

ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐIỆN - ĐIỆN TỬ



BÁO CÁO BÀI TẬP LỚN
HỆ THỐNG NHÚNG VÀ GIAO TIẾP NHÚNG

KIỂM NGHIỆM VÀ TỐI ĐA HÓA KHẢ NĂNG
TRUYỀN THÔNG LORA

Người hướng dẫn: TS. Đào Việt Hùng Tỉ lệ đóng góp

Nhóm sinh viên thực hiện:	Đặng Trung Kiên	20224423	25%
	Vũ Lâm Huy	20224438	25%
	Nguyễn Quang Phú	20224451	20%
	Nguyễn Duy Tùng	20224463	20%
	Nguyễn Minh Đức	20203895	10%

Hà Nội, 06/2025

Lời Mở Đầu

Sự bùng nổ của Internet vạn vật (IoT) đã và đang tạo ra một cuộc cách mạng trong cách chúng ta tương tác với thế giới, mở ra kỷ nguyên của các thành phố thông minh, nông nghiệp chính xác và hệ thống giám sát môi trường tự động. Tuy nhiên, để hiện thực hóa tầm nhìn này, một yêu cầu cơ bản và cấp thiết là phải có công nghệ truyền thông không dây hiệu quả, có khả năng kết nối hàng tỷ thiết bị trên một phạm vi rộng lớn với mức tiêu thụ năng lượng tối thiểu và chi phí hợp lý.

Trong bối cảnh đó, công nghệ LoRa (Long Range) đã nổi lên như một giải pháp hàng đầu, đáp ứng chính xác những thách thức cốt lõi của mạng IoT. Với khả năng truyền dữ liệu đi xa hàng ki-lô-mét, xuyên qua vật cản và hoạt động bền bỉ trong nhiều năm chỉ với một viên pin nhỏ, LoRa đã trở thành nền tảng cho vô số ứng dụng thực tiễn.

Tuy nhiên, hiệu suất trên lý thuyết và hiệu quả trong thực tế của LoRa là hai câu chuyện hoàn toàn khác nhau. Khả năng hoạt động của một hệ thống LoRa không phải là một hằng số, mà là một phương trình phức tạp với nhiều biến số: từ các tham số kỹ thuật cốt lõi như Hệ số trai phỏ (SF), Bandwidth (BW), Tỷ lệ mã hóa (CR), cho đến các yếu tố vật lý như loại anten, chiều cao lắp đặt và đặc biệt là môi trường truyền dẫn dù đó là không gian mở, khu đô thị dày đặc, hay bên trong các tòa nhà bê tông.

Nhận thức được khoảng cách giữa lý thuyết và thực tiễn này, báo cáo này được thực hiện với mục tiêu cốt lõi: tiến hành kiểm nghiệm một cách có hệ thống và đánh giá toàn diện hiệu suất của công nghệ LoRa trong các kịch bản đa dạng của thế giới thực. Thông qua việc thiết kế và triển khai các thử nghiệm chi tiết, từ việc đo đạc trong phòng đến các bài kiểm tra khắc nghiệt ngoài trời và trong các công trình cao tầng, sẽ phân tích tác động của các yếu tố đến phạm vi và độ tin cậy của liên kết truyền thông.

Kết quả của báo cáo không chỉ nhằm mục đích xác thực các giới hạn và tiềm năng của LoRa mà còn hướng tới việc đưa ra những kết luận và khuyến nghị kỹ thuật cụ thể. Bằng cách làm sáng tỏ mối quan hệ giữa cấu hình hệ thống và hiệu suất thực tế, mong muốn cung cấp một tài liệu tham khảo giá trị giúp đưa ra những quyết định thiết kế tối ưu, từ đó xây dựng các ứng dụng IoT mạnh mẽ, hiệu quả và đáng tin cậy hơn.

Mục lục

DANH MỤC HÌNH VẼ.....	4
DANH MỤC BẢNG BIỂU.....	5
1. MỞ ĐẦU.....	6
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT	7
2.1. <i>Tổng quan về LoRa - Long Range Wireless Communication</i>	7
2.2. <i>Các thông số kỹ thuật liên quan</i>	8
2.3. <i>Ứng dụng thực tiễn</i>	10
3. LỰA CHỌN LINH KIỆN	11
3.1. <i>Vì điều khiển ESP32</i>	11
3.2. <i>Anten</i>	13
3.3. <i>Nguồn điện</i>	15
3.4. <i>Mô đun Truyền thông LoRa: Ai-Thinker Ra-02 (SX1278)</i>	16
4. KỊCH BẢN KIỂM THỦ & KẾT QUẢ	19
4.1. <i>Thử nghiệm trong phòng</i>	19
4.2. <i>Thử nghiệm ngoài trời</i>	20
4.3. <i>Thử nghiệm trong chung cư cao tầng</i>	29
5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN.....	32
5.1. <i>Tổng hợp và Đánh giá Sơ bộ Hiệu suất Thực nghiệm</i>	32
5.2. <i>Phân Tích Chuyên Sâu các Yếu Tố Quyết Định Hiệu Suất</i>	33
5.3. <i>Đánh Giá Tổng Thể và Khuyến Nghị Kỹ Thuật</i>	36
5.4. <i>Định Hướng Nghiên Cứu và Phát Triển trong Tương Lai</i>	39
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	41

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 2.1 Truyền thông LoRa	7
Hình 2.2 So sánh tốc độ và khoảng cách truyền giữa các chuẩn truyền thông ...	8
Hình 3.1 Vi điều khiển ESP32	10
Hình 3.2 Anten 433MHz	13
Hình 3.3 Nguồn điện máy tính xách tay	16
Hình 3.4 Mô đun Truyền thông LoRa: Ai-Thinker Ra-02 (SX1278).....	16
Hình 4.1 Truyền nhận trong nhà	18
Hình 4.2 Ảnh thiết bị gửi	19
Hình 4.3 Ảnh thiết bị thu.....	19
Hình 4.4 Các vị trí thử nghiệm.....	20
Hình 4.5 Hình ảnh khi set up đo ở bờ đê sông Nhuệ	21
Hình 4.6 Hình ảnh sau khi set up đo ở bờ đê sông Nhuệ.....	22
Hình 4.7 Hình ảnh khoảng cách đo ở bờ đê sông Nhuệ.....	23
Hình 4.8 Thiết bị phát tại trạm phát sóng VTC.....	24
Hình 4.9 Thiết bị thu ở gần trạm phát sóng VTC	25
Hình 4.10 Khoảng cách đo khu vực trạm phát sóng VTC	25
Hình 4.11 Thiết bị gửi tin đầu anten gắn chai inox.....	26
Hình 4.12 Thiết bị thu tin bọc trong chai nhựa có nước phía ngoài	27
Hình 4.13 Khoảng cách đo khu vực công viên Thông Nhất.....	27
Hình 4.14 Hình ảnh tòa nhà Times Tower	28
Hình 4.15 Các vị trí đo trong chung cư.....	29

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 3.1 Nhữn ^g lý do chọn ESP32.....	11
Bảng 3.2 Các khái niệm liên quan đ ^e n anten	13
Bảng 3.3 Một số loại anten thông dụng cho LoRa	14
Bảng 3.4 Các đặc tính chính và lý do lựa chọn Mô đun LoRa RA-02 (SX1278)	14
Bảng 4.1 Kết quả đo khi đứng gần thang máy	29
Bảng 4.2 Kết quả đo khi đứng xa thang máy	30
Bảng 5.1 Phân Tích So Sánh Hiệu Suất LoRa qua các Kịch Bản Thử Nghiệm.....	36

1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của các ứng dụng Internet of Things (IoT), nhu cầu về một giải pháp truyền thông không dây có khả năng hoạt động hiệu quả trên khoảng cách xa, tiêu thụ năng lượng thấp, và chi phí triển khai hợp lý ngày càng trở nên cấp thiết. LoRa (Long Range) đã nhanh chóng khẳng định vị thế là một trong những công nghệ truyền thông vô tuyến nổi bật, đặc biệt phù hợp với các ứng dụng IoT như giám sát môi trường, nông nghiệp thông minh, hệ thống đo đạc từ xa, và thành phố thông minh.

Tuy nhiên, hiệu quả truyền thông của LoRa phụ thuộc vào nhiều yếu tố kỹ thuật như cấu hình tần số, độ rộng băng thông, hệ số lan truyền (spreading factor), công suất phát, loại ăng-ten và môi trường truyền dẫn. Do đó, việc kiểm nghiệm và tối ưu hóa các tham số này là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy, giảm độ trễ và tối đa hóa phạm vi truyền tín hiệu của hệ thống sử dụng công nghệ LoRa.

Bài tập lớn này tập trung vào việc kiểm nghiệm thực tiễn và nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng truyền thông của LoRa, từ đó đề xuất các giải pháp tối ưu hóa cấu hình hệ thống nhằm đạt hiệu suất truyền tải cao nhất. Thông qua việc thiết kế thử nghiệm, đo lường, phân tích và đánh giá hiệu quả truyền thông dưới các điều kiện khác nhau, bài báo cáo góp phần làm sáng tỏ tiềm năng cũng như giới hạn thực tế của công nghệ LoRa trong ứng dụng thực tế.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Tổng quan về LoRa - Long Range Wireless Communication

LoRa (viết tắt của Long Range) là một công nghệ điều chế tín hiệu không dây hoạt động ở tầng vật lý, được phát triển bởi Semtech. Công nghệ này ra đời nhằm giải quyết bài toán cốt lõi của Internet of Things (IoT): tạo ra các kết nối không dây tầm xa, tiêu thụ điện năng cực thấp.

