việc áp dụng mô hình phân cụm này không phù hợp đối với hệ thống với quy mô lớn và yêu cầu đáp ứng thời gian thực. Các phương pháp lập lịch, bao gồm LSA và lập lịch động, giúp TKNL nhưng khả năng thích nghi thấp (như LSA) và chi phí tính toán cao, dẫn đến độ trễ lớn và yêu cầu bộ nhớ cao (lập lịch động). Mặt khác, “Thuật toán DRL” có khả năng thích ứng với các thay đổi trong nhiều trường hợp nhưng đòi hỏi lượng dữ liệu huấn luyện lớn và chi phí tính toán cao, đồng thời chưa có thử nghiệm thực tế để đánh giá hiệu quả. Cuối cùng, “Thuật toán LOKA” với cơ chế Dual Duty Cycling kết hợp với thuật toán lập lịch lai trên sự kiện, buộc các thành phần tiêu thụ nhiều năng lượng như vi điều khiển, module truyền thông vào chế độ TKNL trong phần lớn thời gian, chỉ được lập lịch hoạt động tại các thời điểm tức thời khi có các sự kiện đồng bộ (thức dậy gửi dữ liệu định kỳ) hoặc bất đồng bộ (từ cảm biến) tác động, LOKA đã trực tiếp giải quyết nguyên nhân tiêu tốn năng lượng trong WSN (như đã đề cập ở Mục 1.4 trong Chương I). Kết quả thực nghiệm cho thấy LOKA giúp TKNL hơn 55% so với khi không dùng thuật toán, đồng thời vẫn đảm bảo độ chính xác và tính tin cậy của dữ liệu vì cơ chế đánh thức theo sự kiện cho phép ghi nhận các sự kiện mà không phải giữ thiết bị luôn ở trạng thái hoạt động. Tuy nhiên, hạn chế của LOKA ở việc cơ chế xử lý các sự kiện còn khá đơn giản, với nguyên lý hoạt động của thiết bị cảnh báo thiên tai sẽ hoạt động khi có sự kiện tác động làm cho hiệu quả năng lượng không được tối ưu (với các tác vụ có độ ưu tiên thấp hoặc không quan trọng), ngoài ra LOKA trong nghiên cứu [21] sử dụng giao thức ZigBee để truyền dữ liệu, việc duy trì hoạt động liên tục của bộ thu coordinator làm tiêu tốn một lượng lớn năng lượng, ảnh hưởng tới hiệu quả TKNL của thuật toán.

Thuật toán	Đặc điểm	Hạn chế
Thuật toán DVFS	TKNL thông qua việc điều chỉnh tần số và điện áp hoạt động của CPU theo nhu cầu của thiết bị	Làm tăng thời gian thực thi của tác vụ

Thuật toán	Đặc điểm	Hạn chế
Áp dụng chế độ ngủ sâu	Chuyển các thành phần của hệ thống vào trạng thái ngủ sâu để TKNL ở mức tối thiểu.	Bỏ lỡ các sự kiện quan trọng, giảm độ chính xác của dữ liệu
Thuật toán Amount và Slope	Giảm tần suất gửi dữ liệu dựa trên năng lượng còn lại	Tăng độ trễ, làm giảm trải nghiệm người dùng, khó khăn trong việc xác định ngưỡng năng lượng chuyển đổi, làm tăng chi phí hệ thống và đòi hỏi tính toán phức tạp hơn
Thuật toán nén và gộp dữ liệu (ALDC)	Giảm lượng dữ liệu cần truyền tải, qua đó TKNL	Quá trình nén/giải nén tiêu tốn tài nguyên xử lý, tăng độ trễ, có khả năng gây mất mát dữ liệu (lossy). ALDC chỉ được kiểm chứng trên mô phỏng, thiếu thử nghiệm thực tế
Kỹ thuật định tuyến (LEACH/HEED & PEGASIS)	Sử dụng mô hình phân cụm để giảm năng lượng tiêu thụ. Các thiết bị chỉ truyền tin tầm ngắn đến CH để tổng hợp dữ liệu và thực hiện một lần truyền tin tầm xa duy nhất về server, giúp giảm tổng năng lượng tiêu thụ.	- LEACH: lựa chọn CH ngẫu nhiên, không xét đến năng lượng còn lại, dẫn đến hiệu suất không ổn định và có thể làm cạn kiệt năng lượng các nút quan trọng - HEED: cải thiện hơn LEACH bằng cách xét đến năng lượng dư nhưng chi phí khởi tạo và độ phức tạp cao. - PEGASIS: độ trễ cao do cấu trúc chuỗi tuần tự và dễ bị tổn thương khi chỉ một nút trong chuỗi hỏng có thể phá vỡ toàn bộ mạng. Ngoài ra, các kỹ thuật định tuyến đều không phù hợp với cấu trúc hệ thống như trong luận văn nghiên cứu
Thuật toán LSA	Tối ưu hoạt động của thiết bị bằng lập lịch trình cố định các tác vụ thực thi tuần tự	Hạn chế khả năng thích nghi của hệ thống trước các yếu tố bất định.
Thuật toán lập lịch động	Thay đổi lịch trình hoạt động dựa trên thời gian đến và thời gian thực thi của tác vụ	Chi phí tính toán cao, kéo dài thời gian thực thi, làm tăng độ trễ mạng, có thể gây ra tình trạng treo hoặc khởi động lại
Thuật toán DRL	Kết hợp giữa học sâu và học tăng cường để đưa ra các dự báo dựa trên trạng thái của hệ thống	Yêu cầu tính toán phức tạp, cần dữ liệu huấn luyện mạng lớn. Các nghiên cứu chỉ được thử nghiệm trên mô phỏng, chưa áp dụng vào thực tế
Thuật toán LOKA	Cơ chế Dual Duty Cycling, buộc các thành phần phân cứng vào chế độ TKNL khi không có tác vụ thực hiện, kết hợp với thuật toán lập lịch lại trên sự kiện đồng bộ và bất đồng bộ và tận dụng tối đa các chế độ TKNL của phân cứng giúp TKNL lên đến 55%.	- Cơ chế xử lý sự kiện chưa tối ưu; - Bộ thu coordinator liên tục hoạt động gây tiêu tốn năng lượng.

Thuật toán	Đặc điểm	Hạn chế
	Ngoài ra, LOKA cũng đã được kiểm chứng bằng thực nghiệm	

Bảng 2.1: So sánh các thuật toán TKNL

Từ Bảng 2.1 và từ những phân tích so sánh kể trên, có thể thấy thuật toán LOKA được xem là tiềm năng nhất để áp dụng vào thiết bị IoT quan trắc KTTV mà luận văn nghiên cứu với một số yếu tố chính sau:

- Đầu tiên, không giống như DVFS hay việc giảm xung nhịp của MCU và áp dụng chế độ ngủ sâu sẽ khiến thiết bị có nguy cơ bỏ lỡ các sự kiện quan trọng, làm giảm độ chính xác, tăng thời gian thực thi của hệ thống, LOKA áp dụng cơ chế Dual Duty Cycling để TKNL mà vẫn đảm bảo thiết bị hoạt động ở hiệu suất tối đa khi cần thiết (ở đây là khi có tác vụ cần thực hiện), giúp cân bằng giữa thời gian hoạt động và độ tin cậy của dữ liệu.

- Thứ hai, thuật toán lập lịch lai dựa trên sự kiện của LOKA tối ưu và linh hoạt thông qua cơ chế kết hợp giữa lập lịch đồng bộ cho các tác vụ định kỳ và bất đồng bộ theo các sự kiện từ cảm biến. Cơ chế này giúp LOKA vượt qua hạn chế cố hữu của thuật toán LSA (thiếu tính linh hoạt vì theo lịch trình cố định), đảm bảo khả năng phản ứng thời gian thực mà không bỏ lỡ dữ liệu. Khác với các thuật toán nén dữ liệu (ALDC), lập lịch động hay học tăng cường sâu (DRL) yêu cầu nhiều tài nguyên cho việc xử lý, huấn luyện và tính toán cao, LOKA có logic vận hành ổn định, ít phức tạp tính toán, giúp giảm tải cho vi điều khiển và tăng độ tin cậy của hệ thống.

- Thứ ba, LOKA là một giải pháp phần mềm được thiết kế để khai thác một cách hiệu quả và tối đa các chế độ TKNL chuyên biệt của phần cứng. Điều này vượt trội hơn việc chỉ áp dụng một chế độ ngủ sâu (deep sleep). Chính nhờ việc tận dụng triệt để các khả năng đã có của phần cứng, LOKA cũng không cần phần cứng bổ sung như “Thuật toán Slope”.

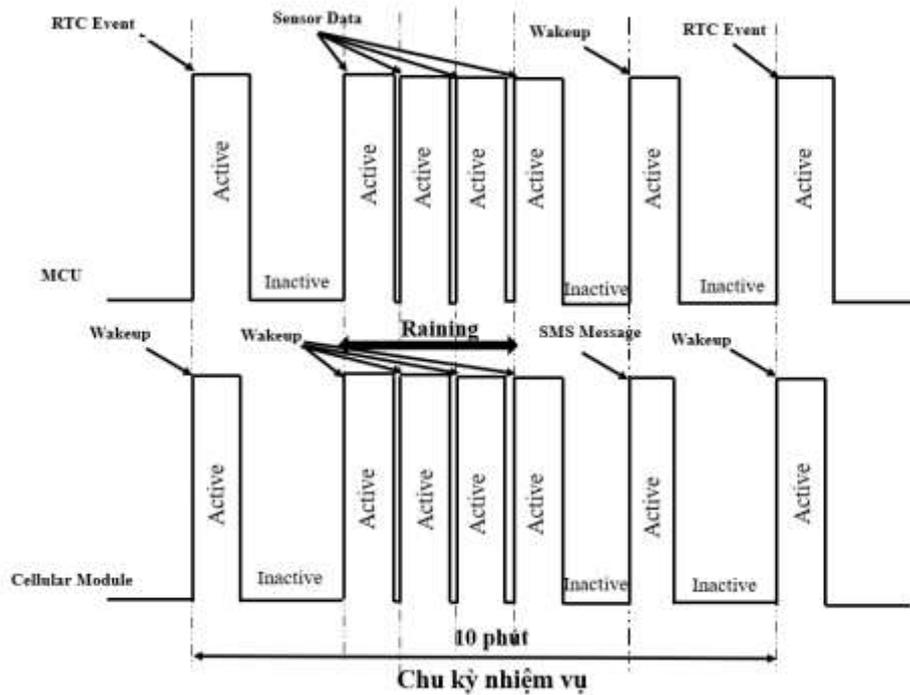
- Cuối cùng, LOKA phù hợp với hệ thống triển khai trên quy mô lớn như hệ thống quan trắc KTTV mà luận văn đang nghiên cứu với việc hoạt động độc lập trên từng thiết bị và không phụ thuộc vào cấu trúc mạng, khác với các kỹ thuật định tuyến (LEACH, HEED & PEGASIS) vốn phù hợp với các mạng WSN quy mô vừa và nhỏ, nơi các thiết bị được triển khai dày đặc trong một khu vực địa lý giới hạn, cho phép chúng dễ dàng giao tiếp và hình thành cụm.

Tuy nhiên, trong quá trình triển khai, áp dụng thuật toán LOKA vào thiết bị quan trắc KTTV mà đề tài nghiên cứu, nhận thấy có một số điểm có thể cải tiến, thay đổi để tối ưu hơn về hiệu quả TKNL của thiết bị:

- Đầu tiên, về kiến trúc mạng, LOKA sử dụng giao thức truyền thông năng lượng thấp, khoảng cách truyền tin trong phạm vi nhỏ là Zigbee để truyền nhận dữ liệu, khác hoàn toàn so với hệ thống quan trắc KTTV sử dụng mạng 4G LTE vốn tiêu thụ nhiều năng lượng hơn gấp nhiều lần so với ZigBee (khoảng 400mA ở chế độ truyền nhận dữ liệu so với chỉ khoảng 30mA khi truyền dữ liệu bằng ZigBee). Lý do chính các trạm quan trắc sử dụng mạng 4G LTE là vì các trạm hoạt động ở khu vực địa lý xa xôi, vùng sâu vùng xa với yêu cầu truyền dữ liệu trên khoảng cách xa, tốc độ truyền tải cao, ổn

định và phạm vi phủ sóng rộng (khoảng cách truyền lên đến vài km so với chỉ 10-100m của ZigBee). Việc này có thể ảnh hưởng đến tổng năng lượng tiêu thụ của thiết bị vì phần lớn năng lượng được sử dụng trong quá trình truyền nhận dữ liệu bằng module truyền thông (công thức 1). Do đó, khó khăn lớn nhất ở đây là phải có cơ chế truyền thông hiệu quả để TKNL trong quá trình truyền dữ liệu bằng mạng LTE. Vì vậy, mục tiêu tiên quyết ở đề tài là giảm thiểu số lần kích hoạt module truyền thông để gửi dữ liệu xuống mức tối thiểu nhưng vẫn đảm bảo hệ thống vận hành ổn định, tin cậy, duy trì đầy đủ các chức năng và đáp ứng được các quy định của Nhà nước trong lĩnh vực KTTV.

- Bên cạnh đó, cơ chế Dual Duty Cycling của LOKA (Hình 2.13) sẽ đánh thức toàn bộ thiết bị để xử lý và truyền dữ liệu mỗi khi có sự kiện được kích hoạt, dẫn đến nếu có nhiều sự kiện được kích hoạt trong một chu kỳ vì hệ thống quan trắc KTTV vận hành trong điều kiện mùa mưa, sẽ có hàng trăm dữ liệu đo được từ cảm biến trong một chu kỳ, thiết bị từ đó cũng phải xử lý và gửi dữ liệu liên tục gây tiêu tốn năng lượng nên cần phải có một cơ chế xử lý sự kiện tối ưu hơn để giải quyết vấn đề này.



Hình 2.13: Cơ chế Dual Duty Cycling của LOKA khi áp dụng vào thiết bị quan trắc KTTV

Chính vì vậy, ở đề tài này, với mong muốn tối ưu hơn nữa về hiệu quả TKNL thông qua quá trình truyền dữ liệu bằng mạng LTE và cải tiến cơ chế Dual Duty Cycling của LOKA để mang lại hiệu quả TKNL cao hơn, đó là động lực để đề xuất thuật toán mới với tên gọi là LOKA Plus. Thuật toán này được phát triển dựa trên nền tảng cốt lõi của LOKA, đồng thời có những cải tiến, thay đổi nhất định để tăng hiệu quả TKNL của thiết bị. Cụ thể, LOKA Plus được xây dựng dựa trên các nguyên tắc sau

* Kế thừa:

- LOKA Plus kế thừa nguyên lý TKNL của LOKA thông qua cơ chế Dual Duty Cycling giúp quản lý, tối ưu đồng thời hai thành phần tiêu tốn nhiều năng lượng nhất

trong thiết bị đó là MCU và module truyền thông. Các module này sẽ chuyển về trạng thái TKNL khi không có tác vụ cần thực hiện, từ đó giúp triệt tiêu phần năng lượng lãng phí trong quá trình nghe nhàn rỗi (như đã phân tích ở mục 1.4 trong Chương I).

- Kết hợp với thuật toán lập lịch lai dựa trên các sự kiện đồng bộ và bất đồng bộ giúp cân bằng giữa thời gian hoạt động của thiết bị và độ tin cậy của dữ liệu. Nhằm duy trì mức tiêu thụ tối thiểu, thiết bị chỉ được đánh thức khi có sự kiện được kích hoạt: sự kiện đồng bộ (tới lịch đã hẹn trước) hoặc bất đồng bộ (khi thiết bị phát hiện có tác vụ cần phải thực hiện). Việc này trực tiếp giải quyết nguyên nhân gây tiêu tốn năng lượng quan trọng trong WSN (như đã nêu trong Chương I).

*** Cải tiến:**

(1) Phát triển và cải tiến cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên để cân bằng giữa việc TKNL và độ tin cậy của dữ liệu. Thay vì khi bất cứ có sự kiện nào xuất hiện, hệ thống lập tức xử lý và gửi dữ liệu gây tiêu tốn năng lượng như LOKA đã áp dụng trong nghiên cứu [21], LOKA Plus phát triển hệ thống phân loại sự kiện phức tạp hơn, ở đó nhiệm vụ liên quan tới thành phần nào thì chỉ có thành phần đó chuyển sang trạng thái hoạt động để xử lý, những thành phần không liên quan vẫn duy trì trạng thái TKNL, cụ thể:

+ Khi có dữ liệu đo được từ cảm biến mưa, MCU chỉ thức dậy trong thời gian cực ngắn để cập nhật bộ đếm rồi quay lại trạng thái TKNL ngay lập tức mà không khởi động module truyền thông để gửi dữ liệu.

+ Khi tới lịch gửi dữ liệu định kỳ hoặc điện áp pin xuống mức báo động, MCU sẽ lập tức thoát khỏi chế độ TKNL, đánh thức toàn bộ thiết bị để xử lý, gửi và lưu dữ liệu.

+ Khi nhận tin nhắn SMS từ users gửi tới module truyền thông, module này sẽ đánh thức MCU dậy để đọc tin nhắn và thực hiện các tác vụ xử lý liên quan.

(2) Phát triển cơ chế lập lịch và gộp dữ liệu tối ưu với mục tiêu tối ưu năng lượng trong quá trình truyền dữ liệu bằng mạng LTE và giảm tần suất kích hoạt module truyền thông để gửi dữ liệu xuống mức tối thiểu. Trong mỗi chu kỳ, hệ thống sẽ gộp chung các mẫu tin như: dữ liệu mới từ cảm biến (số xung mà cảm biến đo được trong chu kỳ), điện áp pin, trạng thái hệ thống sau đó gửi chung thành một gói tin duy nhất, giảm số lần phải kích hoạt module 4G LTE vốn tiêu tốn rất nhiều năng lượng, từ đó giúp TKNL đáng kể. Ngoài ra, việc gộp dữ liệu và giảm tần suất truyền thông giúp làm giảm mật độ giao tiếp trên mạng và truy cập vào kênh truyền, qua đó giảm xác suất xảy ra va chạm khi nhiều thiết bị truy cập mạng cùng lúc.

(3) Cơ chế theo dõi điện áp nguồn cho phép theo dõi tình trạng pin theo thời gian thực và giúp phát hiện sớm tình trạng thiết bị hết pin để người dùng có những phương án phù hợp, giúp nâng cao độ bền và độ tin cậy của hệ thống.

Ngoài ra, những cải tiến trên phải được triển khai một cách hiệu quả, khoa học trên phần cứng gồm MCU và module truyền thông áp dụng các chế độ TKNL phù hợp nhằm giảm điện năng tiêu thụ trong quá trình tính toán, xử lý và truyền dữ liệu nhưng vẫn đảm bảo duy trì đầy đủ các chức năng của hệ thống quan trắc KTTV sử dụng mạng LTE để gửi dữ liệu.

Như vậy, thuật toán LOKA Plus với những cải tiến nêu trên kỳ vọng sẽ giúp nâng cao hơn nữa hiệu quả TKNL của thuật toán LOKA và giải quyết các thách thức đặc thù

của hệ thống quan trắc KTTV sử dụng mạng 4G LTE để gửi dữ liệu. Cấu trúc chi tiết và cơ chế vận hành của thuật toán LOKA Plus sẽ được trình bày và phân tích sâu trong Chương III.

2.3. Tổng kết Chương II

Chương II tập trung phân tích một cách hệ thống về các thuật toán và nghiên cứu của các nhà khoa học về việc tối ưu năng lượng tiêu thụ trong WSN. Với việc tổng quan và phân tích sâu các công trình nghiên cứu liên quan, chương tập trung vào việc đánh giá các ưu điểm và hạn chế của từng thuật toán. Dựa trên sự phân tích so sánh, LOKA là giải pháp tiềm năng nhất để ứng dụng vào đề tài. Tuy nhiên, có một số điểm cải tiến, thay đổi để làm tăng hiệu quả TKNL của thuật toán LOKA khi áp dụng vào thiết bị quan trắc KTTV mà đề tài nghiên cứu.

Chương kết luận bằng việc đề xuất một thuật toán cải tiến mang tên LOKA Plus, được phát triển trên nền tảng những ưu điểm của LOKA nhưng được cải tiến và tích hợp thêm các kỹ thuật quan trọng như: cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên, cơ chế lập lịch và gộp dữ liệu tối ưu, giám sát điện áp nguồn. Ngoài ra, các cải tiến về thuật toán trên phải được triển khai một cách hiệu quả trên phần cứng gồm MCU và module truyền thông với việc áp dụng các chế độ TKNL phù hợp nhằm tối ưu hóa hiệu quả TKNL nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu của hệ thống.

