

เครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล

Long Distance Transmission Pollution Meter



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล

Long Distance Transmission Pollution Meter



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล

Long Distance Transmission Pollution Meter

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล

Long Distance Transmission Pollution Meter

ผู้จัดทำ นาย ชนกฤติ รุ่งแสง รหัสนักศึกษา 58010490

นาย ธีรวุฒิ แก้วมณี รหัสนักศึกษา 58010610

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล		
นักศึกษา	นาย ธนภฤติ	รุ่งแสง	รหัสนักศึกษา 58010490
	นาย ธีรวุฒิ	แก้วมณี	รหัสนักศึกษา 58010610
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีแหล่งอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดมลพิษต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม แต่การจะแก้ไขปัญหาเหล่านั้นนั้นจะเป็นไปได้ยาก หากไม่มีการเก็บข้อมูลค่ามลพิษอย่างถูกต้องและสม่ำเสมอ เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุ จึงเป็นที่มาของเครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล (Long Distance Transmission Pollution Meter) เพื่อรวบรวมและบันทึกค่ามลพิษที่เกิดขึ้นแล้วทำการส่งกลับมายัง Server

หลักการทำงานนั้นมีการนำข้อมูลที่ได้จาก Sensor ที่วัด AQI ของอากาศ ทั้ง MQ-135 Sensor และ PM2.5 Sensor ค่าที่อ่านได้ จะถูกส่งข้อมูล ในรูปแบบ Analog to Digital Converter หรือที่เรียกกันว่า ADC หลังจากนั้น จะได้ค่าโวลต์ที่ได้มาคำนวณหาค่าต่าง ๆ เพื่อที่จะผ่านมายัง STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1 โดยตัวบอร์ดนี้จะมีการกำหนดค่าเพื่อให้เชื่อมต่อกับ Gateway ปลายทางผ่านย่านความถี่ 920-925 MHz ซึ่งภายในประเทศไทยกำหนดย่านความถี่นี้ใช้สำหรับอุปกรณ์ LoRa จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บที่ Network Server

Thesis Title	Long Distance Transmission Pollution Meter		
Student	Mr. Tanakrit	Rungsang	Student ID 58010490
	Mr. Theerawut	Kaewmanee	Student ID 58010610
Degree	Bachelor of Engineering		
Department	Electronic Engineering		
Year	2018		
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surapan	Airphaiboon	

ABSTRACT

At this time Thailand have been growing up quickly in industrial. It caused a lot of pollutions increasing, including problems of environment. But it is difficult to solve this problem, if there is no information of pollution . So that was the derivation of “Long Distance Transmission Pollution Meter” in order to gathering and reporting data to server.

In working principle, there are MQ-135 Sensor and PM2.5 Sensor for measurement. Voltage output of sensor will be sent by Analog to Digital form or ADC. After that calculated from voltage output for another value to send to gateway via STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1 by bandwidth 920-925 MHz that was specified for LoRa Technology in Thailand. And so the data will be collected at Network Server.

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำปริยญาณิพนธ์เรื่องเครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล (Long Distance Transmission Pollution Meter) ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ ที่คอยสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำปริยญาณิพนธ์ รวมถึงการชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหา คำแนะนำในการทำปริยญาณิพนธ์ อีกทั้งคณะอาจารย์ทุกท่านที่เกี่ยวข้องในการให้ความรู้แก่คณะผู้จัดทำและนำความรู้ที่นำมาประยุกต์ใช้ในปริยญาณิพนธ์

ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่ายต่าง ๆ อีกทั้งยังคอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจในเสมอรวมถึงเพื่อน ๆ วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่หิยมใช้อุปกรณ์ รวมถึงคำปรึกษา ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถทำปริยญาณิพนธ์นี้ได้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำหวังว่าปริยญาณิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจและผู้นำผลงานนี้ไปใช้งานได้