Nền tảng của LoRa là kỹ thuật điều chế Trải phổ chirp (Chirp Spread Spectrum - CSS). Kỹ thuật này cho phép tín hiệu được truyền đi với công suất thấp nhưng vẫn duy trì được tính toàn vẹn trên một khoảng cách lớn, đồng thời có khả năng kháng nhiễu vượt trội.



Hình 2.1 Truyền thông LoRa

Tuy nhiên, để đạt được phạm vi truyền thông ánh tượng (lên đến 10km ở không gian mở và 2-5 km trong môi trường đô thị), LoRa phải đánh đổi bằng tốc độ truyền dữ liệu. Tốc độ của LoRa khá khiêm tốn, thường chỉ dao động từ vài trăm bps đến tối đa 50 kbps, tùy thuộc vào cấu hình. Sự đánh đổi này hoàn toàn phù hợp với các ứng dụng IoT, nơi các thiết bị như cảm biến chỉ cần gửi những gói dữ liệu nhỏ một cách không thường xuyên.

Industrial Wireless Technology Comparison Table													
	LAN			Cellular						Low Power Wide Area (LPWA)			
Category	RF	Wi-Fi™	NB-IoT	LTE-M	3G	4G LTE	5G	LoRaWAN®	LPWAN Proprietary	SmartMesh IP™			
Sub-category	802.11a/b/g/n 802.11ac	802.11a/b/g/n 802.11ac									802.15.4g		
Distance	5-10 Meters	100 Meters	100 Meters	by service provider coverage				15 Kilometers	5 Kilometers	Indoor – 100 Meters Outdoor – 300 Meters			
Data Rate	40kbps	2x 2.3Mbps	2x 2.7Mbps	60Kbps	1Mbps	UMTS/NSPA+ 5.7 Mbps (DL) / 14.4 Mbps (UL)	LTE Cat.4 150 Mbps (DL) / 50 Mbps (UL)	LTE Advanced Pro Cat.16 1000 Mbps (DL) / 150 Mbps (UL)	50Kbps	50Kbps	250kbps		
Data Category	Sensor Data	Data, voice, and HD video	Data, voice, and HD video	Sensor data	Sensor data, voice, image	Data, Voice	Data, voice, video	Data, voice, HD video	Sensor data	Sensor data	Sensor data		
License-Free	Yes			No				Yes					
Security	EPC Raw Data Transmission	Open system, shared key, legacy 802.1X, WPA/WPA2, WPA2-PSK (TKIP), WPA2-PSK(AES)	3GPP (128 to 256bit)	3GPP TS 33.401, 128 to 256bits	Based on 3GPP TS			AES-128bit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Device authentication (3 levels) ▪ AES-128bit (multiple keys) ▪ Message integrity check (MIC) ▪ Key changeover and rotation 				
Node	One-to-One	One-to-Many		One-to-Many				One-to-Many					
Recommend application scenario	Short distance without objects in between.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Indoor and fixed range areas ▪ Less signal interference ▪ Supports medium data rate ▪ Provides high scalability 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ideal in complex area, has high signal penetration ▪ High anti-interference capability ▪ Low data transmission ▪ Supports long distance transmission with low power consumption 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Data transmission without geographic constraint ▪ Long distance transmission ▪ Low signal interference ▪ Supports ultra-high data rate transmission ▪ Widely-functional 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Self-configuration for easy deployment in widespread area ▪ High anti-interference capability ▪ Low data rate transmission ▪ Supports long distance transmission with low power consumption 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ultra-low power consumption ▪ Self configuration ▪ Self-configuration and reconfiguration for easy deployment in widespread area ▪ Dynamic bandwidth ▪ Zero network collisions with packet synchronization ▪ Multiple simultaneous data transmission 			
Product Offerings	Gateway WISE-2834	Access Point EKI-8334G Series EKI-1365-H-E EKI-9502n	I/O Modules WISE-4220 WISE-4220-A WISE-4220-S231	Router ICR-3211B	Router ICR-3211B	Router BB-UR2X Series	CAT16 Router ICR-4400 Series CAT3/4 Router ICR-3200 Series IUR-1600 Series BB-LR2X Series BB-SR30X Series Asset Integration Gateway SmartSwarm42 Series	Router ICR-4400 Series	Gateway WISE-6610	Access Point WISE-A210-AP	I/O Modules WISE-2210/2211 WISE-4210	I/O Sensing Modules BB-WS02C3101C BB-WS02M3101P2K BB-WCDH2102H	

Hình 2.2 So sánh tốc độ và khoảng cách truyền giữa các chuẩn truyền thông

LoRa hoạt động trên các băng tần không cần cấp phép (unlicensed bands) như 433 MHz, 868 MHz (Châu Âu), 915 MHz (Bắc Mỹ), giúp giảm chi phí triển khai. Hơn nữa, LoRa có khả năng tiêu thụ năng lượng cực thấp, cho phép các thiết bị dùng pin có thể hoạt động trong vài năm mà không cần sạc lại – một điểm mạnh nổi bật trong các ứng dụng ngoài trời hoặc ở nơi khó bảo trì.

2.2. Các thông số kỹ thuật liên quan

Hiệu suất của một hệ thống LoRa phụ thuộc mật thiết vào việc cấu hình các tham số kỹ thuật. Việc lựa chọn và tối ưu hóa các tham số này ảnh hưởng trực tiếp đến tầm xa, tốc độ, độ ổn định và khả năng chống nhiễu của mạng.

Tần số hoạt động: LoRa vận hành trên các băng tần ISM không cần cấp phép, chẳng hạn như 433 MHz, 868 MHz (châu Âu), và 915 MHz (Bắc Mỹ). Tần số thấp hơn (như 433 MHz) có bước sóng dài hơn, giúp tín hiệu nhiễu xạ tốt hơn và ít bị suy hao bởi vật cản, lý tưởng cho việc truyền xa ở khu vực trống trải.

Tần số hoạt động: Trong dự án này, nhóm sử dụng mô đun LoRa RA-02 tần số 433 MHz – một dải tần không cần cấp phép tại Việt Nam, có bước sóng dài giúp tín hiệu truyền xa và ít bị suy hao qua vật cản. Tần số này đặc biệt phù hợp với các môi trường mở, ít nhiễu.

Hệ số trải phổ (Spreading Factor - SF): Đây là thông số quan trọng nhất, quyết định sự cân bằng giữa tầm xa và tốc độ dữ liệu. SF có giá trị từ 6 đến 12. **SF cao (ví dụ: SF12):** Tín hiệu được "trải" ra lâu hơn, giúp máy thu có nhiều cơ hội "nghe" được tín hiệu yếu hoặc bị nhiễu. Kết quả là tầm xa tăng lên đáng kể, nhưng thời gian phát sóng (Time on Air) kéo dài, làm giảm tốc độ truyền và tốn nhiều năng lượng hơn. **SF thấp (ví dụ: SF7):** Thời gian phát sóng ngắn, cho tốc độ truyền cao hơn, nhưng yêu cầu tín hiệu mạnh hơn và dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu, phù hợp cho khoảng cách ngắn.

Băng thông (Bandwidth - BW): Là độ rộng của dải tần số được sử dụng để truyền một gói tin. Băng thông lớn (ví dụ: 250 kHz) cho phép truyền dữ liệu nhanh hơn nhưng làm giảm độ nhạy của máy thu. Ngược lại, băng thông hẹp (ví dụ: 62.5 kHz) giúp tăng độ nhạy, cải thiện khả năng thu tín hiệu yếu từ xa nhưng làm giảm tốc độ.

Tỷ lệ mã hóa (Coding Rate - CR): Đây là cơ chế sửa lỗi chuyển tiếp (Forward Error Correction - FEC). Một tỷ lệ CR cao (ví dụ: 4/8 so với 4/5) sẽ thêm nhiều bit dữ liệu dự phòng hơn vào gói tin. Điều này giúp máy thu có khả năng tự phục hồi các bit bị lỗi trong quá trình truyền, tăng độ tin cậy nhưng làm giảm tốc độ dữ liệu hiệu dụng.

Preamble Length: Chuỗi preamble là phần mở đầu trong mỗi gói tin LoRa, giúp đồng bộ hóa giữa thiết bị phát và thu. Preamble càng dài thì thiết bị thu càng dễ phát hiện tín hiệu đang đến, đặc biệt trong môi trường có nhiều nhiễu nền.

Sync Word: Là một chuỗi bit đặc biệt để phân biệt các mạng LoRa khác nhau. Việc cấu hình Sync Word giúp tránh tình trạng nhiễu tín hiệu giữa các mạng LoRa độc lập hoạt động trong cùng khu vực.

Công suất phát (TX Power): Là năng lượng anten phát ra. Công suất cao hơn giúp tăng tầm xa nhưng cũng tiêu thụ nhiều năng lượng hơn và có thể gây nhiễu cho các thiết bị lân cận.

Độ lợi anten (Gain): Là khả năng khuếch đại tín hiệu của anten theo một hướng nhất định. Anten có độ lợi cao sẽ tập trung năng lượng truyền hoặc thu về một hướng, tăng hiệu quả truyền thông theo hướng đó nhưng giảm ở hướng khác.

