

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ THÔNG TIN &
TRUYỀN THÔNG VIỆT - HÀN

Khoa Kỹ thuật máy tính và Điện tử



ĐỒ ÁN CHUYÊN NGÀNH 1
XÂY DỰNG VÀ NÂNG CAO HIỆU NĂNG
CỦA HỆ THỐNG LORA/LORAWAN TRONG
CÁC ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG THỰC TẾ

Sinh viên thực hiện: **VÕ VĂN HOÀNG**

Lớp: **19CE**

Giảng viên hướng dẫn: **TS. PHAN THỊ LAN ANH**

Đà Nẵng, tháng 12 năm 2022

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ THÔNG TIN &

TRUYỀN THÔNG VIỆT - HÀN

Khoa Kỹ thuật máy tính và Điện tử



ĐỒ ÁN CHUYÊN NGÀNH 1

**XÂY DỰNG VÀ NÂNG CAO HIỆU NĂNG
CỦA HỆ THỐNG LORA/LORAWAN TRONG
CÁC ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG THỰC TẾ**

Đà Nẵng, tháng 12 năm 2022

NHẬN XÉT CỦA GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Đà Nẵng, ngày...tháng 06 năm 2021

Giảng viên hướng dẫn

TS. Phan Thị Lan Anh

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành nhiệm vụ được giao, ngoài sự nỗ lực của bản thân còn có sự hướng dẫn tận tình của cô Phan Thị Lan Anh.

Em xin chân thành cảm ơn cô – TS. Phan Thị Lan Anh, người hướng dẫn em trong suốt thời gian vừa qua. Mặc dù cô bận nhiều việc nhưng không ngần ngại chỉ dẫn, định hướng và dìu dắt cho em để hoàn thành tốt nhiệm vụ. Một lần nữa em chân thành cảm ơn cô và chúc cô dồi dào sức khỏe.

Tuy nhiên vì kiến thức chuyên môn còn hạn chế và bản thân còn thiếu nhiều kinh nghiệm thực tiễn nên nội dung báo cáo không tránh khỏi những thiếu sót, em rất mong nhận được sự góp ý, chỉ bảo thêm của cô để giúp em hoàn thiện tốt với bài báo cáo này hơn.

Một lần nữa xin gửi đến thầy lời cảm ơn chân thành và tốt đẹp nhất!

Đà Nẵng, ngày...tháng 06 năm 2021

Sinh viên thực hiện

Võ Văn Hoàng

MỤC LỤC

NHẬN XÉT CỦA GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN.....	ii
LỜI CẢM ƠN	iii
MỤC LỤC	iv
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	viii
DANH MỤC HÌNH VẼ	ix
DANH MỤC BẢNG	1
MỞ ĐẦU.....	2
1. Giới thiệu.....	2
2. Mục tiêu của đề tài	2
3. Phương pháp nghiên cứu.....	2
4. Bố cục báo cáo	3
CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU TỔNG QUAN.....	4
1. TỔNG QUAN VỀ INTERNET OF THINGS VÀ LPWAN	4
1.1. Tổng quan về Internet Of Things	4
1.2. Tổng quan về công nghệ LPWAN	4
2. TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ LORA/LORAWAN	5
2.1. Phân biệt LoRa và LoRaWAN	5
2.2. Cấu tạo cơ bản về LoRa End Node	6
2.3. Cấu tạo cơ bản về LoRa Gateway	6
2.4. Các thành phần trong LoRaWAN Network	7
2.4.1. Thiết bị cuối dựa trên LoRa (LoRa-based End Devices)	7
2.4.2. LoRaWAN Gateways	8
2.4.3. Network Server.....	9
2.4.4. Application Servers	10
2.4.5. Join Server	10

2.4.6. Device Comissioning: Activation Types.....	11
2.4.7. Sercurity	12
2.4.8. Phân loại Class trong LoRaWAN	15
2.4.9. Uplink và Downlink	16
2.4.10. Kiến trúc phân lớp trong công nghệ LoRaWAN.....	16
2.4.11. Các quy định trong LoRa/LoRaWAN.....	17
3. CÁC KHÁI NIỆM/THÔNG SỐ TRONG LORA/LORAWAN.....	17
3.1. Time On Air (Thời gian truyền).....	17
3.2. Duty Cycle.....	17
3.3. Propagation.....	18
3.4. Free Space Loss.....	20
3.5. Fresnel Zone	21
3.6. Modulation & Demodulation (Điều chế và giải điều chế)	23
3.7. Link Budget & Link Margin.....	23
3.8. EIRP & ERP	25
3.8.1. EIRP	25
3.8.2. ERP	25
3.9. RSSI & SNR.....	26
3.9.1. RSSI.....	26
3.9.2. SNR	26
3.10. Thay đổi tần số cho mỗi lần truyền (changing frequencies for every transmission).....	27
4. TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ LORA.....	28
4.1. Giới thiệu tổng quan về các kỹ thuật điều chế tín hiệu cơ bản	28
4.1.1. Amplitude Shift Keying (ASK).....	28
4.1.2. Frequency Shift Keying (FSK).....	28

4.1.3. Phase Shift Keying (PSK)	29
4.2. Chirp Spread Spectrum (CSS).....	29
4.3. Chirps, Chip – Chip Rate – Chip Duration , Symbol – Symbol Rate – Symbol Duration, Spreading Factor, Forward Error Correction & Coding Rate, Data Rate, Symbol Rate Chip Duration	30
4.3.1. Chirps	30
4.3.2. Symbol, Symbol Rate, Symbol Duration	31
4.3.3. Spreading Factor (SF).....	32
4.3.4. Forward Error Correction	33
4.3.5. Coding Rate	33
4.3.6. Chip, Chip Rate, Chip Duration	34
4.3.7. Data Rate (D_R) và mối liên hệ giữa Transmission Power (TX), Bandwidth (BW), Spreading Factor (SF)	34
4.4. Định dạng gói LoRa (LoRa Packet Format), Thời gian phát sóng (Time on Air) and Tốc độ dữ liệu thích ứng (Adaptive Data Rate)	36
4.4.1. Định dạng gói LoRa (LoRa Packet Format),	36
CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ VÀ XÂY DỰNG HỆ THỐNG.....	38
1. TỔNG QUAN VỀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG SỬ DỤNG CHIRPSTACK SERVER	38
1.1. Tổng quan	38
1.2. Kiến trúc	38
1.2.1. LoRaWAN devices.....	38
1.2.2. LoRa® Gateway	38
1.2.3. ChirpStack Gateway Bridge	39
1.2.4. ChirpStack Network Server.....	39
1.2.5. ChirpStack Application Server.....	39
1.2.6. End-application.....	39

2. TIẾN HÀNH CÀI ĐẶT VÀ CẤU HÌNH MÁY CHỦ MẠNG CHIRPSTACK TRÊN UBUNTU.....	40
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC VÀ KHẢO SÁT HỆ THỐNG.....	42
1. KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC.....	42
1.1. Khối phần cứng	42
1.1.1. End-node.....	42
1.1.2. LoRaWAN Gateway 1 Channel 433MHz.....	42
1.2. Khối phần mềm	44
1.2.1. Chirpstack Network Server	44
1.2.2. Thingsboard Cloud Platform Application	45
2. KHẢO SÁT HỆ THỐNG	46
2.1. Khảo sát mức độ ảnh hưởng của Spreading Factor (SF) đến các thông số Data rate (Rb), Time on Air (ToA).	46
2.2. Phương pháp khảo sát.....	48
2.3. Kết quả khảo sát và đánh giá hệ thống	49
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	51
1. KẾT LUẬN	51
2. HƯỚNG NGHIÊN CỨU	51
TÀI LIỆU THAM KHẢO	52

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

VIẾT TẮT	NỘI DUNG
Lora	Long Range Radio
LoRaWAN	Lo(ng) Ra(nge) Wide Area Network
LSN	LoRaWAN Server Network
RF	Radio Frequency
CRC	Cyclic Redundancy Check
RSSI	Received Signal Strength Indication
CR	Coding Rate
BW	BandWidth
CSS	Chirp Spread Spectrum
PSK	Phase Shift Keying
ADR	Adaptive Data Rate
PDR	Packet Delivery Rate
PL	Payload Length

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Mô hình tổng quan IoTs	4
Hình 1.2: Mô hình so sánh tổng quát LPWAN và các công nghệ không dây khác	4
Hình 1.3: Bảng so sánh các công nghệ không dây trong LPWAN	5
Hình 1.4: Bộ Thiết bị LoRa End Node	6
Hình 1.5: Bộ thiết bị LoRa Gateway Bridge Single Channel	7
Hình 1.6: Mô hình kiến trúc LoRaWAN Network điển hình	7
Hình 1.7: Thiết bị đầu cuối trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình	8
Hình 1.8: Gateway trong triển khai mạng LoRa điển hình	8
Hình 1.9: Máy chủ mạng LoRaWAN trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình	9
Hình 1.10: Máy chủ ứng dụng LoRaWAN trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình	10
Hình 1.11: Join Server LoRaWAN trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình	10
Hình 1.12: Các chế độ kích hoạt	12
Hình 1.13: Khóa bảo mật được tạo trong quy trình Tham gia (Join Procedure)	13
Hình 1.14: Gửi tin nhắn chấp nhận tham gia đến thiết bị đầu cuối	13
Hình 1.15: Gửi tin nhắn chấp nhận tham gia đến thiết bị đầu cuối	13
Hình 1.16: Khoá phiên được chia sẻ với máy chủ mạng và máy chủ ứng dụng	14
Hình 1.17: Truyền an toàn các gói dữ liệu	14
Hình 1.18: Mức độ tiêu thụ của các loại thiết bị sử dụng Class A, B, C	15
Hình 1.19: Mô hình của Uplink và Downlink	16
Hình 1.20: LoRaWAN technology stack	16
Hình 1.21: Mô hình Time On Air	17
Hình 1.22: Cách tính Duty Cycle	18
Hình 1.23: Tín hiệu truyền trực tiếp từ End Node tới Gateway	18
Hình 1.24: Fresnel Zone (Vùng Fresnel)	18
Hình 1.25: Sóng vô tuyến lan truyền qua trường ngại vật	19
Hình 1.26: Lan truyền qua phản xạ	19
Hình 1.27: Lan truyền qua nhiễu xạ	20
Hình 1.28: Đặt antenna Gateway ở vị trí cao hơn để tránh vật cản trong Fresnel Zone	21

Hình 1.29: Fresnel Zone	21
Hình 1.30: Công thức tính chiều cao	22
Hình 1.31: Bảng chiều cao đặt antenna so với mặt đất ở Fresnel Zone 100% clear và 60% clear (Bị phản xạ can thiệp $\geq 40\%$).....	22
Hình 1.32: Quy tắc đặt antenna tối ưu.....	23
Hình 1.33: Điều chế và giải mã tín hiệu	23
Hình 1.34: Mô hình Link budget & Link Margin	24
Hình 1.35: Link Margin (biên độ liên kết)	24
Hình 1.36: Mô hình tổng quan về công suất bức xạ đẳng hướng hiệu quả.....	25
Hình 1.37: Mô hình tổng quan công suất bức xạ hiệu quả.....	26
Hình 1.38: Mô hình RSSI.....	26
Hình 1.39: Tín hiệu LoRa nhận được và Noise Floor	27
Hình 1.40: Mức năng lượng đã nhận RSSI bên dưới Noise Floor	27
Hình 1.41: Sơ đồ kỹ thuật thay đổi tần số cho mỗi lần truyền	27
Hình 1.42: Mô hình kỹ thuật điều chế ASK.....	28
Hình 1.43: Mô hình kỹ thuật điều chế FSK	28
Hình 1.44: Mô hình kỹ thuật điều chế PSK	29
Hình 1.45: Ảnh minh họa tín hiệu Chirp tăng theo thời gian.....	29
Hình 1.46: Tín hiệu quét ở dạng Up-chirp và Down-chirp	30
Hình 1.47: Message được mã hoá trên Chirp	30
Hình 1.48: So sánh biểu đồ tín hiệu chưa điều chế và đã điều chế	31
Hình 1.49: Ký hiệu của Symbol rate	32
Hình 1.50: Biểu đồ mô phỏng symbol là 1011111.....	33
Hình 1.51: Số bit dùng để mang thông tin và số bit sửa lỗi	33
Hình 1.52: Biểu đồ tín hiệu điều chế SF = 9	34
Hình 1.53: Công thức tính data rate (D_R) hoặc bit rate(R_b)	34
Hình 1.54: Chế độ định dạng gói tiêu đề rõ ràng	36
Hình 1.55: Chế độ định dạng gói tiêu đề ẩn	36
Hình 2.1: Sơ đồ kiến trúc hệ thống LoRaWAN sử dụng Chirpstack	38
Hình 2.2: Cài đặt các gói công cụ cần thiết.....	40
Hình 2.3: Khởi tạo cơ sở dữ liệu mới trên PostgreSQL	40
Hình 2.4: Cài đặt gói https.....	40

Hình 2.5: Cài đặt khoá lưu trữ	40
Hình 2.6: Cài đặt gói chirpstack-gateway-bridge.....	41
Hình 2.7: Cấu hình topic mqtt cho tần số 433MHz.....	41
Hình 2.8: khởi chạy Chirpstack Gateway Bridge.....	41
Hình 2.9: Khởi chạy Chirpstack service.....	41
Hình 2.10: In ra log của chirpstack	41
Hình 3.1: Layout PCB của End-node	42
Hình 3.2: Phần cứng LoRaWAN Gateway	43
Hình 3.3: Gateway đang lắng nghe các gói tin từ End-node.....	43
Hình 3.4: Giao diện hiển thị kết nối với LoRaWAN Gateway	44
Hình 3.5: LIVE LORAWAN FRAMES nhận từ Gateway ID: DCA632FFFF750C5544	
Hình 3.6: Chirpstack Application Integration	45
Hình 3.7: Thingsboard Data converter	45
Hình 3.8: Thingsboard Cloud Dashboard.....	46
Hình 3.9: Sự ảnh hưởng của SF đến Rb và ToA.....	47
Hình 3.10: Sự ảnh hưởng của SF đến ToA	47
Hình 3.11: Sự ảnh hưởng của SF đến Rb.....	47
Hình 3.12: Vị trí khoanh vùng tiến hành khảo sát.....	49
Hình 3. 13: Sự ảnh hưởng khoảng cách đến RSSI và SNR.....	50

DANH MỤC BẢNG

Bảng 3.1: Thông tin thu được ở End-Node	49
---	----

MỞ ĐẦU

1. Giới thiệu

Những năm gần đây, Internet of Things (IoT) là công nghệ tiềm năng nổi bật trong cuộc cách mạng công nghiệp 4.0. Các ứng dụng IoT xuất hiện khắp nơi trong tất cả các lĩnh vực từ công nghiệp đến nông nghiệp, nhà thông minh, trường học thông minh, thành phố thông minh. Ngày nay, nhiều ứng dụng IoT đòi hỏi thu thập dữ liệu ở khoảng cách xa, tiêu thụ năng lượng thấp. Các thiết bị LoRa có thể hoạt động trao đổi dữ liệu trong mạng với thời gian lên đến 10 năm khi sử dụng pin. LoRa được viết tắt bởi Long Range Radio được nghiên cứu và phát triển bởi Cycleo SAS và sau này công ty Semtech mua lại vào năm 2012. LoRa sử dụng kỹ thuật điều chế (modulation) gọi là Chirp Spread Spectrum duy trì các đặc tính công suất thấp nhưng làm tăng đáng kể phạm vi truyền tin, giúp truyền khoảng cách xa. Băng tần làm việc của LoRa từ 430MHz đến 915MHz tùy từng khu vực khác nhau trên thế giới. Mạng diện rộng công suất thấp LPWANs (Low-Power Wide Area Network) là công nghệ truyền thông không dây được thiết kế để hỗ trợ triển khai đa dạng các ứng dụng IoT. Những công nghệ này cho phép kết nối diện rộng và quy mô lớn cho các thiết bị công suất thấp, chi phí thấp và tốc độ dữ liệu thấp. LoRaWAN là một giao thức mạng mở cung cấp các kết nối giữa các cổng LPWAN với các thiết bị IoT ở nút cuối được tiêu chuẩn hóa và duy trì bởi LoRa Alliance. Chính vì thế, mạng LoRaWAN nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học, viện nghiên cứu, ... trên khắp thế giới. Trong đề án này, em xin phép được thực hiện đề tài “Xây dựng và nâng cao hiệu năng của hệ thống LoRa/LoRaWAN trong các điều kiện môi trường thực tế” với đề xuất mạng LoRa Node kết nối với gateway trong vùng phủ sóng khoảng 1km và phân tích đánh giá trong điều kiện địa lý cụ thể.

2. Mục tiêu của đề tài

- Xây dựng mô hình hệ thống LoraWAN Single-Channel hoàn chỉnh bao gồm phần End-Node, Gateway, Network Server, Application Server.
- Tìm hiểu, ứng dụng các thông số (Spreading Factor, Coding Rate, ...) trong hệ thống LoRa/LoRaWAN

3. Phương pháp nghiên cứu

- Nghiên cứu các tài liệu, bài báo nghiên cứu khoa học về LoRa/LoRaWAN
- Nghiên cứu bài báo về cách xây dựng một hệ thống LoRaWAN hoàn chỉnh.

4. Bố cục báo cáo

Nội dung báo cáo gồm 4 phần chính như sau:

Chương 1. *Giới thiệu tổng quan*. Nội dung chương bao gồm giới thiệu tổng quan về khái niệm, đặc điểm của công nghệ LoRa/LoRaWAN. Tổng quan các linh kiện phần cứng, phần mềm được sử dụng trong đề tài.

Chương 2. *Phân tích thiết kế hệ thống*. Nội dung chương bao gồm nghiên cứu và phân tích sơ đồ của hệ thống.

Chương 3. *Xây Dựng Hệ Thống*. Nội dung chương bao gồm xây dựng hệ thống, phân tích đánh giá chất lượng hệ thống.

Kết luận, Tài liệu tham khảo và Phụ lục liên quan đến đề tài.

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU TỔNG QUAN

1. TỔNG QUAN VỀ INTERNET OF THINGS VÀ LPWAN

1.1. Tổng quan về Internet Of Things

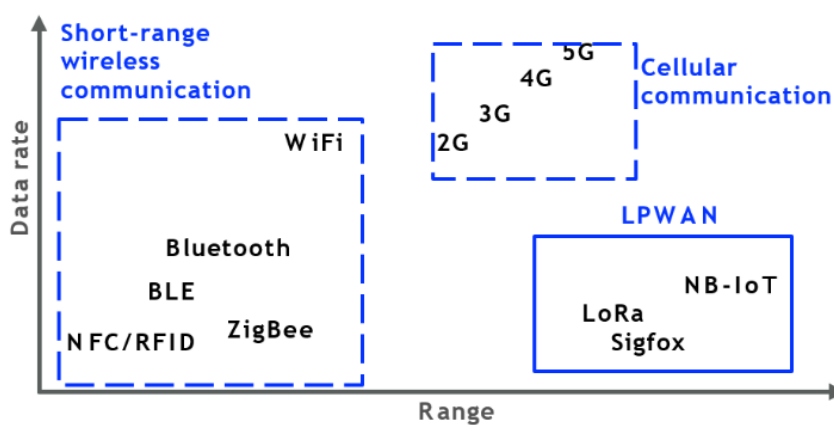
Như chúng ta đã biết Internet of Things, hay IoT, là một mạng lưới các thiết bị vật lý được kết nối với Internet và có thể “nói chuyện” với nhau. Dự báo đến năm 2020 sẽ có trên 25 tỷ thiết bị kết nối Internet. Có nhiều công nghệ không dây mà bạn có thể sử dụng để kết nối các thiết bị này với Internet, chẳng hạn như:

- Giao tiếp không dây tầm ngắn (Short-range wireless)
- Truyền thông di động
- Truyền thông LPWAN



Hình 1.1: Mô hình tổng quan IoTs

1.2. Tổng quan về công nghệ LPWAN



Hình 1.2: Mô hình so sánh tổng quát LPWAN và các công nghệ không dây khác

LPWAN viết tắt của Low Power Wide Area Network là loại giao tiếp không dây này được thiết kế để gửi các gói dữ liệu nhỏ trên một khoảng cách dài, hoạt động bằng pin. Ứng dụng nhiều trong công nghiệp, Khoa học và Y tế (ISM). Tầm xa, công suất thấp, chi phí thấp và thông lượng thấp việc kết nối hàng loạt các công nghệ LPWAN rất dài cho phép các thiết bị trải rộng và di chuyển trên các khu vực địa lý rộng lớn. Có một số công nghệ cạnh tranh trong không gian LPWAN như: IoT băng thông hẹp (Narrowband IoT = NB-IoT), Sigfox, LoRa,

Technology	Operating Frequency	Modulation	Maximum Range	Speed	Max. Payload	Bandwidth	Main Characteristics
NB-IoT	LTE in-band, guard-band	QPSK	<35 km	<250 kbi	1500 bytes	180 kHz	Low power and wide-area coverage
SigFox	868-902 MHz	DBPSK	50 km	100 kbit/s	12 bytes	0.1 kHz	Global cellular network
LoRa, LoRaWAN	Diverse UHF ISM (Industrial, Scientific, Medical) bands (e.g., 863-870 MHz and 433 MHz in Europe)	CSS	<15 km	0.25-50 k	51-222 bytes	125 kHz	Low power and wide range

Hình 1.3: Bảng so sánh các công nghệ không dây trong LPWAN

2. TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ LORA/LORAWAN

2.1. Phân biệt LoRa và LoRaWAN

LoRa là từ viết tắt của Long Range và nó là công nghệ không dây trong đó người gửi có công suất thấp truyền các gói dữ liệu nhỏ (0,3 kbps đến 5,5 kbps) đến người nhận trong một khoảng cách xa. LoRa là lớp vật lý và là độc quyền. Các nhà sản xuất chip bao gồm Semtech, Microchip và Hope RF.