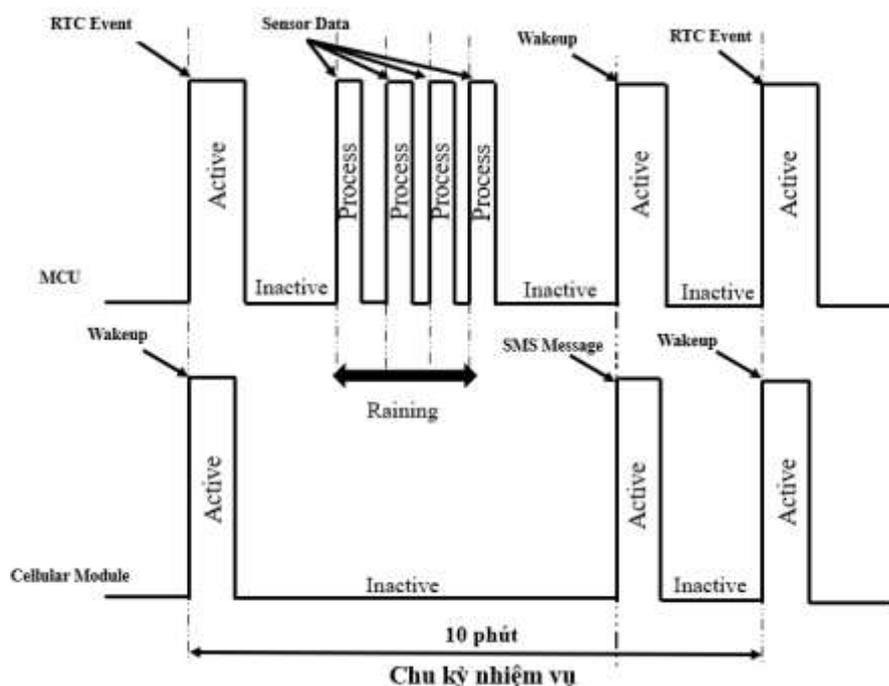
Tổng thể, Chương II đã xây dựng nền tảng lý thuyết vững chắc và xác định rõ ràng giải pháp được đề xuất, tạo tiền đề cho việc thiết kế chi tiết và triển khai thực nghiệm ở các Chương tiếp theo.

CHƯƠNG III: THUẬT TOÁN LOKA PLUS

3.1. Giới thiệu về thuật toán

Dựa trên việc phân tích các giải pháp, thuật toán hiện có và yêu cầu đặc thù của hệ thống quan trắc KTTV, luận văn đề xuất và phát triển một thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ mới, được đặt tên là LOKA Plus. Như đã phân tích ở cuối Chương II, thuật toán LOKA Plus được xây dựng dựa trên việc kế thừa từ thuật toán LOKA và có ba cải tiến trọng tâm: (1) Cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên, (2) Cơ chế lập lịch và gộp dữ liệu tối ưu, và (3) Tính năng giám sát điện áp nguồn. Những cải tiến này nhằm mục đích tối ưu hóa hiệu quả năng lượng cho hệ thống sử dụng module 4G LTE mà vẫn đảm bảo độ tin cậy dữ liệu.

Về bản chất, LOKA Plus thực hiện 2 cơ chế hoạt động chính song song với nhau là hoạt động định kỳ theo lịch hoạt động đã lập và hoạt động theo sự kiện (Hình 3.1). Định kỳ hệ thống sẽ được lập lịch hoạt động mỗi 10 phút để thực hiện các tác vụ cần thiết như xử lý và truyền thông tin dữ liệu về lượng mưa quan trắc được về server. Việc LOKA Plus áp dụng lập lịch tối ưu để gửi dữ liệu định kỳ nhằm giảm số lần hoạt động của thiết bị không cần thiết, khiến hệ thống chỉ thực sự hoạt động khi có tác vụ cần thực hiện hoặc tới chu kỳ đã hẹn trước để xử lý và gửi dữ liệu. Chu kỳ này vẫn đáp ứng yêu cầu về ứng dụng quan trắc KTTV và đúng theo quy định của Nhà nước (Thông tư 18/2022/TT-BTNMT).



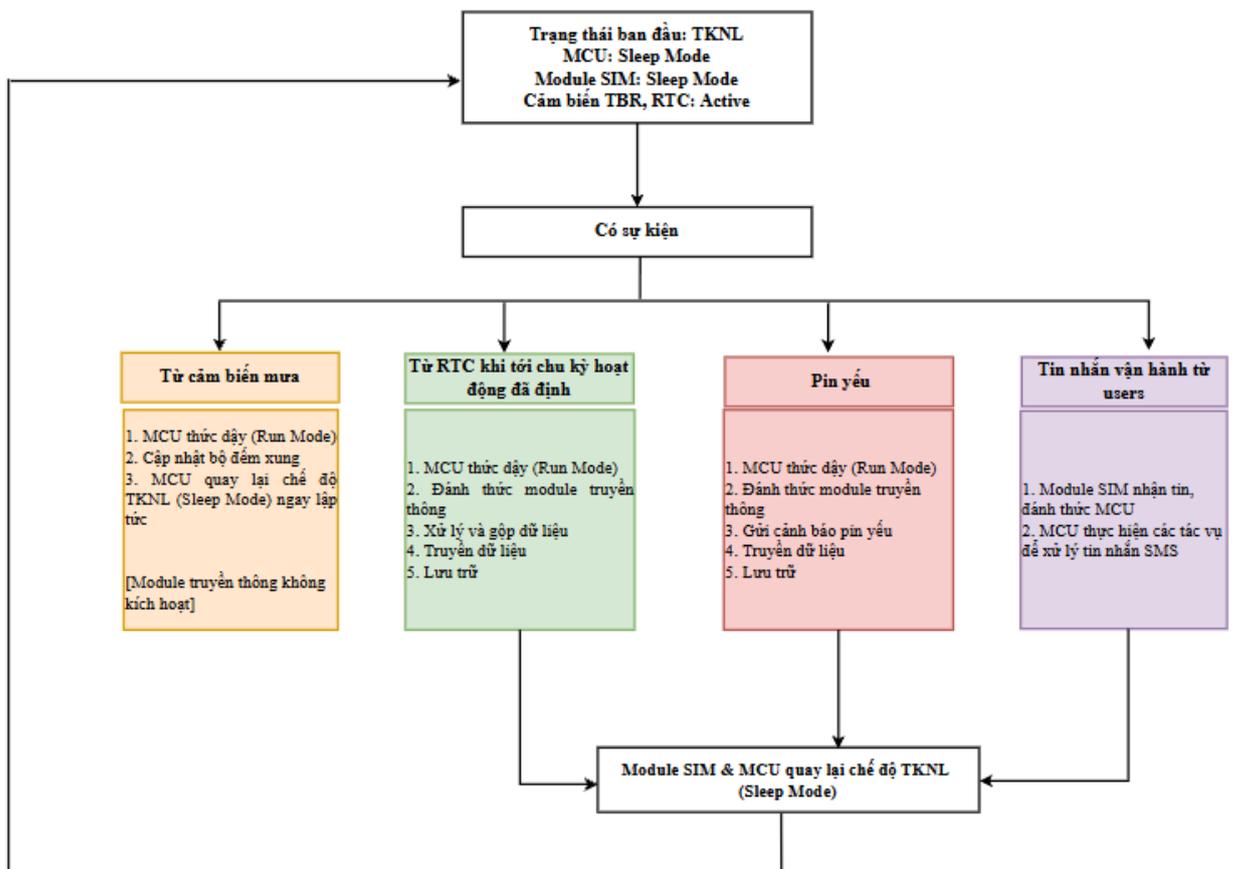
Hình 3.1: Cơ chế Dual Duty Cycling kết hợp với cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên, lập lịch và gộp dữ liệu của LOKA Plus

Ngoài ra, để đảm bảo đáp ứng về độ tin cậy của hệ thống và đáp ứng theo yêu cầu thời gian thực, thuật toán LOKA Plus phát triển cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên (Hình 3.2). Trong giai đoạn thiết bị vào chế độ TKNL (inactive), vi điều khiển có thể lập tức trở về chế độ hoạt động ngay mỗi khi có dữ liệu từ cảm biến mưa, khi có sự thay đổi đột ngột từ điện áp nguồn (pin yếu), khi nhận tin nhắn SMS từ users khi người dùng yêu cầu hệ

thống phản hồi một tác vụ. Khi có sự kiện xuất hiện liên quan đến khối chức năng nào thì chỉ khối module đó chuyển sang trạng thái hoạt động (active) để xử lý, các khối còn lại duy trì trạng thái TKNL (inactive) để giảm điện năng tiêu thụ (Bảng 3.1). Tương ứng với mức độ quan trọng của từng sự kiện, thuật toán đánh thức các thành phần cần thiết để xử lý và hạn chế việc đánh thức module truyền thông cho đến khi thật sự cần thiết để TKNL.

Nguồn sự kiện	Loại sự kiện	Trạng thái thiết bị	Hành động xử lý trong ISR
Sensor Interrupts	Bất đồng bộ	MCU: Process Cellular module: Inactive	Bộ đếm mưa tăng lên 1
RTC Event	Đồng bộ	MCU: Active Cellular module: Active	Đặt cờ Scheduled
Pin yếu	Bất đồng bộ	MCU: Active Cellular module: Active	Đặt cờ LOWBATT
SMS Message	Bất đồng bộ	MCU: Active Cellular module: Active	Đặt cờ SMS_CMD

Bảng 3.1: Bảng phân loại các sự kiện

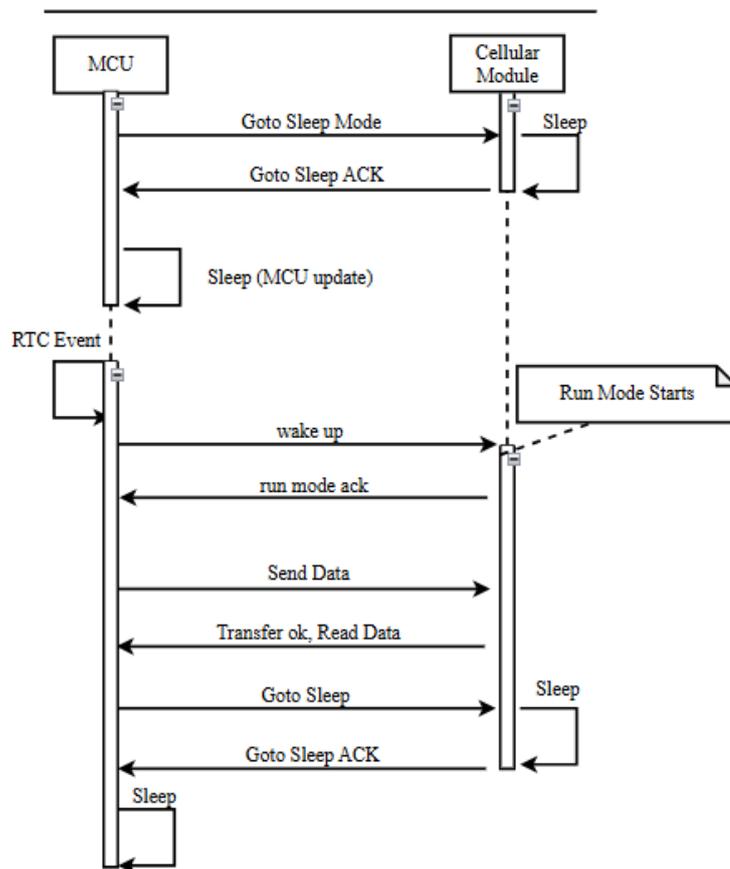


Hình 3.2: Lưu đồ phân loại sự kiện

Khi có dữ liệu đo được từ cảm biến, vi điều khiển sẽ được đánh thức trong một khoảng khắc cực ngắn chỉ để cập nhật bộ đếm vào bộ nhớ tạm của MCU, sau đó ngay lập tức quay lại trạng thái TKNL và đợi tới chu kỳ đã định trước mà không khởi động module truyền thông. Khi tới lịch đã hẹn, RTC sẽ phát tín hiệu đánh thức MCU, MCU

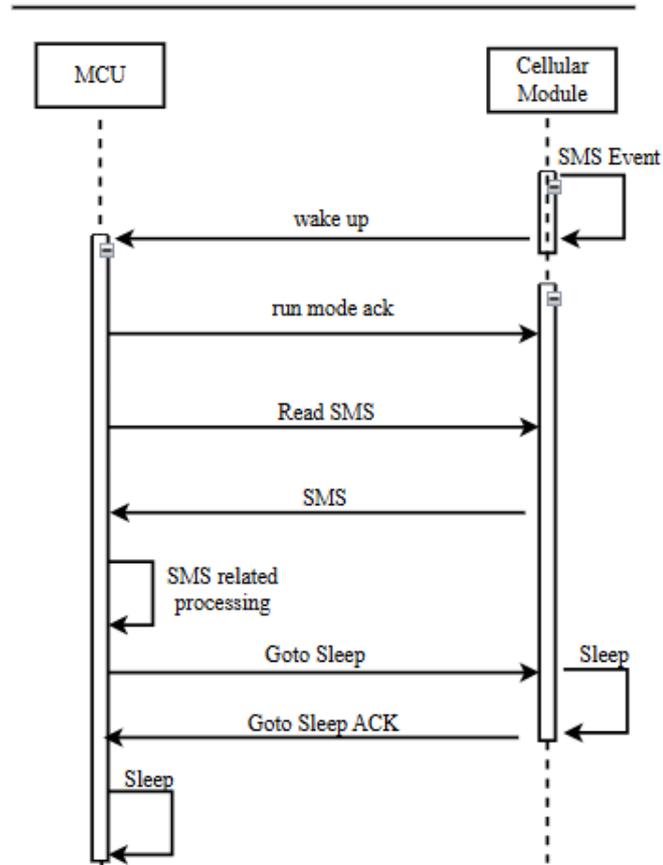
tiếp tục đánh thức module truyền thông để xử lý và gửi dữ liệu về server (Hình 3.3). Điều này đảm bảo không một dữ liệu mưa nào bị bỏ sót trong suốt chu kỳ nhiệm vụ mà vẫn TKNL tối đa. MCU cũng sẽ dựa vào dữ kiện từ cảm biến đo mưa cung cấp để thực hiện các bước tính toán cần thiết nhằm chuyển đổi thành các dữ liệu lượng mưa, cường độ mưa trước khi gửi về server.

Các gói dữ liệu cũng sẽ được tập hợp và gửi trong một lần duy nhất, thay vì truyền đi các gói tin nhỏ lẻ và rời rạc nhằm giảm thiểu số lần kích hoạt module truyền thông, nhờ đó làm giảm dòng tiêu thụ trung bình của thiết bị và kéo dài thời gian hoạt động, trong khi vẫn đảm bảo độ tin cậy và yêu cầu thời gian thực. Bằng cách cân bằng giữa tính kịp thời dữ liệu và tần suất truyền, việc gửi giữ liệu định kỳ giúp tối ưu hóa hệ số năng lượng trên mỗi bit thông tin hữu ích.



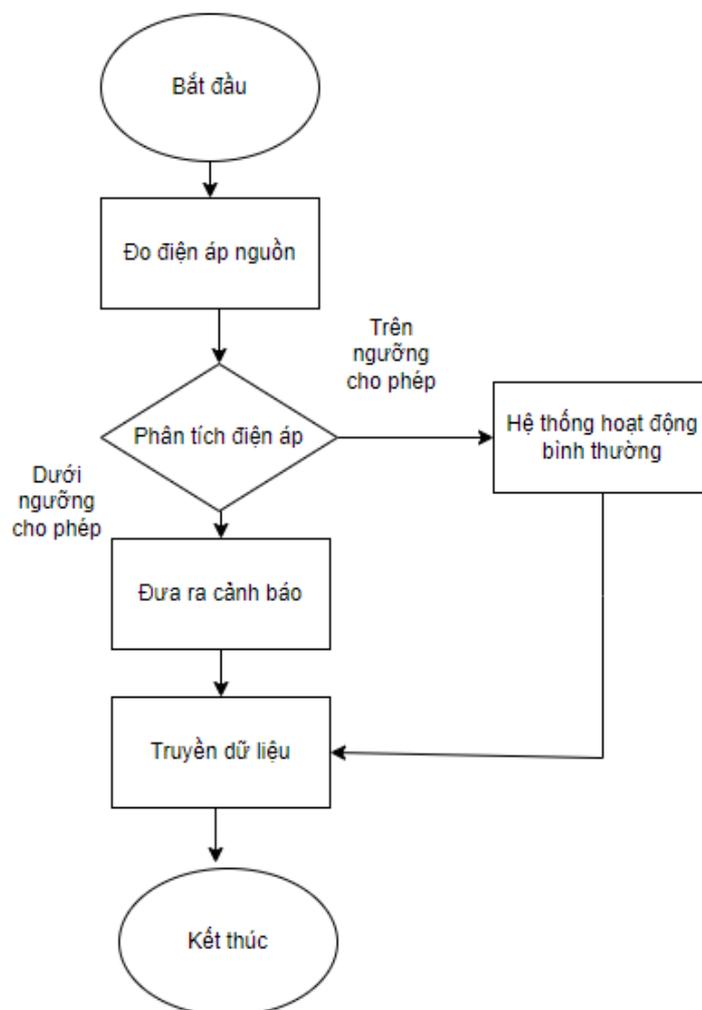
Hình 3.3: Xử lý sự kiện từ cảm biến và RTC

Khi nhận tin nhắn SMS từ users gửi tới module truyền thông, module này sẽ đánh thức MCU từ chế độ TKNL để đọc và xử lý tin nhắn, sau đó quay trở lại chế độ TKNL khi hoàn thành xong tác vụ (Hình 3.4).



Hình 3.4: Xử lý tin nhắn SMS từ users

LOKA Plus phát triển tính năng giám sát điện áp của nguồn cấp (Hình 3.5). Nếu điện áp bị suy giảm có thể gây treo hoặc dừng hệ thống đột ngột, làm mất dữ liệu đã quan trắc được, gây hư hỏng và giảm tuổi thọ của các linh kiện điện tử. Khi tới chu kỳ hoạt động, hệ thống thực hiện việc đo điện áp của nguồn cấp nhằm xác định trạng thái của nguồn điện. Nếu điện áp trên ngưỡng cho phép, hệ thống vẫn sẽ hoạt động bình thường và thực hiện truyền dữ liệu về trạng thái pin về cho vi điều khiển để tiến hành gửi về server thông qua module truyền thông. Trường hợp điện áp nằm dưới ngưỡng cho phép, hệ thống sẽ đưa ra cảnh báo về tình trạng điện áp thấp có nguy cơ gây ảnh hưởng đến hoạt động của thiết bị, vi điều khiển tiếp nhận cảnh báo này, đọc tình trạng pin và gửi về server để đưa ra các giải pháp xử lý.



Hình 3.5: Quy trình giám sát điện áp nguồn

Chu kỳ nhiệm vụ kép D được tính bằng thương của thời gian thiết bị ở chế độ Run Mode (t_{ACT}) chia cho tổng thời gian trong chu kỳ (t_{cycle}), được biểu diễn bởi công thức (3) sau:

$$D (\%) = \frac{t_{ACT}}{t_{cycle}} \times 100\% \quad (3)$$

Với: $t_{cycle} = t_{ACT} + t_{SLP}$ (4)

Mối quan hệ giữa công suất (P), dòng điện (I) và điện áp (V) với năng lượng tiêu thụ E trong một khoảng thời gian T được biểu diễn ở Công thức (5):

$$E = \int_0^T P(t)dt = V \int_0^T I(t)dt \quad (5)$$

Công suất tiêu thụ trung bình của một thiết bị phụ thuộc vào công suất tiêu thụ ở trạng thái hoạt động (ACT) và trạng thái TKNL (SLP):

$$P_{avg} = \frac{P_{ACT} \times T_{ACT} + P_{SLP} \times T_{SLP}}{T_{cycle}} \quad (6)$$

Thay (3) vào công thức (6), ta được: $P_{avg} = P_{ACT} \times D + P_{SLP} \times (1 - D)$ (7)

Trong đó:

P_{ACT} : Công suất khi thiết bị ở trạng thái hoạt động (truyền, nhận, xử lý và lưu dữ liệu).