Chiều cao anten: Việc đặt anten ở vị trí cao hơn mặt đất giúp giảm thiểu suy hao do địa hình và nhiễu từ bề mặt, đồng thời mở rộng vùng phủ sóng. Đây là một yếu tố quan trọng thường bị bỏ qua trong thiết kế hệ thống truyền thông không dây.

Tất cả các thông số trên đều có mối liên hệ chặt chẽ với nhau. Việc lựa chọn và cấu hình phù hợp cần được cân nhắc kỹ lưỡng tùy theo mục tiêu ứng dụng, điều kiện môi trường và yêu cầu về hiệu suất truyền thông. Trong các phần tiếp theo, các thông số này sẽ được phân tích và đánh giá trong thực nghiệm nhằm xác định cấu hình tối ưu cho hệ thống sử dụng công nghệ LoRa.

2.3. Úng dụng thực tiễn

LoRa đã được triển khai trong rất nhiều lĩnh vực thực tế, đặc biệt là trong các hệ thống IoT quy mô lớn. Một trong những ứng dụng phổ biến nhất là đồng hồ nước, điện, gas thông minh, cho phép thu thập dữ liệu từ xa mà không cần đến tận nơi. Trong nông nghiệp thông minh, LoRa được dùng để kết nối các cảm biến đo độ ẩm đất, nhiệt độ, ánh sáng nhằm tối ưu hóa việc tưới tiêu và chăm sóc cây trồng. Ngoài ra, LoRa còn xuất hiện trong các thành phố thông minh như quản lý bãi đỗ xe, đèn đường tự động, giám sát mức rác thải trong thùng rác công cộng, và giám sát môi trường như đo chất lượng không khí, cảnh báo lũ lụt. Một ưu điểm lớn nữa là khả năng triển khai linh hoạt mà không phụ thuộc vào hạ tầng mạng viễn thông truyền thống, giúp LoRa trở thành lựa chọn lý tưởng ở những vùng nông thôn, miền núi hoặc các khu công nghiệp.

3. LỰA CHỌN LINH KIỆN

3.1. Vi điều khiển ESP32

Để xử lý logic, điều khiển module LoRa và các ngoại vi khác, nhóm đã lựa chọn vi điều khiển ESP32 của Espressif Systems. Quyết định này dựa trên sự kết hợp tối ưu giữa hiệu năng, tính năng và chi phí mà ESP32 mang lại cho các dự án IoT.

ESP32 là một vi điều khiển 32-bit mạnh mẽ, thường được trang bị CPU Xtensa hai nhân với xung nhịp lên tới 240 MHz. Sức mạnh xử lý này hoàn toàn đủ khả năng để thực thi các tác vụ phức tạp, từ việc quản lý giao thức LoRa, xử lý dữ liệu cảm biến, cho đến vận hành các giao tiếp mạng khác.



Hình 3.1 Vi điều khiển ESP32

Điểm nổi bật nhất của ESP32 là việc tích hợp sẵn Wi-Fi và Bluetooth (BLE). Tính năng này giúp loại bỏ sự cần thiết của các module không dây bổ sung, qua đó đơn giản hóa thiết kế mạch và giảm chi phí. Nó mở ra khả năng xây dựng các thiết bị đa năng, ví dụ như một gateway có thể nhận dữ liệu qua LoRa và chuyển tiếp lên máy chủ đám mây qua Wi-Fi, hoặc một node cho phép cấu hình qua Bluetooth từ điện thoại thông minh.

Hơn nữa, ESP32 có khả năng giao tiếp mượt mà với các module LoRa phổ biến (như dòng SX127x) thông qua giao diện SPI. Hệ sinh thái phần mềm xung quanh ESP32 rất lớn mạnh, với nhiều thư viện mã nguồn mở (như LoRa.h, LMIC) và sự hỗ trợ rộng

rõi từ các môi trường phát triển như Arduino IDE, PlatformIO, và ESP-IDF. Điều này giúp quá trình lập trình và gỡ lỗi trở nên nhanh chóng và thuận tiện.

Cuối cùng, các chế độ tiết kiệm năng lượng, đặc biệt là chế độ Deep Sleep (tiêu thụ chỉ vài micro-ampe), làm cho ESP32 trở thành một lựa chọn lý tưởng cho các ứng dụng chạy bằng pin, nơi tuổi thọ thiết bị là một yếu tố quan trọng.

Bảng 3.1 Nhữnng lý do chọn ESP32

Tiêu chí	ESP32 đáp ứng
Tích hợp kết nối không dây	ESP32 được trang bị sẵn Wi-Fi và Bluetooth (BLE) , giúp giảm thiểu linh kiện ngoại vi và đơn giản hóa việc xây dựng các thiết bị đa năng như gateway (LoRa-to-WiFi) hoặc cầu hình qua điện thoại.
Hiệu năng xử lý cao	Sở hữu CPU lõi kép Xtensa 32-bit với xung nhịp lên đến 240 MHz, đủ sức xử lý đồng thời tác vụ truyền thông LoRa, các thuật toán và logic phức tạp khác mà không bị quá tải.
Tương thích tốt với LoRa	Dễ dàng giao tiếp với các module LoRa (như dòng SX127x) qua giao diện SPI. Được hỗ trợ bởi nhiều thư viện mã nguồn mở mạnh mẽ (LoRa.h, LMIC), rút ngắn thời gian phát triển.
Tối ưu hóa năng lượng	Hỗ trợ nhiều chế độ tiết kiệm điện, đặc biệt là chế độ ngủ sâu (Deep Sleep) với dòng tiêu thụ chỉ vài micro-ampe (μ A), là yếu tố then chốt cho các ứng dụng IoT vận hành bằng pin.
Hệ sinh thái phát triển mạnh mẽ	Được hỗ trợ bởi các môi trường lập trình phổ biến (Arduino IDE, PlatformIO) cùng cộng đồng người dùng lớn và kho tài liệu, thư viện phong phú, giúp việc lập trình và gỡ lỗi thuận tiện.
Chi phí hợp lý và phổ biến	Có giá thành thấp và nhiều biến thể bo mạch (tích hợp sẵn màn hình OLED, khe cắm pin...), dễ dàng tìm mua trên thị trường, phù hợp với các dự án có ngân sách hạn chế.

3.2. Anten

Anten là một thiết bị dùng để phát và thu sóng điện từ, giúp truyền và nhận tín hiệu trong các hệ thống không dây như Wi-Fi, LoRa, Bluetooth, radio, truyền hình, v.v. Anten đóng vai trò trung gian giữa mạch điện tử và không gian, chuyển đổi dòng điện thành sóng vô tuyến khi phát, và sóng vô tuyến thành tín hiệu điện khi thu.

Bảng 3.2 Các khái niệm liên quan đến anten

Khái niệm	Giải thích
Tần số hoạt động	Dải tần số mà tại đó anten đạt hiệu suất tối ưu (truyền/nhận tốt nhất). Anten cần được thiết kế cho đúng tần số hoạt động của hệ thống (ví dụ: 433 MHz).
Độ lợi anten (Gain)	Đại lượng đo khả năng tập trung năng lượng bức xạ của anten theo một hướng cụ thể, đơn vị là dBi. Độ lợi càng cao, tín hiệu theo hướng đó càng mạnh, giúp tăng tầm xa.
Bức xạ đǎng hướng	Kiểu bức xạ năng lượng đồng đều ra mọi hướng trong một mặt phẳng (360°), phù hợp cho các node cần phủ sóng rộng hoặc khi hướng của các thiết bị khác không cố định.
Bức xạ định hướng	Kiểu bức xạ tập trung năng lượng vào một hướng hẹp (như một chùm sáng), lý tưởng để thiết lập các liên kết điểm-điểm (point-to-point) ở khoảng cách xa.
Tỷ số sóng đứng VSWR	Chỉ số đo mức độ phù hợp trở kháng giữa anten và đường truyền. VSWR càng gần 1.0 càng tốt, cho thấy năng lượng được truyền đi hiệu quả và ít bị phản xạ ngược.
Chiều dài anten	Kích thước vật lý của anten, thường được thiết kế theo một tỷ lệ của bước sóng (λ) của tín hiệu (ví dụ: $\lambda/4$, $\lambda/2$) để đạt được sự cộng hưởng và hiệu suất cao nhất.

Bảng 3.3 Một số loại anten thông dụng cho LoRa

Loại anten	Đặc điểm
Anten thanh (whip)	Thiết kế đơn giản, thẳng, cung cấp dạng bức xạ đanding hướng. Thường được tích hợp sẵn hoặc đi kèm module, phù hợp cho các node thông thường.
Anten PCB	Được thiết kế trực tiếp trên bo mạch, giúp tiết kiệm chi phí và không gian. Phù hợp cho các sản phẩm thương mại yêu cầu tính nhỏ gọn.
Anten dạng xoắn (helical)	Thiết kế nhỏ gọn nhưng vẫn đạt hiệu quả tốt ở các tần số thấp (như 433 MHz). Có dạng bức xạ gần như đanding hướng, là một sự cân bằng tốt giữa kích thước và hiệu suất.
Anten ngoài (external)	Kết nối với module qua cáp đồng trục, cho phép lựa chọn linh hoạt về loại (đanding hướng/định hướng) và vị trí lắp đặt để tối ưu hóa tầm thu phát.