LoRaWAN là một tiêu chuẩn mở có thêm các lớp MAC, mạng và ứng dụng cung cấp các chức năng cần thiết như quản lý truy cập phương tiện, bảo mật, v.v. LoRaWAN khai thác lớp vật lý LoRa. Nó là một tiêu chuẩn mở được phát triển bởi Liên minh LoRa (LoRa alliance).

Lưu ý: LoRaWAN không hỗ trợ giao tiếp trực tiếp giữa các end-node. Nếu bạn muốn giao tiếp trực tiếp giữa các thiết bị LoRa mà không cần sử dụng cổng, sử dụng thư viện RadioHead Packet Radio cho các bộ vi xử lý nhúng. Nó cung cấp một thư viện hướng đối tượng hoàn chỉnh để gửi và nhận các tin nhắn có kích thước gói thông qua một nhiều loại radio như LoRa trên một loạt các bộ vi xử lý nhúng

2.2. Cấu tạo cơ bản về LoRa End Node

Một LoRa End Node bao gồm 2 phần:

- Một mô-đun radio với ăng-ten.
- Một bộ vi xử lý để xử lý dữ liệu cảm biến chẳng hạn.

Các nút cuối thường được cấp nguồn bằng pin.

- Thiết bị LoRa (nút cuối) có bộ thu phát không dây.
- Nếu thiết bị này cũng có cảm biến, thì nó hoạt động như một cảm biến từ xa.
- Trong báo cáo này sẽ sử dụng Atmega328P và SX1278-433MHz.



Hình 1.4: Bộ Thiết bị LoRa End Node

2.3. Cấu tạo cơ bản về LoRa Gateway

Một LoRa Gateway bao gồm 2 phần và các đặc điểm sau:

- Một mô-đun radio với ăng-ten.
 - Bộ vi xử lý để xử lý dữ liệu (thường là một máy tính nhúng mini hoặc vi xử lý có cấu hình cao mới có thể xử lý số lượng End-Node lớn thực tế).
- + Các cổng được cấp nguồn chính và kết nối với Internet.
- + Nhiều cổng có thể nhận dữ liệu từ cùng một nút kết thúc.
- + Các cổng có thể lắng nghe đồng thời nhiều tần số, trong mọi hệ số lan truyền ở mỗi tần số.

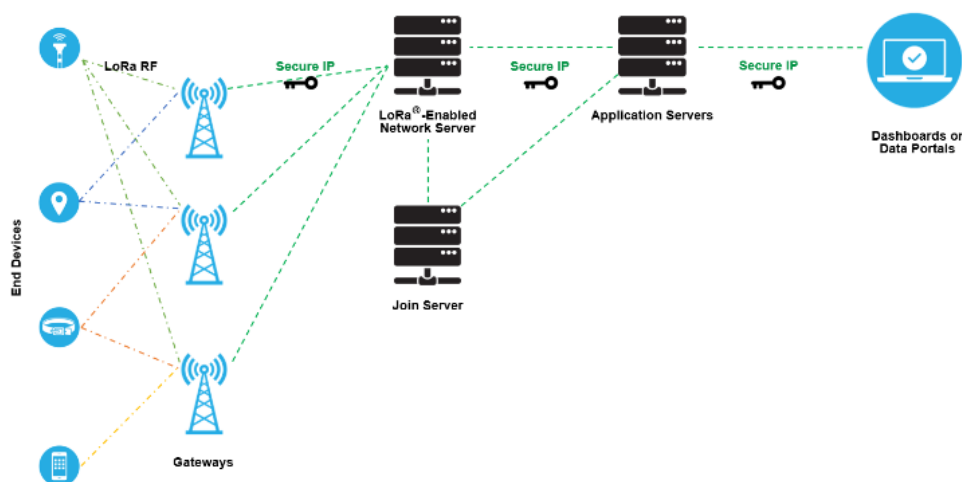
Trong bài báo cáo này sẽ sử dụng máy tính nhúng mini Raspberry Pi 4 và SX1278 - 433MHz.



Hình 1.5: Bộ thiết bị LoRa Gateway Bridge Single Channel

2.4. Các thành phần trong LoRaWAN Network

Chúng ta sẽ kiểm tra kiến trúc của mạng LoRaWAN. Hình 1.6 cho thấy một triển khai mạng LoRaWAN điển hình từ đầu đến cuối.



Hình 1.6: Mô hình kiến trúc LoRaWAN Network điển hình

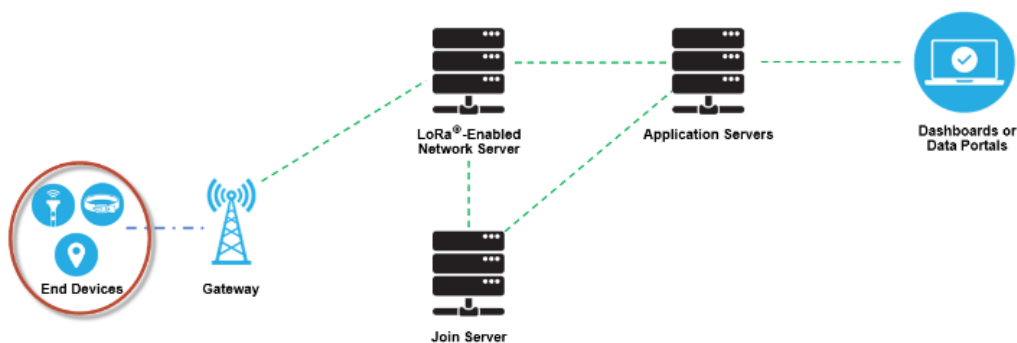
2.4.1. Thiết bị cuối dựa trên LoRa (LoRa-based End Devices)

Thiết bị đầu cuối hỗ trợ LoRaWAN là một cảm biến hoặc bộ truyền động được kết nối không dây với mạng LoRaWAN thông qua các cổng vô tuyến sử dụng Điều chế LoRa RF.

Trong phần lớn các ứng dụng, thiết bị đầu cuối là một cảm biến tự động, thường hoạt động bằng pin, giúp số hóa các điều kiện vật lý và sự kiện môi trường. Các trường hợp sử dụng điển hình cho bộ truyền động bao gồm: chiếu sáng đường phố, khóa không dây, tắt van nước, chống rò rỉ, trong số những trường hợp khác.

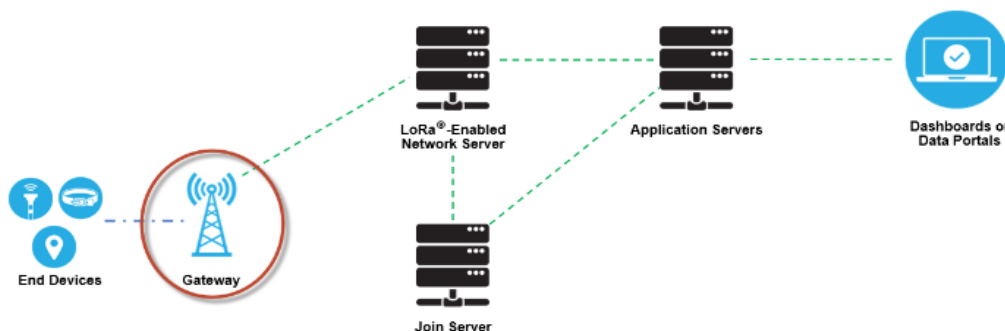
Khi chúng được sản xuất, các thiết bị dựa trên LoRa được gán một số mã định danh duy nhất. Các số nhận dạng này được sử dụng để kích hoạt và quản trị thiết bị một

cách an toàn, nhằm đảm bảo vận chuyển an toàn các gói qua mạng riêng hoặc mạng công cộng và để phân phối dữ liệu được mã hóa lên Đám mây.



Hình 1.7: Thiết bị đầu cuối trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình

2.4.2. LoRaWAN Gateways



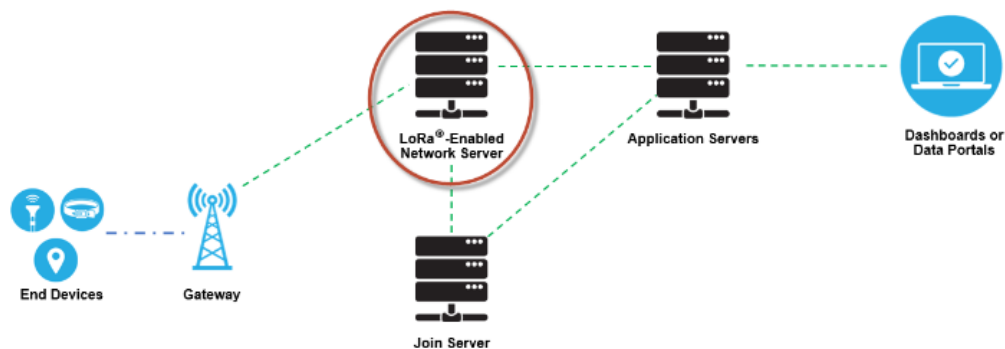
Hình 1.8: Gateway trong triển khai mạng LoRa điển hình

Cổng LoRaWAN nhận thông báo RF được điều chế LoRa từ bất kỳ thiết bị đầu cuối nào trong khoảng cách nghe được và chuyển tiếp các thông báo dữ liệu này đến máy chủ mạng LoRaWAN (LNS), được kết nối thông qua đường trực IP. Không có sự liên kết cố định giữa thiết bị đầu cuối (End Node) và một cổng (Gateway) cụ thể. Thay vào đó, cùng một cảm biến có thể được phục vụ bởi nhiều Gateway trong khu vực. Với LoRaWAN, mỗi gói đường lên được gửi bởi thiết bị đầu cuối sẽ được nhận bởi tất cả các cổng trong phạm vi tiếp cận, như minh họa trong Hình 1.8. Sự sắp xếp này làm giảm đáng kể tỷ lệ lỗi gói (do khả năng ít nhất một cổng sẽ nhận được thông báo là rất cao), giảm đáng kể chi phí sử dụng pin cho cảm biến mobile/nomadic và cho phép định vị địa lý với chi phí thấp (giả sử các cổng được đề cập có khả năng định vị địa lý).

Lưu lượng IP từ một cổng vào máy chủ mạng có thể được truyền ngược qua Wi-Fi, Ethernet có dây cứng hoặc qua kết nối Di động. Các cổng LoRaWAN hoạt động

hoàn toàn ở lớp vật lý và về bản chất, không có gì khác ngoài các bộ chuyển tiếp tin nhắn vô tuyến LoRa. Họ chỉ kiểm tra tính toàn vẹn dữ liệu của từng tin nhắn LoRa RF đến. Nếu tính toàn vẹn không còn nguyên vẹn, nghĩa là nếu CRC (Cyclic Redundancy Check) không chính xác, thông báo sẽ bị loại bỏ. Nếu đúng, cổng sẽ chuyển tiếp nó tới LNS (LoRaWAN Network Server), cùng với một số siêu dữ liệu bao gồm mức RSSI nhận được của tin nhắn cũng như dấu thời gian tùy chọn. Đối với các đường tải xuống LoRaWAN, một cổng thực thi các yêu cầu truyền đến từ LNS mà không có bất kỳ diễn giải nào về tải trọng. Vì nhiều cổng có thể nhận cùng một thông báo LoRa RF từ một thiết bị đầu cuối, LNS thực hiện sao chép dữ liệu và xóa tất cả các bản sao. Dựa trên các mức RSSI (Received Signal Strength Indication) của các thông báo giống hệt nhau, máy chủ mạng thường chọn cổng nhận thông báo có RSSI tốt nhất khi truyền thông báo đường xuống vì cổng đó là cổng gần nhất với thiết bị đầu cuối được đề cập.

2.4.3. Network Server



Hình 1.9: Máy chủ mạng LoRaWAN trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình

Máy chủ mạng LoRaWAN (LNS) quản lý toàn bộ mạng, tự động kiểm soát các tham số mạng để hệ thống thích ứng với các điều kiện luôn thay đổi và thiết lập các kết nối AES 128-bit an toàn để truyền dữ liệu từ đầu đến cuối (từ thiết bị đầu cuối LoRaWAN cho người dùng cuối Ứng dụng trong Đám mây) cũng như để kiểm soát lưu lượng truy cập từ thiết bị cuối LoRaWAN đến LNS (và ngược lại). Máy chủ mạng đảm bảo tính xác thực của mọi cảm biến trên mạng và tính toàn vẹn của mọi thông báo. Đồng thời, máy chủ mạng không thể xem hoặc truy cập dữ liệu ứng dụng.

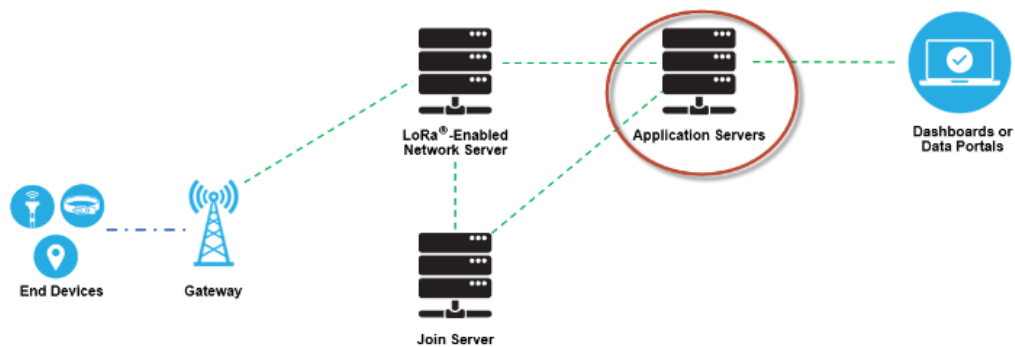
Nói chung, tất cả các máy chủ mạng LoRaWAN đều có chung các tính năng sau:

- Kiểm tra địa chỉ thiết bị
- Xác thực khung (Frame) và quản lý bộ đếm khung
- Xác nhận tin nhắn đã nhận

- Điều chỉnh tốc độ dữ liệu bằng giao thức ADR (Nếu được đặt cờ, Network Server có thể kiểm soát các thông số của nút cuối)
- Đáp ứng tất cả các yêu cầu lớp MAC đến từ thiết bị,
- Chuyển tiếp tải trọng ứng dụng đường lên đến các máy chủ ứng dụng thích hợp
- Xếp hàng các tải trọng đường xuống đến từ bất kỳ Máy chủ ứng dụng nào đến bất kỳ thiết bị nào được kết nối với mạng
- Chuyển tiếp thông báo yêu cầu tham gia (Join-request) và chấp nhận tham gia (Join-accept) giữa các thiết bị và máy chủ tham gia

2.4.4. Application Servers

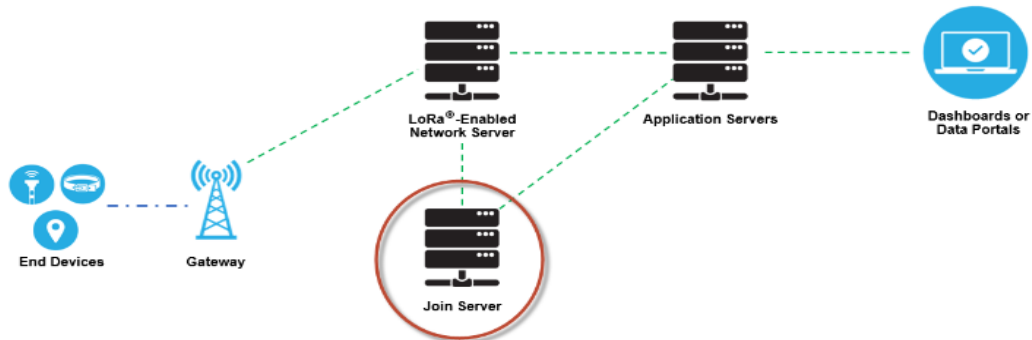
Máy chủ ứng dụng chịu trách nhiệm xử lý, quản lý và diễn giải dữ liệu ứng dụng cảm biến một cách an toàn. Chúng cũng tạo ra tất cả tải trọng đường xuống (downlink) của lớp ứng dụng tới các thiết bị đầu cuối được kết nối.



Hình 1.10: Máy chủ ứng dụng LoRaWAN

2.4.5. Join Server

Máy chủ tham gia (Join Server) quản lý quá trình kích hoạt qua mạng (over-the-air activation) cho các thiết bị đầu cuối được thêm vào mạng.



Hình 1.11: Join Server LoRaWAN trong triển khai mạng LoRaWAN điển hình

Máy chủ tham gia chứa thông tin cần thiết để xử lý các khung yêu cầu tham gia đường lên (Uplink join-accept) và tạo các khung chấp nhận tham gia đường xuống (Downlink join-accept). Nó báo hiệu cho máy chủ mạng máy chủ ứng dụng nào sẽ được kết nối với thiết bị đầu cuối và thực hiện dẫn xuất khóa mã hóa phiên mạng và ứng dụng. Nó giao tiếp Khóa phiên mạng (Network Session Key) của thiết bị với máy chủ mạng và Khóa phiên ứng dụng (Application Session Key) với máy chủ ứng dụng tương ứng.

Vì mục đích đó, máy chủ tham gia phải chứa thông tin sau cho từng thiết bị đầu cuối dưới sự kiểm soát của nó:

- DevEUI (end-device serial unique identifier - số nhận dạng duy nhất nối tiếp thiết bị cuối)
- AppKey (application encryption key - khóa mã hóa ứng dụng)
- NwkKey (network encryption key - khóa mã hóa mạng)
- Mã định danh máy chủ ứng dụng
- Hồ sơ dịch vụ thiết bị cuối

2.4.6. Device Commissioning: Activation Types

Vì mục đích bảo mật, chất lượng dịch vụ, thanh toán và các nhu cầu khác, các thiết bị phải được chạy thử và kích hoạt trên mạng khi bắt đầu hoạt động. Quy trình chạy thử sẽ sắp xếp an toàn từng thiết bị và mạng theo các tham số cung cấp thiết yếu (chẳng hạn như số nhận dạng, khóa mã hóa và vị trí máy chủ)

Khi kích hoạt ABP, một DevAddr cố định và các khóa phiên (session keys) cho mạng được chọn trước được mã hóa cứng vào thiết bị đầu cuối và chúng vẫn giữ nguyên trong suốt vòng đời của thiết bị đầu cuối ABP. Với chế độ này, một thiết bị đầu cuối bỏ qua thủ tục kết nối có vẻ đơn giản hơn, nhưng có khá nhiều hạn chế khi sử dụng ABP.

Các thiết bị đầu cuối OTAA được cung cấp khóa gốc (root keys). Khi kích hoạt OTAA, thiết bị đầu cuối thực hiện quy trình tham gia với mạng LoRaWAN, trong đó DevAddr động được gán cho thiết bị đầu cuối và các khóa gốc được sử dụng để lấy khóa phiên (session keys). Do đó, DevAddr và các khóa phiên thay đổi khi mỗi phiên mới được thiết lập.

Bảng 1.12 cho thấy các đặc điểm khác nhau của từng loại kích hoạt này.

Over-the-Air Activation (OTAA)	Activation by Personalization (ABP)
<ul style="list-style-type: none"> • Device manufacturers autonomously generate essential provisioning parameters • Secure keys (session-long and derived) can be renewed regularly • Devices can store multiple “identities” to dynamically and securely switch networks and operators during its lifetime • High-grade, tamper-proof security options are available 	<ul style="list-style-type: none"> • A simplified (less secure) commissioning process • IDs and Keys are personalized at fabrication • Devices become immediately functional upon powering up; the Join procedure is skipped • Devices are tied to a specific network/service; the NetID is a portion of the device network address

Hình 1.12: Các chế độ kích hoạt

2.4.7. Security

Có hai yếu tố chính đối với bảo mật của mạng LoRaWAN: quy trình tham gia và xác thực tin nhắn (the join procedure and message authentication). Quy trình tham gia thiết lập xác thực lẫn nhau giữa thiết bị đầu cuối và mạng LoRaWAN mà thiết bị được kết nối. Chỉ các thiết bị được ủy quyền mới được phép tham gia mạng. LoRaWAN MAC và thông báo ứng dụng được xác thực nguồn gốc, bảo vệ toàn vẹn và mã hóa từ đầu đến cuối (nghĩa là từ thiết bị đầu cuối đến máy chủ ứng dụng và ngược lại).

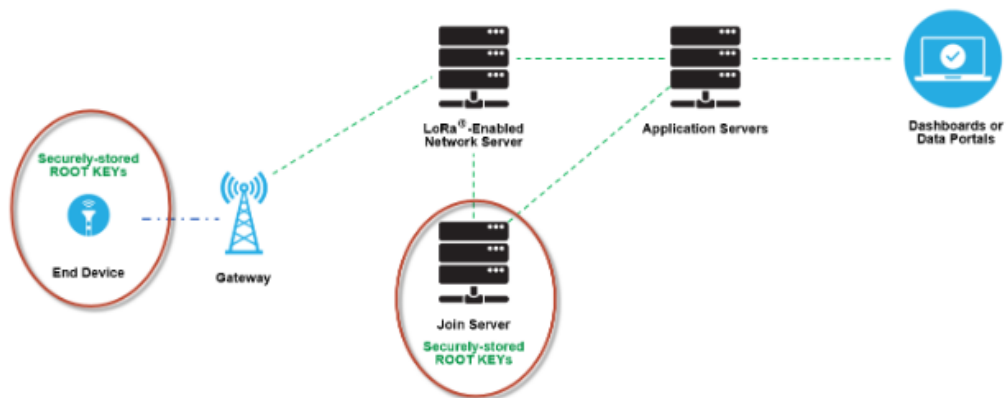
Các tính năng bảo mật này đảm bảo rằng:

- Lưu lượng mạng không bị thay đổi
- Chỉ các thiết bị hợp pháp mới được kết nối với mạng LoRaWAN
- Không thể nghe lưu lượng mạng (không nghe trộm)
- Không thể chụp và phát lại lưu lượng truy cập mạng

Với nền tảng đó, chúng ta sẽ xem xét chi tiết hơn các biện pháp bảo mật LoRaWAN.