P_{SLP} : Công suất khi thiết bị ở trạng thái TKNL

Từ công thức (7) ta cũng suy ra được công thức tính dòng trung bình:

$$I_{avg} = I_{ACT} \times D + I_{SLP} \times (1-D) \quad (8)$$

Công thức (9) tính năng lượng tiêu thụ cho một cycle:

$$E_{cycle} = I_{avg} \times U \times T_{cycle} = P_{avg} \times T_{cycle} \quad (9)$$

Thay (7) vào công thức (9), ta được:

$$E_{cycle} = (P_{ACT} \times D + P_{SLP} \times (1 - D)) \times T_{cycle} \quad (10)$$

Thời gian hoạt động của một thiết bị IoT thường được giới hạn bởi dung lượng pin ban đầu. Được ước tính bằng cách chia tổng năng lượng ban đầu của pin cho công suất tiêu thụ trung bình theo công thức (11) với C_{bat} là dung lượng pin (đơn vị mAH).

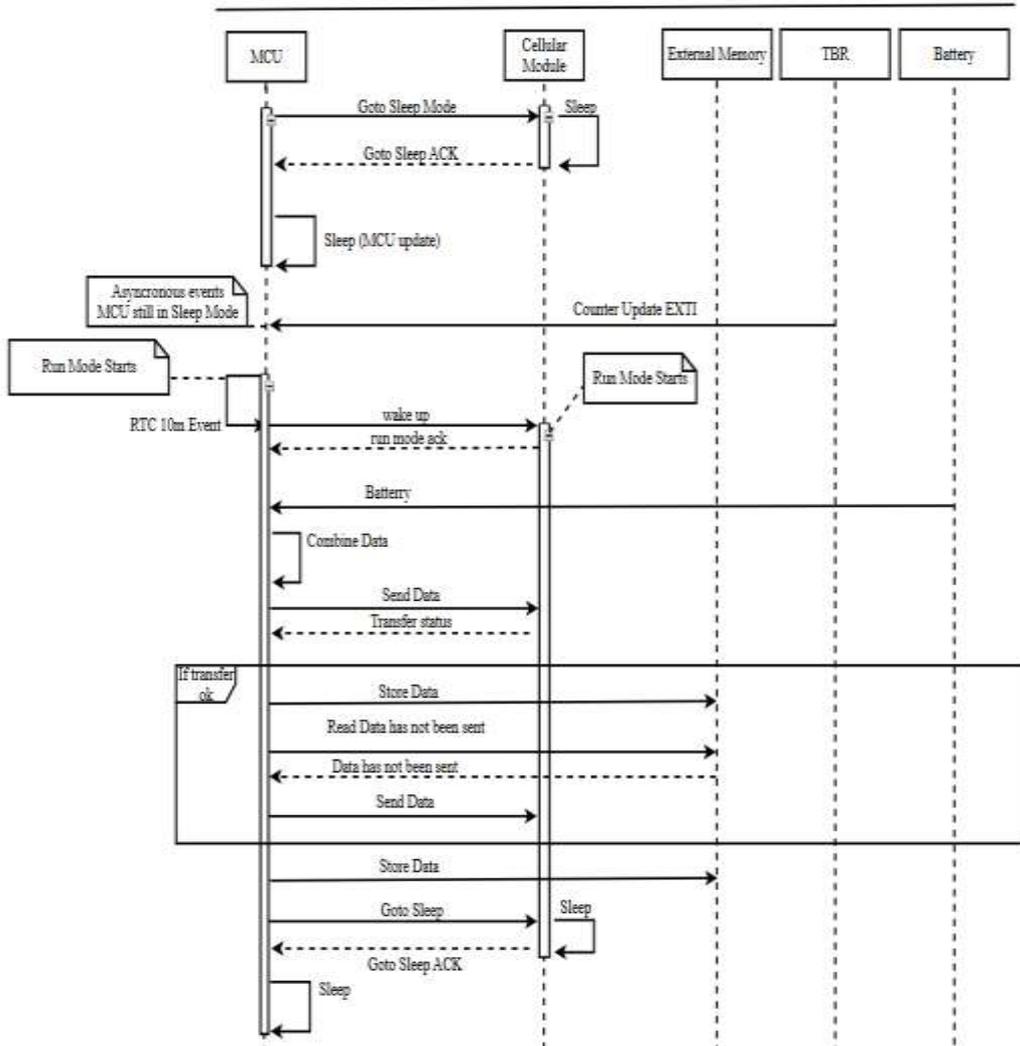
$$L = \frac{E_{thiết\ bi}}{E_{cycle}} = \frac{C_{bat} \times V}{P_{avg} \times t_{cycle}} \quad (11)$$

Từ công thức (7) và (11), có thể thấy rằng việc giảm D sẽ giảm đáng kể công suất tiêu thụ trung bình P_{avg} vì $P_{SLP} \ll P_{ACT}$ và do đó tăng thời gian hoạt động L của thiết bị. Đây là lý do chính khiến việc áp dụng cơ chế Dual Duty Cycling của LOKA sẽ làm giảm năng lượng tiêu thụ trong WSN.

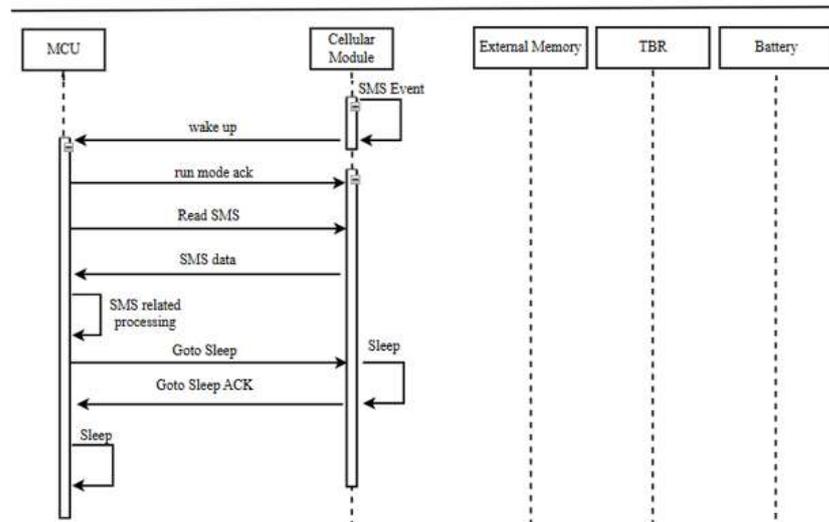
Tuy nhiên, việc giảm mạnh D cũng có mặt hạn chế là làm tăng độ trễ trong việc truyền dữ liệu, vì khi một thiết bị gửi có thể phải chờ cho đến khi thiết bị nhận chuyển sang trạng thái hoạt động để có thể giao tiếp. Do đó, việc chọn giá trị D tối ưu là một sự đánh đổi giữa TKNL và hiệu năng mạng. Vấn đề này sẽ được trình bày và làm rõ ở những phần tiếp theo.

3.2. Thiết kế thuật toán

Trình tự thuật toán được chia làm 2 trường hợp: xử lý sự kiện định kỳ theo chu kỳ đã được lập lịch trước, xử lý sự kiện bất đồng bộ từ cảm biến (Hình 3.6) và xử lý tin nhắn SMS từ users (Hình 3.7).



Hình 3.6: Trường hợp xử lý sự kiện định kỳ theo RTC và cảm biến mưa



Hình 3.7: Trường hợp xử lý tin nhắn SMS từ users

Khi thiết bị được khởi động, vi điều khiển thực hiện quá trình khởi tạo toàn bộ hệ thống bao gồm các thành phần ngoại vi như cảm biến đo mưa, bộ định thời thời gian

thực RTC, các cổng giao tiếp UART, I2C, GPIO và thiết lập kênh giao tiếp với module truyền thông. Đồng thời, các trình phục vụ ngắt (IRQs) cũng được thiết lập và gán mức ưu tiên, bao gồm: RTC để đánh thức MCU theo chu kỳ hoạt động định kỳ phục vụ việc tổng hợp và truyền dữ liệu; dữ liệu từ cảm biến khi có hiện tượng mưa xảy ra; tin nhắn SMS từ users; cảnh báo pin yếu hoặc các sự kiện khẩn cấp khác.

Sau khi hoàn tất quá trình khởi tạo, hệ thống bước vào vòng lặp hoạt động chính. Hệ thống chuyển module truyền thông và MCU vào chế độ TKNL khi không có tác vụ cần thực hiện và chờ sự kiện kích hoạt hoặc chu kỳ định thời tiếp theo. Việc này giúp giảm tiêu thụ năng lượng nền của thiết bị.

Trong trạng thái TKNL, cảm biến đo mưa vẫn liên tục hoạt động để ghi nhận dữ liệu lượng mưa. Khi mưa xuất hiện, nước mưa được thu qua phễu và dẫn vào gầu đo. Khi thể tích nước đạt tới ngưỡng định mức V_t (ở đây là 0.2mm) [23], MCU thoát khỏi chế độ TKNL và xử lý thông qua hàm phục vụ ngắt (ISR), cập nhật bộ đếm xung, mỗi xung tương ứng với một lượng mưa nhất định (mm) rồi lập tức quay trở lại trạng thái TKNL. Dữ liệu về số xung mưa được lưu tạm trong bộ nhớ của vi điều khiển để phục vụ cho việc tổng hợp và truyền dữ liệu khi tới chu kỳ gửi đã định trước hoặc khi có yêu cầu từ server.

Khi đến chu kỳ định sẵn (10 phút), RTC đánh thức vi điều khiển chuyển sang chế độ hoạt động Run Mode. MCU tiến hành xử lý dữ liệu và tính toán lượng mưa mà cảm biến đã ghi nhận trong chu kỳ dựa trên số xung đã đếm được trong khoảng thời gian lấy mẫu bằng công thức (12) và (13), cụ thể:

$$\text{Tổng lượng mưa đo được (mm):} \quad R = N * V_t \quad (12)$$

$$\text{Cường độ lượng mưa trong một khoảng thời gian (mm/h):} \quad O = \frac{R}{T} \quad (13)$$

Trong đó: N là số xung mà cảm biến đo mưa đo được (xung)

V_t là hệ số chuyển đổi lượng mưa (mm/xung)

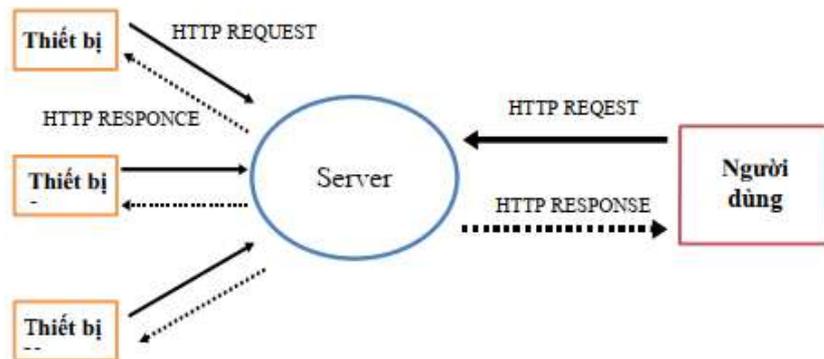
T là thời gian đo (giờ).

Sau khi hoàn tất tính toán, MCU đánh thức module truyền thông, chờ module xác nhận sẵn sàng, rồi gửi dữ liệu quan trắc bao gồm lượng mưa và tình trạng điện áp nguồn. Các dữ liệu này được gộp và truyền trong cùng một phiên kết nối nhằm giảm số lần khởi tạo truyền thông, từ đó TKNL. Sau khi hoàn tất việc truyền dữ liệu của chu kỳ hiện tại, vi điều khiển tiếp tục kiểm tra bộ nhớ ngoài để đọc lại các dữ liệu từ các chu kỳ trước đó chưa được gửi hoặc gửi không thành công do lỗi mạng. Nếu có, các dữ liệu này sẽ được gửi lại. Khi quá trình truyền kết thúc và được xác nhận thành công (ACK) từ phía máy chủ, toàn bộ dữ liệu sẽ được lưu vào bộ nhớ ngoài để phục vụ mục đích lưu trữ lâu dài và truy xuất lịch sử khi cần thiết. Ngược lại, nếu quá trình truyền dữ liệu không thành công do lỗi mạng, gói dữ liệu bị lỗi sẽ được lưu lại trong bộ nhớ ngoài và được gửi lại trong các chu kỳ kế tiếp. Cơ chế này giúp đảm bảo tính toàn vẹn và liên tục của chuỗi dữ liệu ngay cả khi kết nối mạng bị gián đoạn tạm thời.

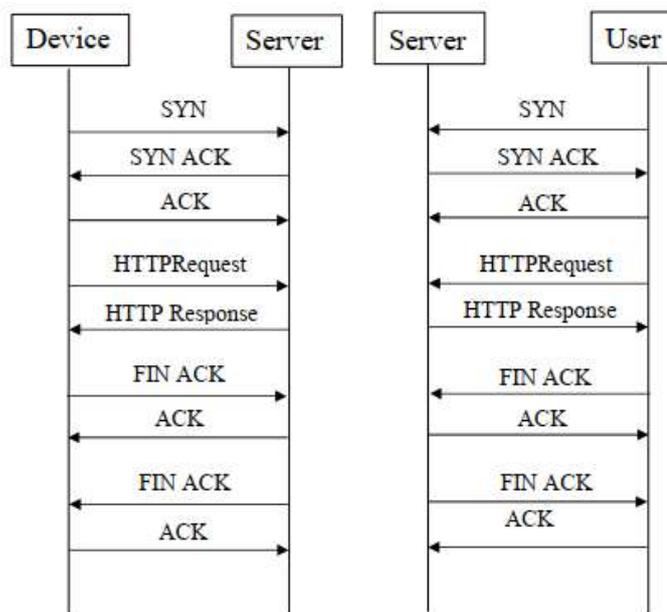
Khi toàn bộ quá trình xử lý, truyền và lưu trữ dữ liệu hoàn tất, vi điều khiển gửi tín hiệu yêu cầu module truyền thông quay trở lại chế độ TKNL, bản thân MCU cũng chuyển về trạng thái TKNL, kết thúc chu kỳ hoạt động và chuẩn bị cho chu kỳ tiếp theo.

Ngoài chu trình hoạt động định kỳ, thuật toán cũng xử lý các sự kiện bất đồng bộ từ server. Khi nhận được tin nhắn SMS, module SIM được đánh thức từ Sleep Mode, module này sẽ phát tín hiệu đánh thức MCU để đọc, xử lý và phản hồi tin nhắn trên, sau đó thiết bị quay trở lại trạng thái LPM Mode để TKNL.

Dữ liệu sau khi đã được thiết bị xử lý xong sẽ gửi lên server, người dùng kết nối đến cơ sở dữ liệu bằng giao thức HTTP. Mô hình sử dụng giao thức HTTP được mô tả như Hình 3.8 và biểu đồ tuần tự thể hiện trong Hình 3.9.



Hình 3.8: Mô hình hệ thống IoT sử dụng HTTP [22]



Hình 3.9: Trình tự giao tiếp trên HTTP [22]

Nhờ cấu trúc vận hành định kỳ theo chu kỳ hoạt động song song với cơ chế xử lý sự kiện, LOKA Plus vừa đảm bảo duy trì khả năng truyền dữ liệu ổn định, vừa đạt hiệu quả tối ưu về năng lượng cho các trạm quan trắc KTTV hoạt động, đặc biệt trong những điều kiện thời tiết khó khăn, thiên tai và tại các khu vực địa lý xa xôi.

Mã giả của Thuật toán LOKA Plus được đề xuất ở Bảng 3.2

Algorithm	
1. function Sleep_System()	.Đưa toàn bộ hệ thống vào chế độ TKNL, nhưng vẫn duy trì các ngắt hoạt động
2. Order CellularModule to Sleep	.Gửi lệnh AT command cho SIM chuyển sang chế độ TKNL
3. Disable_Unused_Peripherals()	.Tắt các ngoại vi không cần thiết
4. Set MCU to LPM	.Đưa MCU vào chế độ TKNL (WFI), vẫn duy trì hoạt động của RTC và EXTI từ cảm biến
5. return	
6. function wakeup_System()	.Đánh thức hệ thống để xử lý tác vụ định kỳ hoặc sự kiện
7. PowerOn_MCU_Peripherals()	.Kích hoạt lại các ngoại vi và bộ nhớ SD
8. Order CellularModule to Wake Up	.Gửi lệnh AT command để đánh thức SIM trở lại chế độ hoạt động
9. return	
10. procedure MAIN	.Chương trình chính điều khiển hệ thống
11. Initialize all peripherals and IRQs	.Khởi tạo cảm biến, UART, RTC, GPIO và các ngắt
12. LOOP	.Vòng lặp chính, duy trì hoạt động liên tục của thiết bị
13. sleep_System()	.Đưa hệ thống vào chế độ TKNL, chờ RTC hoặc sự kiện
14. //Code below executes only when MCU wakes up by IRQ	.MCU chỉ thức dậy khi RTC hoặc ngắt ngoài (EXTI/SMS/LOW_BATT) kích hoạt
15. wakeup_System()	.Đánh thức toàn hệ thống để xử lý nhiệm vụ
16. Read all Sensor Data	.Đọc dữ liệu từ cảm biến
17. Combine Data Packet	.Gộp dữ liệu thành gói tin hoàn chỉnh
18. UART Send Data Packet	.Gửi dữ liệu qua module SIM bằng UART
19. Wait for Transfer Status (OK / FAIL)	.Chờ phản hồi từ module LTE hoặc server
20. IF Transfer OK THEN	
21. Read Buffered Data (if any)	.Đọc dữ liệu cũ còn tồn trong bộ đệm (nếu có)
22. UART Send Buffered Data	.Gửi nốt dữ liệu cũ lên server
23. ENDIF	
24. Store Data	.Lưu dữ liệu hiện tại vào thẻ nhớ SD
25. END LOOP	.Kết thúc chu kỳ và quay lại bước 10
26. Procedure EXTI_Callback (Rain Event)	.Xử lý ngắt bất đồng bộ từ cảm biến mưa
27. Sensor_counter_update	.Tăng bộ đếm mưa khi nhận được xung từ cảm biến
28. Store Rain Data to Buffer	.Lưu tạm dữ liệu lượng mưa vào bộ nhớ đệm
29. return	.MCU trở lại LPM mode ngay sau khi xử lý xung
30. Procedure SMS_Callback (Async Event)	.Xử lý ngắt bất đồng bộ khi có tin nhắn điều khiển từ users
31. Wake up MCU to Read SMS	.Đánh thức MCU, kích hoạt UART đọc tin nhắn
32. Perform SMS related processing	.Thực thi lệnh điều khiển: tình trạng hệ thống, reset, ...
33. sleep_System()	.Sau khi xử lý xong, đưa hệ thống về chế độ TKNL trở lại
34. return	

35. Procedure LOWBATT Callback (Async Event)	.pin yếu
36. Wake up MCU	.Đánh thức hệ thống
37. Send Low Battery Alert	.Gửi cảnh báo pin yếu về server
38. sleep_System()	.Quay lại chế độ TKNL
39. return	

Bảng 3.2: Mã giả của thuật toán LOKA Plus

Trình tự hoạt động của thuật toán được mô tả thông qua mã giả trong Bảng 3.2 gồm ba nhóm chức năng chính là (1) khởi tạo và đưa hệ thống vào chế độ TKNL, (2) thực hiện chu kỳ đo, xử lý và truyền dữ liệu, và (3) xử lý các sự kiện bất đồng bộ (async events).

Giai đoạn (1), thuật toán bắt đầu bằng việc gọi hàm Sleep_System() (dòng 1–5) để đưa toàn bộ hệ thống vào trạng TKNL. Trong quá trình này, MCU gửi lệnh AT tới Cellular module yêu cầu chuyển sang chế độ TKNL (dòng 2). Các ngoại vi không cần thiết như đèn được vô hiệu hóa thông qua lệnh “Disable_Unused_Peripherals()” (dòng 3), giúp giảm thiểu tiêu thụ điện năng trong giai đoạn chờ. Sau đó, lệnh “Set MCU to LPM Mode” (dòng 4) được thực thi để đưa MCU vào chế độ TKNL nhưng vẫn duy trì hoạt động của RTC và ngắt ngoài từ cảm biến mưa. Việc này đảm bảo rằng MCU vẫn có thể được đánh thức đúng thời điểm hoặc khi có tín hiệu mưa được ghi nhận.