Để có thể thực hiện nhiều kịch bản kiểm nghiệm khác nhau, nhóm quyết định sử dụng anten:

- Anten 433MHz 5dBi, 12dBi Magnetic Base Omni Antenna SMA Male



Hình 3.2 Anten 433MHz

3.3. Nguồn điện

Việc đảm bảo một nguồn điện ổn định và linh hoạt là yếu-tố-then-chốt trong quá trình phát triển và kiểm nghiệm thực địa. Trong dự án này, nhóm đã lựa chọn sử dụng **máy tính xách tay (laptop)** làm nguồn cấp điện chính cho cả thiết bị phát và thu. Giải pháp này mang lại nhiều lợi ích kép, vừa cung cấp năng lượng, vừa tạo điều kiện thuận lợi cho việc lập trình và giám sát.

Các bo mạch ESP32 được thiết kế để cấp nguồn trực tiếp qua cổng USB. Bằng cách kết nối thiết bị với cổng USB của laptop, chúng ta không chỉ cung cấp được một nguồn điện **5V Ổn định** mà còn thiết lập được một kênh giao tiếp nối tiếp. Kênh giao tiếp này cực kỳ hữu ích, cho phép:

- 1. Nạp chương trình:** Dễ dàng cập nhật firmware cho vi điều khiển ngay tại hiện trường mà không cần tháo lắp phức tạp.
- 2. Giám sát và Gỡ lỗi :** Theo dõi trực tiếp các thông số hoạt động của thiết bị (như trạng thái gửi/nhận, giá trị RSSI, SNR, nội dung gói tin) thông qua công cụ Serial Monitor. Điều này giúp việc phân tích kết quả và xác định lỗi trở nên nhanh chóng và chính xác.

Sự kết hợp giữa việc cấp nguồn và giám sát dữ liệu trong cùng một kết nối đã đơn giản hóa đáng kể quá trình thiết lập và triển khai thử nghiệm, giúp nhóm tập trung hoàn toàn vào việc đánh giá hiệu suất của hệ thống LoRa.



Hình 3.3 Nguồn điện máy tính xách tay

3.4. Mô đun Truyền thông LoRa: Ai-Thinker Ra-02 (SX1278)



Hình 3.4 Mô đun Truyền thông LoRa: Ai-Thinker Ra-02 (SX1278)

Để hiện thực hóa khả năng truyền thông không dây tầm xa, thành phần cốt lõi của hệ thống là mô đun LoRa. Nhóm đã quyết định sử dụng mô đun **Ra-02** của hãng Ai-Thinker, một lựa chọn phổ biến và đáng tin cậy được xây dựng dựa trên chip **SX1278** của Semtech. Mô đun này chịu trách nhiệm hoàn toàn cho việc điều

chế và giải điều chế tín hiệu theo công nghệ Trải phổ chirp (CSS), hoạt động ở tầng vật lý của mô hình OSI.

Việc lựa chọn mô đun Ra-02 dựa trên các đặc tính kỹ thuật và tính phù hợp với mục tiêu của dự án:

Bảng 3.4 Các đặc tính chính và lý do lựa chọn Mô đun LoRa Ra-02 (SX1278)

Tiêu chí	Phân tích & Lý do lựa chọn cho dự án
Chip xử lý lõi	Dựa trên chip Semtech SX1278, là trái tim của công nghệ LoRa, đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy theo tiêu chuẩn công nghiệp.
Tần số hoạt động	Vận hành trên băng tầnISM 433 MHz, không yêu cầu cấp phép tại Việt Nam. Bước sóng dài của tần số này giúp tín hiệu xuyên vật cản tốt hơn, là yếu tố lý tưởng cho mục tiêu kiểm nghiệm tầm xa.
Giao diện kết nối	Sử dụng giao diện SPI (Serial Peripheral Interface) phổ biến, cho phép kết nối đơn giản và trao đổi dữ liệu tốc độ cao với vi điều khiển ESP32. Được hỗ trợ bởi nhiều thư viện, giúp rút ngắn thời gian phát triển.
Độ nhạy thu (Sensitivity)	Có độ nhạy thu cực cao (lên tới -148 dBm). Khả năng này cho phép mô đun giải mã thành công các tín hiệu rất yếu, là yếu tố then chốt để đạt được khoảng cách truyền thông lớn.
Khả năng tùy biến Anten	Hỗ trợ anten ngoài (qua cổng U.FL hoặc hàn trực tiếp). Đây là một đặc tính bắt buộc và quan trọng nhất đối với dự án, cho phép nhóm linh hoạt thay đổi và thử nghiệm với nhiều loại anten để thực hiện mục tiêu kiểm nghiệm và tối ưu hóa.
Chi phí & Tính phổ biến	Mô đun có giá thành hợp lý và được cộng đồng sử dụng rộng rãi, giúp việc tìm kiếm tài liệu, mã nguồn tham khảo và hỗ trợ kỹ thuật trở nên dễ dàng.

Với sự kết hợp giữa hiệu năng tin cậy, chi phí hợp lý và đặc biệt là tính linh hoạt trong việc lựa chọn anten, mô đun Ra-02 là lựa chọn tối ưu, đáp ứng đầy đủ các yêu cầu nghiên cứu và thực nghiệm của dự án.

4. KỊCH BẢN KIỂM THỬ & KẾT QUẢ

4.1. Thử nghiệm trong phòng

4.1.1. Chuẩn bị

1. Ăng ten 12dbi với các thông số mặc định.
2. Mô đun SX1278 LoRa Ra02, đầu chuyển đổi SMA sang IPEX
3. Esp32

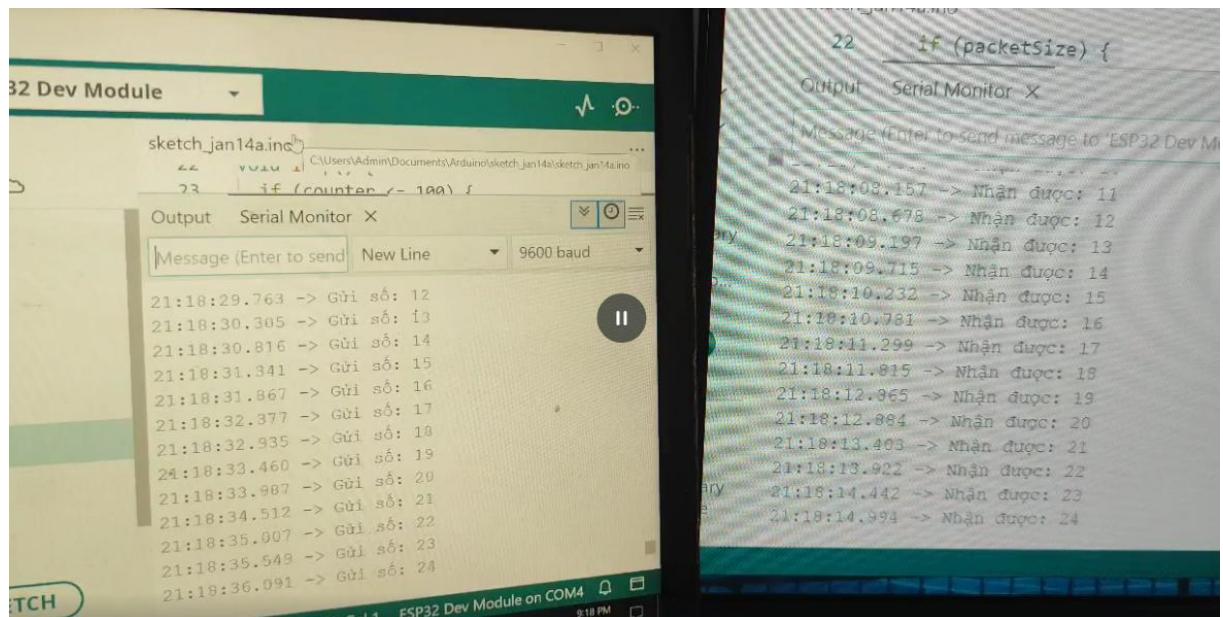
4.1.2. Quy trình thử nghiệm

Kịch bản 1 : Test truyền nhận trong phòng (2 kí tự)

Địa Điểm: Trong phòng 4.2m x 6.5m

Bên gửi: Gửi 99 gói tin có nội dung từ 1 đến 99 tin

Bên nhận: Nhận các gói tin rồi in ra màn hình



Hình 4.1 Truyền nhận trong nhà

- ⇒ Với khoảng cách như 0cm, 50cm, 1m, 6m đều truyền nhận thành công với tỷ lệ lỗi gần như bằng 0 khi đặt thiết bị ổn định.

4.2. Thủ nghiệm ngoài trời

4.2.1. Chuẩn bị

1. Ăng ten 5dbi và 12dbi với các thông số mặc định.
2. Mô đun SX1278 LoRa Ra02, Đầu chuyển đổi SMA sang IPEX.
3. Esp32, gậy dài 1,5m và gậy dài 2,5m.

4.2.2. Thủ nghiệm

A. Địa điểm 1: Hồ Tây (không gian thoáng, nhưng chưa phải là lý tưởng)

1. Kịch bản 1: Test truyền nhận **ngoài trời** với **Āng ten 5dbi, 12dbi**.

(SF=12, BW=125kHz, CR=4/5, Tx Power 17 dBm...)