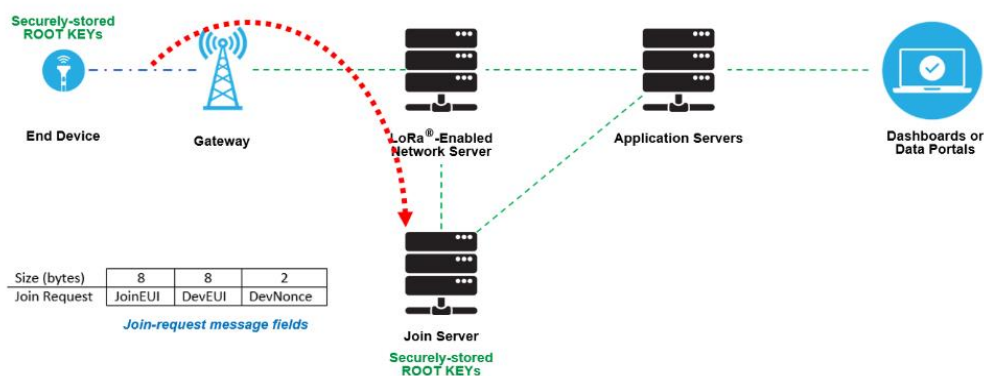
2.4.7.1. The Join Procedure

Chúng ta sẽ bắt đầu với các khóa bảo mật, như được minh họa trong Hình 1.13. Các khóa gốc riêng lẻ được lưu trữ an toàn trên thiết bị đầu cuối và các khóa phù hợp được lưu trữ an toàn trên máy chủ tham gia.



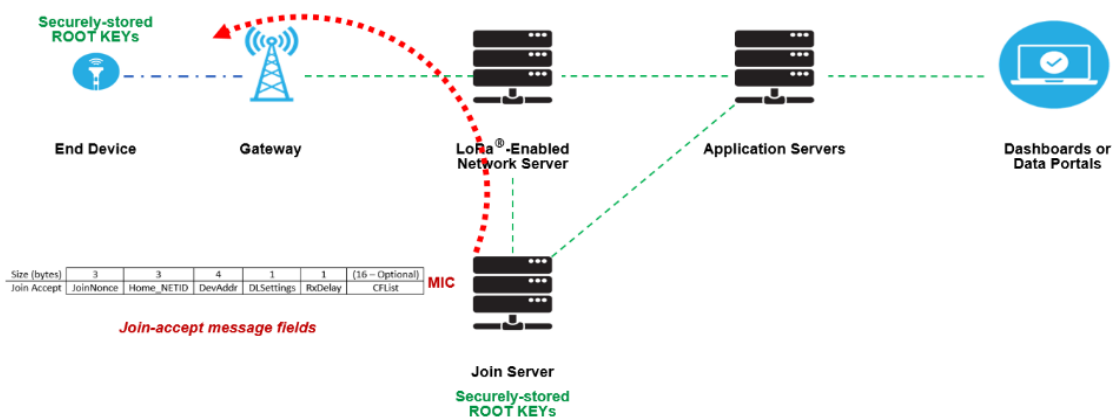
Hình 1.13: Khóa bảo mật được tạo trong quy trình Tham gia (Join Procedure)

Thiết bị cuối gửi thông báo yêu cầu tham gia đến máy chủ tham gia, như minh họa trong Hình 1.14



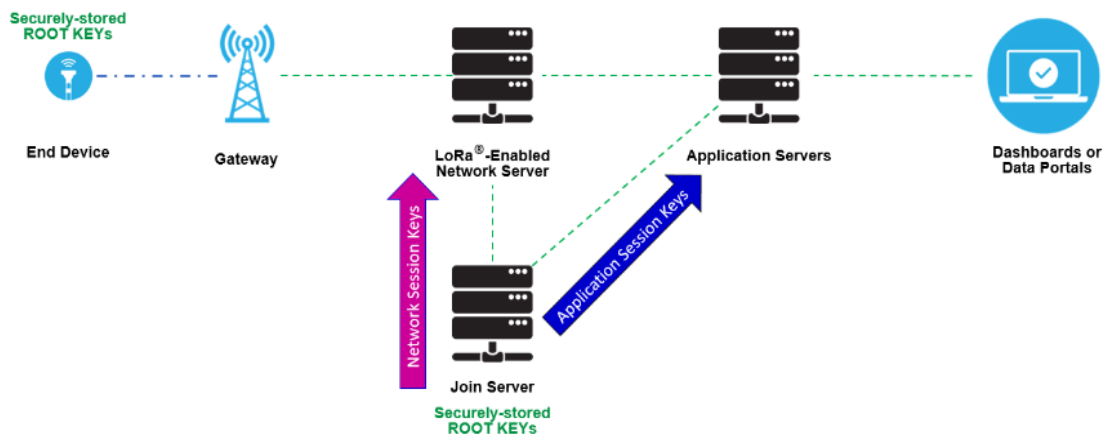
Hình 1.14: Gửi tin nhắn chấp nhận tham gia đến thiết bị đầu cuối

Sau khi máy chủ tham gia xác thực thiết bị yêu cầu tham gia mạng, nó sẽ trả về một thông báo chấp nhận tham gia cho thiết bị, như minh họa trong Hình 1.15.



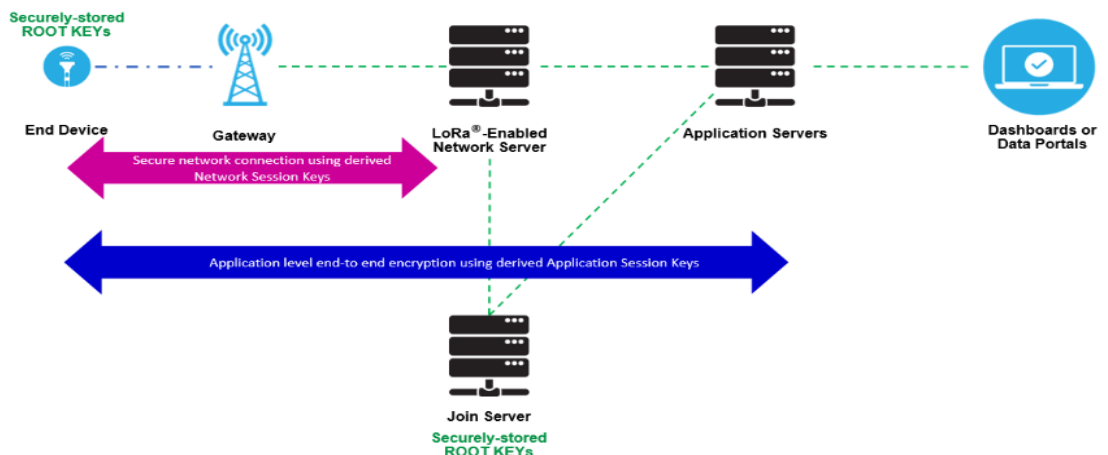
Hình 1.15: Gửi tin nhắn chấp nhận tham gia đến thiết bị đầu cuối

Tiếp theo, thiết bị đầu cuối lấy được khóa phiên cục bộ, dựa trên DevEUI, Join EUI, DevNonce, khóa gốc và các trường trong thông báo yêu cầu tham gia và chấp nhận tham gia. Cuối cùng, máy chủ tham gia cũng lấy được các khóa phiên từ ID nổi tiếp, khóa gốc và các trường trong yêu cầu tham gia và thông báo chấp nhận tham gia. Cuối cùng, máy chủ tham gia chia sẻ khóa phiên với máy chủ mạng và ứng dụng, như minh họa trong Hình 18.



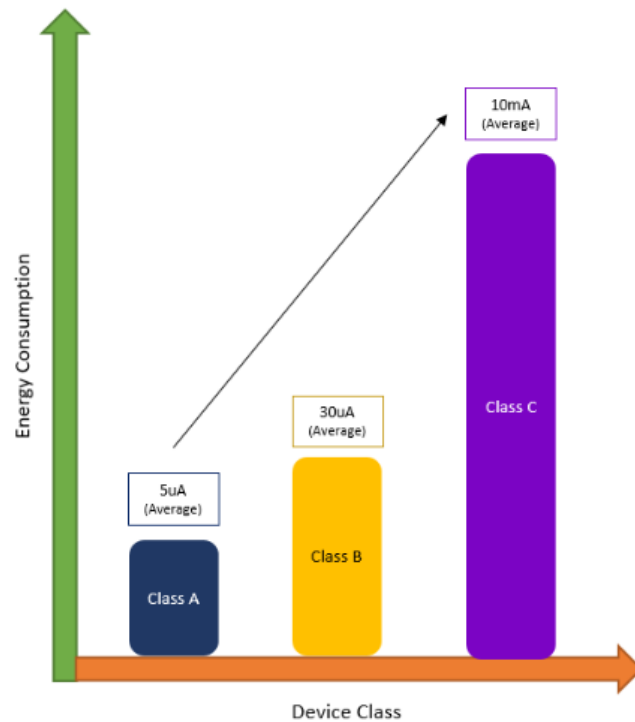
Hình 1.16: Khóa phiên được chia sẻ với máy chủ mạng và máy chủ ứng dụng

Hình 1.17 minh họa tính bảo mật của việc truyền gói dữ liệu. Lưu lượng điều khiển giữa thiết bị cuối và máy chủ mạng được bảo mật bằng Khóa phiên mạng AES (Network Session Key) 128 bit (NwSKey). Lưu lượng dữ liệu di chuyển giữa thiết bị cuối và máy chủ ứng dụng, được bảo mật bằng Khóa phiên ứng dụng (Application Session Key) 128 bit (AppSKey). Phương pháp này đảm bảo rằng cả công và máy chủ mạng đều không thể đọc dữ liệu người dùng.



Hình 1.17: Truyền an toàn các gói dữ liệu

2.4.8. Phân loại Class trong LoRaWAN



Hình 1.18: Mức độ tiêu thụ của các loại thiết bị sử dụng Class A, B, C

2.4.8.1. Class A: Công suất thấp nhất, thiết bị đầu cuối hai chiều:

Lớp mặc định phải được hỗ trợ bởi tất cả các thiết bị cuối LoRaWAN, giao tiếp lớp A luôn được khởi tạo bởi thiết bị cuối và hoàn toàn không đồng bộ. Mỗi lần truyền đường lên (uplink) có thể được gửi bất cứ lúc nào và được theo sau bởi hai cửa sổ đường xuống (downlink) ngắn, tạo cơ hội cho giao tiếp hai chiều hoặc các lệnh điều khiển mạng nếu cần. Đây là một loại giao thức ALOHA.

Thiết bị đầu cuối có thể chuyển sang chế độ ngủ năng lượng thấp trong khoảng thời gian được xác định bởi chính ứng dụng của nó: Không yêu cầu mạng đối với các lần đánh thức định kỳ. Điều này làm cho lớp A trở thành chế độ hoạt động với công suất thấp nhất, trong khi vẫn cho phép liên lạc đường lên bất cứ lúc nào.

Vì truyền thông đường xuống phải luôn tuân theo truyền tải đường lên với lịch trình được xác định bởi ứng dụng thiết bị đầu cuối, nên truyền thông đường xuống phải được lưu vào bộ đệm tại máy chủ mạng cho đến sự kiện đường lên tiếp theo.

2.4.8.2. Class B: Thiết bị đầu cuối hai chiều với độ trễ đường xuống xác định:

Ngoài các cửa sổ nhận do lớp A khởi tạo, các thiết bị lớp B được đồng bộ hóa với mạng bằng cách sử dụng đèn hiệu (beacons) định kỳ và mở các 'ping slots' đường xuống vào các thời điểm đã lên lịch. Điều này cung cấp cho mạng khả năng gửi thông

tin liên lạc đường xuống với độ trễ xác định, nhưng phải trả giá bằng một số mức tiêu thụ năng lượng bổ sung trong thiết bị đầu cuối. Độ trễ có thể lập trình lên đến 128 giây để phù hợp với các ứng dụng khác nhau và mức tiêu thụ năng lượng bổ sung đủ thấp để vẫn hợp lệ cho các ứng dụng chạy bằng pin.

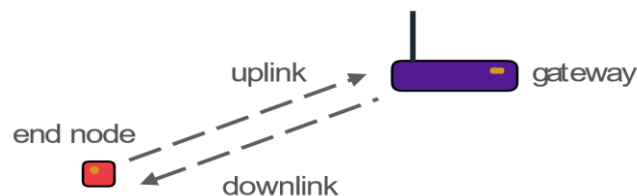
2.4.8.3. Class C: Độ trễ thấp nhất, thiết bị đầu cuối hai chiều:

Ngoài cấu trúc lớp A của đường lên theo sau là hai cửa sổ đường xuống, lớp C còn giảm độ trễ trên đường xuống bằng cách giữ cho bộ thu của thiết bị đầu cuối luôn mở ở mọi thời điểm mà thiết bị không truyền (song công một nửa). Dựa trên điều này, máy chủ mạng có thể bắt đầu truyền tải đường xuống bất kỳ lúc nào với giả định rằng bộ thu thiết bị đầu cuối đang mở, do đó không có độ trễ. Thỏa hiệp là tiêu hao năng lượng của máy thu (lên đến ~50mW) và do đó, loại C phù hợp cho các ứng dụng có sẵn nguồn điện liên tục.

Đối với các thiết bị chạy bằng pin, có thể chuyển đổi chế độ tạm thời giữa các loại A & C và rất hữu ích cho các tác vụ không liên tục như cập nhật chương trình cơ sở qua mạng.

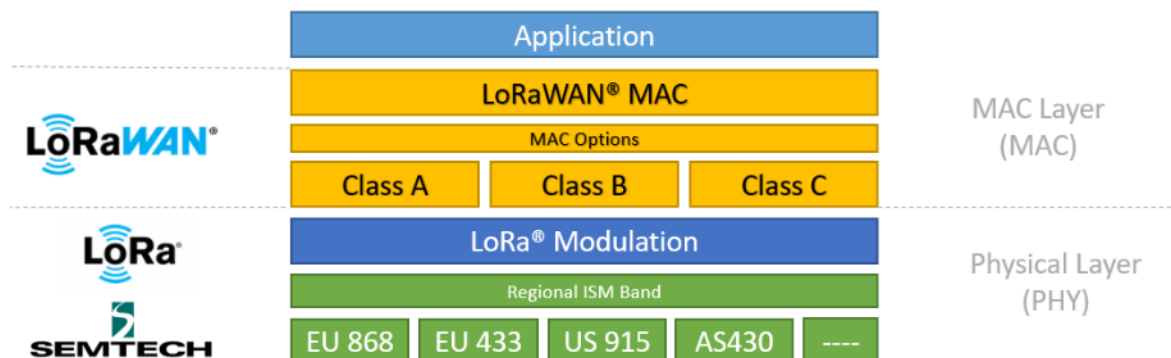
2.4.9. Uplink và Downlink

- Khi một nút cuối (End-node) truyền dữ liệu đến cổng (Gateway) gọi là uplink.
- Khi cổng (Gateway) truyền dữ liệu đến nút cuối (End-Node) gọi là downlink.



Hình 1.19: Mô hình của Uplink và Downlink

2.4.10. Kiến trúc phân lớp trong công nghệ LoRaWAN



Hình 1.20: LoRaWAN technology stack

LoRa là lớp vật lý (PHY), tức là điều chế không dây được sử dụng để tạo liên kết truyền thông tầm xa. LoRaWAN là một giao thức mạng mở cung cấp các dịch vụ liên lạc hai chiều, di động và bản địa hóa an toàn do Liên minh LoRa chuẩn hóa và duy trì.

2.4.11. Các quy định trong LoRa/LoRaWAN

LoRa hoạt động trong băng tần vô tuyến ISM (Công nghiệp, Khoa học và Y tế - Industrial, Scientific and Medical) được cấp phép có sẵn trên toàn thế giới. Có ưu điểm là bất kỳ ai cũng có thể sử dụng tần số này, nhược điểm là tốc độ dữ liệu thấp và khả năng nhiễu cao vì ai cũng có thể sử dụng tần số này.

Ví dụ: Ở Châu Âu khi sử dụng băng tần ISM (863 MHz - 870 MHz) người dùng phải tuân thủ các quy tắc sau:

- Đối với đường lên, công suất truyền tối đa được giới hạn ở mức 25mW (14 dBm).
- Đối với đường xuống (đối với 869,525MHz), công suất truyền tối đa được giới hạn ở 0,5W (27 dBm)
- Có chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle) 0,1% và 1,0% mỗi ngày tùy thuộc vào kênh.
- Độ lợi anten tối đa cho phép +2,15 dBi.

3. CÁC KHÁI NIỆM/THÔNG SỐ TRONG LORA/LORAWAN

3.1. Time On Air (Thời gian truyền)

Khi tín hiệu được gửi từ người gửi, phải mất một khoảng thời gian nhất định trước khi người nhận nhận được tín hiệu này. Thời gian này được gọi là Time On Air (ToA).

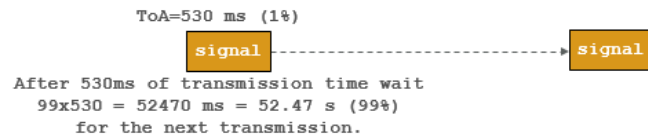


Hình 1.21: Mô hình Time On Air

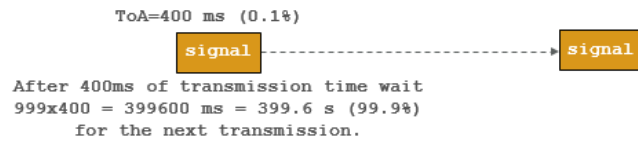
3.2. Duty Cycle

Chu kỳ nhiệm vụ (Duty Cycle) là tỷ lệ thời gian mà một thành phần, thiết bị hoặc hệ thống được vận hành. Chu kỳ nhiệm vụ có thể được biểu thị dưới dạng tỷ lệ hoặc phần trăm.

- For example:
Time on Air = 530 ms
Duty cycle = 1%



- For example:
Time on Air = 400 ms
Duty cycle = 0.1%



Hình 1.22: Cách tính Duty Cycle

Ví dụ: ToA = 530ms => sau khi gửi tin nhắn, chúng ta phải đợi 99x530ms = 52,47s trước khi gửi tin nhắn mới

3.3. Propagation

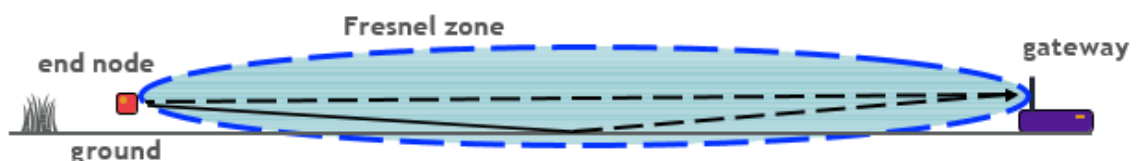
Lan truyền (Propagation) là cách sóng vô tuyến di chuyển trong không gian trống (còn được gọi là môi trường). Cách thức các sóng này di chuyển có thể ảnh hưởng đến cường độ tín hiệu của nó.

Line-of-sight Propagation là sóng vô tuyến truyền trực tiếp từ người gửi đến người nhận mà không gặp bất kỳ trở ngại nào. Nếu khoảng cách giữa người gửi và người nhận lớn hơn, tín hiệu sẽ yếu đi. Mất mát này được gọi là Free Space Loss (Sự suy hao tín hiệu trong không gian trống).



Hình 1.23: Tín hiệu truyền trực tiếp từ End Node tới Gateway

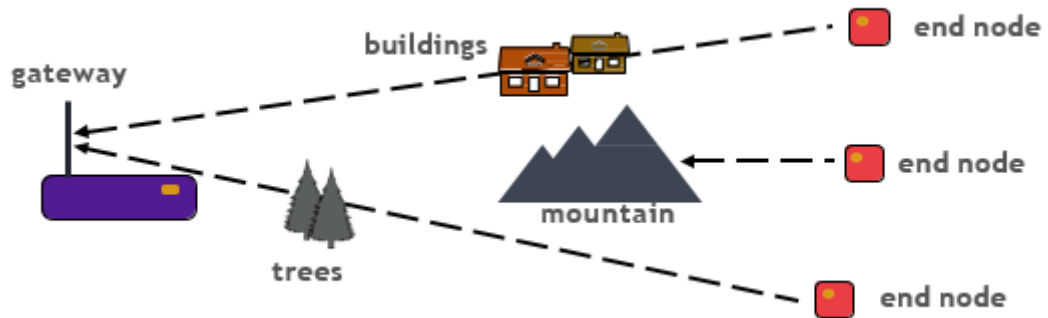
Nếu có chướng ngại vật gần đường đi của nó (trong Fresnel Zone), sóng vô tuyến phản xạ từ những vật thể đó có thể lệch pha với tín hiệu truyền trực tiếp và làm giảm công suất của tín hiệu nhận được.