Giai đoạn (2), khi đến chu kỳ hoạt động do RTC kích hoạt, hàm wakeup_System() (dòng 6–9) được gọi để khởi động lại toàn bộ hệ thống. Các ngoại vi cần thiết và bộ nhớ ngoài SD được kích hoạt trở lại thông qua lệnh “PowerOn_MCU_Peripherals()” (dòng 7). Sau đó, MCU gửi lệnh AT để đánh thức module SIM khỏi chế độ TKNL, cho phép module sẵn sàng thực hiện việc truyền dữ liệu (dòng 8).

Quá trình điều khiển chính của hệ thống được thể hiện trong hàm MAIN (dòng 10–25). Sau khi khởi tạo tất cả ngoại vi và các sự kiện cần thiết bằng lệnh Initialize all peripherals and IRQs (dòng 11), hệ thống bước vào vòng lặp chính (LOOP, dòng 12). Trong mỗi chu kỳ, hệ thống được đưa vào chế độ TKNL (dòng 13) và chỉ thức dậy khi có RTC hoặc sự kiện bất đồng bộ xảy ra (dòng 14). Khi được đánh thức, hệ thống thực hiện chuỗi tác vụ đo, xử lý và truyền dữ liệu. Cụ thể, cảm biến được đọc bằng lệnh “Read all Sensor Data” (dòng 16) để thu thập lượng mưa từ cảm biến mưa, điện áp pin và các thông số khác. Dữ liệu sau đó được gộp thành một gói tin hoàn chỉnh (dòng 17). Gói dữ liệu này được truyền qua module truyền thông sử dụng giao thức UART (dòng 18) và chờ hệ thống phản hồi từ server hoặc module (dòng 19).

Nếu việc truyền dữ liệu thành công (Transfer OK), vi điều khiển tiến hành đọc dữ liệu còn lại trong bộ nhớ ngoài (dòng 21) và gửi lại các gói dữ liệu chưa được truyền trước đó (dòng 22). Tất cả dữ liệu mới hoặc cũ đều được lưu trữ lại trong bộ nhớ ngoài SD để đảm bảo tính toàn vẹn (dòng 24). Sau khi hoàn thành chu kỳ, hệ thống quay lại vòng lặp chính và tiếp tục ở trạng TKNL chờ chu kỳ kế tiếp.

Giai đoạn (3), ngoài chu kỳ đo định kỳ, thuật toán LOKA Plus được thiết kế để phản ứng nhanh với các sự kiện khác nhằm duy trì độ tin cậy và khả năng phản hồi thời gian thực của hệ thống như:

Dữ liệu từ cảm biến mưa (EXTI_Callback): Khi có xung tín hiệu từ cảm biến mưa (dòng 26–29) MCU thức dậy tạm thời để cập nhật bộ đếm lượng mưa (dòng 27) và lưu

trữ dữ liệu tạm thời vào bộ nhớ (dòng 28). Quá trình này được tối ưu hóa để thực thi trong thời gian rất ngắn, sau đó MCU ngay lập tức quay trở lại chế độ TKNL (dòng 29).

Tin nhắn SMS (SMS_Callback): Khi module SIM nhận được tin nhắn điều khiển từ người dùng (dòng 30–34), MCU được đánh thức (dòng 31) và kích hoạt giao tiếp UART để đọc nội dung tin nhắn. Sau đó, hệ thống thực thi lệnh tương ứng (dòng 32). Sau khi xử lý xong, hệ thống được đưa trở lại trạng thái TKNL (dòng 33).

Cảnh báo pin yếu (LOW_BATT_Callback): Khi điện áp nguồn giảm dưới ngưỡng an toàn, cảnh báo pin yếu được kích hoạt (dòng 35–39). MCU được đánh thức (dòng 36) để đo và xác nhận trạng thái pin, sau đó gửi gói cảnh báo về server (dòng 37). Sau khi hoàn tất quá trình này, hệ thống nhanh chóng trở lại chế độ TKNL (dòng 38).

3.3. Tổng kết Chương III

Chương III đã tập trung phân tích một cách chi tiết về thuật toán LOKA Plus, một giải pháp được thiết kế nhằm tối ưu hóa năng lượng cho thiết bị quan trắc KTTV quy mô lớn. Chương đã đi sâu vào phân tích các yêu cầu cốt lõi của LOKA Plus gồm: việc áp dụng cơ chế Dual Duty Cycling, phương pháp gửi dữ liệu định kỳ kết hợp với cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên để cân bằng giữa hiệu quả năng lượng và độ tin cậy của hệ thống; kỹ thuật tập hợp dữ liệu để giảm thiểu số lần truyền thông và giám sát điện áp nguồn.

Cuối cùng, để minh họa cho việc triển khai, chương đã trình bày chi tiết thiết kế của thuật toán thông qua các biểu đồ tuần tự và mã giả, làm rõ luồng hoạt động của hệ thống trong các kịch bản khác nhau. Toàn bộ nội dung của chương tạo thành một cơ sở lý thuyết và thiết kế vững chắc, là tiền đề cho việc triển khai và đánh giá hiệu quả thực nghiệm của thuật toán LOKA Plus sẽ được trình bày và phân tích ở chương tiếp theo.

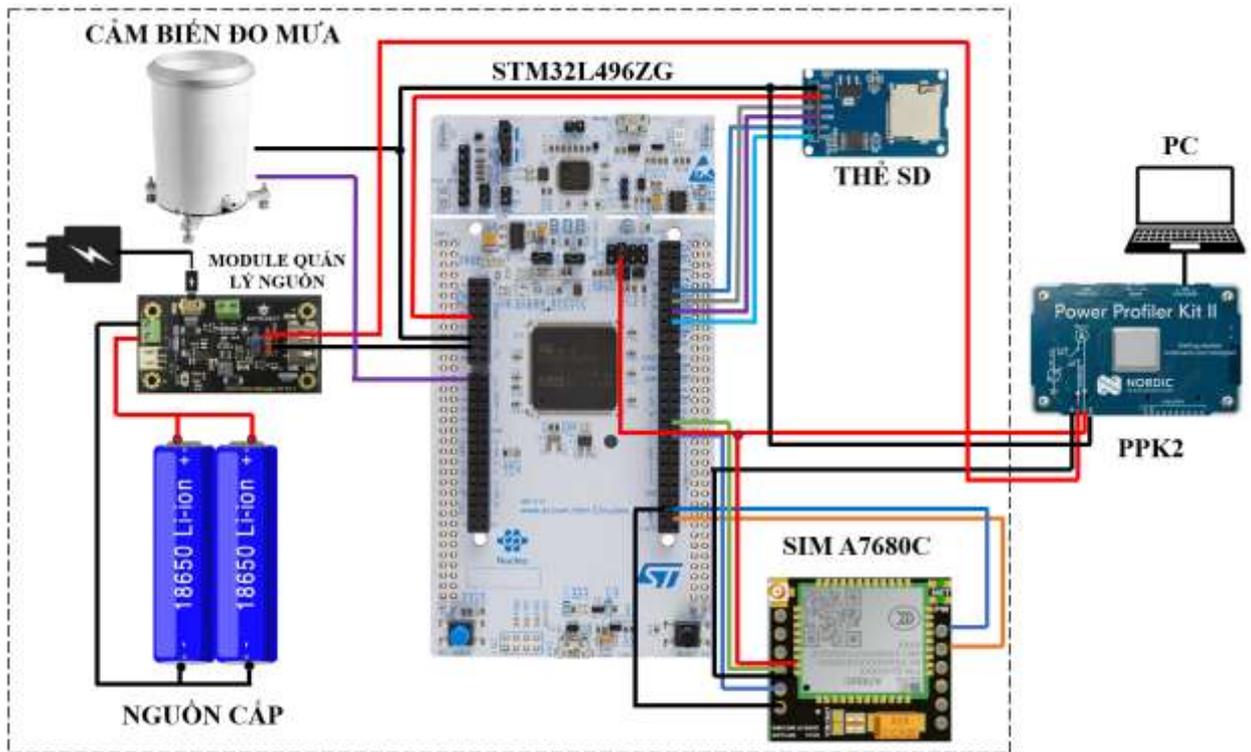
CHƯƠNG IV: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

4.1. Mục tiêu và phương pháp thực nghiệm

4.1.1. Mục tiêu

Chương IV tập trung vào việc đánh giá định lượng hiệu quả tối ưu năng lượng của thuật toán LOKA Plus thông qua so sánh với hai phương án điều khiển năng lượng khác khi sử dụng thuật toán LOKA và khi không sử dụng thuật toán tối ưu năng lượng.

Triển khai thực nghiệm đánh giá hiệu quả tối ưu năng lượng được thực hiện trên phần cứng nguyên mẫu thiết bị IoT quan trắc lượng mưa (Hình 4.1). Trong luận văn sử dụng thiết bị Power Profiler Kit II (PPK2) để đo công suất tiêu thụ theo các kịch bản khác nhau.



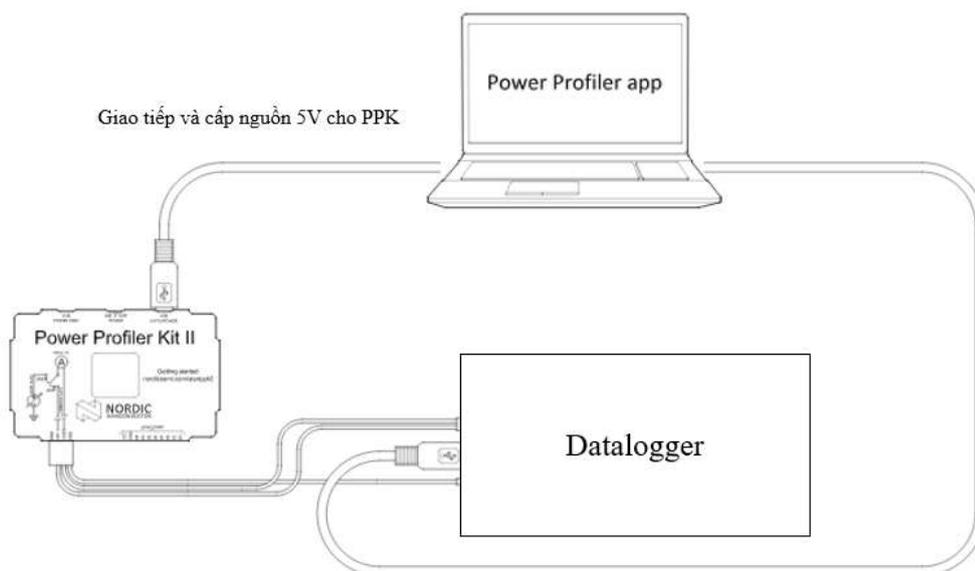
Hình 4.1: PPK2 đo dòng tiêu thụ trên thiết bị IoT quan trắc lượng mưa

Thành phần	Model	Thông số kỹ thuật
Vi điều khiển	STM32L496ZG (Stop 2)	Dòng ở các trạng thái: - Run Mode: 3.13 mA - Sleep Mode: 32 μ A/MHz - LPSleep: 51 μ A/MHz - Stop 0: 127 μ A - Stop 1: 11.8 μ A - Stop 2: 2.86 μ A - Standby: 0.42 μ A - Shutdown: 0.23 μ A
Module truyền thông	SIM A7680C (Sleep Mode)	Dòng ở trạng thái: - TKNL (Sleep Mode): 2.2 mA - Truyền nhận dữ liệu (TX/RX): 36 mA

Thành phần	Model	Thông số kỹ thuật
		- Trạng thái chờ (Idle): 12 mA
Cảm biến đo mưa	Dạng gầu lật	Đo lượng mưa với ngưỡng định mức V_t là 0.2mm
Nguồn cấp	Pin dự phòng	Gồm 2 viên Pin 18650 Lithium-ion 3400mAH mắc song song với điện áp là 3.7V

Bảng 4.1: Các thành phần phần cứng nguyên mẫu thực nghiệm

PPK2 là thiết bị đo dòng chuyên dụng cho thiết bị IoT và hệ thống nhúng tiêu thụ điện năng thấp với dải đo dòng điện rộng (từ 200nA đến 1A), tần số lấy mẫu và độ phân giải cao (100000 mẫu/giây, độ phân giải 100nA). PPK2 được cấu hình ở chế độ Ampe để thực hiện chức năng đo dòng điện do nguồn ngoài cấp cho thiết bị (Hình 4.2), cho phép ghi nhận chính xác năng lượng tiêu thụ của nguyên mẫu mà không bị ảnh hưởng bởi bộ điều áp bên trong của bộ kit. Dòng điện trung bình (I_{avg}) được ghi lại liên tục mỗi chu kỳ, kết hợp với điện áp U và thời gian t để tính năng lượng tiêu thụ chính xác của toàn hệ thống.



Hình 4.2: Sơ đồ kết nối PPK2 ở chế độ Ampe để

4.1.2. Kịch bản và phương pháp đo

Hai nhóm đánh giá được triển khai gồm:

- Mô phỏng tính toán tiêu thụ năng lượng dựa trên thông số kỹ thuật phần cứng thiết kế.
- Sử dụng Power Profiler Kit II để đo đạc thực nghiệm trên nguyên mẫu.

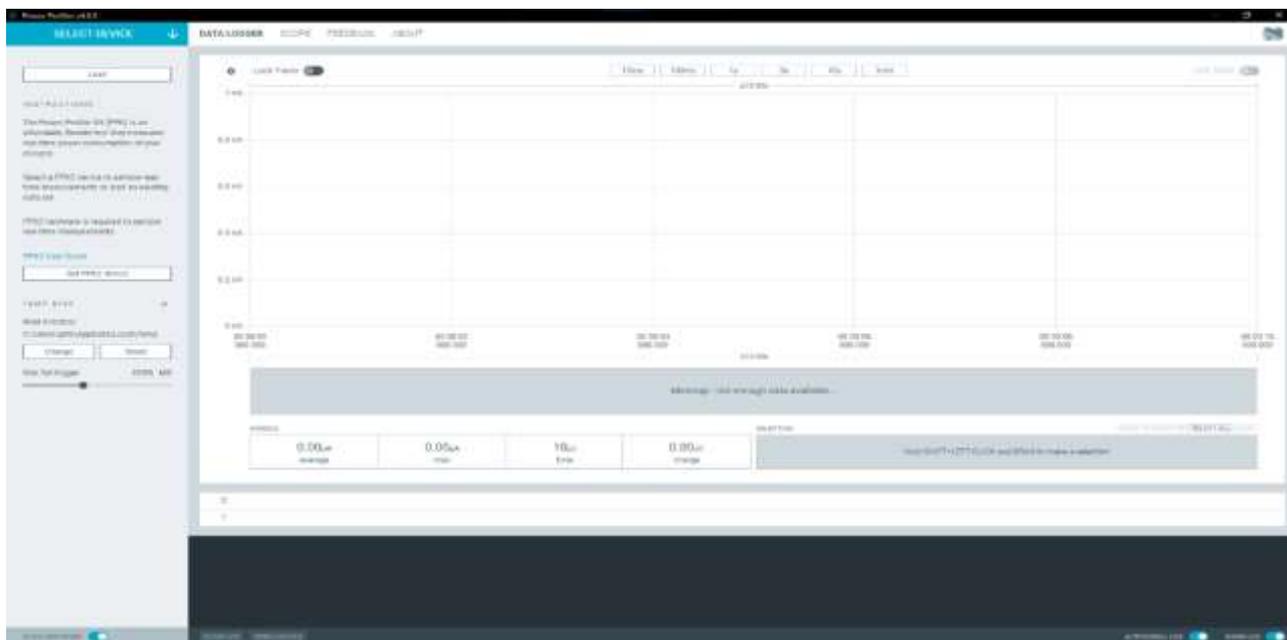
Mỗi phương án được tiến hành kiểm thử đánh giá dưới hai điều kiện vận hành khác nhau (Bảng 4.2).

Kịch bản	Điều kiện vận hành
Kịch bản 1	Trong điều kiện vận hành bình thường

Kịch bản 2	Trong điều kiện vận hành có mưa lớn (lượng mưa trên 30mm trong 1 giờ)
------------	---

Bảng 4.2: Các kịch bản đánh giá tối ưu năng lượng tiêu thụ

Dữ liệu các kịch bản được thu thập thông qua ứng dụng Power Profiler trong bộ công cụ nRF Connect for Desktop. Phần mềm này cho phép hiển thị biểu đồ dòng tiêu thụ theo thời gian thực, tự động tính toán dòng điện trung bình (Hình 4.3).



Hình 4.3: Giao diện phần mềm Power Profiler

Tiếp theo, Chương dựa trên các thông số kỹ thuật từ tài liệu của nhà sản xuất để thiết lập mô hình tính toán lý thuyết với mục đích ước tính các chỉ số về năng lượng tiêu thụ và thời gian hoạt động của thiết bị, qua đó đặt ra một cơ sở so sánh ban đầu. Các kết quả thực nghiệm, phân tích sau đó sẽ được trình bày chi tiết ở các phần sau, giúp xác nhận tính khả thi và hiệu quả TKNL của thuật toán LOKA Plus.

4.2. Tính toán

Nguồn pin dự phòng gồm 02 viên pin 18650 mắc song song với điện áp danh định là 3.7V và dung lượng pin là 3400 mAh.

Công thức tính năng lượng tổng của nguồn pin dự phòng:

$$E = C_{\text{bat}} \times V = 2 \times 3400 \times 3.7 = 25160 \text{ mWh} = 25.16 \text{ Wh (với } 1\text{Wh}=3600 \text{ J)}$$

$$E = 25.16 \times 3600 = 90576 \text{ J}$$

Căn cứ tài liệu datasheet, ta có: $I_{\text{LP MCU}} = 2.86 \mu\text{A} = 0.000286\text{mA}$, $I_{\text{SLPSIM}} = 2.2 \text{ mA}$, $I_{\text{ACTSIM}} = 36 \text{ mA}$, $I_{\text{idle}} = 12\text{mA}$, $I_{\text{IC nguồn}} = 0.8 \text{ mA}$, $I_{\text{ACTMCU}} = 3.13 \text{ mA}$, $I_{\text{SDcard}} = 1.6 \text{ mA}$, $t_{\text{wakeUpMCU}} = 8.2 \mu\text{s} = 8.2 \times 10^{-6}\text{s}$.