Bên gửi: Gửi 99 gói tin nội dung từ 1 đến 99

Bên nhận: **Nhận các gói tin rồi in ra màn hình.**

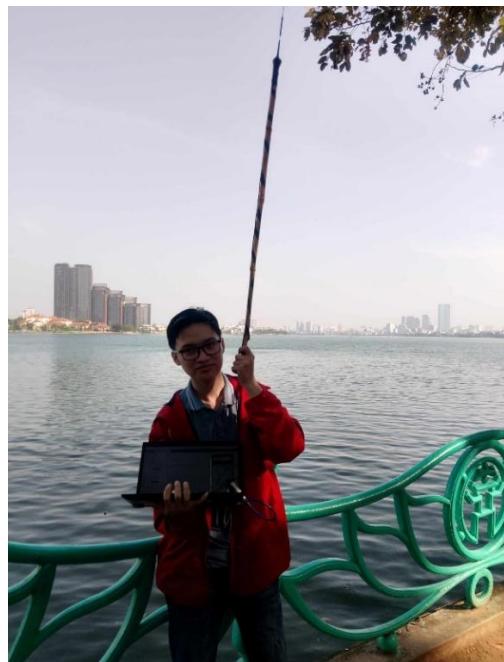
2. Thực hiện:

Thiết bị gửi cao 2,5m so với đất, 4m so với mặt nước đứng yên và di chuyển với tốc độ 25km/h.

Thiết bị thu cao 2,5m so với đất, 4m so với mặt nước và đứng yên.

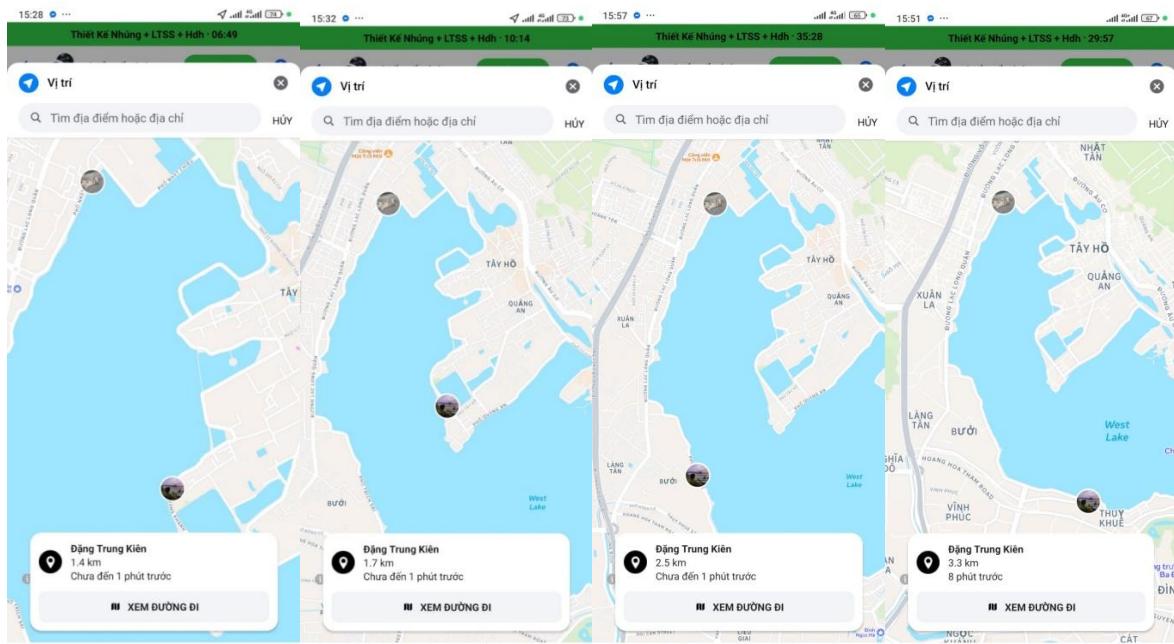


Hình 4.2 Ảnh thiết bị gửi



Hình 4.3 Ảnh thiết bị thu

3.Các vị trí thử nghiệm



Hình 4.4 Các vị trí thử nghiệm

=> Kết quả:

Với Ăng ten 5 dbi

Khoảng cách thu được tối đa là 2,5km khi đứng yên và ổn định.

Khoảng cách thu được tối đa là 1,7km khi di chuyển.

Với Ăng ten 12dbi

Khoảng cách thu được 3.3km khi đứng yên và tỉ lệ mất mát bản tin là rất lớn do chưa tìm được vị trí thông thoáng xa hơn.

Khoảng cách thu được tối đa 2,5km khi di chuyển (có nhiều tán cây, xe cộ và nhà khi di chuyển).

B. Địa điểm 2: Đê sông Nhuệ (đê cao hai bên là đồng ruộng cây cỏ xung quanh thấp, khá lý tưởng).



Hình 4.5 Hình ảnh khi set up đo ở bờ đê sông Nhuệ

- **Kịch bản 2:** Tương tự kịch bản 1 tuy nhiên thay đổi một số thông số cũng như tối ưu đánh đổi, đo khi đứng yên để đạt được hiệu quả truyền xa tốt nhất.

(SF=12 Độ nhạy cao nhất, xa nhất

BW= 7.8 kHz Băng hẹp nhất

CR= 4/8 Tăng chống nhiễu, giảm lỗi

Tx Power 20 dBm Công suất lớn nhất)

- **Thiết bị phát** đặt cao 5,5m so với đê và cao 10,5m so với mặt sông
- **Thiết bị thu** đặt cao 5,5m so với đê và cao 10,5m so với mặt sông



Hình 4.6 Hình ảnh sau khi set up đo ở bờ đê sông Nhuệ

=> Kết quả:



Hình 4.7 Hình ảnh khoảng cách đo ở bờ đê sông Nhuệ

Khoảng cách truyền xa tối đa lên tới **8,2km** tuy nhiên tại khoảng cách này các tin nhắn được có nhiều lỗi và tỉ lệ mất gói cao.

C. Địa điểm 3: Trạm phát sóng VTC cạnh Công Viên Thống Nhất (Kiểm tra khả năng hoạt động trong vùng nhiễu cường độ cao)

- **Kịch bản:** Vẫn sử dụng kịch bản số 2
- **Thiết bị gửi:** Anten được gắn trên gậy dài 250cm, đặt cố định tại vị trí gần chân trạm phát sóng VTC nhất có thể. **Đây là điểm có mức nhiễu nền cao nhất.**

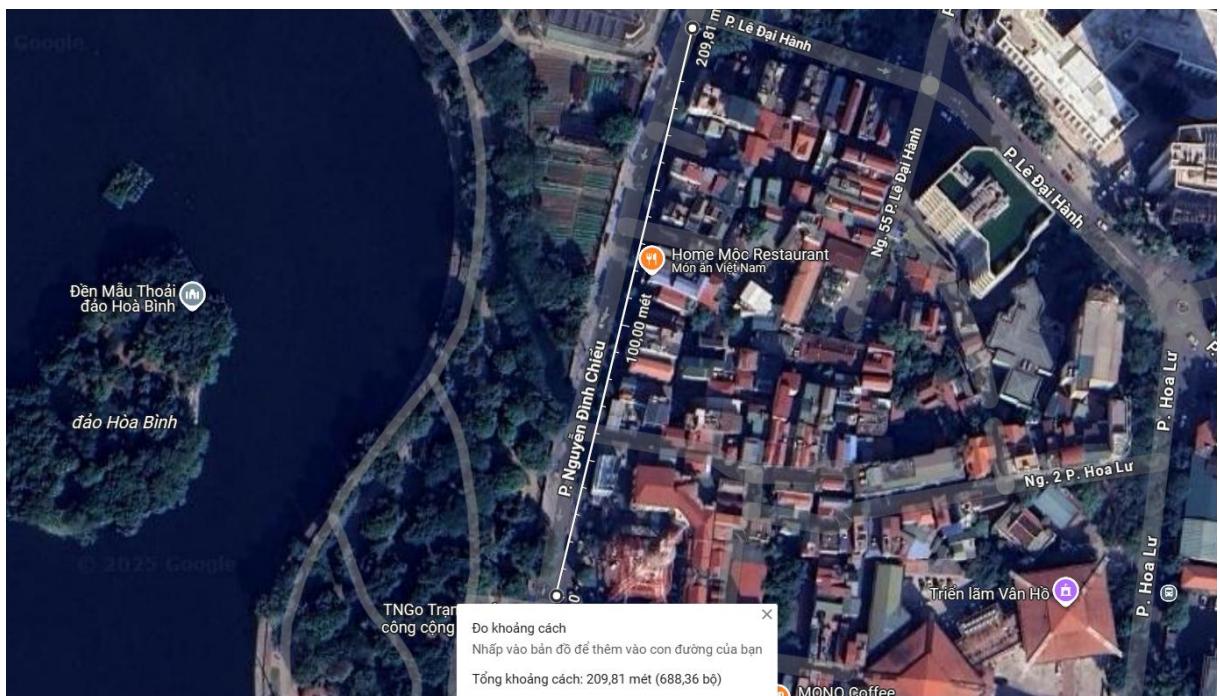


Hình 4.8 Thiết bị phát tại trạm phát sóng VTC

- **Thiết bị thu:** Anten được gắn trên gậy dài 250cm, bắt đầu từ vị trí gần thiết bị phát, sau đó di chuyển thẳng ra xa dần.