Hình 1.24: Fresnel Zone (Vùng Fresnel)

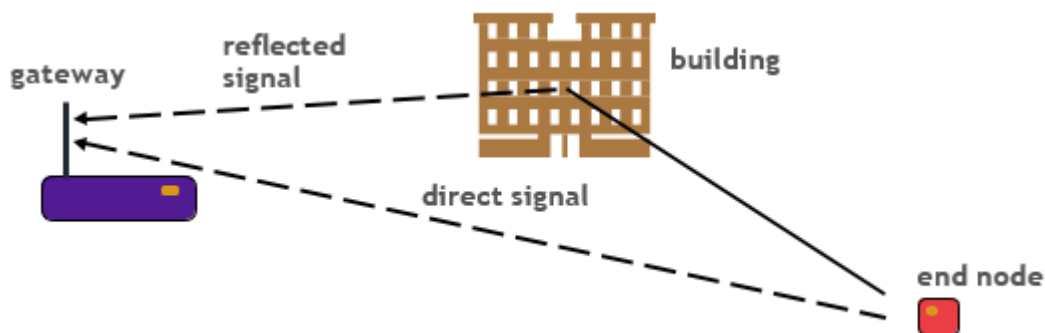
Lan truyền (Propagation) qua chướng ngại vật (obstacles): Sóng vô tuyến có thể xuyên qua các chướng ngại vật xuất hiện trên đường đi của nó. Sóng vô tuyến sẽ mất cường độ nếu nó truyền qua các chướng ngại vật làm bằng vật liệu dẫn điện hơn.

Như ví dụ dưới hình 1.25 các tòa nhà được làm bằng nhiều vật liệu dẫn điện hơn làm suy yếu tín hiệu nhiều hơn so với cây cối. Một ngọn núi chặn tín hiệu hoàn toàn.



Hình 1.25: Sóng vô tuyến lan truyền qua trường ngại vật

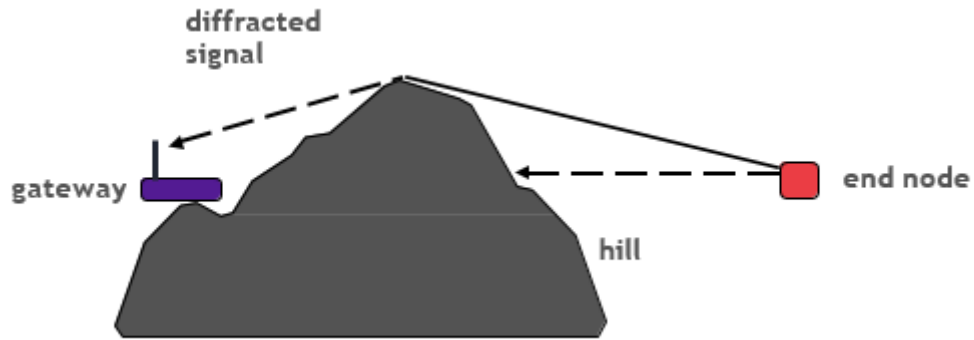
Lan truyền (Propagation) qua phản xạ (reflected): Sóng vô tuyến có thể bị phản xạ bởi các tòa nhà cản trở tín hiệu trực tiếp của nó. Tín hiệu phản xạ có thể gây nhiễu tín hiệu trực tiếp.



Hình 1.26: Lan truyền qua phản xạ

Lan truyền (Propagation) qua nhiễu xạ (diffracted): Là nơi sóng vô tuyến bị uốn cong xung quanh các cạnh sắc nét. Cổng có thể nhận được tín hiệu từ bộ phát mặc dù tín hiệu đó có thể bị "che khuất" bởi một chướng ngại vật lớn.

Như hình 1.27 Cổng nhận tín hiệu nhiễu xạ chứ không phải tín hiệu trực tiếp.



Hình 1.27: Lan truyền qua nhiều xạ

3.4. Free Space Loss

Thông thường, sẽ thuận tiện hơn nếu có thể biểu thị suy hao đường dẫn theo suy hao trực tiếp tính bằng decibel. Theo cách này, có thể tính toán các yếu tố bao gồm tín hiệu dự kiến, v.v.

Lưu ý:

- dBm : reference is 1mW
- dBi : refers to the antenna gain with respect to an isotropic antenna
- dBd : dBd refers to the antenna gain with respect to a reference dipole antenna

$$\text{dBi} = \text{dBd} + 2.15$$

Phương trình dưới đây cho thấy tổn hao đường dẫn đối với ứng dụng lan truyền trong không gian tự do. Nó cũng có thể được sử dụng khi tính toán hoặc ước tính các đường dẫn khác.

$$L(f_s) = 32.45 + 20\log(D) + 20\log(f)$$

Trong đó:

- L_{fs} = Sự suy hao tín hiệu trong không gian trống (Free Space Loss) tính bằng dB
- D = Khoảng cách giữa nút cuối và cổng tính bằng km
- f = tần số tính bằng MHz

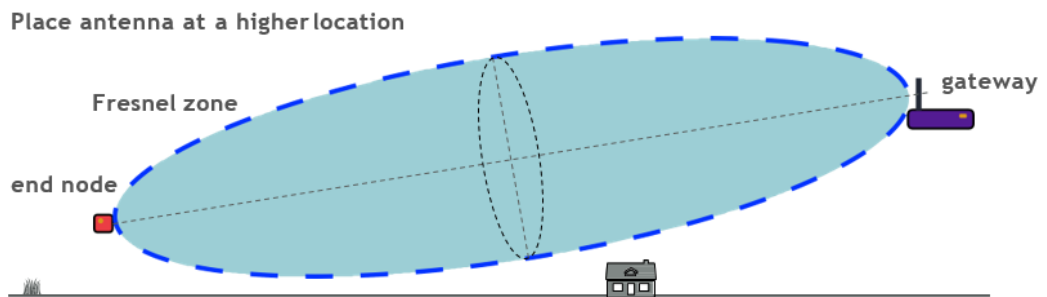
Ví dụ: $f=868$ MHz

- $D=0.01$ km, $L_{fs} = 32.45 + 20\log(0.01) + 20\log(868) = 51$ dB
- $D=0.05$ km, $L_{fs} = 32.45 + 20\log(0.05) + 20\log(868) = 65$ dB
- $D=0.10$ km, $L_{fs} = 32.45 + 20\log(0.10) + 20\log(868) = 71$ dB
- $D=0.50$ km, $L_{fs} = 32.45 + 20\log(0.50) + 20\log(868) = 85$ dB
- $D=1.00$ km, $L_{fs} = 32.45 + 20\log(1.00) + 20\log(868) = 91$ dB

3.5. Fresnel Zone

Vùng Fresnel (Fresnel Zone) là một khối hình elip bao quanh đường ngắm trực tiếp giữa nút cuối và cổng. Bất kỳ chướng ngại vật nào trong phạm vi này, ví dụ như các tòa nhà, cây cối, đỉnh đồi hoặc mặt đất đều có thể làm suy yếu tín hiệu truyền đi ngay cả khi có một đường ngắm trực tiếp giữa nút cuối và cổng. vì vậy ta nên đặt antenna thiết bị ở vị trí cao tránh các đối tượng trong vùng Fresnel.

Như hình 1.28 ta đặt ăng ten Gateway ở vị trí cao hơn. Nút cuối gửi tín hiệu đến cổng mà không có bất kỳ sự can thiệp nào. Không có chướng ngại vật trong vùng Fresnel



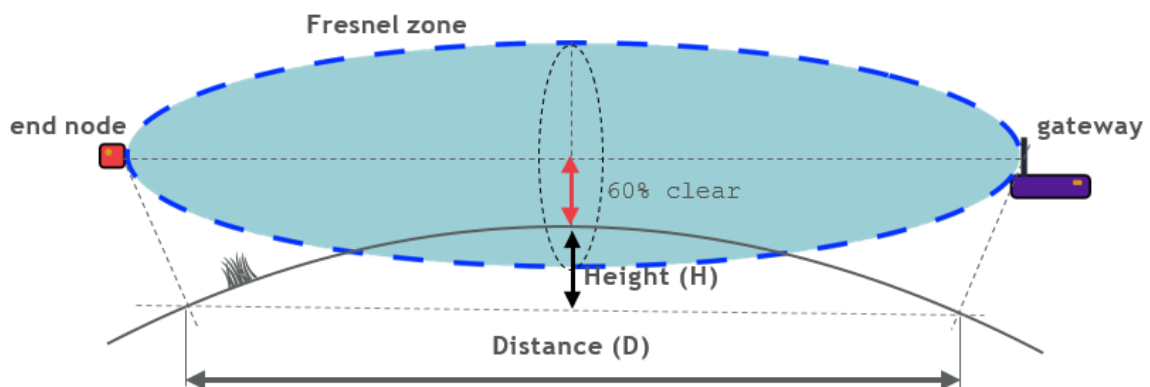
Hình 1.28: Đặt antenna Gateway ở vị trí cao hơn để tránh vật cản trong Fresnel Zone

Công thức tính bán kính Fresnel Zone dựa trên trái đất phẳng:

$$r = 8.657 \times \sqrt{D / f}$$

Trong đó:

- r : Bán kính Fresnel zone (m)
- D : Khoảng cách giữa 2 antenna truyền và nhận (km)
- f : Tần số (GHz)

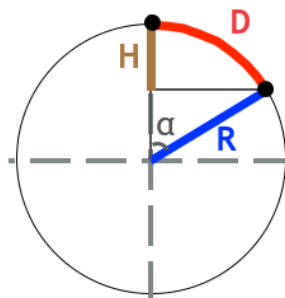


Hình 1.29: Fresnel Zone

Công thức tính chiều cao H:

$$\alpha = D \times \frac{360}{2 \times \pi \times R}$$

$$H = R - (R \times \cos \alpha)$$



Hình 1.30: Công thức tính chiều cao

Trong đó:

- H = Chiều cao (hoặc phụ cấp độ cong của trái đất) tính bằng km
- D = Khoảng cách giữa nút cuối và cổng tính bằng km
- R = Bán kính Trái đất tính bằng km = 6371 km
- α = Góc giữa nút cuối và cổng tính bằng độ

Ví dụ:

- $f = 868 \text{ MHz}$
- H : phụ cấp độ cong trái đất
- $r+H$: chiều cao nút cuối và cổng tối thiểu so với mặt đất

100% clear: $r = 8.657 \times \sqrt{D / f}$, 60% clear: $r = 8.657 \times \sqrt{(0.6 \times D) / f}$

100 % clear

D (m)	D (km)	r (m)	r + H (m)
100	0.1	2.94	2.94
500	0.5	6.57	6.57
1000	1.0	9.29	9.29
2000	2.0	13.14	13.14
5000	5.0	20.78	22.74
10000	10.0	29.38	37.23

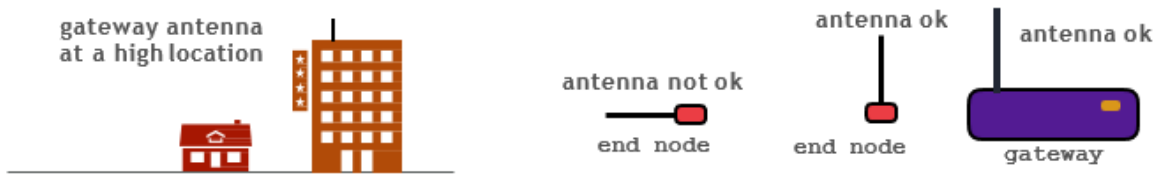
60 % clear

D (m)	0.6 x D (km)	r (m)	r + H (m)
100	0.06	2.28	2.28
500	0.3	5.09	5.09
1000	0.6	7.20	7.20
2000	1.2	10.18	10.18
5000	3.0	16.09	18.05
10000	6.0	22.76	30.61

Hình 1.31: Bảng chiều cao đặt antenna so với mặt đất ở Fresnel Zone 100% clear và 60% clear (Bị phản xạ can thiệp $\geq 40\%$).

Để có hiệu suất tín hiệu vô tuyến tốt nhất: Ăng-ten của cổng phải được đặt ngoài trời ở vị trí cao (tránh các chướng ngại vật trong vùng Fresnel).

Thiết kế ăng-ten cho cả nút cổng và nút cuối phải được tối ưu hóa cho tần số khu vực của nó. Giữ phân cực ăng-ten theo chiều dọc cho cả nút cổng và nút cuối và sử dụng ăng-ten đa hướng để bao phủ một khu vực rộng lớn.

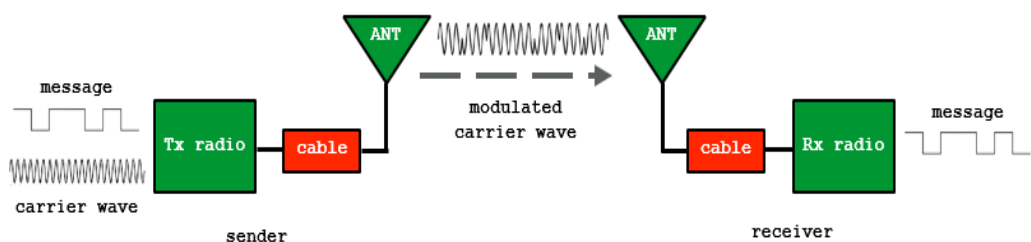


Hình 1.32: Quy tắc đặt antenna tối ưu

3.6. Modulation & Demodulation (Điều chế và giải điều chế)

Nếu một tín hiệu đầu vào (=tín nhắn) được đặt lên một tín hiệu sóng mang thì quá trình này được gọi là điều chế (modulation). Tín hiệu đã điều chế được truyền đến máy thu.

Giải điều chế (Demodulation) thì ngược lại, trong đó tín hiệu gốc (= message) được phục hồi từ sóng mang đã điều chế.



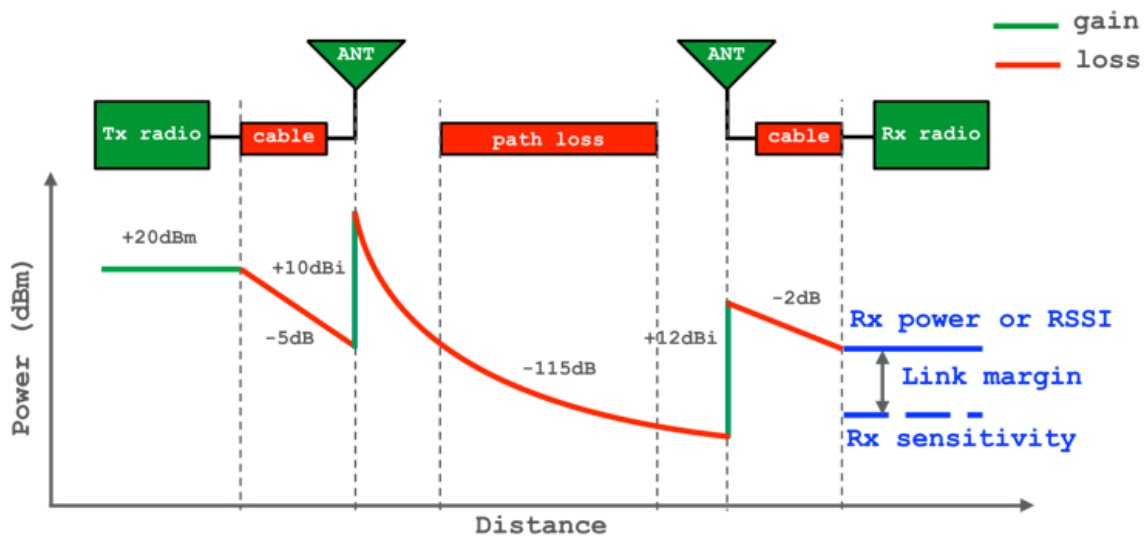
Hình 1.33: Điều chế và giải mã tín hiệu

3.7. Link Budget & Link Margin

Ngân sách liên kết (A link budget) là tổng của tất cả các lợi ích và tổn thất từ máy phát, thông qua phương tiện (còn gọi là không gian trống), đến máy thu trong hệ thống viễn thông. Đó là một cách để định lượng hiệu suất liên kết.

- Máy phát: Giá trị máy phát vô tuyến phải được chỉ định bằng dbm, nếu không bạn không biết giá trị tuyệt đối của nó.
- Độ lợi (Gains): Ăng-ten (Đơn vị: dbi)
- Suy hao (Losses): cáp, đầu nối, tín hiệu truyền qua môi trường (Đơn vị: db)

Khi tín hiệu truyền qua môi trường, tín hiệu sẽ mất cường độ. Điều này được gọi là mất đường dẫn hoặc suy giảm đường dẫn.



Hình 1.34: Mô hình Link budget & Link Margin

Một phương trình ngân sách liên kết (Link budget):

$$\text{Received Power} = \text{Transmitted Power} + \text{Gains} - \text{Losses}$$

Độ nhạy của máy thu là mức công suất thấp nhất mà máy thu có thể nhận hoặc giải điều chế tín hiệu. Ví dụ các thông số như hình 1.34:

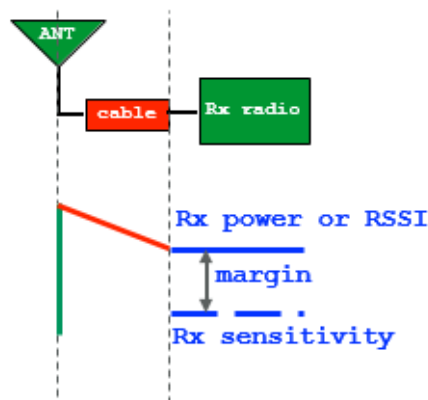
$$\text{Received Power} = 20 - 5 + 10 - 115 + 12 - 2 = -80 \text{ dBm}$$

Lề liên kết (Link Margin) là sự khác biệt giữa công suất nhận được và độ nhạy của máy thu.

Biên độ liên kết = Công suất nhận - Độ nhạy của máy thu

- Biên độ liên kết (Link margin) tính bằng dBm
- Công suất nhận được (Received power) tính bằng dBm
- Độ nhạy của máy thu (Receiver sensitivity) tính bằng dBm

Ví dụ như hình 1.35 ta có:



Hình 1.35: Link Margin (biên độ liên kết)

$$\text{Link margin} = \text{Received power} - \text{Receiver sensitivity}$$

- Received power = -80dBm
- Receiver sensitivity = -90dBm
- Link margin = -80 - (-90) = 10 dBm = 10 Mw

3.8. EIRP & ERP

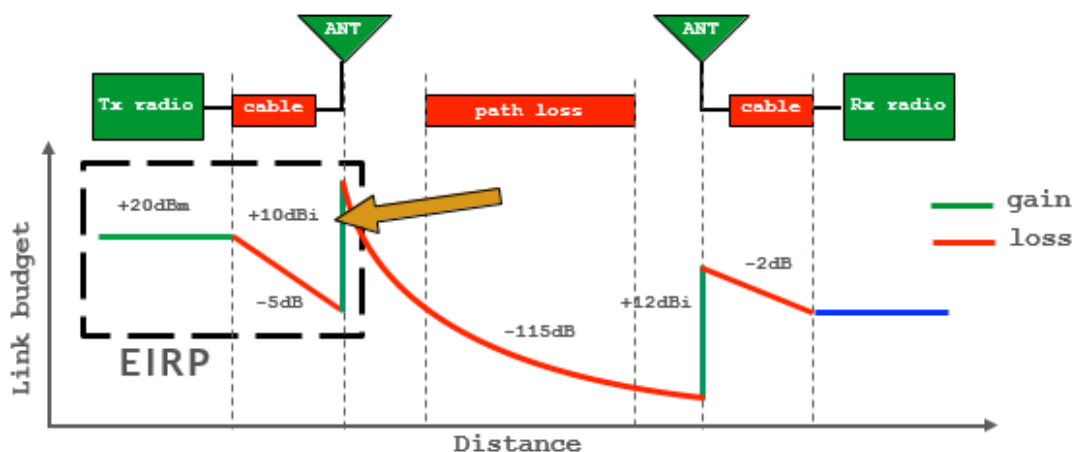
3.8.1. EIRP

Các hệ thống truyền RF phải tuân thủ các quy tắc nhất định do các cơ quan quản lý như FCC hoặc ETSI đặt ra. Một trong những quy tắc này: thiết bị vô tuyến không được vượt quá các giá trị ERP hoặc EIRP nhất định do các cơ quan quản lý này đặt ra.