- Công suất hoạt động của thiết bị với điện áp 4.2V.

$$\begin{aligned} P_{\text{ACT}} &= I_{\text{ACT}} \times U = (I_{\text{ACTMCU}} + I_{\text{ACTSIM}} + I_{\text{IC nguồn}} + I_{\text{SDcard}}) \times U \\ &= (3.13 + 36 + 0.8 + 1.6) \times 4.2 = 174.42 \text{ mW}. \end{aligned}$$

4.2.1. Kịch bản 1 - Hoạt động định kỳ trong điều kiện bình thường

4.2.1.1. Không áp dụng LOKA Plus

Trong điều kiện bình thường, khi không áp dụng LOKA Plus, hệ thống hoạt động liên tục (MCU ở chế độ active và module SIM ở chế độ Idle) mà không vào chế độ TKNL ($t_{SLP} = 0$). Giả định thiết bị xử lý, truyền dữ liệu và lưu vào bộ nhớ trong vòng 15 giây ($t_{ACT} = 15$), thời gian còn lại thiết bị ở chế độ Idle ($t_{idle} = 585$) ta có thể tính được các giá trị:

- Thời gian một chu kỳ: $t_{cycle} = t_{ACT} + t_{idle} = 600$ (s)

- Chu kỳ hoạt động theo công thức (2): $D (\%) = \frac{t_{ACT}}{t_{cycle}} \times 100\% = \frac{15}{600} \times 100\% = 2.5\% = 0.025$

- Công suất hoạt động ở chế độ Idle:

$P_{idle} = I \times U = (I_{idle} + I_{MCUACT} + I_{IC nguồn} + I_{SDcard}) \times U = (12 + 3.13 + 0.8 + 1.6) \times 4.2 = 73.6$ mW

- Công suất tiêu thụ trung bình theo công thức (6):

$P_{avg} = P_{ACT} \times D + P_{idle} \times (1-D) = 174.42 \times 0.025 + 73.6 \times (1-0.025) = 76.12$ mW

- Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ hoạt động (10 phút):

$E_{cycle} = P_{avg} \times t_{cycle} = 76.12 \times 600 = 45672$ mW = 45.672 J

- Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (144 chu kỳ):

$E_{day} = E_{cycle} \times 144 = 45.672 \times 144 = 6576.77$ J

- Tuổi thọ của thiết bị: $L = \frac{E}{E_{day}} = \frac{90576}{6576.77} = 13.77$ ngày

4.2.1.2. Áp dụng LOKA Plus

Điều kiện vận hành bình thường trong chu kỳ hoạt động 10 phút, giả thiết thiết bị trong chế độ TKNL ($t_{SLP} = 585$ s) và hoạt động ($t_{ACT} = 15$ s) để xử lý và truyền dữ liệu, ta có thể tính được các giá trị:

- Thời gian một chu kỳ: $t_{cycle} = t_{ACT} + t_{SLP} = 600$ (s)

- Chu kỳ hoạt động: $D (\%) = \frac{t_{ACT}}{t_{cycle}} \times 100\% = \frac{15}{600} \times 100\% = 2.5\% = 0.025$

- Công suất tiêu thụ ở chế độ TKNL

$P_{SLP} = I_{SLP} \times U = (I_{LPMMCU} + I_{SLPSIM} + I_{IC nguồn} + I_{SDcard}) \times U$
 $= (0.000286 + 2.2 + 0.8 + 1.6) \times 4.2 = 19.32$ mW

- Công suất tiêu thụ trung bình theo công thức (6):

$P_{avg} = P_{ACT} \times D + P_{SLP} \times (1-D) = 174.42 \times 0.025 + 19.32 \times (1-0.025) = 23.2$ mW

- Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ hoạt động:

$E_{cycle} = P_{avg} \times t_{cycle} = 23.2 \times 600 = 13920$ mW = 13.92 J

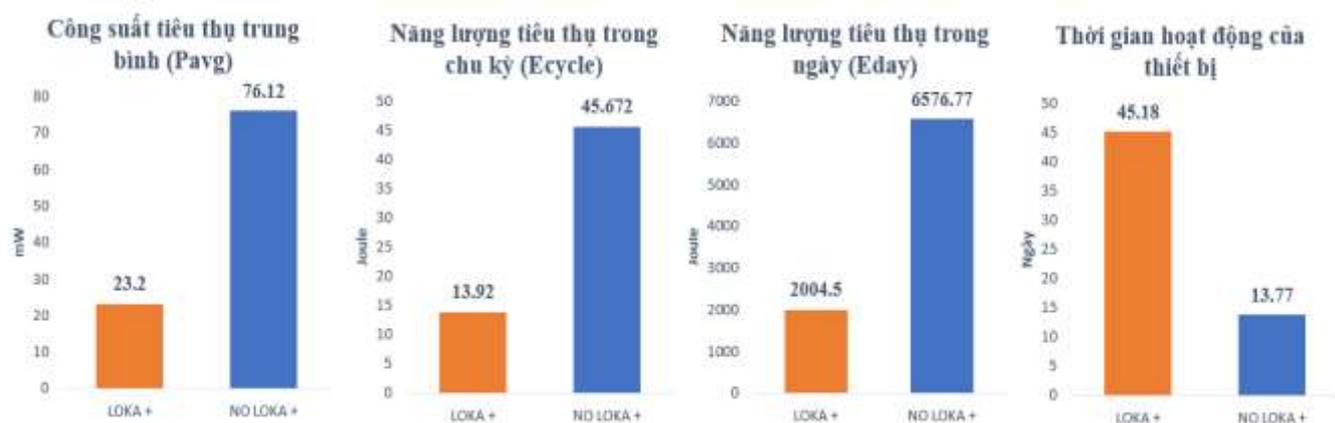
- Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (144 chu kỳ):

$$E_{\text{day}} = E_{\text{cycle}} \times 144 = 13.92 \times 144 = 2004.5 \text{ J}$$

$$\text{- Tuổi thọ của thiết bị: } L_{\text{LOKA+}} = \frac{E}{E_{\text{day}}} = \frac{90576}{2004.5} = 45.18 \text{ ngày}$$

Chỉ số	LOKA +	No LOKA+
Thời gian ở các trạng thái (t)	$t_{\text{ACT}}=15\text{s}, t_{\text{SLP}} = 585\text{s}$	$t_{\text{ACT}}=15\text{s}, t_{\text{idle}} = 585\text{s}$
Công suất tiêu thụ trung bình (P_{avg})	23.2 mW	76.12 mW
Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ (E_{cycle})	13.92 J	45.672 J
Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (E_{day})	2004.5 J	6576.77 J
Tuổi thọ của thiết bị (L)	45.18 ngày	13.77 ngày

Bảng 4.3: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 1



Hình 4.4: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 1

Dựa vào Bảng 4.3 và Hình 4.4, có thể thấy hiệu quả của thuật toán LOKA Plus trong việc tối ưu hóa năng lượng. Mặc dù cả hai trường hợp đều hoạt động với cùng một khoảng thời gian giống nhau, công suất tiêu thụ trung bình (P_{avg}) của thiết bị khi áp dụng LOKA Plus chỉ là 23.2 mW, thấp hơn đáng kể so với mức 76.12 mW của trường hợp không áp dụng. Điều này dẫn đến việc năng lượng tiêu thụ hàng ngày (E_{day}) giảm từ 6576.77 J xuống chỉ còn 2004.5 J. Kết quả là thời gian hoạt động của thiết bị đã được kéo dài từ 13.77 ngày lên 45.18 ngày, tương đương gấp 3.28 lần.

4.2.2. Kịch bản 2 - Hoạt động trong điều kiện vận hành có mưa lớn

4.2.2.1. Gửi dữ liệu ngay khi có mưa

Kịch bản này thể hiện hoạt động của hệ thống có dữ liệu từ cảm biến mưa. Cụ thể, thiết bị trong trạng thái TKNL khi không có tác vụ cần thực hiện và sẽ được đánh thức để gửi dữ liệu về máy chủ mỗi khi có mưa, đây là cơ chế đặc trưng của LOKA. Giả định có 30 dữ liệu lượng mưa từ cảm biến trong chu kỳ đo, các thông số tính toán cụ thể:

$$\text{- Thời gian một chu kỳ: } t_{\text{cycle}} = t_{\text{ACT}} + t_{\text{idle}} = 600 \text{ (s)}$$

Với $t_{\text{ACT}} = 30 \times 15 = 450\text{s}$ (tương đương với 30 lần gửi dữ liệu khi có mưa)

- Chu kỳ hoạt động theo công thức (2):

$$D (\%) = \frac{t_{ACT}}{t_{cycle}} \times 100\% = \frac{450}{600} \times 100\% = 75 \% = 0.75$$

- Công suất hoạt động của thiết bị: $P_{ACT} = 174.42 \text{ mW}$

- Công suất tiêu thụ ở chế độ TKNL: $P_{SLP} = 19.32 \text{ mW}$

- Công suất tiêu thụ trung bình theo công thức (6):

$$P_{avg} = P_{ACT} \times D + P_{SLP} \times (1-D) = 174.42 \times 0.75 + 19.32 \times (1-0.75) = 135.645 \text{ mW}$$

- Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ hoạt động:

$$E_{cycle} = P_{avg} \times t_{cycle} = 135.645 \times 600 = 81387 \text{ mW} = 81.387 \text{ J}$$

- Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (144 chu kỳ):

$$E_{day} = E_{cycle} \times 144 = 81.387 \times 144 = 11719.7 \text{ J}$$

- Tuổi thọ của thiết bị: $L_{LOKA} = \frac{E}{E_{day}} = \frac{90576}{11719.7} = 7.73 \text{ ngày}$

4.2.2.2. Áp dụng LOKA Plus

Kịch bản này áp dụng thuật toán LOKA Plus, mỗi khi có mưa, LOKA Plus chỉ đánh thức MCU để ghi nhận sự kiện, module SIM vẫn được duy trì ở chế độ TKNL. Toàn bộ dữ liệu mưa sẽ chỉ được gửi về máy chủ một lần duy nhất trong lần truyền dữ liệu định kỳ theo RTC ở cuối chu kỳ 10 phút.

- Thời gian một chu kỳ: $t_{cycle} = t_{ACT} + t_{idle} = 600 \text{ (s)}$

- Chu kỳ hoạt động: $D (\%) = \frac{t_{ACT}}{t_{cycle}} \times 100\% = \frac{15}{600} \times 100\% = 2.5 \% = 0.025$

- Chu kỳ hoạt động của vi điều khiển thức dậy xử lý (trong điều kiện mưa lớn) là:

$$D_{MCU} (\%) = \frac{t_{wakeupMCU}}{t_{cycle}} \times 100\% = \frac{30 \times 8.2 \times 10^{-6}}{600} \times 100\% = 4.1 \times 10^{-7}$$

- Công suất hoạt động của thiết bị: $P_{ACT} = 174.42 \text{ mW}$

- Công suất của MCU trong quá trình xử lý (process): $P_{MCU} = 3.13 \times 4.2 = 13.146 \text{ mW}$

- Công suất tiêu thụ ở chế độ TKNL: $P_{SLP} = 19.32 \text{ mW}$

- Công suất tiêu thụ trung bình theo công thức (6):

$$\begin{aligned} P_{avg} &= P_{ACT} \times D + P_{SLP} \times (1-D) + P_{MCU} \times D_{MCU} \\ &= 174.42 \times 0.025 + 19.32 \times (1-0.025) + 13.146 \times 4.1 \times 10^{-7} = 23.21 \text{ mW} \end{aligned}$$

- Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ hoạt động:

$$E_{cycle} = P_{avg} \times t_{cycle} = 23.21 \times 600 = 13926 \text{ mW} = 13.926 \text{ J}$$

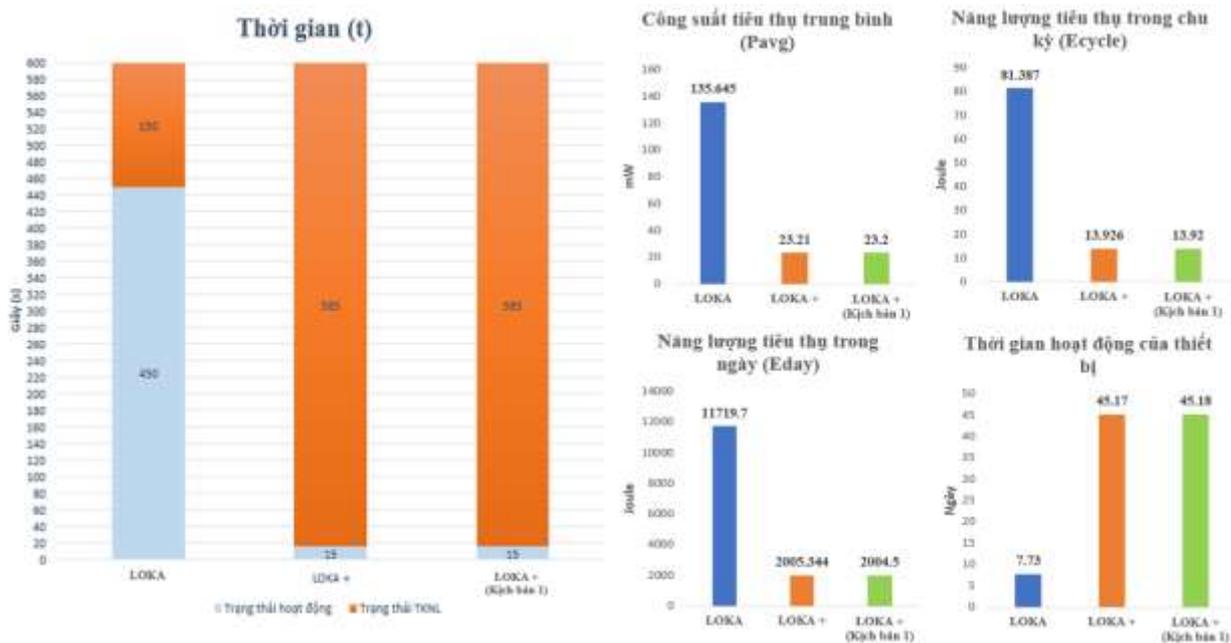
- Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (144 chu kỳ):

$$E_{day} = E_{cycle} \times 144 = 13.926 \times 144 = 2005.344 \text{ J}$$

- Tuổi thọ của thiết bị: $L_{LOKA+} = \frac{E}{E_{day}} = \frac{90576}{2005.344} = 45.17 \text{ ngày}$

Chỉ số	LOKA	LOKA +	LOKA + (Kịch bản 1)
Thời gian ở các trạng thái (t)	$t_{ACT} = 450s$ $t_{SLP} = 150s$	$t_{ACT} = 15s$ $t_{SLP} = 585s$	$t_{ACT} = 15s$ $t_{SLP} = 585s$
Công suất tiêu thụ trung bình (P_{avg})	135.645 mW	23.21 mW	23.2 mW
Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ (E_{cycle})	81.387 J	13.926 J	13.92 J
Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (E_{day})	11719.7 J	2005.344 J	2004.5 J
Thời gian hoạt động của thiết bị (L)	7.73 ngày	45.17 ngày	45.18 ngày

Bảng 4.4: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 2



Hình 4.5: So sánh các thông số dựa vào tính toán - Kịch bản 2

Dựa vào Bảng 4.4 và Hình 4.5, có thể thấy hiệu quả của thuật toán LOKA Plus so với LOKA trong điều kiện vận hành có mưa lớn. Mỗi khi ghi nhận dữ liệu từ cảm biến mưa trong chu kỳ, LOKA đánh thức toàn bộ thiết bị để gửi dữ liệu dẫn đến công suất tiêu thụ trung bình lên tới 135.645 mW. Trong khi đó, thuật toán LOKA Plus với cơ chế xử lý sự kiện thông minh, chỉ đánh thức MCU để xử lý mà không bật module truyền thông. Điều này giúp P_{avg} của LOKA Plus (23.21 mW) thấp hơn 82.8% so với LOKA. Kết quả là, trong cùng điều kiện mưa lớn, tuổi thọ của thiết bị đã được kéo dài từ 7.73 ngày lên 45.17 ngày, tương đương mức cải thiện gấp 5.84 lần.

Khi so sánh với LOKA Plus ở kịch bản 1, việc hoạt động trong điều kiện vận hành có mưa lớn không làm suy giảm năng lượng của hệ thống. Tuổi thọ thiết bị của LOKA Plus trong kịch bản mưa lớn (45.17 ngày) gần như tương đương với kịch bản không mưa (45.18 ngày), khẳng định hiệu quả TKNL của LOKA Plus trong điều kiện vận hành có mưa lớn.

Việc tính toán lý thuyết là cơ sở dự báo quan trọng về hiệu quả của thuật toán LOKA Plus. Tuy nhiên, tính toán này dựa trên thông số lý tưởng do nhà sản xuất cung cấp. Trong thực tế, kết quả đo đạc trên nguyên mẫu phần cứng dự kiến sẽ có những sai khác nhất định so với mô hình lý thuyết này.

Các biểu đồ về kết quả dòng điện tiêu thụ đo được cho nguyên mẫu trong các kịch bản được trình bày ở phần tiếp theo. Thông qua việc phân tích và so sánh trực quan các biểu đồ, hiệu quả của thuật toán LOKA Plus sẽ được chứng minh rõ ràng hơn.

4.3. Kết quả đo đạc thực nghiệm

4.3.1. Kết quả đo dòng tiêu thụ theo các kịch bản

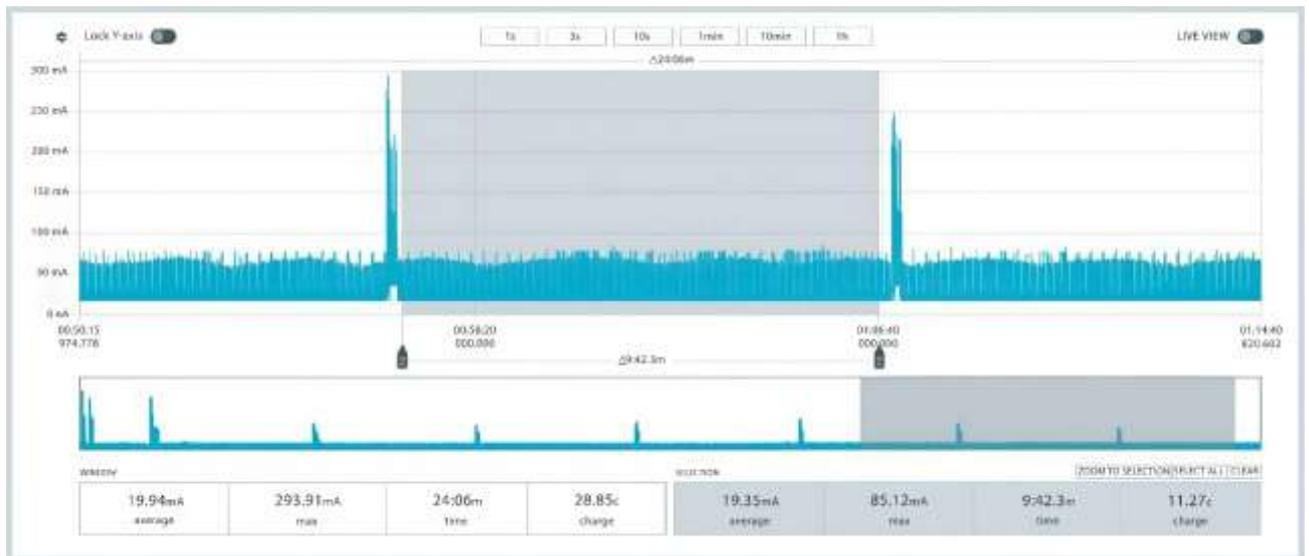
Để kiểm chứng cho các tính toán lý thuyết đã trình bày ở mục 4.2, các kịch bản thực nghiệm được tiến hành đo đạc và so sánh dòng tiêu thụ trên nguyên mẫu phần cứng.

4.3.1.1. Kịch bản 1

Kịch bản đo dòng hoạt động của thiết bị trong điều kiện bình thường, chỉ thực hiện tác vụ gửi dữ liệu định kỳ mỗi 10 phút mà không có bất kỳ sự kiện bất đồng bộ nào khác từ cảm biến hay người dùng.

a. Trường hợp không áp dụng LOKA Plus

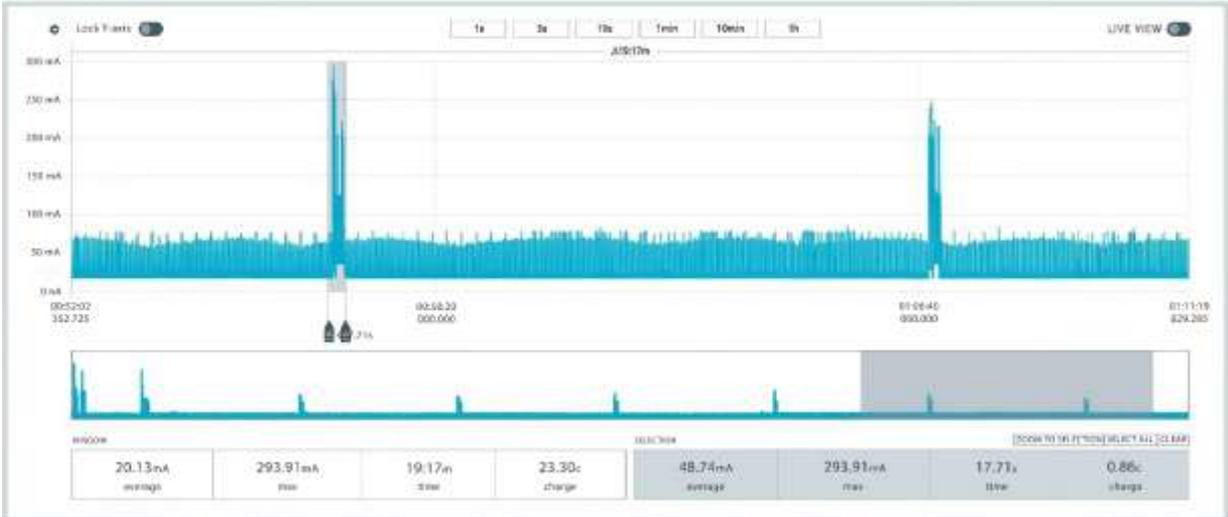
Biểu đồ tại Hình 4.6 đặc trưng dòng điện tiêu thụ của nguyên mẫu thiết bị trong giai đoạn chờ giữa hai chu kỳ truyền dữ liệu, khi không áp dụng thuật toán LOKA Plus.



Hình 4.6: Dòng trung bình giai đoạn chờ – Trường hợp không áp dụng LOKA Plus

Kết quả cho thấy dòng điện tiêu thụ trung bình của hệ thống (I_{avg}) là 19,35 mA trong suốt thời gian khoảng 9 phút 42,3 giây (tương đương 582,3 giây).