Hình 4.9 Thiết bị thu ở gần trạm phát sóng VTC



Hình 4.10 Khoảng cách đo khu vực trạm phát sóng VTC

=> Kết quả:

Khoảng cách truyền xa tối đa chỉ **200m** do truyền trong môi trường nhiễu cực mạnh

D. Địa điểm 4: Trong khuôn viên Công Viên Thông Nhất (Kiểm tra khả năng hoạt động trong khu vực có nhiều cây cối)

- **Kịch bản 3:** Tương tự kịch bản số 2 nhưng ở đầu anten có gắn
 - 1 chai nhựa có nước bên ngoài (mô phỏng thiết bị được đóng gói đặt ngoài trời mưa),
 - 1 lọ inox (mô phỏng xuyên cửa inox hoặc hộp iox)
- **Thiết bị gửi:** Anten được gắn trên gậy dài 250cm, đầu anten có gắn 1 chai inox

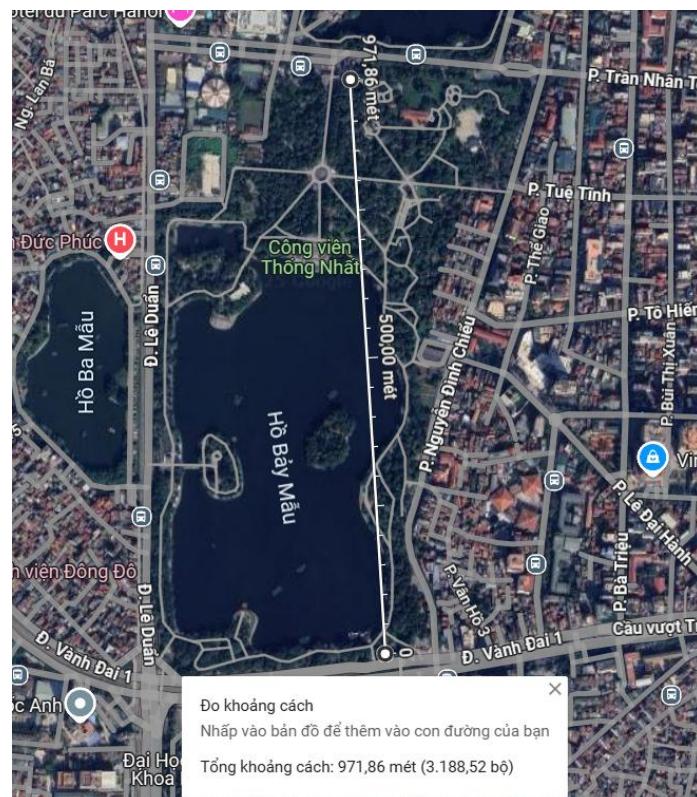


Hình 4.11 Thiết bị gửi tin đầu anten gắn chai inox

- **Thiết bị thu:** Anten được gắn trên gậy dài 250cm, đầu anten có gắn 1 chai nhựa bên ngoài có dính nước



Hình 4.12 Thiết bị thu tin bọc trong chai nhựa có nước ngoài



Hình 4.13 Khoảng cách đo khu vực công viên Thông Nhất

=> Kết quả:

Anten truyền tốt trong khu vực gần trạm phát song (cách 100m), thoảng đãng (công viên) có nhiều tán cây với khoảng cách xấp xỉ **1km** (chưa phải là tối đa do chưa tìm được vị trí đo dài hơn) tuy nhiên đã cho thấy với môi trường mưa, môi trường ẩm cao (qua mặt hồ), qua các tán cây hay qua vài lớp inox trong khoảng cách này gần như không có ảnh hưởng.

4.3. Thủ nghiệm trong chung cư cao tầng

4.3.1. Chuẩn bị

1. Ăng ten 12dbi với các thông số mặc định.
2. Mô đun SX1278 LoRa Ra02, đầu chuyển đổi SMA sang IPEX
3. Esp32

4.3.2. Quy trình thử nghiệm

Kịch bản: Test truyền nhận xuyên tầng chung cư thực hiện truyền sóng từ tầng 22 xuống.

Bên gửi: Gửi **99** gói tin có nội dung từ **1** đến **99** tin

Bên nhận: Nhận các gói tin rồi in ra màn hình.

Địa điểm: tòa Times Tower



Hình 4.14 Hình ảnh tòa nhà Times Tower

=> Kết quả:

134,34m² 115,17m² 133,98m²



dường Lê Văn Thiêm

Tháp 1

Hình 4.15 Các vị trí đo trong chung cư

Bảng 4.1 Kết quả đo khi đứng gần thang máy

Vị trí	Số tầng xuyên	Kết quả
Tầng 22-20	2	Nhận tốt
Tầng 22-18	4	Nhận tốt
Tầng 22-16	6	Nhận tốt
Tầng 22-14	8	Nhận tốt
Tầng 22-12	10	Nhận tốt
Tầng 22-10	12	Nhận tốt

Bảng 4.2 Kết quả đo khi đứng xa thang máy

Vị trí	Số tầng xuyên	Kết quả
Tầng 22-20	2	Nhận tốt
Tầng 22-18	4	Nhận tốt
Tầng 22-16	6	Nhận tốt
Tầng 22-14	8	Nhận được
Tầng 22-12	10	Không nhận được
Tầng 22-10	12	Không nhận được

5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Phân Tích Đánh Giá Toàn Diện Hiệu Suất Truyền Thông LoRa trong các Môi Trường Thực Tế Đa Dạng

5.1. Tổng hợp và Đánh giá Sơ bộ Hiệu suất Thực nghiệm

Quá trình kiểm nghiệm thực tế đã cho thấy một bức tranh toàn cảnh về hiệu suất của công nghệ LoRa, khẳng định rằng khả năng truyền thông không phải là một hằng số mà là một kết quả biến thiên mạnh mẽ, phụ thuộc sâu sắc vào bối cảnh triển khai. Sự khác biệt này được minh chứng rõ nét qua hai kết quả cực đoan của các thử nghiệm: một mặt, hệ thống đã thiết lập được một liên kết truyền thông ở khoảng cách án tượng lên tới 8.2 km trong điều kiện gần như lý tưởng tại khu vực Đê Sông Nhuệ; mặt khác, phạm vi hoạt động đã suy giảm nghiêm trọng xuống chỉ còn 200 m khi đặt trong môi trường nhiễu điện từ cường độ cao gần trạm phát sóng VTC. Sự chênh lệch lên đến 41 lần về cự ly hoạt động này bác bỏ mọi nhận định đơn giản hóa về tầm phủ sóng của LoRa và nhấn mạnh rằng bối cảnh môi trường không chỉ là một yếu tố phụ trợ, mà là nhân tố quyết định đến hiệu suất trong thế giới thực.

Bên cạnh đó, các thử nghiệm trong môi trường đô thị dày đặc cũng cung cấp những dữ liệu giá trị, đặc biệt là khả năng xuyên phá vật cản của sóng LoRa. Kết quả ghi nhận tại tòa nhà Times Tower cho thấy tín hiệu có thể xuyên qua tới 12 tầng bê tông cốt thép khi được đặt ở vị trí thuận lợi.

Từ những kết quả sơ bộ này, có thể rút ra một kết luận nền tảng: hiệu suất của một hệ thống LoRa là kết quả tổng hòa của một bộ ba yếu tố có liên quan mật thiết với nhau: 1) Cấu hình logic của các tham số truyền sóng, 2) Chiến lược triển khai vật lý của hệ thống anten, và 3) Đặc tính của môi trường truyền dẫn. Các phân tích chuyên sâu dưới đây sẽ tiến hành mở rộng và làm rõ vai trò của từng trụ cột này.

5.2. Phân Tích Chuyên Sâu các Yếu Tố Quyết Định Hiệu Suất

5.2.1. Tác Động Quyết Định của Cấu Hình Tham Số LoRa

Việc lựa chọn các tham số vận hành của LoRa có ảnh hưởng trực tiếp và sâu sắc đến hiệu suất cuối cùng, đặc biệt là sự cân bằng giữa tầm xa, tốc độ dữ liệu và độ tin cậy. Sự chuyển đổi từ cấu hình mặc định sang cấu hình tối ưu hóa cho tầm xa đã mang lại một bước nhảy vọt về hiệu suất. Cụ thể, trong thử nghiệm tại Hồ Tây với cấu hình mặc định (ví dụ: SF=12, BW=125 kHz, CR=4/5, Công suất phát 17 dBm), hệ thống đạt được khoảng cách 3.3 km với anten 12dBi. Tuy nhiên, khi chuyển sang cấu hình tối ưu hóa tại Đê Sông Nhuệ, khoảng cách đã tăng vọt lên 8.2 km, tương đương mức tăng gần 150%, chủ yếu nhờ vào việc tinh chỉnh các tham số logic.