Công suất bức xạ đẳng hướng hiệu quả (Effective Isotropic Radiated Power - EIRP) là tổng công suất bức xạ của ăng ten đẳng hướng giả định theo một hướng.

$$\text{EIRP} = \text{Tx power (dBm)} + \text{antenna gain (dBi)} - \text{cable loss (dBm)}$$

$$\text{Ví dụ: EIRP} = 20 + 10 - 5 = 25 \text{ dBm}$$



Hình 1.36: Mô hình tổng quan về công suất bức xạ đẳng hướng hiệu quả

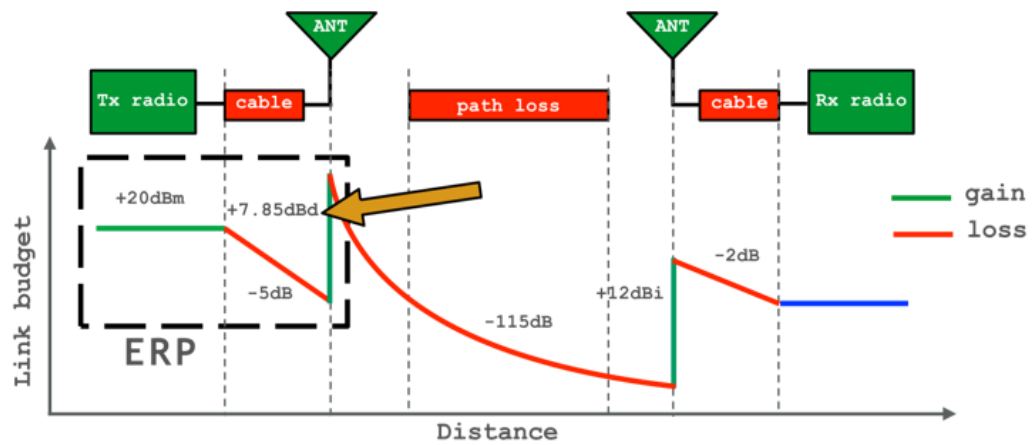
3.8.2. ERP

Công suất bức xạ hiệu quả (Effective Radiated Power - ERP) là tổng công suất bức xạ của một ăng-ten thực so với một lưỡng cực nửa bước sóng chứ không phải là một ăng-ten đẳng hướng lý thuyết.

$$\text{ERP} = \text{Tx power (dBm)} + \text{antenna gain (dBd)} - \text{cable loss (dBm)}$$

$$\text{Ví dụ: ERP} = 20 + 7.85 - 5 = 22.85 \text{ dBm}$$

$$\text{Mối quan hệ giữa EIRP \& ERP: EIRP (dBm)} = \text{ERP (dBm)} + 2.15$$



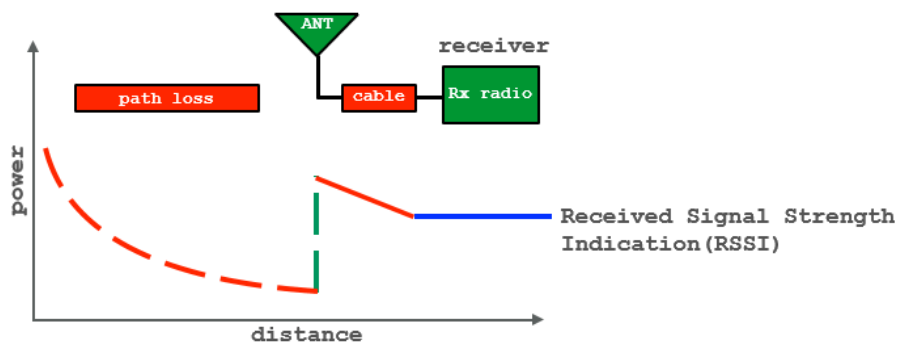
Hình 1.37: Mô hình tổng quan công suất bức xạ hiệu quả

3.9. RSSI & SNR

3.9.1. RSSI

Cường độ tín hiệu đã nhận (Received Signal Strength Indication - RSSI) là công suất tín hiệu nhận được tính bằng miliwatt và được đo bằng dBm. Giá trị này có thể được sử dụng để đo mức độ người nhận (receiver) có thể “nghe” tín hiệu từ người gửi (sender). RSSI được đo bằng dBm và là một giá trị âm. Càng gần 0 thì tín hiệu càng tốt. Các giá trị LoRa RSSI điển hình là:

- RSSI tối thiểu = -120 dBm.
- Nếu RSSI=-30dBm: tín hiệu mạnh.
- Nếu RSSI=-120dBm: tín hiệu yếu.



Hình 1.38: Mô hình RSSI

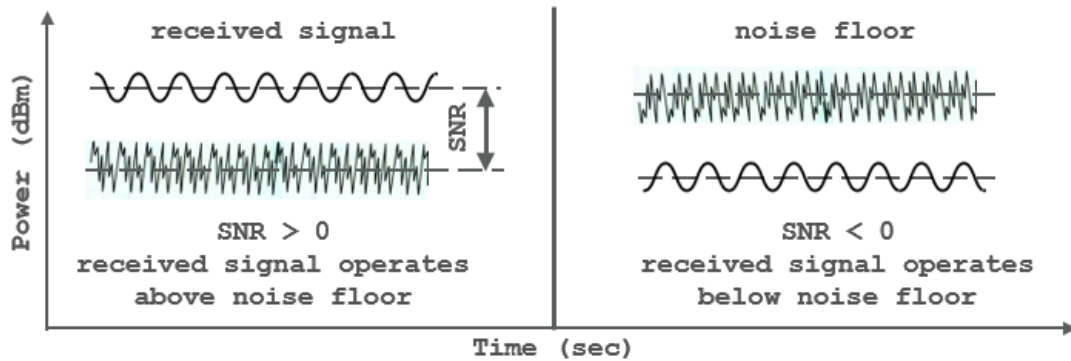
3.9.2. SNR

Tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm (Signal-to-Noise Ratio - SNR) là tỷ lệ giữa tín hiệu công suất nhận được và mức công suất sản tiếng ồn. Sàng tiếng ồn (noise floor) là một khu vực của tất cả các nguồn tín hiệu gây nhiễu không mong muốn có thể làm hỏng tín hiệu đã truyền và do đó sẽ xảy ra việc truyền lại.

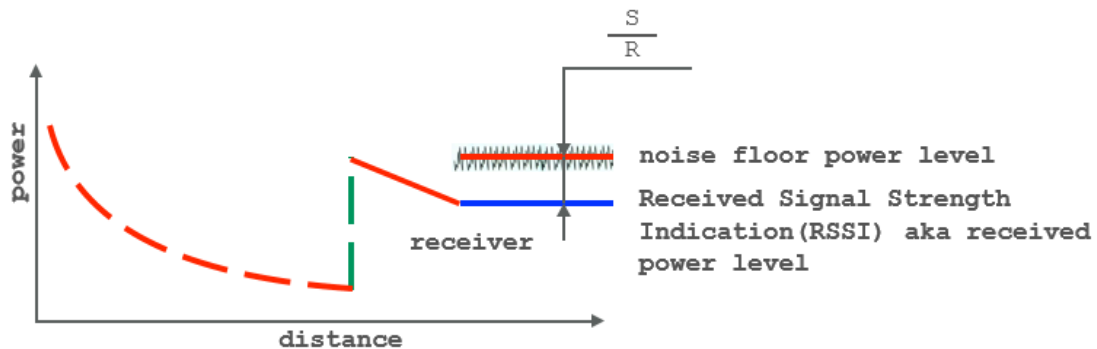
- Nếu SNR lớn hơn 0, tín hiệu nhận được hoạt động trên mức nhiễu nền.
- Nếu SNR nhỏ hơn 0, tín hiệu nhận được sẽ hoạt động dưới mức nhiễu nền.

Thông thường mức ồn sàn là giới hạn vật lý của độ nhạy, tuy nhiên LoRa hoạt động dưới mức ồn:

- Các giá trị LoRa SNR điển hình nằm trong khoảng: -20dB đến +10dB
- Giá trị gần +10dB hơn có nghĩa là tín hiệu nhận được ít bị hỏng hơn.
- LoRa có thể giải điều chế các tín hiệu từ -7,5 dB đến -20 dB dưới mức nhiễu nền.

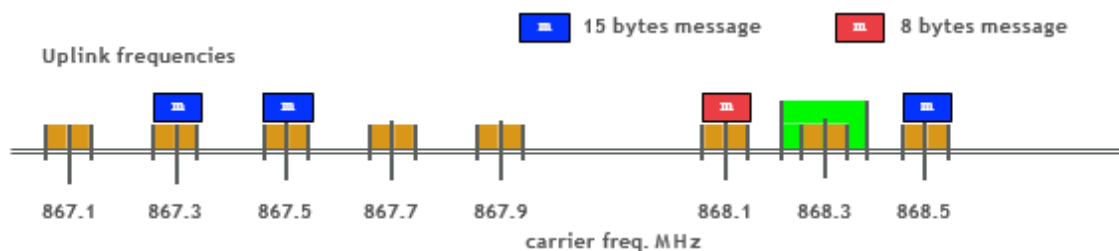


Hình 1.39: Tín hiệu LoRa nhận được và Noise Floor



Hình 1.40: Mức năng lượng đã nhận RSSI bên dưới Noise Floor

3.10. Thay đổi tần số cho mỗi lần truyền (changing frequencies for every transmission)



Hình 1.41: Sơ đồ kỹ thuật thay đổi tần số cho mỗi lần truyền

Thiết bị đầu cuối thay đổi kênh theo kiểu giả ngẫu nhiên (pseudo-random) cho mỗi lần truyền. Thay đổi tần số làm cho hệ thống mạnh mẽ hơn để can thiệp.

Ví dụ như hình 1.41 ở Châu Âu, 8 tần số khác nhau được sử dụng để truyền dẫn đường lên.

Thời gian dừng (Dwell time) hay thời gian truyền là khoảng thời gian cần thiết để truyền trên một tần số.

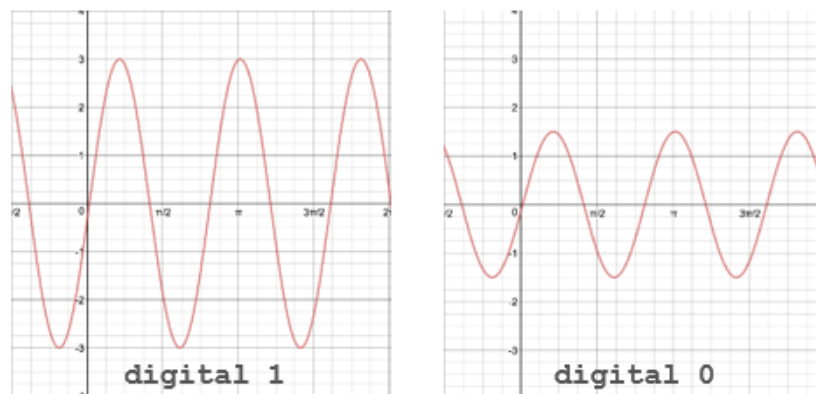
Hop time là lượng thời gian cần thiết để thay đổi từ tần số này sang tần số khác mà đài không truyền.

4. TỔNG QUAN VỀ KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ LORA

4.1. Giới thiệu tổng quan về các kỹ thuật điều chế tín hiệu cơ bản

4.1.1. Amplitude Shift Keying (ASK)

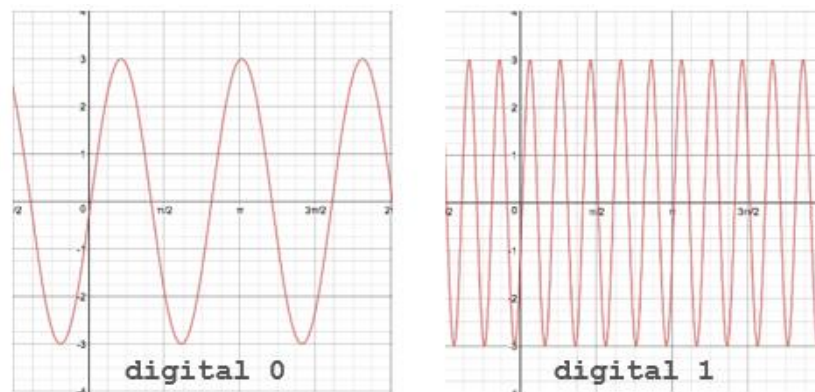
Chỉ có biên độ thay đổi



Hình 1.42: Mô hình kỹ thuật điều chế ASK

4.1.2. Frequency Shift Keying (FSK)

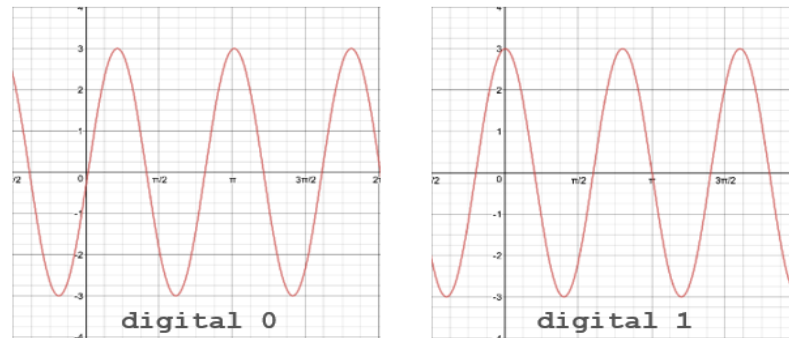
Chỉ có tần số thay đổi



Hình 1.43: Mô hình kỹ thuật điều chế FSK

4.1.3. Phase Shift Keying (PSK)

Chỉ có giai đoạn thay đổi:

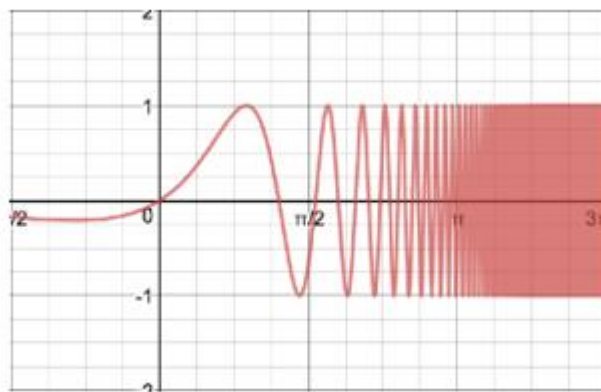


Hình 1.44: Mô hình kỹ thuật điều chế PSK

4.2. Chirp Spread Spectrum (CSS)

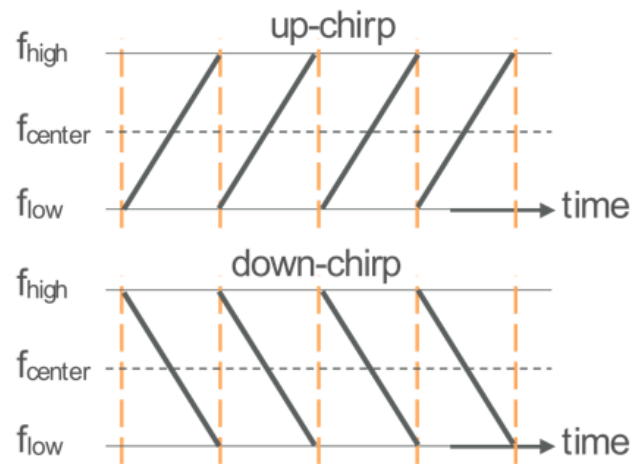
LoRa là sử dụng sơ đồ điều chế trải phổ độc quyền dựa trên điều chế Trải phổ Chirp (Chirp Spread Spectrum - CSS).

Chirp Spread Spectrum là một kỹ thuật trải phổ sử dụng các xung chirp được điều chế tần số tuyến tính bằng rộng để mã hóa thông tin (có thể hiểu đơn giản là thay đổi tần số theo thời gian). Kỹ thuật trải phổ là các phương pháp mà tín hiệu được trải rộng có chủ ý trong miền tần số. Ưu điểm khoảng cách liên lạc dài, yêu cầu công suất truyền tải thấp và ít nhiễu hơn. Ví dụ, một tín hiệu được truyền theo từng đợt ngắn, "nhảy" giữa các tần số trong một chuỗi giả ngẫu nhiên (được miêu tả ở phần 3.10)



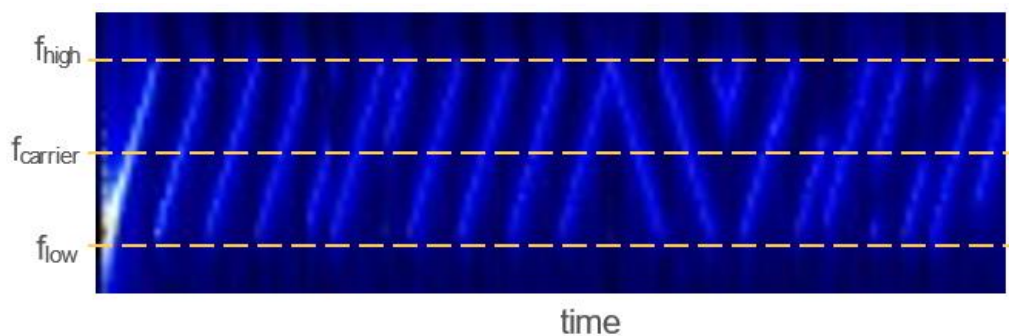
Hình 1.45: Ảnh minh họa tín hiệu Chirp tăng theo thời gian

Chirp thường được gọi là tín hiệu quét, là một âm thanh trong đó tần số tăng (up-chirp) hoặc giảm (down-chirp) theo thời gian.



Hình 1.46: Tín hiệu quét ở dạng Up-chirp và Down-chirp

Các tín hiệu chirp này được sử dụng làm tín hiệu sóng mang khi tin nhắn được mã hóa. Hình 1.47 là một tín hiệu được điều chế LoRa thực tế. Tin nhắn được mã hóa trên tín hiệu Chirp.

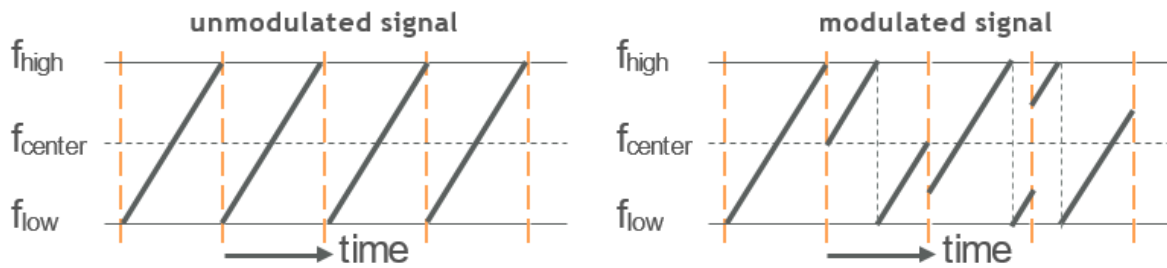


Hình 1.47: Message được mã hoá trên Chirp

4.3. Chirps, Chip – Chip Rate – Chip Duration , Symbol – Symbol Rate – Symbol Duration, Spreading Factor, Forward Error Correction & Coding Rate, Data Rate, Symbol Rate Chip Duration

4.3.1. Chirps

Các Chirp được thay đổi theo chu kỳ (cyclically-shifted) và chính bước nhảy tần số sẽ xác định cách dữ liệu được mã hóa trên các tiếng kêu, hay còn gọi là điều chế LoRa. **Chirps** cơ bản chỉ đơn giản là một đoạn nối từ f_{min} đến f_{max} (up-chirp) hoặc f_{max} đến f_{min} (down-chirp). Chirps mang dữ liệu (Data-carrying chirps) là chirps được thay đổi theo chu kỳ và sự thay đổi theo chu kỳ này mang thông tin.



Hình 1.48: So sánh biểu đồ tín hiệu chưa điều chế và đã điều chế

4.3.2. Symbol, Symbol Rate, Symbol Duration

Nếu chúng ta muốn truyền tín hiệu qua các loại phương tiện khác nhau này, bạn phải mô tả và truyền các bit thông tin đó theo cách sao cho nó đến được đích. **Một biểu tượng (symbol)** đại diện cho một hoặc nhiều bit dữ liệu, nó có thể là một loại dạng sóng hoặc mã. LoRa là một điều chế trải phổ dựa trên chirp. Một Symbol là một chirp.

Tốc độ ký hiệu (Symbol rate) là số lần thay đổi ký hiệu trên một đơn vị thời gian, nó có thể bằng hoặc nhỏ hơn tốc độ bit. Tốc độ ký hiệu (Symbol rate) còn được gọi là tốc độ baud và tốc độ điều chế.

$$R_s \text{ (symbols/sec)} = BW / 2SF = R_c / 2SF$$

Thời lượng biểu tượng (Symbol Duration) hoặc thời gian quét được tính như sau:

$$T_s \text{ (sec)} = 2^{SF} / BW$$

Trong đó:

- Bandwidth (BW) in Hz
- Spreading Factor (SF): 7-12

Ví dụ về T_s :

Cho $SF = 7$

- $BW=125 \text{ kHz}$, $T_s = 2^7 / 125000 = 1,024 \text{ ms}$
- $BW=250 \text{ kHz}$, $T_s = 2^7 / 250000 = 512 \text{ } \mu\text{s}$
- $BW=500 \text{ kHz}$, $T_s = 2^7 / 500000 = 256 \text{ } \mu\text{s}$

⇒ Khi BW tăng thì Symbol Duration sẽ giảm

Cho $BW = 125\text{kHz}$

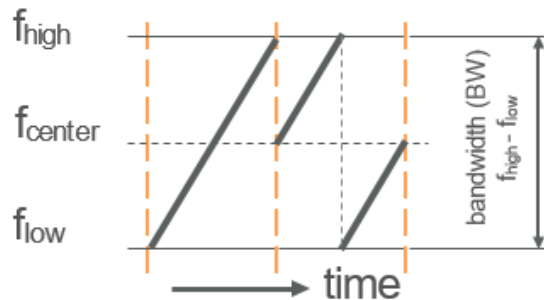
- $SF = 7$, $T_s = 2^7 / 125000 = 1,024 \text{ ms}$
- $SF = 9$, $T_s = 2^9 / 125000 = 4.096 \text{ ms}$
- $SF = 12$, $T_s = 2^{12} / 125000 = 32.768 \text{ ms}$

⇒ Khi SF tăng thì Symbol Duration sẽ tăng

Ví dụ về R_s :

$BW=125\text{ kHz}$, $SF=7$

$R_s = 125000 / 27 = 977\text{ symbols/sec}$



Hình 1.49: Ký hiệu của Symbol rate

4.3.3. Spreading Factor (SF)

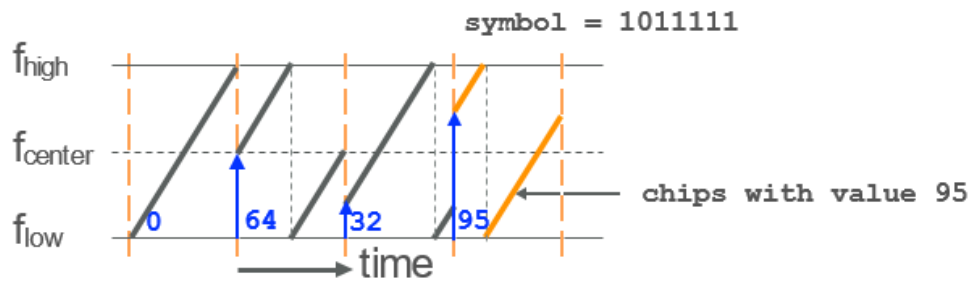
Hệ số trải phổ (Spreading Factor - SF) là tỷ lệ giữa tốc độ ký hiệu (symbol rate) và tốc độ chip (chip rate). Hệ số trải phổ cao hơn làm tăng Tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm (Signal to Noise Ratio - SNR), độ nhạy và phạm vi nhưng cũng làm tăng thời gian phát sóng của gói tin (packet). Số lượng chips trên mỗi symbol được tính là 2^{SF} . Số lượng bit thô có thể được mã hóa bởi symbol đó là SF. Ví dụ: với SF là 7 (SF7) thì có 127 chips/symbol được sử dụng.