Biểu đồ tại Hình 4.7 mô tả đặc trưng dòng điện tiêu thụ của thiết bị giai đoạn hoạt động khi không áp dụng thuật toán LOKA Plus. Kết quả cho thấy trong khoảng thời gian hoạt động kéo dài 17,71 giây, thiết bị tiêu thụ dòng điện trung bình 48,74 mA.

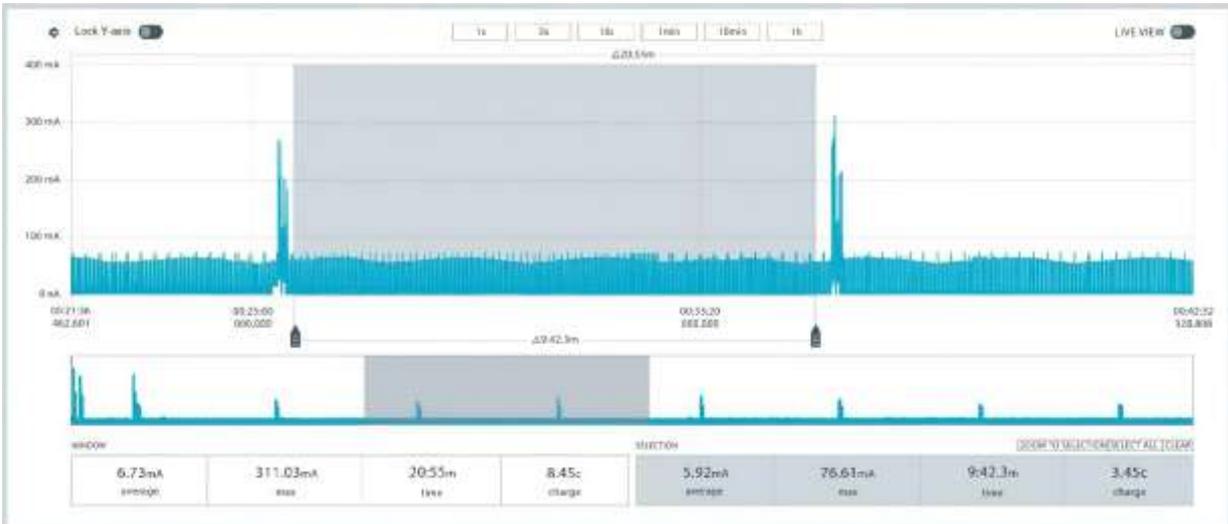


Hình 4.7: Dòng trung bình giai đoạn hoạt động – Trường hợp không áp dụng LOKA Plus

Kết quả này phản ánh rõ mức tiêu thụ năng lượng của thiết bị trong giai đoạn hoạt động, nơi các thành phần phần cứng được kích hoạt nhằm thực hiện các tác vụ xử lý và truyền nhận dữ liệu.

b. Trường hợp áp dụng LOKA Plus

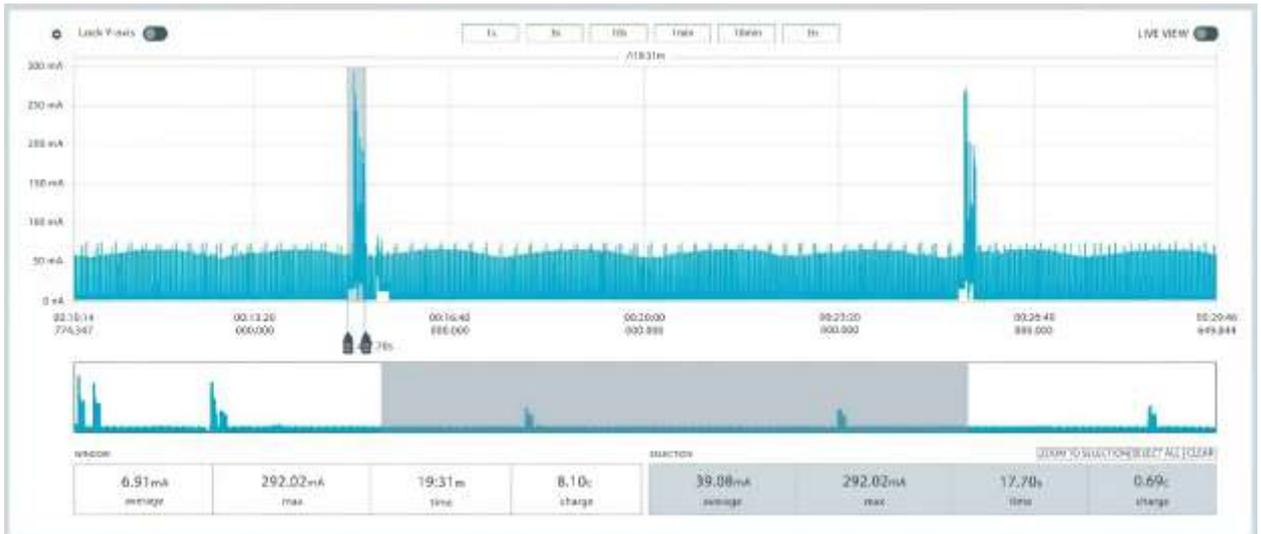
Khi áp dụng thuật toán LOKA Plus, kết quả đo được thể hiện tại Hình 4.8.



Hình 4.8: Dòng trung bình giai đoạn chờ - Trường hợp áp dụng LOKA Plus

Trong giai đoạn chờ giữa hai chu kỳ truyền dữ liệu, dòng điện trung bình là 5,92 mA trong thời gian đo là 9 phút 42,3 giây (tương đương 582,3 giây).

Biểu đồ tại Hình 4.9 mô tả dòng điện tiêu thụ của thiết bị trong giai đoạn hoạt động của nguyên mẫu khi áp dụng thuật toán LOKA Plus.



Hình 4.9: Dòng trung bình giai đoạn hoạt động - Trường hợp áp dụng LOKA Plus

Kết quả đo cho thấy dòng điện trung bình là 39,08 mA, với thời gian hoạt động 17,7 giây, phản ánh các thời điểm hệ thống kích hoạt module truyền thông và ghi dữ liệu vào thẻ nhớ.

4.3.1.2. Kịch bản 2

Kịch bản đo dòng hoạt động của thiết bị trong điều kiện vận hành có mưa lớn. Thời gian đo được tiến hành trong một giờ đồng hồ với lượng mưa ghi nhận được trên 30mm.

a. Gửi dữ liệu ngay khi có mưa

Biểu đồ tại Hình 4.10 đặc trưng cho dòng điện tiêu thụ của nguyên mẫu khi hoạt động theo cơ chế LOKA. Trong đó, mỗi khi có mưa, LOKA sẽ đánh thức toàn bộ thiết bị xử lý và gửi dữ liệu, tạo ra các đỉnh sóng liên tục nối tiếp nhau trong các giai đoạn mưa lớn khoảng trên 30mm.



Hình 4.10: Dòng trung bình - Thuật toán LOKA trường hợp có mưa lớn

Kết quả đo đặc trong khoảng thời gian 59 phút 59,8 giây (khoảng 1 giờ) cho thấy dòng điện tiêu thụ trung bình (I_{avg}) của hệ thống là 33,57 mA. Các đỉnh nhọn xuất hiện dày đặc trên biểu đồ cho thấy thiết bị phải hoạt động liên tục để xử lý và gửi dữ liệu sau

mỗi lần có mưa ghi nhận từ cảm biến, dẫn đến mức tiêu thụ năng lượng trung bình rất cao.

b. Áp dụng LOKA Plus

Biểu đồ tại Hình 4.11 đặc trưng cho dòng điện tiêu thụ của nguyên mẫu khi áp dụng thuật toán LOKA Plus trong cùng điều kiện có mưa lớn.



Hình 4.11: Dòng trung bình - Thuật toán LOKA Plus trường hợp có mưa lớn

Kết quả đo trong khoảng thời gian 59 phút 59,9 giây cho thấy dòng điện tiêu thụ trung bình (I_{avg}) của hệ thống chỉ là 6,98 mA. Biểu đồ cho thấy một dòng điện nền ở chế độ TKNL rất thấp, chỉ bị ngắt quãng bởi các đỉnh xung nhọn của chu kỳ gửi tin 10 phút. Điều này chứng minh rằng chỉ có MCU thức dậy xử lý mỗi khi có mưa mà không kích hoạt module truyền thông, giúp thiết bị TKNL.

4.3.2. Tính toán hiệu quả năng lượng trên số liệu đo đạc

Dựa trên số liệu đo đạc, luận văn tiến hành tính toán thực tế để so sánh đánh giá hiệu quả năng lượng của thiết bị khi áp dụng LOKA Plus và không áp dụng, với tổng năng lượng của nguồn dự phòng là $E = 90576 \text{ J}$

4.3.2.1. Kịch bản 1

a. Không có LOKA Plus

Các giá trị đo được: $I_{idle} = 19.35 \text{ mA}$, $I_{ACT} = 48.74 \text{ mA}$, $t_{idle} = 582.3 \text{ s}$, $t_{ACT} = 17.7 \text{ s}$

Thời gian một chu kỳ: $t_{cycle} = t_{ACT} + t_{idle} = 600 \text{ (s)}$

Chu kỳ hoạt động: $D (\%) = \frac{t_{ACT}}{t_{cycle}} \times 100\% = \frac{17.7}{600} \times 100\% = 2.95\% = 0.0295$

Công suất:

- Ở chế độ bình thường: $P = I_{idle} \times U = 19.35 \times 4.2 = 81.27 \text{ mW}$

- Ở chế độ hoạt động: $P_{ACT} = I_{ACT} \times U = 48.74 \times 4.2 = 204.708 \text{ mW}$

- Công suất trung bình: $P_{avg} = P_{ACT} \times D + P \times (1-D)$

$$= 204.708 \times 0.0295 + 81.27 \times (1-0.0295) = 84.913 \text{ mW}$$

Năng lượng:

- Chu kỳ: $E_{\text{cycle}} = P_{\text{avg}} \times t_{\text{cycle}} = 84.913 \times 600 = 50947.8 \text{ mW} = 50.948 \text{ J}$

- Ngày: $E_{\text{day}} = E_{\text{cycle}} \times 144 = 50.948 \times 144 = 7336.512 \text{ J}$

Tuổi thọ thiết bị: $L_{\text{NOLOKA}+} = \frac{E}{E_{\text{day}}} = \frac{90576}{7336.512} = 12.34 \text{ ngày}$

b. Áp dụng LOKA Plus

Các giá trị đo được: $I_{\text{SLP}} = 5.92 \text{ mA}$, $I_{\text{ACT}} = 39.08 \text{ mA}$, $t_{\text{SLP}} = 582.3 \text{ s}$, $t_{\text{ACT}} = 17.7 \text{ s}$

Thời gian một chu kỳ: $t_{\text{cycle}} = t_{\text{ACT}} + t_{\text{SLP}} = 600 \text{ (s)}$

Chu kỳ hoạt động: $D (\%) = \frac{t_{\text{ACT}}}{t_{\text{cycle}}} \times 100\% = \frac{17.7}{600} \times 100\% = 2.95 \% = 0.0295$

Ta có công suất:

- Ở chế độ Sleep: $P_{\text{SLP}} = I_{\text{SLP}} \times U = 5.92 \times 4.2 = 24.864 \text{ mW}$

- Chế độ hoạt động: $P_{\text{ACT}} = I_{\text{ACT}} \times U = 39.08 \times 4.2 = 164.136 \text{ mW}$

- Công suất trung bình: $P_{\text{avg}} = P_{\text{ACT}} \times D + P_{\text{SLP}} \times (1-D)$
 $= 164.136 \times 0.0295 + 24.864 \times (1-0.0295) = 28.97 \text{ mW}$

Năng lượng: - Chu kỳ: $E_{\text{cycle}} = P_{\text{avg}} \times t_{\text{cycle}} = 28.97 \times 600 = 17382 \text{ mW} = 17.382 \text{ J}$

J

- Ngày: $E_{\text{day}} = E_{\text{cycle}} \times 144 = 17.382 \times 144 = 2503 \text{ J}$

Tuổi thọ thiết bị: $L_{\text{LOKA}+} = \frac{E}{E_{\text{day}}} = \frac{90576}{2503} = 36.18 \text{ ngày}$

Chỉ số	LOKA +	No LOKA+
Thời gian ở các trạng thái (t)	$t_{\text{ACT}} = 17.7\text{s}$ $t_{\text{SLP}} = 582.3\text{s}$	$t_{\text{ACT}} = 17.7\text{s}$ $t_{\text{idle}} = 582.3\text{s}$
Công suất tiêu thụ trung bình (P_{avg})	28.97 mW	84.913 mW
Năng lượng tiêu thụ trong chu kỳ (E_{cycle})	17.382 J	50.948 J
Năng lượng tiêu thụ trong ngày (E_{day})	2503 J	7336.512 J
Tuổi thọ của thiết bị (L)	36.18 ngày	12.34 ngày

Bảng 4.5: So sánh các thông số dựa vào kết quả đo đạc thực tế - Kịch bản 1

Từ Bảng 4.5, có thể tính được Phần trăm TKNL của LOKA Plus so với khi không áp dụng thuật toán TKNL:

$$\% E_{\text{saving}} = \frac{E_{\text{NoLOKA}+} - E_{\text{LOKA}+}}{E_{\text{NoLOKA}+}} \times 100\% = \frac{7336.512 - 2503}{7336.512} \times 100\% = 66\%$$

4.3.2.2. Kịch bản 2

a. Gửi dữ liệu ngay khi có mưa

Giá trị đo được: Dòng trung bình $I_{\text{avg}} = 33.57 \text{ mA}$

Công suất trung bình: $P_{avg} = I_{avg} \times U = 33.57 \times 4.2 = 141 \text{ mW}$

Năng lượng tiêu thụ trong:

$$\text{Chu kỳ: } E_{cycle} = P_{avg} \times t_{cycle} = 141 \times 600 = 84600 \text{ mW} = 84.6 \text{ J}$$

$$\text{Ngày: } E_{day} = E_{cycle} \times 144 = 84.6 \times 144 = 12182.4 \text{ J}$$

$$\text{Tuổi thọ thiết bị: } L_{LOKA} = \frac{E}{E_{day}} = \frac{90576}{12182.4} = 7.43 \text{ ngày}$$

b. Áp dụng LOKA Plus

Giá trị đo được: Dòng trung bình $I_{avg} = 6.98 \text{ mA}$

Công suất trung bình: $P_{avg} = I_{avg} \times U = 6.98 \times 4.2 = 29.32 \text{ mW}$

Năng lượng tiêu thụ trong:

$$\text{Chu kỳ: } E_{cycle} = P_{avg} \times t_{cycle} = 29.32 \times 600 = 17590 \text{ mW} = 17.59 \text{ J}$$

$$\text{Ngày: } E_{day} = E_{cycle} \times 144 = 17.59 \times 144 = 2533 \text{ J}$$

$$\text{Tuổi thọ thiết bị: } L_{LOKA+} = \frac{E}{E_{day}} = \frac{90576}{2533} = 35.76 \text{ ngày}$$

Chỉ số	LOKA	LOKA +	LOKA + (Kịch bản 1)
Công suất tiêu thụ trung bình (P_{avg})	141 mW	29.32 mW	28.97 mW
Năng lượng tiêu thụ trong một chu kỳ (E_{cycle})	84.6 J	17.59 J	17.382 J
Năng lượng tiêu thụ trong một ngày (E_{day})	12182.4 J	2533 J	2503 J
Thời gian hoạt động của thiết bị (L)	7.43 ngày	35.76 ngày	36.18 ngày

Bảng 4.6: So sánh các thông số dựa vào kết quả đo đạc thực tế - Kịch bản 2

Từ Bảng 4.6, có thể tính được Phần trăm TKNL của LOKA Plus so với thuật toán LOKA:

$$\% E_{saving} = \frac{E_{LOKA} - E_{LOKA+}}{E_{LOKA}} \times 100\% = \frac{12182.4 - 2533}{12182.4} \times 100\% = 79.21\%$$

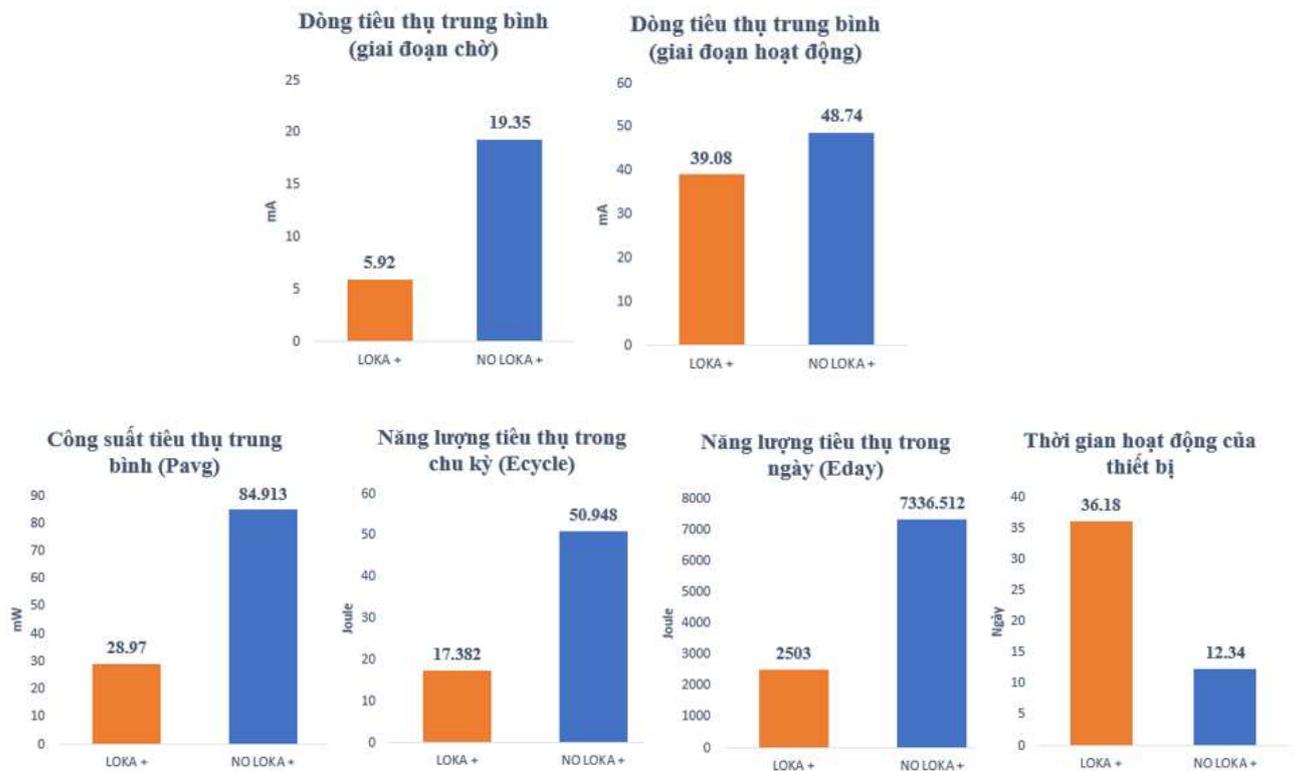
4.4. Phân tích và đánh giá

4.4.1. Phân tích hiệu quả TKNL của thuật toán

4.4.1.1. Kịch bản 1

Dựa vào Bảng 4.5 và phân tích từ thống kê dữ liệu đo đạc thực tế (Hình 4.12) cho thấy thuật toán LOKA Plus chứng minh hiệu quả rõ rệt trong việc giảm dòng tiêu thụ trung bình (I_{avg}) của hệ thống trong trạng thái vận hành bình thường. Khi không áp dụng LOKA Plus, dòng điện trung bình trong giai đoạn chờ đo được là 19,35 mA chứng tỏ hệ thống tiêu tốn năng lượng đáng kể do duy trì vi điều khiển và module truyền thông ở trạng thái hoạt động. Ngược lại, khi áp dụng LOKA Plus, dòng điện trong giai đoạn này giảm mạnh xuống chỉ còn 5,92 mA, qua đó giảm công suất tiêu thụ trung bình (P_{avg}) từ

84,913 mW xuống 28,97 mW, năng lượng tiêu thụ hàng ngày (E_{day}) cũng giảm từ 7336,512 J xuống 2503 J, giúp kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị từ 12,34 ngày lên 36,18 ngày (tương đương 2.93 lần).