Mỗi tham số được tối ưu hóa đều đóng một vai trò kỹ thuật riêng biệt trong việc gia tăng ngân sách liên kết (link budget):

- **Hệ số trải phổ (SpreadingFactor=12):** Việc chọn giá trị SF cao nhất làm tăng đáng kể độ lợi xử lý (processing gain) của máy thu. Về mặt lý thuyết, mỗi bậc tăng của SF sẽ cung cấp thêm khoảng 2.5 dB vào ngân sách liên kết, cho phép máy thu giải mã các tín hiệu yếu hơn nhiều (ở xa hơn hoặc bị suy hao nhiều hơn). Cái giá phải trả là thời gian phát sóng (Time-on-Air) tăng lên, làm giảm tốc độ dữ liệu và tiêu thụ nhiều năng lượng hơn.
- **Băng thông (Bandwidth=7.8 kHz):** Sử dụng băng thông hẹp nhất giúp giảm mức nhiễu nền tích hợp trong kênh truyền. Việc giảm một nửa băng thông sẽ làm giảm nhiễu nền đi 3 dB, từ đó cải thiện trực tiếp Tỷ số tín hiệu trên nhiễu (Signal-to-Noise Ratio - SNR) và tăng độ nhạy của máy thu.
- **Tỷ lệ mã hóa (CodingRate=4/8):** Đây là cơ chế Sửa lỗi chuyển tiếp (Forward Error Correction - FEC) mạnh mẽ nhất. Với tỷ lệ 4/8, hệ thống sẽ thêm 4 bit dư thừa cho mỗi 4 bit dữ liệu gốc. Lượng thông tin dự phòng này cho phép máy thu có khả năng tự phục hồi các gói tin bị lỗi bit ở mức độ cao hơn, tăng cường độ tin cậy của liên kết trong môi trường nhiễu.
- **Công suất phát (TXPower=20 dBm):** Cấu hình công suất phát ở mức tối đa cho phép của module (+20 dBm) đã trực tiếp cộng thêm năng lượng vào tín

hiệu phát đi, tối đa hóa khả năng tín hiệu vượt qua suy hao không gian để đến được máy thu.

Tuy nhiên, một chi tiết quan trọng được ghi nhận trong báo cáo là tại khoảng cách cực đại 8.2 km, tỷ lệ gói tin nhận được là "rất ít". Điều này cho thấy con số 8.2 km không đại diện cho một liên kết truyền thông ổn định mà là *ngưỡng phát hiện tuyệt đối* của hệ thống. Tại cự ly này, liên kết đang hoạt động ở mức SNR tối thiểu mà chip SX1278 có thể khóa tín hiệu, với cơ chế FEC phải làm việc ở giới hạn của nó. Do đó, "phạm vi sử dụng được" hay "phạm vi tin cậy" trên thực tế sẽ ngắn hơn đáng kể. Việc diễn giải kết quả này phụ thuộc hoàn toàn vào yêu cầu của ứng dụng: đối với một cảm biến không trọng yếu (ví dụ: đo độ ẩm đất hàng ngày), tỷ lệ mất gói 50% có thể chấp nhận được; nhưng đối với một hệ thống cảnh báo quan trọng (ví dụ: cảnh báo lũ lụt), liên kết này hoàn toàn không thể sử dụng. Điều này biến một con số đơn thuần (8.2 km) thành một cuộc thảo luận sâu sắc về Chất lượng Dịch vụ (QoS) và độ tin cậy theo từng ứng dụng cụ thể.

5.2.2. Vai Trò Sóng Còn của Hệ Thống Anten và Vị Trí Triển Khai

Bên cạnh các tham số logic, chiến lược triển khai vật lý, đặc biệt là hệ thống anten, đóng một vai trò không thể thiếu. Thủ nghiệm tại Hồ Tây đã cho thấy minh chứng rõ ràng về tác động của độ lợi anten, khi anten 12dBi đạt tầm xa 3.3 km so với 2.5 km của anten 5dBi trong cùng điều kiện. Độ lợi anten cao hơn giúp tập trung năng lượng phát và thu, trực tiếp cải thiện ngân sách liên kết.

Tuy nhiên, yếu tố mang tính đột phá trong thử nghiệm tại Đê Sông Nhuệ không chỉ nằm ở việc sử dụng anten độ lợi cao, mà còn ở việc nâng độ cao của anten lên 5.5 m so với mặt đê (tương đương 10.5 m so với mặt sông). Việc này không đơn thuần tuân theo nguyên tắc "càng cao càng tốt", mà đã đáp ứng một yêu cầu kỹ thuật quan trọng trong truyền sóng vô tuyến tầm xa đảm bảo độ thông thoáng của Vùng Fresnel thứ nhất.

Vùng Fresnel là một vùng không gian hình elipsoid giữa hai anten phát và thu, nơi phần lớn năng lượng sóng được truyền qua. Để đảm bảo suy hao tín hiệu ở mức tối thiểu, lý tưởng nhất là vùng này không bị vật cản chiếm quá 40%. Đối với liên kết 8.2 km ở tần số 433 MHz, bán kính của Vùng Fresnel thứ nhất tại điểm giữa của quãng đường được tính toán vào khoảng 37.7 m. Bằng cách đặt

anten ở độ cao 10.5 m so với mặt sông, nhóm thực hiện đã nâng đường truyền thẳng (Line-of-Sight) lên cao, giúp phần trung tâm quan trọng nhất của Vùng Fresnel tránh được các vật cản trên mặt đất và hiện tượng phản xạ từ mặt sông. Điều này đã giảm thiểu đáng kể suy hao do nhiễu xạ và phản xạ mặt đất, một trong những nguyên nhân chính gây suy giảm tín hiệu ở các liên kết tầm xa. Do đó, bản chất "lý tưởng" của địa điểm Đê Sông Nhuệ không chỉ là có tầm nhìn thẳng, mà là địa hình của nó đã tạo điều kiện để thực thi một nguyên tắc kỹ thuật RF quan trọng, dẫn đến kết quả tầm xa vượt trội.

5.2.3. Phân Tích Ảnh Hưởng của Môi Trường Truyền Sóng

Các kịch bản thử nghiệm trong những môi trường khắc nghiệt đã cung cấp cái nhìn sâu sắc về giới hạn và khả năng chống chịu của LoRa.

A. Môi trường nhiễu điện từ cường độ cao (Trạm phát sóng VTC): Sự suy giảm phạm vi hoạt động một cách thảm khốc xuống còn 200 m được giải thích bằng hiện tượng giảm độ nhạy của máy thu. Các tín hiệu phát sóng công suất cực lớn từ trạm VTC đã làm tăng đột biến nền nhiễu trong môi trường. Khả năng giải mã tín hiệu của máy thu LoRa phụ thuộc vào tỷ số SNR. Ngay cả khi công suất tín hiệu từ máy phát LoRa vẫn đủ mạnh, việc nền nhiễu bị nâng lên hàng chục dB đã khiến cho tỷ số SNR giảm mạnh, làm cho máy thu trở nên "điếc" và không thể phân biệt được tín hiệu LoRa yếu ớt so với biển nhiễu xung quanh. Thủ nghiệm này đã định lượng hóa điểm yếu của LoRa khi hoạt động gần các nguồn phát nhiễu trong băng tần hoặc gần băng tần.

B. Môi trường đô thị có vật cản và cây cối (Công viên Thông Nhất): Việc duy trì được liên kết ở khoảng cách xấp xỉ 1 km dù anten bị che chắn bởi cây cối, một chai nhựa chứa nước (mô phỏng trời mưa) và một lọ inox (mô phỏng xuyên vật cản kim loại) đã chứng tỏ khả năng phục hồi đáng kể của LoRa trước hiện tượng fading đa đường và suy hao tín hiệu. Nước hấp thụ năng lượng RF, trong khi vỏ inox hoạt động như một lồng Faraday không hoàn hảo. Sự thành công của liên kết trong điều kiện này nêu bật lợi thế của kỹ thuật điều chế Trải phổ Chirp (CSS) trong việc vượt qua các thách thức của môi trường thực tế.

C. Môi trường tòa nhà cao tầng (Times Tower): Dữ liệu sâu sắc nhất đến từ việc so sánh kết quả khi đặt máy thu gần và xa khu vực thang máy. Tín hiệu đã

xuyên qua được 12 tầng khi ở gần thang máy, nhưng chỉ còn 6-8 tầng khi di chuyển ra xa. Sự khác biệt đáng kể này có thể được lý giải bằng hiệu ứng dẫn sóng (waveguide effect) không chủ đích của giếng thang máy. Khi tín hiệu lan truyền qua nhiều lớp sàn bê tông cốt thép, nó chịu mức suy hao tích lũy rất lớn (thường từ 10-15 dB mỗi tầng). Tuy nhiên, khi tín hiệu lọt vào không gian mở, thẳng đứng của giếng thang máy, nó có thể lan truyền theo chiều dọc với mức suy hao thấp hơn nhiều. Cấu trúc bê tông và thép của giếng thang đã phản xạ và dẫn sóng 433 MHz, hoạt động như một kênh truyền thẳng đứng. Đây là một ví dụ kinh điển về kênh truyền sóng không ngòi tới trong một môi trường phức tạp, và nó mang một hàm ý quan trọng cho việc triển khai thực tế: đặt các gateway IoT trong tòa nhà gần các trục thẳng đứng (thang máy, ống kỹ thuật, cầu thang bộ) là một chiến lược hiệu quả để tối đa hóa vùng phủ sóng theo chiều dọc.

5.3. Đánh Giá Tổng Thể và Khuyến Nghị Kỹ Thuật

5.3.1. Phân Tích So Sánh Hiệu Suất

Để tổng hợp các kết quả một cách có hệ thống, bảng dưới đây sẽ định lượng hóa hiệu suất của hệ thống LoRa qua các kịch bản thử nghiệm khác nhau, làm cơ sở cho các đánh giá và khuyến nghị tiếp theo.