Mỗi lần tăng SF làm giảm một nửa tốc độ truyền (transmission rate) và do đó tăng gấp đôi thời lượng truyền (transmission duration) và cuối cùng là mức tiêu thụ năng lượng. Hệ số trải rộng có thể được chọn từ 7 đến 12.

Tín hiệu quét được chia thành 2^{SF} bước (steps) hoặc chips

Ví dụ symbol là: 1011111 (decimal = 95)

- Số bit thô có thể được mã hóa bằng ký hiệu này là 7 (SF=7)
- Tín hiệu quét được chia thành $2^{\text{SF}} = 2^7 = 127$ chips.



Hình 1.50: Biểu đồ mô phỏng symbol là 1011111

4.3.4. Forward Error Correction

Forward Error Correction (FEC) là quá trình trong đó các bit sửa lỗi được thêm vào dữ liệu được truyền. Các bit dư thừa này giúp khôi phục dữ liệu khi dữ liệu bị hỏng do nhiễu. Nếu thêm nhiều bit sửa lỗi thì dữ liệu càng dễ sửa.

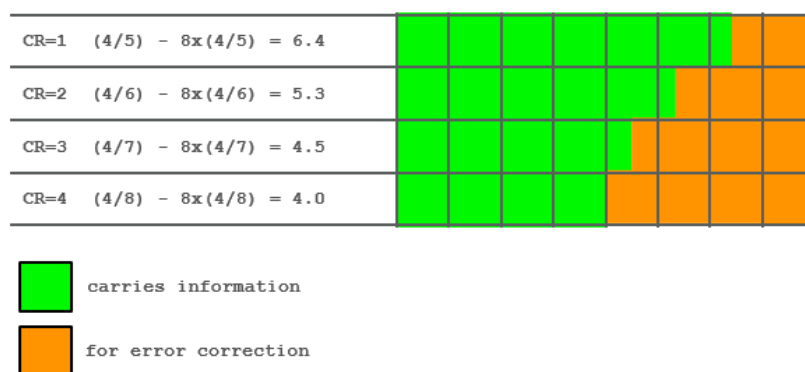
Tuy nhiên, bằng cách thêm nhiều bit sửa lỗi, nhiều dữ liệu được truyền đi làm giảm tuổi thọ pin.

4.3.5. Coding Rate

Tốc độ mã hóa (Coding Rate) đề cập đến tỷ lệ các bit được truyền thực sự mang thông tin. Do nhiễu, quá trình điều chế/giải điều chế gây ra lỗi và đó là lý do mã sửa lỗi (error correction code) được thêm vào. Đối với tải trọng thông thường, Như hình 1.51 có 8 bit được truyền và $CR1 = 4/5$ thì có 6.4 bit mang thông tin thực tế còn lại dùng để sửa lỗi. Trong thực tế, dữ liệu do người dùng gửi cũng được trộn lẫn để có được các thuộc tính sửa lỗi tốt hơn.

Các giá trị tốc độ mã hóa (Coding Rate) được phép của LoRa: $CR = 4/5, 4/6, 4/7$ hoặc $4/8$.

For example, $SF = 8$ (the transmitted bits = 8)



Hình 1.51: Số bit dùng để mang thông tin và số bit sửa lỗi

4.3.6. Chip, Chip Rate, Chip Duration

Chip là phần tử nhị phân cơ bản của chuỗi dữ liệu trong ngữ cảnh truyền trải phổ và để tránh nhầm lẫn, họ đã đặt tên cho nó khác với bit.

Để tạo các symbol/chirps, modem điều chỉnh pha của bộ tạo dao động. Số lần mỗi giây mà modem điều chỉnh pha được gọi là **tốc độ chip (Chip rate)** và xác định băng thông điều chế (Bandwidth). Hay còn gọi tốc độ chip (Chip Rate) là số chip được truyền hoặc nhận trên mỗi đơn vị thời gian. Băng thông có thể thay thế cho tốc độ chip. Chip Rate > Symbol Rate : $R_c > R_s$

$$BW = R_c = \text{chip rate (chips/s)}$$

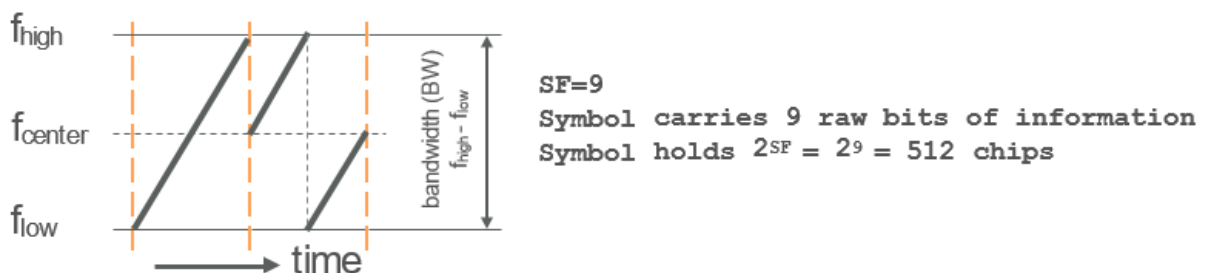
Công thức tính Chip Duration (Vì $R_c = BW$):

$$T_c (\text{sec}) = 1 / BW$$

Ví dụ: Bandwidth (BW) = 125kHz

$$BW = R_c = 125000 \text{ chips/s}$$

$$T_c = 1/125000 = 8\mu\text{s}$$



Hình 1.52: Biểu đồ tín hiệu điều chế $SF = 9$

4.3.7. Data Rate (D_R) và mối liên hệ giữa Transmission Power (TX), Bandwidth (BW), Spreading Factor (SF)

Tốc độ dữ liệu (data rate) phụ thuộc vào băng thông được sử dụng và hệ số trải rộng. LoRaWAN có thể sử dụng các kênh có băng thông 125 kHz, 250 kHz hoặc 500 kHz, tùy thuộc vào khu vực hoặc gói tần số. Hệ số trải phổ (SF) được chọn bởi thiết bị đầu cuối và ảnh hưởng đến thời gian cần thiết để truyền một khung (frame).

$$R_b \text{ (bits/sec)} = SF \times BW \times \frac{4}{2^{SF} (4 + CR)}$$

Hình 1.53: Công thức tính data rate (D_R) hoặc bit rate (R_b)

Trong đó:

- Bandwidth (BW) in Hz
- Spreading Factor (SF): 7-12
- Coding Rate (CR): 1-4

Ví dụ:

Cho SF = 7, CR = 1

- BW=125 kHz, $R_b = 7 \times (125000 / 2^7) \times (4 / (4 + 1)) = 5.5 \text{ kbits/s}$
- BW=250 kHz, $R_b = 7 \times (250000 / 2^7) \times (4 / (4 + 1)) = 10.9 \text{ kbits/s}$
- BW=500 kHz, $R_b = 7 \times (500000 / 2^7) \times (4 / (4 + 1)) = 21.9 \text{ kbits/s}$

⇒ Nếu tăng băng thông (BW), tốc độ bit hoặc tốc độ dữ liệu sẽ tăng lên, tín hiệu nhiễu tăng lên

Cho BW = 125 kHz, CR = 1

- SF=7, $R_b = 7 \times (125000 / 2^8) \times (4 / (4 + 1)) = 5.5 \text{ kbits/s}$
- SF=8, $R_b = 8 \times (125000 / 2^8) \times (4 / (4 + 1)) = 3.13 \text{ kbits/s}$
- SF=9, $R_b = 9 \times (125000 / 2^9) \times (4 / (4 + 1)) = 1.76 \text{ kbits/s}$
- SF=10, $R_b = 10 \times (125000 / 2^{10}) \times (4 / (4 + 1)) = 0.98 \text{ kbits/s}$
- SF=11, $R_b = 11 \times (125000 / 2^{11}) \times (4 / (4 + 1)) = 0.54 \text{ kbits/s}$
- SF=12, $R_b = 12 \times (125000 / 2^{12}) \times (4 / (4 + 1)) = 0.29 \text{ kbits/s}$

⇒ Nếu bạn tăng Hệ số trải phổ, tốc độ bit hoặc tốc độ dữ liệu sẽ giảm => thời gian truyền tăng.

Mối liên hệ giữa 3 thông số TX, BW, SF:

- Nếu bạn giảm công suất TX, bạn sẽ tiết kiệm pin, nhưng phạm vi tín hiệu rõ ràng sẽ ngắn hơn.
- Hai thông số SF và BW kết hợp tạo thành tốc độ dữ liệu (data rate).
- Nếu bạn tăng tốc độ dữ liệu (D_R): làm cho băng thông (BW) rộng hơn hoặc hệ số trải phổ (SF) thấp hơn, bạn có thể truyền các byte đó trong thời gian ngắn hơn.
- Đối với những trường hợp đó, phép tính xấp xỉ như sau: Làm cho băng thông (BW) rộng hơn gấp 2 lần (từ BW125 đến BW250) cho phép bạn gửi nhiều byte hơn gấp 2 lần trong cùng một thời điểm. Làm cho hệ số trải phổ (SF) thấp hơn 1 bước (từ SF10 đến SF9) cho phép bạn gửi nhiều byte hơn gấp 2 lần trong cùng

một thời điểm. Hệ số trải phổ được sử dụng càng lớn, tín hiệu sẽ có thể truyền đi xa hơn và vẫn được bộ thu RF thu được mà không bị lỗi.

- Việc hạ thấp hệ số trải phổ (SF) khiến công nhận tín hiệu khó khăn hơn vì nó sẽ nhạy cảm hơn với nhiễu. (tín hiệu nhiễu tăng vì thời gian truyền giảm và ngược lại)

4.4. Định dạng gói LoRa (LoRa Packet Format), Thời gian phát sóng (Time on Air) và Tốc độ dữ liệu thích ứng (Adaptive Data Rate)

4.4.1. Định dạng gói LoRa (LoRa Packet Format),

Định dạng gói LoRa bao gồm ba yếu tố: Mở đầu (Preamble), tiêu đề (header - optional) và tải trọng (payload).

Explicit header mode



Hình 1.54: Chế độ định dạng gói tiêu đề rõ ràng

Implicit header mode



Hình 1.55: Chế độ định dạng gói tiêu đề ẩn

Có hai loại chế độ định dạng gói LoRa:

- Chế độ tiêu đề rõ ràng bao gồm một tiêu đề ngắn chứa thông tin về độ dài tải trọng, tốc độ mã hóa và liệu CRC có được sử dụng trong gói hay không. CRC là viết tắt của Cyclic Redundancy Check và được sử dụng để phát hiện lỗi trong dữ liệu số.
- Chế độ tiêu đề ẩn trong đó tải trọng, tốc độ mã hóa và sự hiện diện của CRC được cố định. Trong chế độ này, tiêu đề được loại bỏ khỏi gói do đó giảm thời gian truyền. Trong trường hợp này, chiều dài tải trọng, tốc độ mã hóa lỗi và sự hiện diện của CRC tải trọng phải được cấu hình thủ công trên cả hai phía của liên kết vô tuyến.

Mô tả định dạng gói trong LoRa:

Phần mở đầu (Preamble) được sử dụng để phát hiện sự bắt đầu của gói bởi người nhận.

Tiêu đề (Header) (chỉ trong chế độ tiêu đề rõ ràng – only in explicit header mode) là chế độ hoạt động mặc định. Nó cung cấp thông tin về tải trọng:

- Độ dài tải trọng tính bằng byte.
- Tỷ lệ mã sửa lỗi chuyển tiếp.
- Sự hiện diện của CRC (cyclic redundancy check: Mục tiêu cơ bản của CRC là xác định xem tất cả các byte trong tin nhắn có được nhận chính xác hay không) 16 bit tùy chọn cho tải trọng.

Tải trọng (Payload) là trường có độ dài thay đổi chứa dữ liệu thực tế được mã hóa ở tốc độ mã sửa lỗi (Forward Error Correction) chuyển tiếp như được chỉ định trong tiêu đề ở chế độ rõ ràng hoặc cố định ở chế độ ẩn. CRC tải trọng tùy chọn có thể được thêm vào.

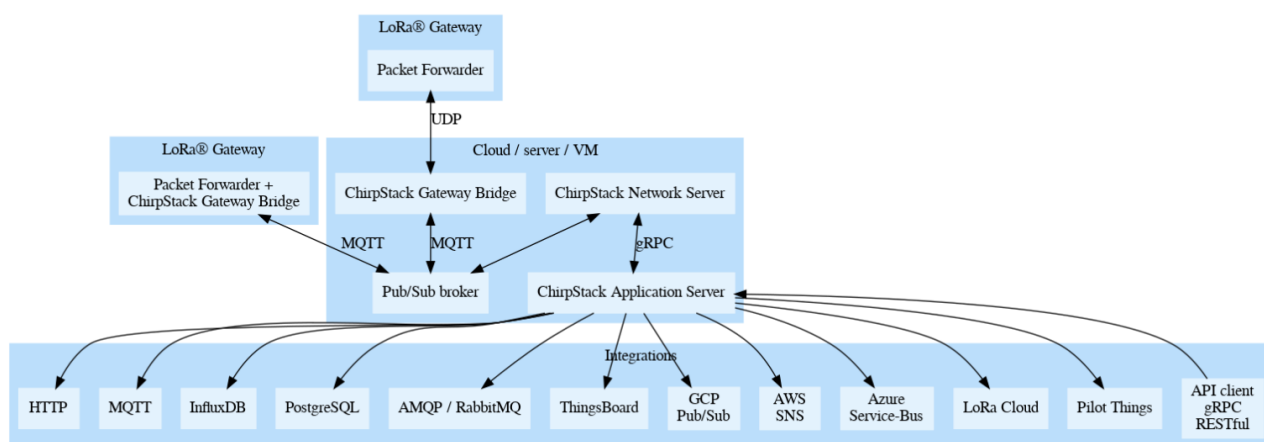
CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ VÀ XÂY DỰNG HỆ THỐNG

1. TỔNG QUAN VỀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG SỬ DỤNG CHIRPSTACK SERVER

1.1. Tổng quan

ChirpStack là một Máy chủ mạng LoRaWAN mã nguồn mở có thể được sử dụng để thiết lập các mạng LoRaWAN riêng tư hoặc công cộng. ChirpStack cung cấp giao diện web để quản lý cổng, thiết bị và đối tượng thuê cũng như thiết lập tích hợp dữ liệu với các nhà cung cấp đám mây lớn, cơ sở dữ liệu và dịch vụ thường được sử dụng để xử lý dữ liệu thiết bị. ChirpStack cung cấp API dựa trên gRPC có thể được sử dụng để tích hợp hoặc mở rộng ChirpStack.

1.2. Kiến trúc



Hình 2.1: Sơ đồ kiến trúc hệ thống LoRaWAN sử dụng Chirpstack

1.2.1. LoRaWAN devices

Các thiết bị LoRaWAN (không có trong biểu đồ trên) là các thiết bị gửi dữ liệu đến Máy chủ mạng ChirpStack (thông qua một hoặc nhiều Cổng LoRa). Các thiết bị này có thể ví dụ như cảm biến đo chất lượng không khí, nhiệt độ, độ ẩm, vị trí...

1.2.2. LoRa® Gateway

Cổng LoRa lắng nghe (thường) 1 kênh hoặc 8 kênh đồng thời và chuyển tiếp dữ liệu nhận được (từ thiết bị) đến máy chủ mạng LoRaWAN (trong trường hợp này là Máy chủ mạng ChirpStack). Phần mềm chạy trên Cổng LoRa chịu trách nhiệm nhận và gửi được gọi là Bộ chuyển tiếp gói. Các triển khai phổ biến là Semtech UDP Packet Forwarder và Semtech Basic Station Packet Forwarder.

1.2.3. ChirpStack Gateway Bridge

Cầu cổng ChirpStack nằm giữa Packet Forwarder và MQTT broker. Nó chuyển đổi định dạng Bộ chuyển tiếp gói (như giao thức Bộ chuyển tiếp gói Semtech UDP) thành định dạng dữ liệu được sử dụng bởi các thành phần ChirpStack. Nó cũng cung cấp khả năng tích hợp với nhiều nền tảng đám mây khác nhau như GCP Cloud IoT Core và Azure IoT Hub.

1.2.4. ChirpStack Network Server

Máy chủ mạng ChirpStack là Máy chủ mạng LoRaWAN, chịu trách nhiệm quản lý trạng thái của mạng. Nó có kiến thức về kích hoạt thiết bị trên mạng và có thể xử lý các yêu cầu tham gia khi thiết bị muốn tham gia mạng.

Khi dữ liệu được nhận bởi nhiều cổng, Máy chủ mạng ChirpStack sẽ loại bỏ dữ liệu trùng lặp này và chuyển tiếp dưới dạng một tải trọng đến Máy chủ ứng dụng ChirpStack. Khi một máy chủ ứng dụng cần gửi dữ liệu trở lại thiết bị, Máy chủ mạng ChirpStack sẽ giữ các mục này trong hàng đợi, cho đến khi nó có thể gửi đến một trong các cổng.

1.2.5. ChirpStack Application Server

Máy chủ ứng dụng ChirpStack là Máy chủ ứng dụng LoRaWAN, tương thích với Máy chủ mạng ChirpStack. Nó cung cấp giao diện web và API để quản lý người dùng, tổ chức, ứng dụng, cổng và thiết bị. Dữ liệu đường lên đã nhận được chuyển tiếp tới một hoặc nhiều tích hợp đã định cấu hình.

1.2.6. End-application

Ứng dụng cuối nhận dữ liệu thiết bị thông qua một trong các tích hợp đã định cấu hình. Nó có thể sử dụng API máy chủ ứng dụng ChirpStack để lên lịch tải trọng tải xuống cho các thiết bị. Mục đích của ứng dụng cuối có thể là phân tích, cảnh báo, trực quan hóa dữ liệu, kích hoạt hành động, ...