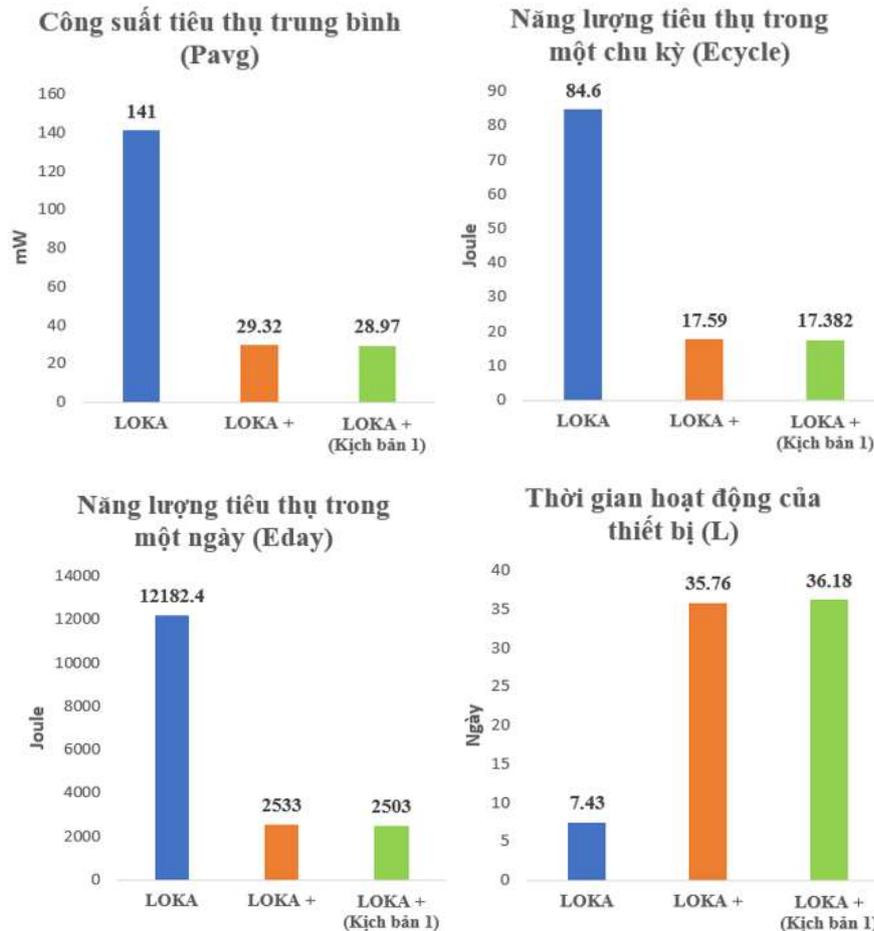


Hình 4.12: So sánh số liệu thực tế - Kịch bản 1

Mức cải thiện này tương đồng với dự báo lý thuyết (3,28 lần), sai khác nhỏ đến từ các tổn hao thực tế chưa được mô hình hóa lý tưởng. Kết quả này không chỉ xác nhận tính chính xác của mô hình phân tích mà còn khẳng định hiệu quả thực tiễn vượt trội của LOKA Plus trong việc tối ưu hóa năng lượng cho hoạt động định kỳ.

4.4.1.2. Kịch bản 2

Kết quả thực nghiệm của Kịch bản 2 (Bảng 4.6 & Hình 4.13) cho thấy sự vượt trội của thuật toán LOKA Plus so với LOKA. Khi ghi nhận dữ liệu từ cảm biến đo mưa trong mỗi chu kỳ, LOKA đánh thức toàn bộ hệ thống dậy làm việc gây tiêu tốn năng lượng, khiến dòng điện trung bình (I_{avg}) lên tới 33,57 mA dẫn đến các thông số khác như P_{avg} , E_{cycle} , E_{day} cũng tăng theo, hệ quả là tuổi thọ thiết bị giảm xuống chỉ còn 7,43 ngày. Ngược lại, LOKA Plus chỉ đánh thức MCU để xử lý mỗi khi có mưa mà không đánh thức module truyền thông để gửi dữ liệu, giúp duy trì dòng điện trung bình rất thấp là 6,98 mA, tăng khả năng TKNL lên đến 79.21% so với LOKA, các chỉ số khác cũng được tối ưu gần như tương đương với kịch bản 1. Nhờ vậy, tuổi thọ thực tế của thiết bị được duy trì ở mức 35,76 ngày, cao hơn gần 4,8 lần so với LOKA và gần như không bị ảnh hưởng bởi cường độ mưa.



Hình 4.13: So sánh số liệu thực tế - Kịch bản 2

Ngoài ra, sự tương đồng so với dự báo lý thuyết một lần nữa xác nhận tính khả thi của thuật toán, đồng thời chứng minh LOKA Plus không chỉ TKNL trong điều kiện lý tưởng mà còn cực kỳ hiệu quả trong việc ứng phó với các sự kiện bất đồng bộ có tần suất cao như hoạt động trong mùa mưa mà không làm gián đoạn việc thu thập dữ liệu.

4.4.2. Đánh giá độ ổn định và độ tin cậy của hệ thống

4.4.2.1. Về độ trễ

Thuật toán LOKA Plus có độ trễ được kiểm soát với cơ chế Dual Duty Cycling được thiết lập là 10 phút, được xem là hoàn toàn phù hợp với đặc thù của ứng dụng quan trắc mưa, vốn thường yêu cầu dữ liệu tổng hợp theo chu kỳ thay vì phản ứng tức thời mỗi khi có mưa.

Ngoài ra, thuật toán vẫn được thiết kế để đảm bảo khả năng phản hồi nhanh khi cần thiết thông qua cơ chế xử lý sự kiện từ tin nhắn SMS. Khả năng này đảm bảo hệ thống có thể cung cấp thông tin kịp thời trong các tình huống cần thiết, thể hiện sự cân bằng giữa việc tối ưu năng lượng trong hoạt động và khả năng phản ứng khi có yêu cầu đặc biệt.

4.4.2.2. Về mất gói tin và độ tin cậy của dữ liệu

Trong khuôn khổ thực nghiệm của luận văn, quá trình đo đạc và truyền dữ liệu được tiến hành liên tục trong 5 ngày, tương ứng với 720 chu kỳ gửi tin theo lịch trình 10

phút/lần trong điều kiện mạng 4G LTE ở trạng thái ổn định (Bảng 4.7). Kết quả ghi nhận cho thấy không có trường hợp mất gói tin nào xảy ra trong suốt thời gian thử nghiệm, toàn bộ dữ liệu gửi đi đều được máy chủ tiếp nhận thành công.

Lần TN	Thời gian	Số lần gửi dữ liệu	Số lần gửi thành công	Tỉ lệ
1	Từ 0h-24h Ngày 01/10/2025	144	144	100%
2	Từ 0h-24h Ngày 02/10/2025	144	144	100%
3	Từ 0h-24h Ngày 03/10/2025	144	144	100%
4	Từ 0h-24h Ngày 04/10/2025	144	144	100%
5	Từ 0h-24h Ngày 05/10/2025	144	144	100%

Bảng 4.7: Bảng thống kê thực nghiệm truyền dữ liệu

Kết quả này cho thấy việc giảm tiêu thụ năng lượng nhờ LOKA Plus không ảnh hưởng đến độ tin cậy truyền thông, khẳng định tính cân bằng giữa hiệu quả năng lượng và QoS.

Mặc dù vậy, trong các kịch bản triển khai thực tế dài hạn, đặc biệt tại các khu vực có tín hiệu 4G LTE yếu hoặc không ổn định, việc tạm thời không gửi được gói tin (dẫn đến độ trễ dữ liệu) là hoàn toàn có thể xảy ra. Tuy nhiên, nhờ cơ chế lưu trữ và gửi lại thông tin, thuật toán LOKA Plus đảm bảo rằng dữ liệu quan trọng sẽ không bị mất và sẽ được gửi đến máy chủ khi kết nối được khôi phục, duy trì độ tin cậy của dữ liệu.

4.5. Tổng kết Chương IV

Chương IV đánh giá một cách toàn diện hiệu quả của thuật toán LOKA Plus thông qua một phương pháp chặt chẽ kết hợp giữa tính toán lý thuyết, đo đạc thực nghiệm, tính toán và phân tích trên số liệu đo đạc thực tế. Kết quả thu được đã khẳng định những ưu điểm vượt trội của thuật toán trên cả hai phương diện: tối ưu năng lượng và đảm bảo độ ổn định, tin cậy cho hệ thống.

Về hiệu quả TKNL, thuật toán LOKA Plus không chỉ thể hiện hiệu quả trong điều kiện vận hành bình thường mà còn phát huy hiệu suất TKNL trong các kịch bản có sự kiện bất đồng bộ với tần suất cao như mùa mưa. LOKA Plus giúp kéo dài thời gian hoạt

động của thiết bị lên gấp khoảng 2.93 lần so với hệ thống không áp dụng thuật toán TKNL và gần 4.8 lần so với cơ chế gửi dữ liệu tức thời của LOKA. Đặc biệt, sự tương đồng cao giữa kết quả dự báo lý thuyết và số liệu đo đạc thực tế đã xác nhận tính khả thi, độ chính xác của mô hình phân tích.

Về độ ổn định và tin cậy, hệ thống vận hành ổn định trong suốt thời gian thử nghiệm. Độ trễ trong truyền dữ liệu định kỳ được chứng minh là phù hợp với yêu cầu của ứng dụng quan trắc. Quan trọng hơn, thuật toán LOKA Plus đảm bảo độ tin cậy cao cho dữ liệu, không ghi nhận trường hợp mất gói tin nào trong điều kiện mạng ổn định.

Những kết quả thành công của chương này là tiền đề quan trọng, tạo cơ sở để đưa ra những kết luận tổng thể cho toàn bộ luận văn.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận văn đã tập trung nghiên cứu và giải quyết một trong những thách thức lớn nhất của mạng WSN trong ứng dụng thực tiễn đó chính là bài toán về năng lượng. Các trạm quan trắc KTTV tự động, được triển khai ở những khu vực vùng sâu, vùng xa, đòi hỏi khả năng tự vận hành bằng nguồn pin dự phòng trong thời gian dài từ 30-45 ngày khi xảy ra thiên tai, mất điện để đảm bảo tính liên tục của dữ liệu nhằm phục vụ công tác dự báo, ứng phó và ra quyết định xả lũ. Luận văn đề xuất thuật toán LOKA Plus là giải pháp về phần mềm nhằm tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ cho các thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp.

Về mặt lý thuyết, LOKA Plus đã kế thừa có chọn lọc các ưu điểm của thuật toán LOKA, đồng thời có ba cải tiến quan trọng: (1) Cơ chế xử lý sự kiện ưu tiên, (2) Cơ chế lập lịch và gộp dữ liệu tối ưu, (3) Tính năng giám sát điện áp nguồn. Những cải tiến này giúp LOKA Plus tối ưu hơn về hiệu quả TKNL so với thuật toán LOKA, trở nên phù hợp hơn với kiến trúc hệ thống quan trắc KTTV sử dụng module truyền thông 4G LTE tiêu thụ nhiều năng lượng, mà vẫn đảm bảo độ tin cậy và khả năng phản hồi theo thời gian thực.

Về mặt thực nghiệm và đánh giá, kết quả triển khai trên nguyên mẫu phần cứng đã chứng minh một cách thuyết phục hiệu quả TKNL của LOKA Plus. Trong điều kiện bình thường, thuật toán giúp giảm tới 66% năng lượng tiêu thụ trung bình, kéo dài tuổi thọ pin từ 12.34 ngày lên 36.18 ngày (gấp 2.93 lần) so với không áp dụng thuật toán TKNL. Trong điều kiện mưa lớn (kịch bản thách thức nhất) LOKA Plus giúp TKNL lên tới 79.21% so với LOKA và duy trì được tuổi thọ thiết bị ở mức 35.76 ngày, cao hơn gần 4.8 lần so với thuật toán LOKA, trong khi vẫn đảm bảo độ tin cậy, toàn vẹn dữ liệu và các chỉ số chất lượng dịch vụ.

Những kết quả trên chứng minh luận văn đã đáp ứng đầy đủ và vượt mong đợi các mục tiêu đề ra. Thuật toán LOKA Plus là một giải pháp tối ưu năng lượng hiệu quả, khả thi, đã được kiểm chứng, giải quyết trực tiếp và thành công bài toán năng lượng cho các thiết bị IoT quan trắc KTTV sử dụng nguồn tích hợp. Giải pháp này có ý nghĩa thực tiễn cao, góp phần nâng cao độ tin cậy, tính bền bỉ và khả năng ứng phó của các hệ thống

giám sát thiên tai, đảm bảo thiết bị hoạt động ổn định ngay cả trong những điều kiện vận hành khắc nghiệt nhất trong bối cảnh biến đổi khí hậu và thiên tai ở Việt Nam diễn biến phức tạp trong những năm gần đây.

Mặc dù đã đạt được những kết quả rất tích cực, kết quả thực nghiệm được thực hiện chủ yếu trên môi trường phòng thí nghiệm và chưa bao phủ toàn diện các điều kiện thực địa phức tạp như nhiệt độ và độ ẩm cực đoan, hoặc các kịch bản vùng có tín hiệu LTE không ổn định gây mất gói tin liên tục hoặc mất kết nối kéo dài, điều kiện mưa bão, dông sét.... Ngoài ra, việc đánh giá hiệu quả của thuật toán LOKA Plus hiện tại tập trung vào so sánh trực tiếp với thuật toán LOKA và kịch bản không áp dụng thuật toán để làm nổi bật tính cải tiến. Trong tương lai, sẽ mở rộng nghiên cứu để so sánh với các thuật toán tối ưu năng lượng khác trên cùng một phần cứng để có cái nhìn tổng quan và làm nổi bật hơn nữa ưu điểm của thuật toán LOKA Plus.

Những kết quả của luận văn là nền tảng và là căn cứ quan trọng cho các hướng phát triển, cải tiến sâu hơn trong tương lai. Mục tiêu của các nghiên cứu tiếp theo sẽ là kế thừa và phát huy những kết quả hiện tại, nhằm tối ưu hơn nữa hiệu quả TKNL mà thuật toán LOKA Plus đạt được, hướng tới một giải pháp ngày càng hoàn thiện hơn.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Farhan, R. S. Hameed, A. S. Ahmed, A. H. Fadel, W. Gheth, L. Alzubaidi, M. A. Fadhel, and M. Al-Amidie, "Energy efficiency for green Internet of Things (IoT) networks: A survey," *Network*, vol. 1, no. 3, pp. 279–314, 2021.
- [2] M. Trigka and E. Dritsas, "Wireless sensor networks: From fundamentals and applications to innovations and future trends," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 96365–96399, 2025.
- [3] M. Majid, S. Habib, A. R. Javed, M. Rizwan, G. Srivastava, T. R. Gadekallu, and J. C.-W. Lin, "Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review," *Sensors*, vol. 22, no. 6, Art. no. 2087, Mar. 2022.
- [4] Bedi, J. S., et al., "Minimising Energy Consumption in WSN-IoT Networks by Focusing on Routing Strategies, Gateway Selection, Duty Cycle Rate, and Node Distance," *Journal of Computer Science*, vol. 20, no. 9, pp. 1322–1329, 2024
- [5] R. Sharma, S. Prakash, and P. Roy, "Methodology, Applications, and Challenges of WSN-IoT," in *Proc. ICE3 2020 Int. Conf. on Electrical and Electronics Engineering*, Gorakhpur, India, 2020.
- [6] H. Ali, "Multiprocessor System-on-Chips based Wireless Sensor Network Energy Optimization," Ph.D. dissertation, University of Derby, Derby, United Kingdom, 2020.
- [7] P. P. Ray, M. Mukherjee, and L. Shu, "Internet of Things for disaster management: State-of-the-art and prospects," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18818–18835, 2017.
- [8] F. Al-Turjman, "Cognitive routing protocol for disaster-inspired Internet of Things," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 92, pp. 1103–1115, 2019.
- [9] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, "A study of LoRa low power and wide area network technology," in *Proc. 2017 Int. Conf. Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Fez, Morocco, May 2017.
- [10] E. Baccelli, O. Hahm, M. Gunes, M. Wählisch, and T. C. Schmidt, "RIOT OS: Towards an OS for the Internet of Things," *Poster Abstracts, IEEE INFOCOM*, pp. 79–80, 2013.
- [11] H. Li, Y. Wei, Y. Xiong, E. Ma, and W. Tian, "A frequency-aware and energy-saving strategy based on DVFS for Spark," *The Journal of Supercomputing*, vol. 77, pp. 11575–11596, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11227-021-03740-5.
- [12] X. Chen, H.-B. Chen, W. Ma, X. Li, and S. X.-. Tan, "Energy-efficient wireless temperature sensing for smart building applications," in *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, pp. 680–683, 2016.
- [13] L. Wang and Y. Xiao, "A Survey of Energy-Efficient Scheduling Mechanisms in Sensor Networks," *MONET*, vol. 11, pp. 723–740, Oct. 2006.

- [14] J. Lojda, J. Strnadel, P. Smrz, and V. Simek, "First steps towards unified low-power IoT design: The 'DYNAMIC' framework," in Proceedings of IT4Innovations, Brno University of Technology, Czech Republic, pp. 1–6, 2024.
- [15] K. L. Ketshabetswe, A. M. Zungeru, B. Mtengi, C. K. Lebekwe, and S. R. S. Prabakaran, "Data Compression Algorithms for Wireless Sensor Networks: A Review and Comparison," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136872–136891, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116311
- [16] C. Jandaeng, J. Kongsen, P. Koad, M. Thu, and S. Somchuea, "Task scheduling algorithm for power minimization in low-cost disaster monitoring system: A heuristic approach," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 13, no. 5, p. 59, 2024.
- [17] M. Severini, S. Squartini, and F. Piazza, "Energy-aware lazy scheduling algorithm for energy-harvesting sensor nodes," *Neural Comput. Appl.*, vol. 23, no. 7–8, pp. 1899–1908, Dec. 2013, doi: 10.1007/s00521-012-1088-x.
- [18] T. C. Think and V. M. Huan, "Dynamic Algorithm for Selecting Tasks in IoTs Systems," *Journal of Technical Education Science*, vol. 63, no. 4, pp. 46–56, 2021
- [19] G. Manimaran and C. Siva Ram Murthy, "An Efficient Dynamic Scheduling Algorithm for Multiprocessor Real-Time Systems," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 312–319, Mar. 1998
- [20] A. Ashiquzzaman, H. Lee, T.-W. Um, and J. Kim, "Energy-efficient IoT sensor calibration with deep reinforcement learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 212801–212812, 2020.
- [21] D. Vaquerizo-Hdez, P. Muñoz, M. D. R-Moreno, and D. F. Barrero, "A low power consumption algorithm for efficient energy consumption in ZigBee motes," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2179, Sep. 2017, doi: 10.3390/s17102179.
- [22] T. Yokotani and Y. Sasaki, "Comparison with HTTP and MQTT on required network resources for IoT," in 2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), 2016, pp. 1–6.
- [23] D. A. Segovia-Cardozo, C. Bernal-Basurco, and L. Rodríguez-Sinobas, "Tipping bucket rain gauges in hydrological research: Summary on measurement uncertainties, calibration, and error reduction strategies," *Sensors*, vol. 23, no. 12, p. 5385, 2023.

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

Số: 2212/QĐ-ĐHBK

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Đà Nẵng, ngày 07 tháng 6 năm 2024

QUYẾT ĐỊNH

Về việc giao đề tài và trách nhiệm của người hướng dẫn luận văn thạc sĩ

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

Căn cứ Nghị định số 32/CP ngày 04 tháng 4 năm 1999 của Chính phủ về việc thành lập Đại học Đà Nẵng;

Căn cứ Thông tư số 15/2014/TT-BGDĐT ngày 15 tháng 5 năm 2014 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc ban hành Quy chế đào tạo trình độ thạc sĩ;

Căn cứ Thông tư số 10/2020/TT-BGDĐT ngày 14 tháng 5 năm 2020 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của đại học vùng và các cơ sở giáo dục đại học thành viên;

Căn cứ Thông tư số 23/2021/TT-BGDĐT ngày 30 tháng 8 năm 2021 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ thạc sĩ;

Căn cứ Nghị quyết số 08/NQ-HĐĐH ngày 12 tháng 7 năm 2021 của Hội đồng Đại học Đà Nẵng ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Đại học Đà Nẵng và Nghị quyết số 13/NQ-HĐĐH ngày 07 tháng 9 năm 2021 của Hội đồng Đại học Đà Nẵng về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế tổ chức và hoạt động của Đại học Đà Nẵng;

Căn cứ Nghị quyết số 93/NQ-HĐT ngày 18 tháng 12 năm 2023 của Hội đồng trường Trường Đại học Bách khoa ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng;

Căn cứ Quyết định số 3875/QĐ-ĐHBK ngày 12 tháng 10 năm 2022 của Hiệu trưởng Trường Đại học Bách khoa về việc ban hành Quy định đào tạo trình độ thạc sĩ của Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng;

Căn cứ Quyết định số 4868/QĐ-ĐHBK ngày 13 tháng 12 năm 2022 của Hiệu trưởng Trường Đại học Bách khoa về việc thành lập các lớp cao học và công nhận học viên cao học khóa 44;

Căn cứ Tờ trình số 38/KĐ ngày 27 tháng 5 năm 2024 của Khoa Điện về việc ra Quyết định giao đề tài và người hướng dẫn luận văn thạc sĩ cho học viên cao học ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, theo định hướng nghiên cứu, khóa 44;

Theo đề nghị của Trưởng phòng Phòng Đào tạo.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Giao cho học viên cao học Tạ Việt Hoàng, lớp K44.TĐH, ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, thực hiện đề tài luận văn "Thiết kế thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp.", dưới sự hướng dẫn của TS. Ngô Đình Thanh, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng.