Bảng 5.1 Phân Tích So Sánh Hiệu Suất LoRa qua các Kịch Bản Thử Nghiệm

Kịch Bản Thử Nghiệm	Loại Môi Trường	Tham Số Chính (SF/BW/CR/Pwr)	Cấu Hình Anten	Tầm Xa / Xuyên Tối Đa	Độ Tin Cậy Quan Sát	Yếu Tố Quyết Định Hiệu Suất Chính
Đê Sông Nhuệ	LoS Lý Tưởng, Nông Thôn	12 / 7.8kHz / 4/8 / 20dBm	12dBi, cao 5.5m	8.2 km	Rất thấp ở tầm xa tối đa	Độ thông thoáng Vùng Fresnel, Tham số tối ưu

Hồ Tây	Mặt Nước Mở, LoS	12 / 125kHz / 4/5 / 17dBm	12dBi, cao 2.5m	3.3 km	Tốt	Tầm nhìn thẳng (LoS), Độ lợi anten
Times Tower (Gần Thang Máy)	Đô Thị Dày Đặc, Độc	12 / 125kHz / 4/5 / 17dBm	12dBi	12 Tầng	Tốt	Hiệu ứng lan truyền "ông dẫn sóng"
Times Tower (Xa Thang Máy)	Đô Thị Dày Đặc, Độc	12 / 125kHz / 4/5 / 17dBm	12dBi	6-8 Tầng	Suy giảm ở độ sâu tối đa	Suy hao vật liệu cao (Bê tông, cốt thép)
Công viên Thông Nhất	Nhiều Cây Cối, Vật Cản	12 / 7.8kHz / 4/8 / 20dBm	12dBi, 2,5m	~1 km (chưa tối đa)	Tốt	Khả năng chống chịu Fading đa đường & Suy hao
Trạm phát sóng VTC	Nhiều Điện Từ Cao	12 / 7.8kHz / 4/8 / 20dBm	12dBi, 2,5m	200 m	Liên kết không ổn định	Giảm độ nhạy máy thu (Nền nhiều cao)

5.3.2. Đánh Giá Ưu và Nhược Điểm của Hệ Thống

Dựa trên các phân tích, ưu và nhược điểm của hệ thống LoRa được thử nghiệm có thể được tổng kết như sau:

Ưu điểm:

1. Tiềm năng tầm xa vượt trội: Khi được triển khai với kỹ thuật phù hợp (tối ưu tham số, đảm bảo Vùng Fresnel), LoRa có khả năng đạt được khoảng cách truyền thông rất lớn.
2. Khả năng chống chịu cao: Hệ thống tỏ ra bền bỉ trước các thách thức phổ biến của môi trường như fading đa đường và suy hao do vật cản vừa phải (cây cối, vỏ bọc).
3. Hiệu quả về chi phí: Việc sử dụng các linh kiện phổ thông như ESP32 và module Ra-02 cho phép xây dựng một hệ thống truyền thông tầm xa với chi phí rất hợp lý.
4. Khả năng xuyên vật cản tốt: LoRa có thể xuyên qua nhiều tầng của các công trình xây dựng kiên cố, đặc biệt khi tận dụng được các đặc điểm cấu trúc của tòa nhà.

Nhược điểm:

1. Cực kỳ nhạy cảm với nhiễu điện từ cường độ cao: Hệ thống gần như vô dụng khi đặt gần các nguồn phát sóng công suất lớn, đòi hỏi phải có các biện pháp giảm thiểu nhiễu nếu muốn triển khai ở các khu vực tương tự.
2. Sự đánh đổi gay gắt giữa Tầm xa và Độ tin cậy: Tầm xa tối đa được quảng cáo thường tương ứng với một liên kết không ổn định và tỷ lệ mất gói cao, không phù hợp cho các ứng dụng trọng yếu.
3. Hiệu suất phụ thuộc lớn vào chuyên môn hoạch định: Để đạt hiệu suất tối ưu, cần có kiến thức chuyên môn về việc lựa chọn vị trí và độ cao anten để tối ưu hóa các yếu tố kỹ thuật như Vùng Fresnel và các kênh truyền dẫn đặc biệt.

5.3.3. Kịch Bản Cấu Hình Tối Ưu cho các Ứng Dụng Cụ Thể

Từ các kết quả thực nghiệm, có thể đề xuất các bản thiết kế cấu hình cho những ứng dụng thực tế cụ thể:

- Cho Nông nghiệp chính xác / Giám sát môi trường (mô phỏng kịch bản Đê Sông Nhuệ):
 - Khuyến nghị: Ưu tiên tầm xa và độ tin cậy. Sử dụng các tham số đã được tối ưu hóa (SF12, băng thông hẹp, CR 4/8, công suất 20dBm). Quan trọng nhất, lắp đặt các node và gateway trên các cột cao (3-5m trở lên) để đảm bảo độ thông thoáng của Vùng Fresnel bên trên cây trồng hoặc địa hình.
- Cho Quản lý Tòa nhà thông minh (mô phỏng kịch bản Times Tower):
 - Khuyến nghị: Ưu tiên khả năng xuyên vật cản. Đặt các gateway ở các vị trí chiến lược gần các trục thẳng đứng (thang máy, cầu thang bộ, ống kỹ thuật) để tận dụng hiệu ứng ống dẫn sóng. Có thể sử dụng SF thấp hơn (ví dụ: SF7-SF9) để tiết kiệm năng lượng và tăng dung lượng mạng, vì khoảng cách trong tòa nhà thường ngắn hơn.
- Cho Theo dõi tài sản trong đô thị dày đặc (mô phỏng kịch bản hồn họp VTC/Công viên):
 - Khuyến nghị: Ưu tiên khả năng chống nhiễu và mật độ mạng. Cần chấp nhận rằng các liên kết tầm xa với một gateway duy nhất là không khả thi. Thay vào đó, triển khai một mạng lưới gateway dày đặc hơn. Cần nhắc sử dụng anten định hướng cho các liên kết cố định để loại bỏ các nguồn nhiễu đã biết. Xây dựng một giao thức truyền lại (re-transmission) mạnh mẽ ở tầng ứng dụng để xử lý việc mất gói tin.

5.4. Định Hướng Nghiên Cứu và Phát Triển trong Tương Lai

Dựa trên những kết quả và hạn chế của dự án, các hướng nghiên cứu và phát triển trong tương lai có thể được đề xuất nhằm xây dựng các hệ thống LoRa thông minh và mạnh mẽ hơn:

1. Triển khai Cơ chế Tốc độ Dữ liệu Thích ứng (Adaptive Data Rate - ADR):
Thay vì sử dụng các tham số tĩnh, hướng phát triển tiếp theo là triển khai ADR. Cơ chế này cho phép các node tự động đàm phán SF và công suất phát tối ưu với gateway. Điều này sẽ tạo ra một mạng lưới thông minh và tiết kiệm năng lượng hơn, nơi các node ở gần gateway sẽ dùng SF thấp (tốc độ cao, năng lượng thấp) và các node ở xa sẽ dùng SF cao (tốc độ thấp, năng lượng cao).
2. Chuyển đổi từ Kiến trúc Điểm-Điểm sang Mạng LoRaWAN Hoàn chỉnh: Hệ thống hiện tại là một liên kết điểm-điểm (P2P). Bước tiếp theo là triển khai một ch่อง giao thức LoRaWAN hoàn chỉnh, bao gồm một máy chủ mạng. Điều này sẽ cho phép nghiên cứu các vấn đề về khả năng mở rộng (hàng trăm node), bảo mật (mã hóa AES) và các tính năng quản lý mạng nâng cao.
3. Nghiên cứu Chuyên sâu về Kỹ thuật Anten: Dựa trên các kết quả tại trạm VTC và Công viên Thông Nhất, một nghiên cứu tập trung vào anten là cần thiết.
 - Phân tập Anten: Triển khai các hệ thống với nhiều anten (phân tập không gian hoặc phân cực) để chống lại hiện tượng fading đa đường trong các hẻm đô thị.
 - Anten Định hướng: Đối với các liên kết điểm-điểm cố định trong môi trường nhiễu (như kịch bản VTC), thử nghiệm các anten Yagi độ lợi cao để tăng ngân sách liên kết và lọc nhiễu theo không gian.
4. Xây dựng Mô hình Tiêu thụ Năng lượng Định lượng: Đây là một mảnh ghép còn thiếu nhưng cực kỳ quan trọng cho bất kỳ ứng dụng IoT chạy bằng pin nào. Cần tiến hành một nghiên cứu để đo lường chính xác năng lượng tiêu thụ cho mỗi gói tin ở từng cấu hình SF/BW/Công suất. Điều này sẽ cho phép xây dựng một mô hình dự đoán tuổi thọ pin chính xác, giúp các nhà phát triển đưa ra quyết định sáng suốt về sự đánh đổi giữa hiệu suất truyền thông và tuổi thọ thiết bị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Semtech Corporation, "SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver," Datasheet, Rev. 7, 2020.
- [2] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," Version 4.5, 2023.
- [3] LoRa Alliance, "LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification," Technical Specification, October 2020.
- [4] Arshdeep Bahga and Vijay Madisetti, *Internet of Things: A Hands-On Approach*. VPT, 2014.
- [5] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hänninen, and M. Pettissalo, "On the performance of LoRaWAN in a large-scale urban environment," in *2017 13th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Rome, Italy, 2017, pp. 329-335.
- [6] T. H. B. Centenaro, M. R. V. R., L. P. L. et al., "Understanding the limits of LoRaWAN," in *2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Coimbra, Portugal, 2016.