2. TIẾN HÀNH CÀI ĐẶT VÀ CẤU HÌNH MÁY CHỦ MẠNG CHIRPSTACK TRÊN UBUNTU

Lệnh sau cài đặt các yêu cầu ChirpStack bằng trình quản lý gói apt cần thiết:

```
sudo apt install \
    mosquitto \
    mosquitto-clients \
    redis-server \
    redis-tools \
    postgresql
```

Hình 2.2: Cài đặt các gói công cụ cần thiết

Khởi tạo cơ sở dữ liệu trên PostgreSQL:

```
-- create role for authentication
create role chirpstack with login password 'chirpstack';

-- create database
create database chirpstack with owner chirpstack;

-- change to chirpstack database
\c chirpstack

-- create pg_trgm extension
create extension pg_trgm;

-- exit psql
\q
```

Hình 2.3: Khởi tạo cơ sở dữ liệu mới trên PostgreSQL

Cài đặt kho phần mềm Chirpstack

ChirpStack cung cấp kho lưu trữ Debian/Ubuntu có thể được sử dụng để cài đặt phiên bản ChirpStack mới nhất. Trước tiên hãy đảm bảo rằng cả hai dirmngr và apt-transport-https đã được cài đặt:

```
sudo apt install apt-transport-https dirmngr
```

Hình 2.4: Cài đặt gói https

Thiết lập khóa cho kho lưu trữ ChirpStack:

```
sudo apt-key adv --keyserver keyserver.ubuntu.com --recv-keys 1CE2AFD36DBCCA00
```

Hình 2.5: Cài đặt khoá lưu trữ

Thêm kho lưu trữ vào danh sách kho lưu trữ:

```
sudo echo "deb https://artifacts.chirpstack.io/packages/3.x/deb stable main" | sudo tee  
/etc/apt/sources.list.d/chirpstack.list
```

Cài đặt gói Chirpstack Gateway Bridge

```
sudo apt install chirpstack-gateway-bridge
```

Hình 2.6: Cài đặt gói chirpstack-gateway-bridge

Cấu hình file chirpstack-gateway-bridge.toml

```
[integration.mqtt]  
event_topic_template="eu868/gateway/{{ .GatewayID }}/event/{{ .EventType }}"  
command_topic_template="eu868/gateway/{{ .GatewayID }}/command/#"
```

Hình 2.7: Cấu hình topic mqtt cho tần số 433MHz

Khởi chạy ChirpStack Gateway Bridge

```
# start chirpstack-gateway-bridge  
sudo systemctl start chirpstack-gateway-bridge  
  
# start chirpstack-gateway-bridge on boot  
sudo systemctl enable chirpstack-gateway-bridge
```

Hình 2.8: khởi chạy Chirpstack Gateway Bridge

Khởi chạy Chirpstack service

```
# start chirpstack  
sudo systemctl start chirpstack  
  
# start chirpstack on boot  
sudo systemctl enable chirpstack
```

Hình 2.9: Khởi chạy Chirpstack service

Kiểm tra thông tin gói:

```
sudo journalctl -f -n 100 -u chirpstack
```

Hình 2.10: In ra log của chirpstack

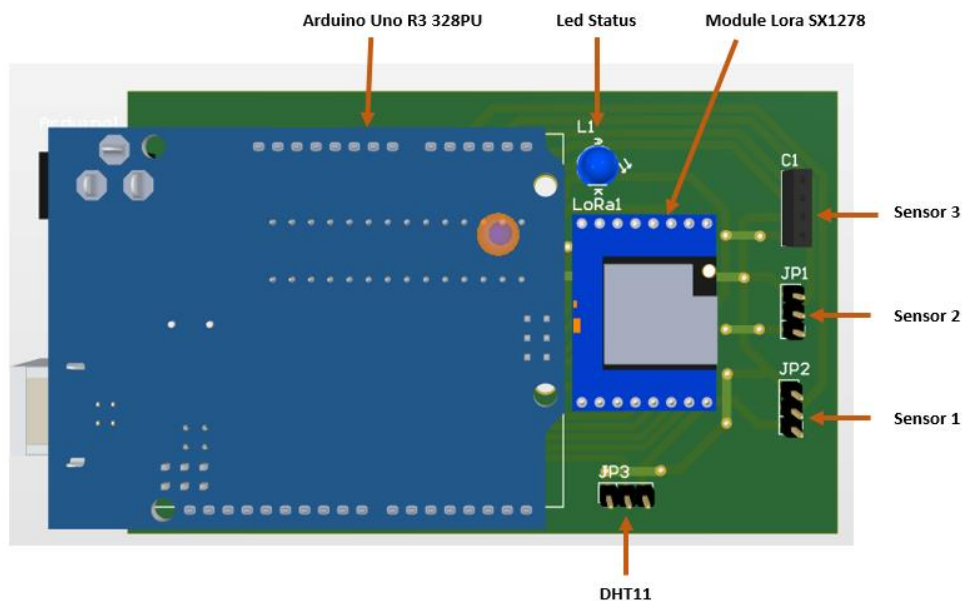
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC VÀ KHẢO SÁT HỆ THỐNG

1. KẾT QUẢ ĐẠT ĐƯỢC

1.1. Khối phần cứng

1.1.1. End-node

Khối phần cứng End-node gồm 1 Arduino Uno R3 sử dụng vi xử lý Atmega328P để điều khiển các hoạt động của khối End-node, mô-đun LoRa SX1278 (433MHz) chịu trách nhiệm điều chế tín hiệu giao tiếp với các thiết bị khác thông qua sóng LoRa, cảm biến DHT11 (giám sát dữ liệu nhiệt độ và độ ẩm), sử dụng nguồn pin 5V 1.5A và phần ăng-ten 3dBi. Trong đề tài, sẽ sử dụng 2 End-node để đảm bảo mô hình phù hợp với yêu cầu thực tế. Ngoài ra, end-node còn có thể gắn thêm 2 cảm biến 1 chân Output Data, 1 cảm biến đọc qua I2C giám sát dữ liệu phù hợp với yêu cầu phát triển theo từng dự án cụ thể như Hình 3.1.

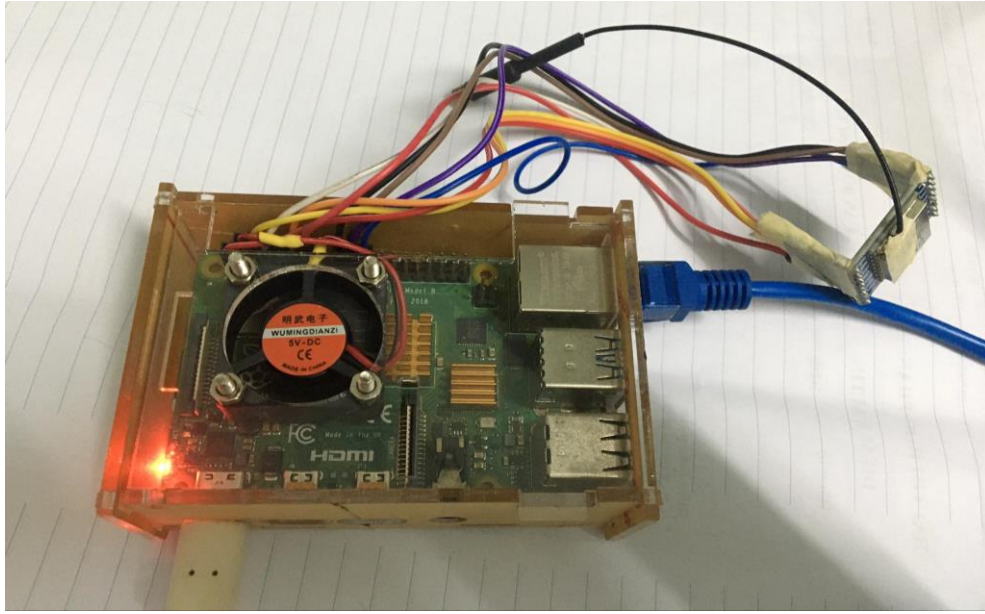


Hình 3.1: Layout PCB của End-node

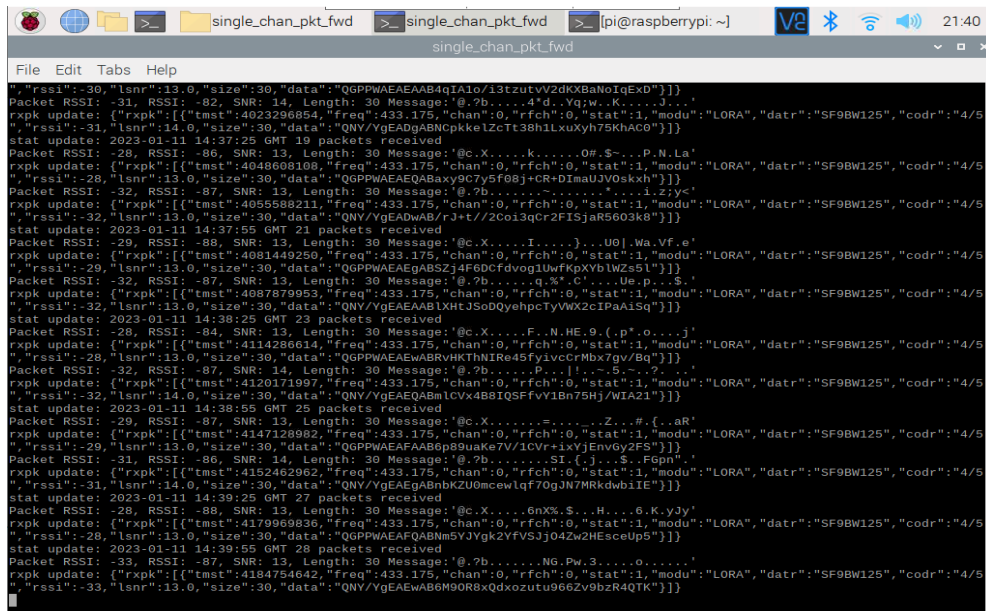
1.1.2. LoRaWAN Gateway 1 Channel 433MHz

LoRaWAN Gateway 433MHz được sử dụng trong thử nghiệm gồm 1 máy tính nhúng mini Raspberry Pi 4B (Dung lượng 2G RAM, thẻ nhớ 16GB) được thiết kế để có thể xử lý nhiều tác vụ, số lượng End-node lớn cùng một lúc đảm bảo phù hợp với yêu cầu thực tế. Gateway kết nối với module LoRa SX1278 hoạt động ở kênh tần số băng tần 433MHz.

Gateway được kết nối với Internet thông qua cổng Ethernet. Thiết bị Gateway luôn được đảm bảo nguồn điện chuẩn 5V 3A để đảm bảo hoạt động ổn định nhất. Dữ liệu từ các End-node truyền tới Gateway được xử lý để chuyển tiếp đến Chirpstack Network Server, đây là Network Server LoRaWAN mã nguồn mở phù hợp với hệ thống đang triển khai trong đề tài. Hình 3.2 mô tả Gateway đang khởi chạy và Hình 3.3 mô tả quá trình Gateway đang lắng nghe gói tin từ các End-Node.



Hình 3.2: Phần cứng LoRaWAN Gateway

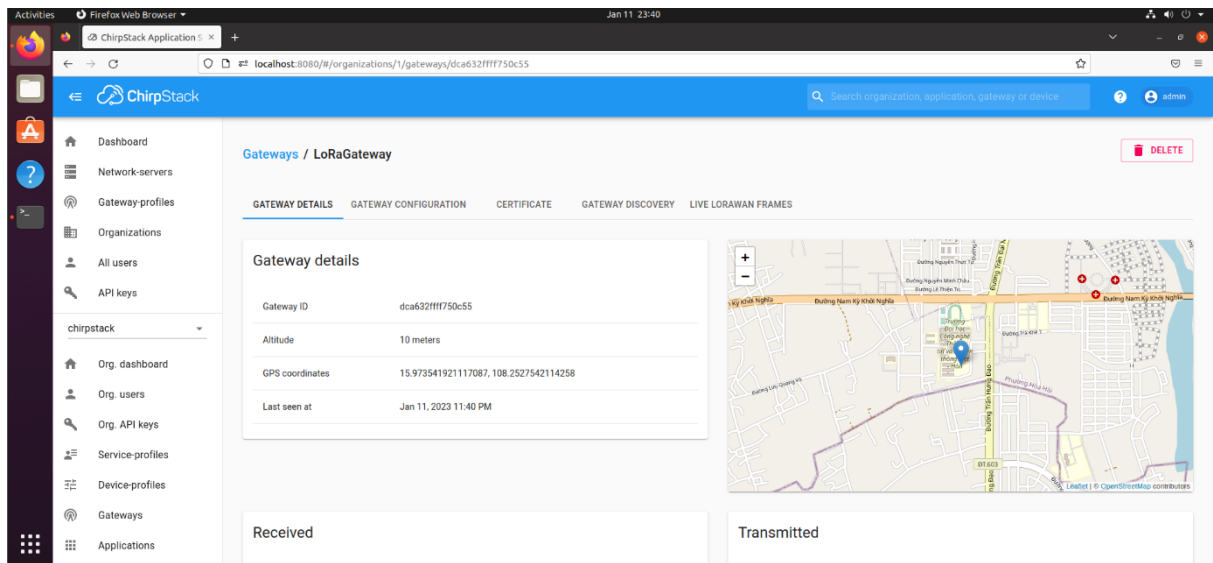


Hình 3.3: Gateway đang lắng nghe các gói tin từ End-node

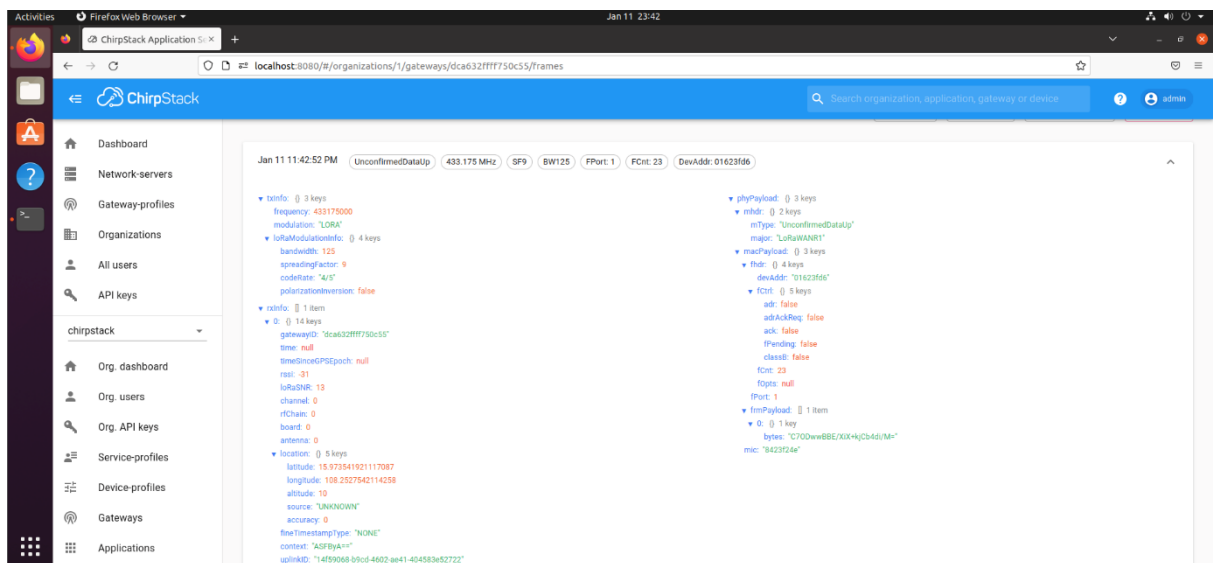
1.2. Khởi phần mềm

1.2.1. Chirpstack Network Server

Chirpstack Network Server được triển khai và cấu hình trên hệ điều hành Linux đảm bảo tính hoạt động ổn định và chính xác trong quá trình thực nghiệm. Cần tiến hành cấu hình thông số ở các file `chirpstack-network-server.toml`, `chirpstack-application-server.toml`, `chirpstack-gateway-bridge.toml` để hệ thống có thể giao tiếp với phần Gateway. Hình 3.4 mô tả hệ thống Chirpstack Network Server đang được khởi chạy và đã kết nối với Gateway ID là: DCA632FFFF750C55. Đồng thời Hình 3.5 mô tả hệ thống đang nhận các gói tin từ Gateway gửi lên thông qua địa chỉ IP local: 192.168.2.128



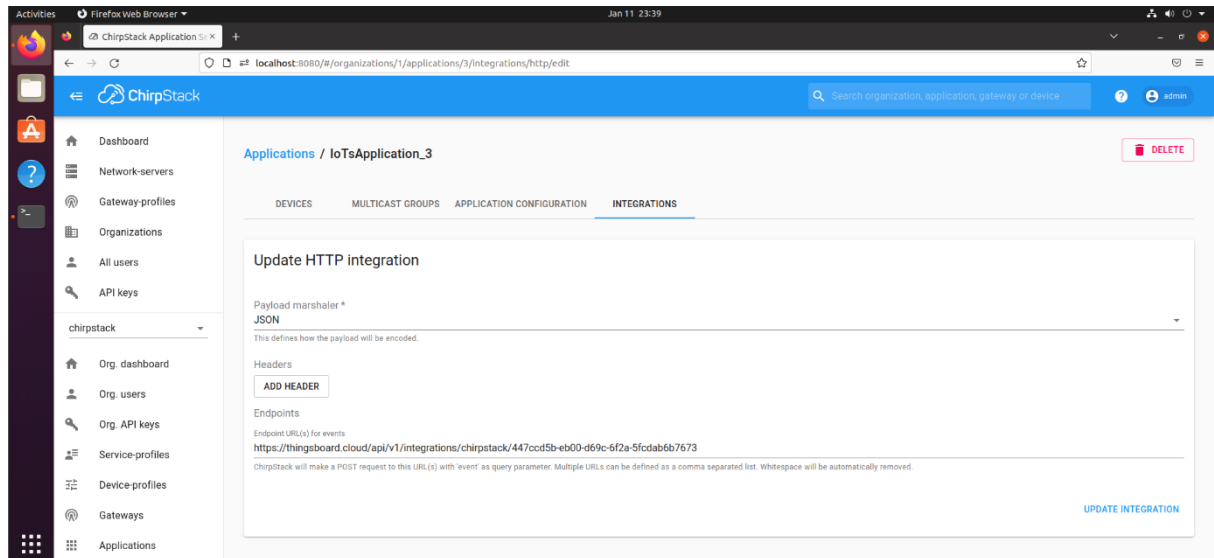
Hình 3.4: Giao diện hiển thị kết nối với LoRaWAN Gateway



Hình 3.5: LIVE LORAWAN FRAMES nhận từ Gateway ID: DCA632FFFF750C55

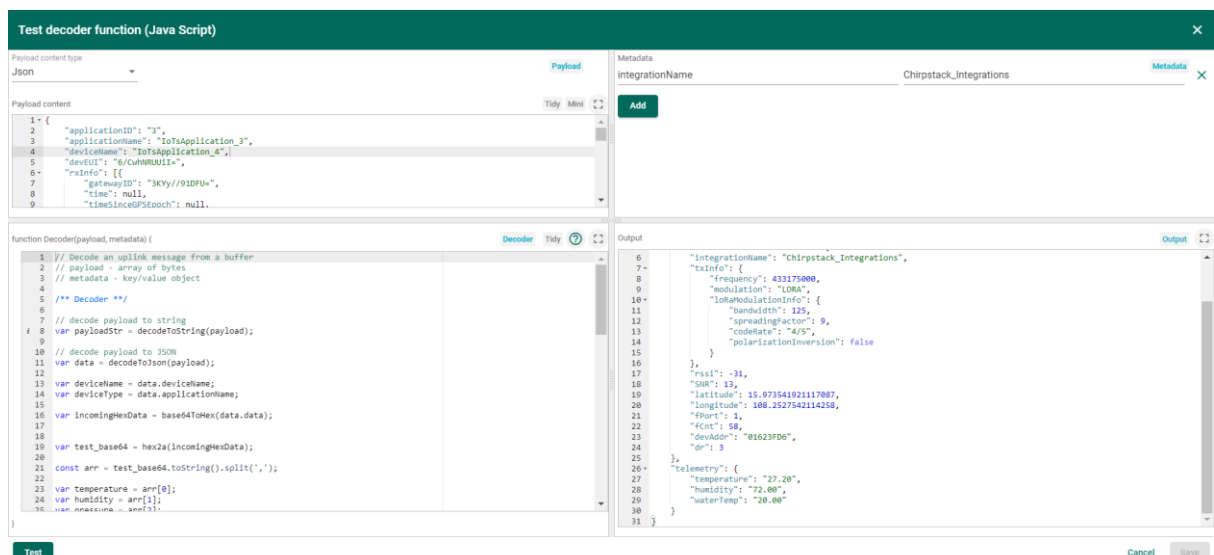
1.2.2. Thingsboard Cloud Platform Application

Người dùng cuối sẽ tương tác trực tiếp với hệ thống thông qua nền tảng Thingsboard Cloud. Để liên kết hệ thống Chirpstack Network Server và Thingsboard Cloud cần kết nối qua tính năng Application Server Integration thông qua giao thức HTTP như hình 3.6.



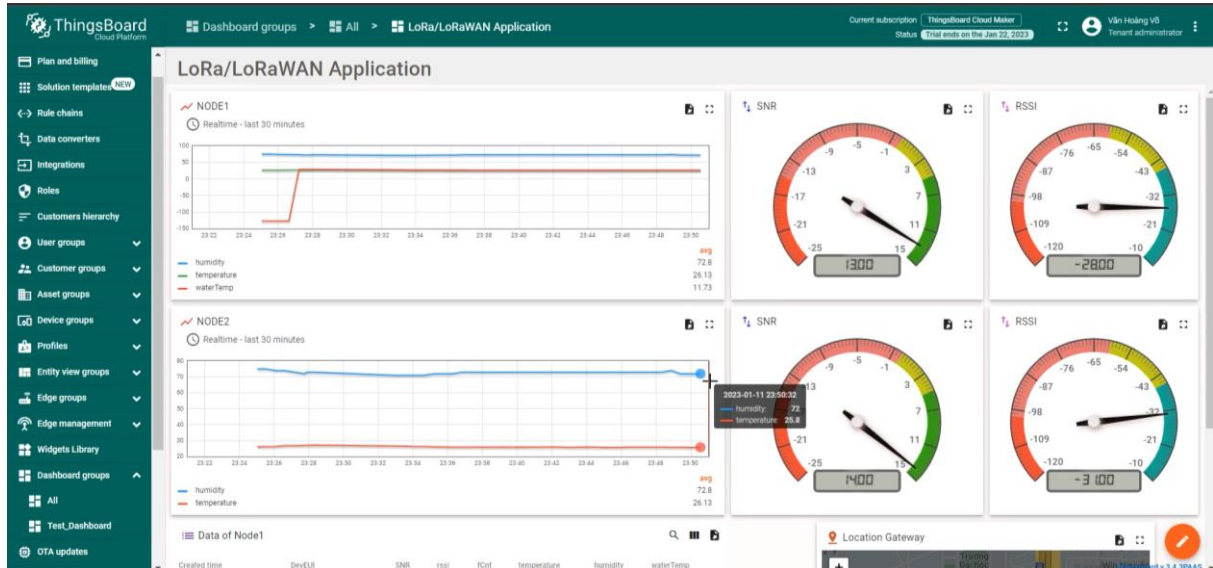
Hình 3.6: Chirpstack Application Integration

ThingsBoard Cloud nhận được các gói tin JSON gửi từ Chirpstack Network Server cần phải Decode về dạng JSON ở phần Data converters phục vụ cho mục đích hiển thị và trực quan hoá dữ liệu được mô tả ở Hình 3.7.



Hình 3.7: Thingsboard Data converter

Thingsboard Cloud cho phép xây dựng Dashboard hiển thị trực quan hoá các thông số quan trọng: SNR, RSSI, DevEUI, fCnt, dữ liệu cảm biến (nhiệt độ, độ ẩm, nhiệt độ nước), vị trí Gateway. Tất cả data được cập nhật và hiển thị dưới dạng biểu đồ theo thời gian thực với lịch sử hiển thị là 30 phút, các thông số SNR và RSSI được cập nhật ngay sau khi Thingsboard Cloud nhận gói tin từ Network Server phục vụ cho quá trình khảo sát như Hình 3.8.