Điều 2. Học viên cao học và người hướng dẫn có tên ở Điều 1 được hưởng các quyền lợi và thực hiện nhiệm vụ theo đúng quy chế đào tạo thạc sĩ hiện hành của Bộ Giáo dục và Đào tạo, quy định đào tạo thạc sĩ của Trường Đại học Bách khoa.

Điều 3. Trưởng phòng Phòng Tổ chức - Hành chính, Trưởng phòng Phòng Đào tạo, Trưởng phòng Phòng Kế hoạch - Tài chính, Trưởng khoa Khoa Điện, người hướng dẫn luận văn và học viên có tên ở Điều 1 căn cứ Quyết định thi hành.

Nơi nhận:

- Như Điều 3;

- Lưu: VT, ĐT.



PGS.TS. Nguyễn Hồng Hải

HỒ SƠ HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN VĂN THẠC SĨ

Học viên: Tạ Việt Hoàng

1. Biên bản Hội đồng
2. Bảng điểm của học viên cao học
3. Lý lịch khoa học của học viên
4. Biên bản kiểm phiếu
5. Nhận xét

TT	HỌ VÀ TÊN	TRÁCH NHIỆM TRONG HỘI ĐỒNG	NHẬN XÉT	
			Bản nhận xét	Phiếu điểm
1.	PGS.TS. Lê Tiến Dũng	Chủ tịch Hội đồng	✓	✓
2.	TS. Trương Thị Bích Thanh	Thư ký Hội đồng	✓	✓
3.	TS. Trần Thái Anh Âu	Phản biện 1	✓	✓
4.	TS. Ngô Văn Quang Bình	Phản biện 2	✓	✓
5.	TS. Nguyễn Hoàng Mai	Ủy viên	✓	✓
6.	TS. Ngô Đình Thanh	Người hướng dẫn	✓	

Đà Nẵng, ngày 08 tháng 2.. năm 2026.
Thư ký Hội đồng



BIÊN BẢN

HỌP HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN VĂN THẠC SĨ

Ngày .8. tháng 2. năm 2026., Hội đồng được thành lập theo Quyết định số 6861/QĐ-ĐHBK ngày 31 tháng 12 năm 2025 của Hiệu trưởng trường Đại học Bách khoa, gồm các thành viên:

TT	HỌ VÀ TÊN	TRÁCH NHIỆM TRONG HỘI ĐỒNG
1.	PGS.TS. Lê Tiến Dũng	Chủ tịch Hội đồng
2.	TS. Trương Thị Bích Thanh	Thư ký Hội đồng
3.	TS. Trần Thái Anh Âu	Ủy viên Phản biện 1
4.	TS. Ngô Văn Quang Bình	Ủy viên Phản biện 2
5.	TS. Nguyễn Hoàng Mai	Ủy viên



đã họp (có mặt: 5., vắng mặt: 0. thành viên) để đánh giá luận văn thạc sĩ:

- Tên đề tài: *Thiết kế thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp.*
- Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa (K44.TĐH)
- Cửa học viên cao học: **Tạ Việt Hoàng**

1. Nội dung buổi họp đánh giá gồm các phần chính sau đây:

- Thư ký Hội đồng báo cáo quá trình học tập, nghiên cứu và đọc lý lịch khoa học của học viên (có văn bản kèm theo);
- Học viên trình bày luận văn;
- Các phản biện đọc nhận xét và nêu câu hỏi (có văn bản kèm theo);
- Học viên trả lời các câu hỏi của thành viên Hội đồng;
- Hội đồng thảo luận kín và đánh giá;
- Kiểm phiếu và công bố kết quả (có biên bản kiểm phiếu và phiếu kèm theo).
- Tác giả luận văn phát biểu ý kiến
- Chủ tịch Hội đồng tuyên bố bế mạc.

2. Kết luận của Hội đồng:

- a) Kết luận chung: Học viên bảo vệ thành công luận văn Thạc sĩ.
Kết quả đạt yêu cầu

b) Yêu cầu chỉnh, sửa về nội dung:

Chỉnh sửa báo cáo toàn văn của luận văn theo ý kiến góp ý của hai phản biện và các thành viên hội đồng.

c) Các ý kiến khác:

/

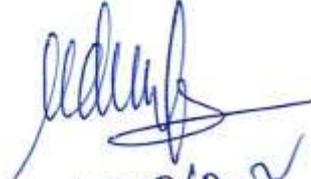


d) Điểm đánh giá: Bằng số: 8,1 Bằng chữ: Tám phẩy một

THƯ KÝ HỘI ĐỒNG


Trương Thị Bích Thanh

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG


Lê Tiến Dũng

XÁC NHẬN CỦA TRƯỞNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

TL. HIỆU TRƯỞNG

TRƯỞNG PHÒNG ĐÀO TẠO




PGS.TS. Đặng Công Thuật

CÂU HỎI VÀ TRẢ LỜI

Kèm theo Biên bản họp Hội đồng đánh giá luận văn thạc sĩ

Của học viên:Tạ Việt Hoàng.....

1) Đâu là cốt lõi của thuật toán Loka Plus

Trả lời: thuật toán được xây dựng trên nền tảng Loka, bổ sung thêm một số tác vụ như: phân loại dữ liệu, cải tiến phần cứng phù hợp sử dụng mạng LTE

2) Trong các cải tiến, cái nào quan trọng nhất?

Trả lời: Cải tiến lập lịch ưu tiên là quan trọng nhất nó giúp TKVL Cao nhất

3) Độ tin cậy trong ĐK thực nghiệm

Trả lời: học viên đưa ra giải pháp thông hướng phát triển

4) Lý do phía sau of việc LOKA plus mang lại hiệu quả

Trả lời: năng lượng truyền thông chiếm 80% năng lượng thiết bị, học viên sẽ bổ sung công thức tính toán phân năng lượng tiết kiệm trong thuật toán vào báo cáo

5) Giải thích thuật toán đề xuất được tham khảo hay do tác giả đề xuất

Trả lời: tác giả dựa trên nền thuật toán LOKA và đề xuất cải tiến một số tác vụ để mong muốn bị tiêu thụ năng lượng thấp nhất

6) Giải thích thêm về số lượng node khảo sát?

Trả lời: Khảo sát theo mô hình thực nghiệm

THU KÝ HỘI ĐỒNG



Trương Thị Bích Thanh

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BIÊN BẢN KIỂM PHIẾU
CỦA HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN VĂN THẠC SĨ
(Kèm theo biên bản họp Hội đồng)

- Tên đề tài: Thiết kế thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp.
- Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa (K44.TĐH)
- Của học viên cao học: **Tạ Việt Hoàng**
- Hội đồng bắt đầu họp lúc .10.h 20. ngày: .8../.2../2026..
- Tại Trường Đại học Bách khoa.

Tham gia kiểm phiếu gồm:

1.Tường Thị Bích Thanh.....
2.Nguyễn Hồng Mai.....
3.Trần Thái Anh Âu.....

Kết quả kiểm phiếu:

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| - Số phiếu phát ra: <u>5</u> | Số phiếu thu về: <u>5</u> |
| - Số phiếu hợp lệ: <u>5</u> | Số phiếu không hợp lệ: <u>0</u> |
| - Tổng số điểm: <u>40,5</u> | Điểm trung bình: <u>8,1</u> |

Đà Nẵng, ngày 8.. tháng 2. năm 2026..

HỌ TÊN & CHỮ KÝ CÁC THÀNH VIÊN THAM GIA KIỂM PHIẾU:

Thanh
Tường Thị Bích Thanh

Mai
Nguyễn Hồng Mai

Sut
Trần Thái Anh Âu

NHẬN XÉT LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP

(Dành cho người phản biện)

Họ và tên người nhận xét: Trần Thái Anh Âu.

Học hàm: Học vị: Tiến sĩ.

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa.

Cơ quan công tác: Khoa Điện- Trường Đại học Bách khoa- Đại học Đà Nẵng.

Họ và tên học viên cao học: Tạ Việt Hoàng. Khóa: K44.

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa.

Tên đề tài luận văn: Thiết Kế Thuật Toán Tối Ưu Năng Lượng Tiêu Thụ Cho Thiết Bị Iot Sử Dụng Nguồn Tích Hợp.

Ý KIẾN NHẬN XÉT

Luận văn được thực hiện nghiêm túc, có bố cục hợp lý, nội dung rõ ràng và bám sát mục tiêu nghiên cứu đã đề ra. Tác giả đã tiếp cận đúng một bài toán mang tính thời sự và có ý nghĩa thực tiễn cao, đó là tối ưu năng lượng cho thiết bị IoT trong mạng cảm biến không dây (WSN), với đối tượng nghiên cứu cụ thể là hệ thống quan trắc khí tượng thủy văn quy mô lớn tại Việt Nam. Các nội dung lý thuyết, phân tích, thiết kế thuật toán và đánh giá thực nghiệm được trình bày tương đối đầy đủ, logic và có tính kế thừa các nghiên cứu trước. Kết quả đạt được cho thấy luận văn đáp ứng tốt các yêu cầu của một luận văn thạc sĩ chuyên ngành.

1- Về lý do chọn đề tài:

Đề tài được lựa chọn có tính cấp thiết cao cả về mặt khoa học lẫn thực tiễn. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, thiên tai diễn biến phức tạp và hệ thống quan trắc KTTV ngày càng được triển khai trên diện rộng, bài toán đảm bảo năng lượng cho thiết bị IoT tại các khu vực vùng sâu, vùng xa là một vấn đề lớn. Tác giả đã chỉ ra rõ những hạn chế của các giải pháp hiện có và lựa chọn hướng tiếp cận phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam. Lý do chọn đề tài là hợp lý, rõ ràng và có cơ sở khoa học.

2- Về phương pháp nghiên cứu, độ tin cậy của các số liệu:

Luận văn sử dụng kết hợp các phương pháp nghiên cứu lý thuyết, phân tích hệ thống, mô hình hóa thuật toán và đánh giá thông qua thực nghiệm. Các giả thiết nghiên cứu được xây dựng phù hợp với điều kiện vận hành thực tế của hệ thống quan trắc KTTV. Số liệu thực nghiệm được thu thập từ các kịch bản hoạt động cụ thể, có so sánh với các phương pháp/ thuật toán liên quan,

qua đó đảm bảo tính khách quan và độ tin cậy. Phương pháp nghiên cứu được lựa chọn phù hợp với mục tiêu và phạm vi của luận văn.

3- Về kết quả khoa học của đề tài:

Luận văn đã đề xuất và đánh giá giải pháp tối ưu năng lượng dựa trên thuật toán phần mềm cho thiết bị IoT trong WSN. Kết quả cho thấy giải pháp đề xuất giúp giảm dòng tiêu thụ trung bình, giảm năng lượng tiêu thụ theo chu kỳ và kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị trong điều kiện mất điện kéo dài. Các kết quả này có giá trị khoa học nhất định, góp phần bổ sung hướng nghiên cứu tối ưu năng lượng cho WSN trong các hệ thống quan trắc quy mô lớn.

4- Về ý nghĩa khoa học, ứng dụng thực tiễn và hướng mở rộng của đề tài:

Về mặt khoa học, luận văn góp phần làm rõ vai trò của các thuật toán phần mềm trong việc tối ưu năng lượng cho WSN, đặc biệt trong các hệ thống sử dụng mạng truyền thông tiêu thụ năng lượng cao như 4G LTE. Về mặt ứng dụng, kết quả nghiên cứu có thể áp dụng trực tiếp cho các hệ thống quan trắc KTTV hiện có tại Việt Nam, góp phần nâng cao độ tin cậy và tính bền vững của hệ thống. Trong tương lai, nghiên cứu có thể được mở rộng theo hướng tích hợp các kỹ thuật học máy, học tăng cường hoặc tối ưu đa mục tiêu để nâng cao hơn nữa hiệu quả năng lượng.

5- Những thiếu sót & vấn đề cần làm rõ (nếu có):

Bên cạnh các kết quả đạt được, luận văn vẫn còn một số hạn chế. Phần đánh giá thực nghiệm chủ yếu tập trung vào một số kịch bản hoạt động điển hình, chưa khảo sát đầy đủ trong các điều kiện môi trường và tải mạng đa dạng hơn. Ngoài ra, việc so sánh với nhiều thuật toán khác trong các điều kiện tương đương có thể được mở rộng để làm nổi bật hơn ưu điểm của giải pháp đề xuất.

6. Ý kiến kết luận (mức độ đáp ứng yêu cầu đối với luận văn thạc sĩ):

Luận văn đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về nội dung, phương pháp nghiên cứu và hình thức trình bày của một luận văn thạc sĩ. Tác giả thể hiện khả năng nghiên cứu độc lập, nắm vững kiến thức chuyên ngành và vận dụng tốt vào giải quyết bài toán thực tiễn. Luận văn đạt yêu cầu và đủ điều kiện đề bảo vệ trước Hội đồng chấm luận văn thạc sĩ.

Ý KIẾN ĐỀ NGHỊ

(Ghi rõ đề nghị cho hay không cho học viên bảo vệ luận văn trước Hội đồng chấm luận văn Thạc sĩ)

.Đề nghị cho học viên được phép bảo vệ luận văn trước Hội đồng chấm luận văn Thạc sĩ.

Câu hỏi:

Câu 1 – Tính mới và đóng góp

thuật đơn thuần?

Câu 2 – Cơ chế tiết kiệm năng lượng

Trong ba cải tiến của LOKA Plus (xử lý sự kiện thông minh, lập lịch & gộp dữ liệu, giám sát điện áp nguồn), cải tiến nào đóng vai trò quyết định nhất trong việc giảm tiêu thụ năng lượng, và học viên đã chứng minh điều này bằng số liệu hay phân tích nào?

Câu 3 – Độ tin cậy của kết quả thực nghiệm

Các kết quả thực nghiệm chủ yếu được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm. Theo học viên, những yếu tố thực địa nào có thể làm sai lệch kết quả, và nếu triển khai ngoài thực tế thì xu hướng so sánh giữa LOKA và LOKA Plus có còn giữ nguyên hay không?

Câu 4 – Tính tổng quát của thuật toán

Thuật toán LOKA Plus được thiết kế cho hệ thống quan trắc KTTV sử dụng 4G LTE – một công nghệ tiêu thụ nhiều năng lượng. Vậy thuật toán này có thể áp dụng cho các hệ thống WSN/IoT khác hay không, và những điều chỉnh nào là bắt buộc?

Câu 5 – Giới hạn và hướng phát triển

Học viên hãy chỉ ra giới hạn lớn nhất hiện tại của thuật toán LOKA Plus, và đề xuất một hướng nghiên cứu tiếp theo có tính khả thi cao nhất để khắc phục giới hạn đó.

Đà Nẵng, ngày 03 tháng 02 năm 20

NGƯỜI PHẢN BIỆN


Trần Thái An

NHẬN XÉT LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP

(Dành cho người phân biện)

Họ và tên người nhận xét: Ngô Văn Quang Bình
Học hàm: Học vị: Tiến sĩ
Chuyên ngành: Tự động hóa
Cơ quan công tác: Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế

Họ và tên học viên cao học: Tạ Việt Hoàng. Khóa: K44.TDH
Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa
Tên đề tài luận văn: Thiết kế thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT sử dụng nguồn tích hợp.

Ý KIẾN NHẬN XÉT

(Nhận xét chung (nếu có)).

1- Về lý do chọn đề tài:

Lý do chọn đề tài được trình bày khá rõ ràng về sự cần thiết của việc nghiên cứu, thiết kế thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT trong mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Network - WSN) nhằm kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị, đảm bảo thiết bị hoạt động ổn định. Tuy nhiên, tổng quan tình hình nghiên cứu liên quan đến ứng dụng thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT trong mạng cảm biến không dây chưa được đề cập trong phần đặt vấn đề.

2- Về phương pháp nghiên cứu, độ tin cậy của các số liệu:

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết dựa trên cơ sở mô hình toán học, kết hợp với kiểm chứng bằng thực nghiệm cho mẫu thiết bị IoT quan trắc lượng mưa đảm bảo được độ tin cậy của kết quả và các số liệu nghiên cứu.

3- Về kết quả khoa học của đề tài:

Đề tài có tính khoa học khi áp dụng thành công thuật toán LOKA mở rộng (Low Power Consumption Algorithm - LOKA plus) cho cấu trúc mạng cảm biến không dây trong hệ thống khí tượng thủy văn để nâng cao độ tin cậy mạng cảm biến không dây và giảm mức tiêu thụ năng lượng cho hệ thống. Kết quả nghiên cứu cho thấy tính ưu điểm của thuật toán LOKA cải tiến so với thuật toán LOKA truyền thống ở các tiêu chí như thời gian hoạt động thông qua giảm công suất tiêu thụ, tỷ lệ mất gói tin, độ trễ.

4- Về ý nghĩa khoa học, ứng dụng thực tiễn và hướng mở rộng của đề tài:

Đề tài có ý nghĩa khoa học và tính ứng dụng thực tiễn cao khi có thể áp dụng cho việc tối ưu năng lượng và đảm bảo độ ổn định, tin cậy cho mạng cảm biến không dây trong thực tế. Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng cho việc giảm tiêu thụ năng lượng, nâng cao độ

tin cậy và độ ổn định cho các hệ thống khí tượng thủy văn sử dụng mạng cảm biến không dây.

5- Những thiếu sót & vấn đề cần làm rõ (nếu có):

- Còn một số lỗi chính tả và lỗi định dạng văn bản trong luận văn.
 - Phần đặt vấn đề cần bổ sung tổng quan liên quan đến ứng dụng thuật toán tối ưu năng lượng tiêu thụ cho thiết bị IoT trong mạng cảm biến không dây để làm nổi bật lý do chọn đề tài.
 - Cần bổ sung trích dẫn các tài liệu tham khảo và thứ tự trích dẫn theo đúng quy định, trong luận văn, ví dụ trích dẫn tài liệu [2] trang 1 trong khi chưa có [1], trích dẫn tài liệu [9] trang 9 trong khi chưa có [5-8] ...
 - Đề nghị trích dẫn tài liệu tham khảo cho kết quả hình 2.4 trang 22 nếu sử dụng hình vẽ từ tài liệu tham khảo.
 - Tác giả có thể giải thích thuật toán LOKA plus là do tác giả đề xuất hay sử dụng từ tài liệu tham khảo để áp dụng cho hệ thống mạng cảm biến không dây.
 - Tác giả có thể cho biết số lượng các node IoT của hệ thống thực nghiệm khảo sát trong luận văn. Trong trường hợp, phạm vi lớn, số lượng các cảm biến đo mưa tăng thì có thể đảm bảo được yêu cầu hệ thống hoạt động ổn định hay không?
- 6. Ý kiến kết luận** (mức độ đáp ứng yêu cầu đối với luận văn thạc sĩ):
Kết quả nghiên cứu đáp ứng yêu cầu đối với một luận văn thạc sĩ.

Ý KIẾN ĐỀ NGHỊ

(Ghi rõ đề nghị cho hay không cho học viên bảo vệ luận văn trước Hội đồng chấm luận văn Thạc sĩ)
Đề nghị cho học viên bảo vệ luận văn trước Hội đồng chấm luận văn Thạc sĩ.

Đà Nẵng, ngày 03 tháng 02 năm 2026

NGƯỜI PHẢN BIỆN



Ngô Văn Quang Bình