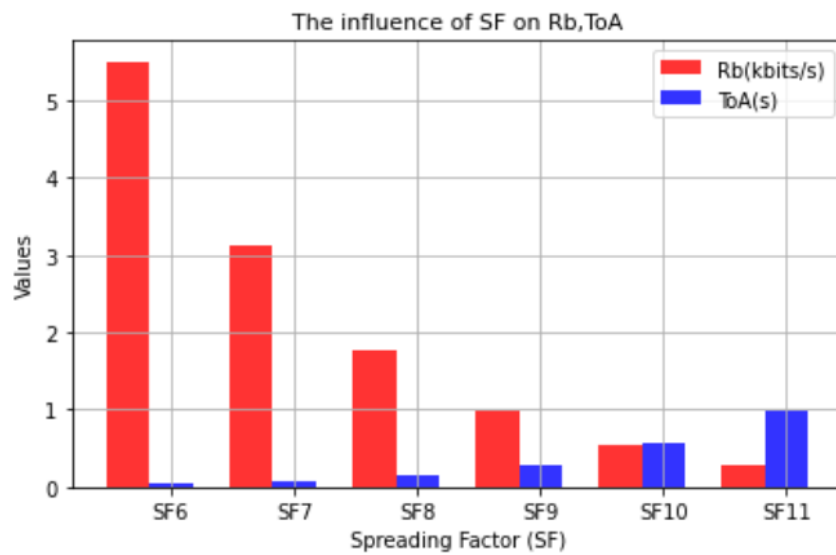
Hình 3.8: Thingsboard Cloud Dashboard

2. KHẢO SÁT HỆ THỐNG

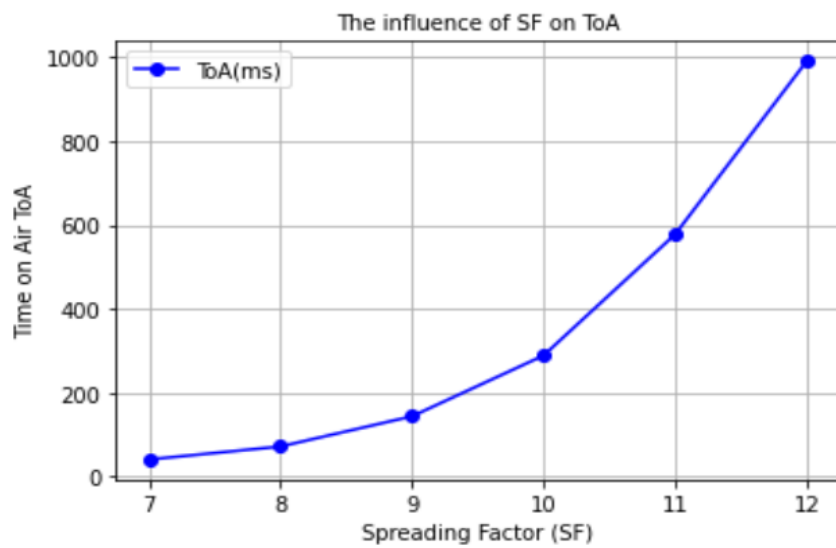
2.1. Khảo sát mức độ ảnh hưởng của Spreading Factor (SF) đến các thông số Data rate (Rb), Time on Air (ToA).

Thay đổi giá trị SF lần lượt từ SF7-SF12, sử dụng băng thông BW 125kHz, Coding Rate = 1. Với SF càng lớn cho phép phạm vi truyền tin xa hơn, khả năng gói tin bị lỗi sẽ thấp hơn. Tuy nhiên, như kết quả đánh giá tổng quát trong Hình 3.9. Hình 3.10 mô tả các SF càng lớn cũng làm tăng thời gian truyền tin trong thông gian ToA. Đồng thời, các SF càng lớn cũng làm giảm tốc độ truyền gói tin càng giảm hiển thị ở Hình 3.11.

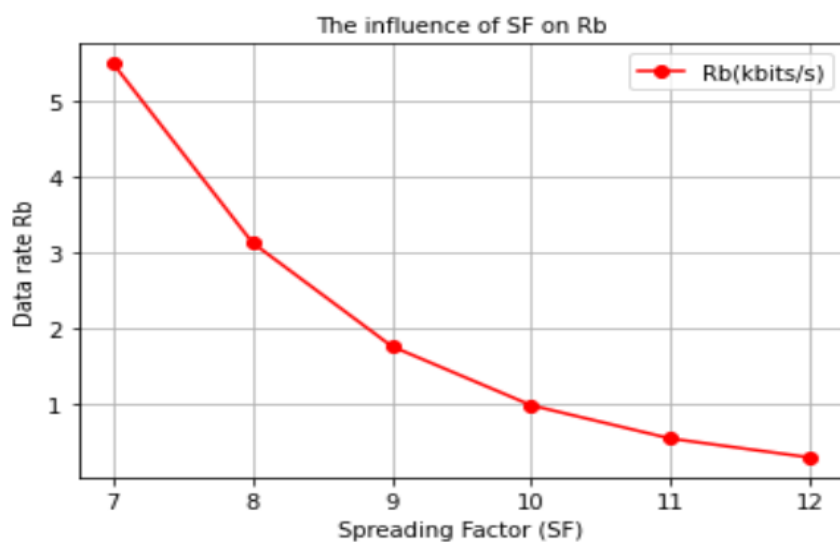
Vì vậy, vấn đề này cần được chú ý đến để đảm bảo tính thuận lợi và chính xác của dữ liệu trong quá trình thực nghiệm hệ thống, bởi thực tế là các SF lớn được sử dụng thường xuyên hơn các SF nhỏ (mặc định là SF=9).



Hình 3.9: Sự ảnh hưởng của SF đến Rb và ToA

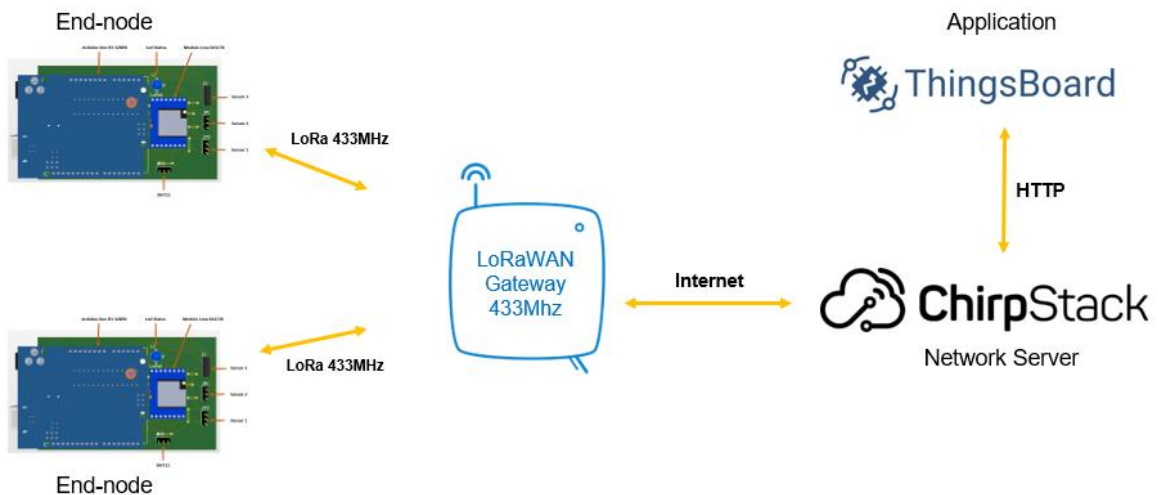


Hình 3.10: Sự ảnh hưởng của SF đến ToA



Hình 3.11: Sự ảnh hưởng của SF đến Rb

2.2. Phương pháp khảo sát

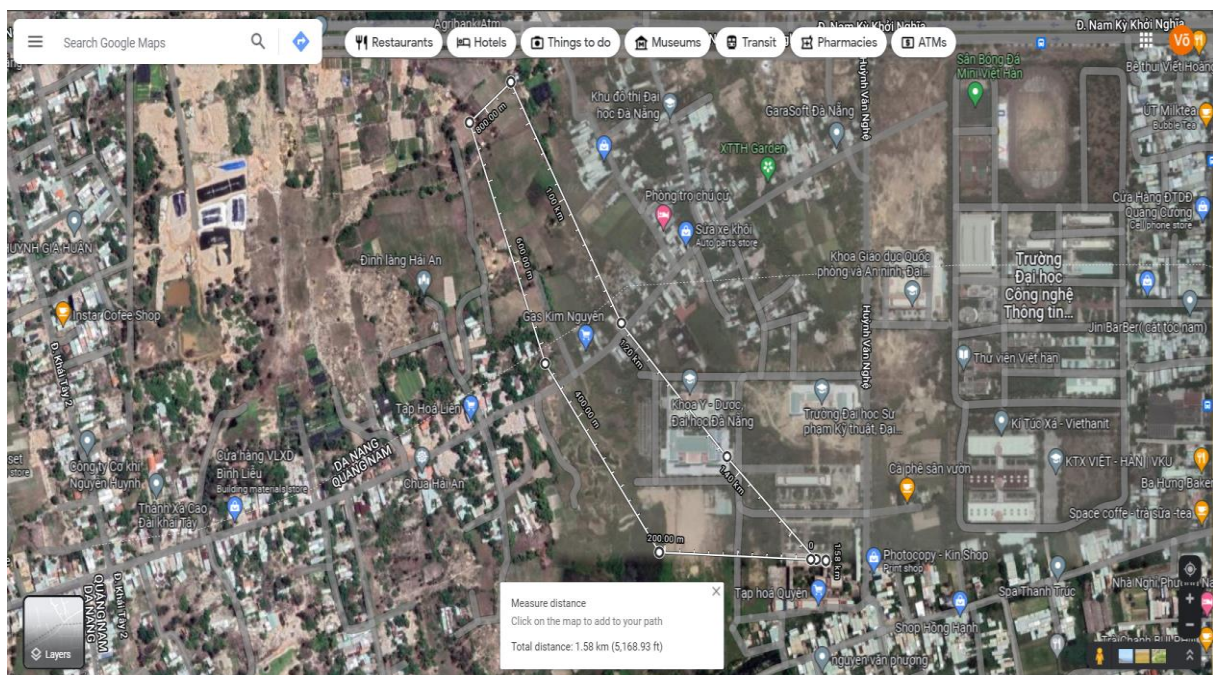


Hình 3.12: Sơ đồ mô hình khảo sát thực tế

Trong thử nghiệm này, thông số khoảng cách sẽ được thay đổi để đánh giá tác động của khoảng cách đối với các thông số SNR, RSSI của hệ thống mạng LoRaWAN được hiển thị ở Hình 3.12.

Thử nghiệm được thiết lập như sau:

- End-node sẽ gửi 20 gói tin ở mỗi điểm khoảng cách đến Gateway, mỗi gói cách nhau 60s.
- End-node sẽ lần lượt được đặt ở các điểm khoảng cách khác nhau từ 50 m đến 450 m như Hình 3.13 được tính theo đường chim bay.
- Cấu hình các thông số cho Gateway và End-node SF=9, tần số 433175000Hz, ăng-ten 3dBi.
- Gateway được đặt tại sân thượng Trường Đại học CNTT và TT Việt Hàn.
- Dữ liệu thu được từ Gateway sẽ được truyền về và hiển thị lên Thingsboard Cloud. Sau khi thu thập đủ dữ liệu, tiến hành tổng hợp và phân tích dữ liệu, sử dụng Python để hiển thị mối liên hệ dưới dạng đồ thị.



Hình 3.13: Vị trí khoanh vùng tiến hành khảo sát

2.3. Kết quả khảo sát và đánh giá hệ thống

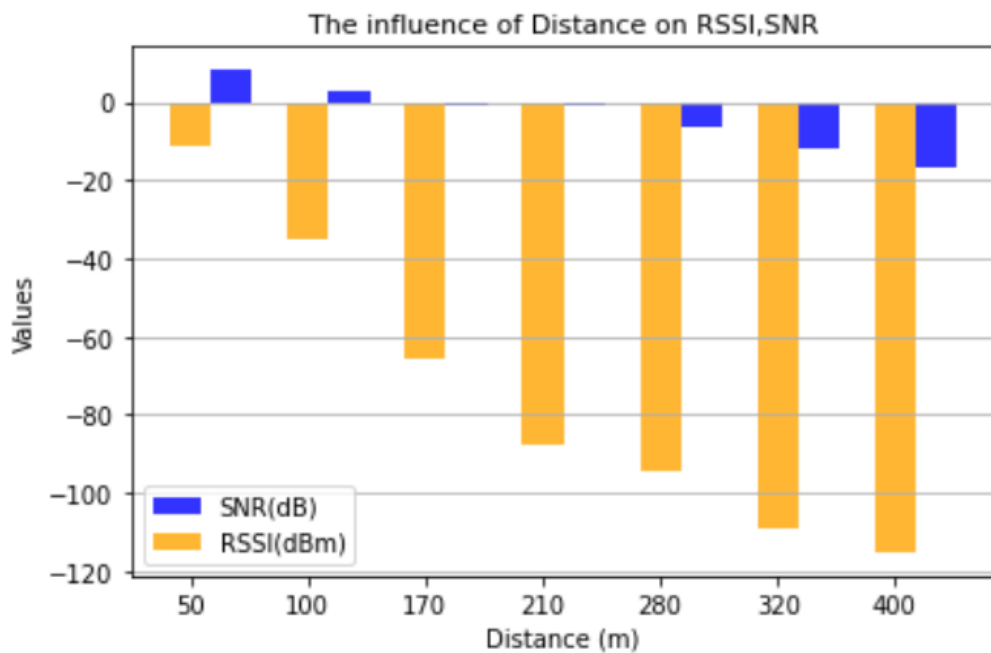
Sau quá trình tiến hành thử nghiệm ở điều kiện thực tế. Dữ liệu được thu thập và tiến hành phân tích. RSSI và SNR ở Bảng 3.1 có sự giảm đáng kể ở khoảng cách tối thiểu (50 m) đến khoảng cách xa (450 m). Ở khoảng cách tối thiểu, SNR dương và có giá trị 8 dB chứng tỏ dữ liệu ít bị nhiễu, giá trị SNR tốt phổ biến ở mức 10 dB. Tuy nhiên, khi tăng khoảng cách lên (450 m) thu được SNR giảm nhiều và lớn hơn -17dB có hiện tượng gói tin bị lỗi cao. Tương tự, thông số cường độ tín hiệu thu được RSSI cũng giảm đáng kể ở khoảng cách từ gần đến xa.

Mức độ ảnh hưởng của khoảng cách đến SNR và RSSI được trực quan hoá ở Hình 3.14.

Bảng 3.1: Thông tin thu được ở End-Node

Khoảng cách xấp xỉ (đơn vị: m)	SNR (đơn vị: dB)	RSSI (đơn vị: dBm)
50 m	8	-11
100 m	3	-35
170 m	-1	- 62 -> - 69
210 m	-1	-85 -> -90
280 m	- 5 -> - 8	-92 -> 97

320 m	-11 ->-13 (có hiện tượng gói tin bị lỗi, trung bình 10 gói thì có 3 gói lỗi)	-106 -> -112 (Có hiện tượng bị mất gói tin, trung bình 20 gói thì có 4 gói bị mất).
400 m	> -17 (Có hiện tượng gói tin bị lỗi cao hơn, trung bình 10 gói thì 8 gói lỗi)	> -115 (Có hiện tượng bị mất gói tin hoàn toàn, trung bình 20 gói thì 17 gói bị mất)



Hình 3. 14: Sự ảnh hưởng khoảng cách đến RSSI và SNR

2.4. Nguyên nhân

Nguyên nhân ảnh hưởng đến khoảng cách truyền không cao (khoảng cách truyền tối đa phổ biến của LoRa là 10km) gồm:

- Nguồn của Arduino End-node không ổn định, không cấp đủ điện áp 120mA cần thiết cho chip LoRa SX1278.
- Antenna không chuẩn 3 dBi.
- Vị trí khảo sát có nhiều thiết bị thu phát sóng vô tuyến lớn làm nhiễu tín hiệu.
- Khu vực khảo sát có toà nhà Đại Học Y Dược gây hiện lan truyền tín hiệu qua vật cản trong Fresnel Zone làm tín hiệu bị suy yếu.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

1. KẾT LUẬN

Sau một thời gian tập trung tìm hiểu và nghiên cứu đề tài, đã hoàn thành cơ bản được các mục tiêu đã đề ra:

- Tìm hiểu, cấu hình thành công một hệ thống LoRa/LoRaWAN phân cứng.
- Nghiên cứu xây dựng hệ thống Chirpstack Network Server.
- Đưa dữ liệu thu thập được từ Lora End-Node uplink lên Server Network.
- Tìm hiểu các thông số lý thuyết về LoRa/LoRaWAN và tiến hành khảo sát thực nghiệm.
- Tiến hành khảo sát và đánh giá hệ thống.

Hạn chế của đề tài: Bên cạnh những nghiên cứu và kết quả đã đạt được, đề tài còn tồn tại một số hạn chế:

- Chưa khắc phục được tình trạng mất ổn định nguồn điện của End-Node.
- Khoảng cách truyền nhận giữa End-Node và Gateway chưa đạt được khoảng cách truyền tối đa trong LoRa.
- Chưa khảo sát được các thông số APR, PL tính năng downlink trong hệ thống LoRaWAN.

2. HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Trên cơ sở kết quả đạt được và hạn chế của đề tài, hướng phát triển và nghiên cứu trong tương lai dự kiến như sau:

- Nghiên cứu thêm các loại Antenna phù hợp cho hệ thống.
- Tối ưu hoá kích thước mạch PCB cho cả End Node và Gateway.
- Phát triển nguồn điện ổn định cấp cho LoRa End-Node.
- Xây dựng ứng dụng riêng với mục đích tối ưu hoá việc trực quan hoá dữ liệu và tương tác trực tiếp với người dùng.
- Đề xuất thêm phần học máy Machine Learning vào việc tự động phân tích dữ liệu của các cảm biến

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng anh

- [1] (2022). Retrieved 15 December 2022, from <https://pycom.io/wp-content/uploads/2020/04/Lesson-4.5-Setting-up-Chirpstack.pdf>
- [2] Bor, Martin, John Edward Vidler, and Utz Roedig. "LoRa for the Internet of Things." (2016): 361-366.
- [3] LoRaWAN. (2022). Retrieved 15 December 2022, from https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html
- [4] zhgzgh. Name already in use. (2022). Retrieved 15 December 2022, from <https://github.com/zghgzgh/LoRaPacketForwarder/blob/master/config.json.template>
- [5] LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL. (2022). Retrieved 15 December 2022, from <https://loradevelopers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/loranda-lorawan/>
- [6] (2022). Retrieved 15 December 2022, from https://www.linklabs.com/hubfs/DOCS.linklabs.com/2017/01/loras-scalability_r254.pdf
- [7] ChirpStack Community Forum. (2022). Retrieved 15 December 2022, from <https://forum.chirpstack.io/>
- [8] (2022). Retrieved 15 December 2022, from https://loradevelopers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- [9] (2022). Retrieved 15 December 2022, from <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Book-LoRa-LoRaWAN-and-Internet-of-Things.pdf>
- [10] A. M. Yousuf, E. M. Rochester, B. Ousat and M. Ghaderi, "Throughput, Coverage and Scalability of LoRa LPWAN for Internet of Things", 2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS), Banff, AB, Canada, 2018, pp. 1-10.
- [11] M. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the Internet of Things", in Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, Graz, Austria, February 2016, pp. 361–366.

Tài liệu tiếng việt

- [1] PHẠM, K. T. (2022). THIẾT KẾ VÀ THI CÔNG HỆ THỐNG GIÁM SÁT THỜI TIẾT TRONG NÔNG NGHIỆP ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ LORAWAN (Doctoral dissertation).
- [2] Thanh, N. Đ., Ferrero, F., Lê Công Vĩnh Khải, N. H., Thương, N., & Tuấn, P. V. (2020). Designing an industrial LoRaWAN network for Danang city: Solution to long-range and low-power IoT application. Tạp chí Khoa học và Công nghệ-Đại học Đà Nẵng, 7-10.

- [3] Líc, T. V., & Vỹ, T. Đ. (2021). Phân tích ảnh hưởng các thông số mạng LoRaWAN đến hiệu suất hoạt động của mạng trong môi trường thực tế. Tạp chí Khoa học và Công nghệ-Đại học Đà Nẵng, 16-21.
- [4] Trung, T. V., Thiện, N. Đ., Lê Song Toàn, N. V. T., & Phi, H. V. (2020). Hệ thống giám sát và cảnh báo lũ lụt thời gian thực ứng dụng công nghệ LoRa cho lưu vực sông Kôn-Hà Thanh, tỉnh Bình Định. Journal of Science-Quy Nhon University, 14(5), 69-78.
- [5] Lê, D. H. (2022). ỨNG DỤNG MÔ HÌNH LORA NETWORK CHO BÀI TOÁN QUAN TRẮC MÔI TRƯỜNG TẠI THÀNH PHỐ BÌNH DƯƠNG (Doctoral dissertation, Trường Đại học Sư phạm-Đại học Đà Nẵng).
- [6] Lil, H. A., & Minh, B. V. (2021). Thiết kế và thực hiện cổng chuyển đổi LoRa-GSM giám sát các nút dựa trên công nghệ LoRa. Journal of Science and Technology, (15), 9-9.