ธนกฤติ รุ่งแสง
ธีรวุฒิ แก้วมณี
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
สารบัญรูปภาพ.....	vii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 LoRa , LoRaWAN.....	3
2.2 ดัชนีชี้วัดผลกระทบต่อสุขภาพของมลพิษทางอากาศในประเทศไทย.....	17
2.3 พื้นที่ให้บริการของ CAT Telecom.....	20
บทที่ 3 วิธีการจัดทำปริญญาานิพนธ์.....	21
3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	21
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้.....	22
3.3 Block Diagram.....	25
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	26
4.1 ตอนที่ 1 ทำการ config ให้อุปกรณ์ออนไลน์บนเครือข่าย.....	26
4.2 ตอนที่ 2 หาค่า Delay ของเครือข่ายในการส่งการตัวบอร์ด.....	28
4.3 ตอนที่ 3 ทดลองอ่านค่า V โดยโปรแกรมในตัวบอร์ดและ Server.....	30
4.4 ตอนที่ 4 ทดลองการทำงานของ Sensor MQ-135.....	33
4.5 ตอนที่ 5 ทดลองการทำงานของ PM2.5 Sensor.....	35
4.6 ตอนที่ 6 ทดลองใช้งานอุปกรณ์.....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	39
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	39
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
5.3 การแก้ปัญหา.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงค่า Delay ในการส่งข้อมูล.....	29
4.2 ตารางแสดงค่า input และตัว Server ที่อ่านได้.....	31
4.3 ตารางแสดงค่าที่อ่านได้จาก MQ-135.....	33
4.4 ตารางแสดงค่าที่อ่านได้จาก PM2.5 Sensor.....	35
4.5 ตารางแสดงค่าสถานการณ์ภายในห้อง.....	36
4.6 ตารางแสดงค่าสถานการณ์พื้นที่โล่งตอนเช้า.....	37
4.7 ตารางแสดงค่าสถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถ.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Modulation Setting for Europe.....	3
2.2 Modulation Setting.....	4
2.3 LoRaWAN.....	5
2.4 Physical Network Topology.....	6
2.5 LoraWan Network Topology.....	6
2.6 End-Device เชื่อมต่อกับ Gateway.....	7
2.7 หลักการ End-Device.....	7
2.8 LoRa Class A.....	8
2.9 LoRa Class B.....	9
2.10 LoRa Class C.....	9
2.11 การทำงาน Network Server.....	11
2.12 ตัวอย่าง Application Server.....	12
2.13 การส่งข้อมูลจาก End-Device ถึง Application Server.....	12
2.14 การส่งข้อมูลจาก Application Server ถึง End-Device.....	13
2.15 อุปกรณ์ End-device ส่งข้อมูลโดยมี Gateways สองตัวที่ได้รับ.....	14
2.16 gateway ทั้งสองตัวได้รับข้อมูลและ forward.....	14
2.17 Network Server จัดการเรื่องการ duplicate.....	14
2.18 Application Server ส่ง Acknowledgement กลับไปที่ Network Server.....	15
2.19 Network Server จะเลือก Gateway.....	15
2.20 Gateway จะส่ง Acknowledgement กลับไปที่ End-Device.....	15
2.21 Application Server ต้องการจะส่งข้อมูลบางอย่างไปที่ End-Device.....	16
2.22 End-Device จะตื่นขึ้นมาและเริ่มต้น Transmits.....	16
2.23 พื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ LoRa ของ CAT Telecom.....	20
3.1 STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1.....	22
3.2 Air Quality Control Gas sensor MQ-135.....	23
3.3 Arduino ESP32.....	23
3.4 PM2.5 Sensor - SPS30.....	24
3.6 แสดง Block Diagram.....	25

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เช็คค่า Config ด้วย Tera Term.....	26
4.2 เช็ค Logger Data ที่ปลายทาง Server.....	27
4.3 ทดลอง Input Data โดยสั่งงานให้ไฟ LED สีฟ้าที่บอร์ดติด.....	28
4.4 ทดลอง Input Data โดยสั่งงานให้ไฟ LED สีฟ้าที่บอร์ดดับ.....	28
4.5 กราฟแสดงค่า Delay ในการส่งข้อมูลต่อครั้ง.....	29
4.6 ทดลองอ่านค่า V.....	30
4.7 ค่า V ที่อ่านได้จาก Tera และจาก Server.....	30
4.8 สถานการณ์ภายในห้อง.....	36
4.9 สถานการณ์พื้นที่โล่งตอนเช้า.....	37
4.10 สถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถ.....	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมขึ้นมา ทำให้แหล่งอุตสาหกรรม มีเพิ่มอย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อค่ามลพิษในอากาศมีมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยรวมเป็นอย่างมาก

แต่การที่เราจะแก้ปัญหาเรื่องมลพิษเหล่านั้น เราจะต้องทราบถึงค่ามลพิษว่ามีอะไรบ้าง และมีปริมาณเท่าไร เพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้บริหารเขตอุตสาหกรรมนั้น ๆ พิจารณาและออกนโยบายเพื่อแก้ปัญหามลพิษดังกล่าว

ดังนั้นจึงได้ทำเครื่องวัดค่าปริมาณมลพิษและส่งข้อมูลทางไกล (Long Distance Transmission Pollution Meter) เพื่อรวบรวมและบันทึกค่ามลพิษที่เกิดขึ้นแล้วทำการส่งกลับมายัง Server ผ่าน STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจจับมลพิษ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการสื่อสารข้อมูลโดยเทคโนโลยี LoRa
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการใช้งาน Server มาเก็บข้อมูล
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการใช้ภาษา C ใน Keil และ Arduino
- 1.2.5 นำผลงานในโครงการนี้ไปวัดค่ามลพิษในแหล่งอุตสาหกรรม
- 1.2.6 นำผลงานในโครงการนี้ไปพัฒนาใช้ในสถานที่ต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาด้านมลพิษได้ดี

ยิ่งขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 ผลงานในโครงการสามารถวัดมลพิษได้
- 1.3.2 ผลงานในโครงการสามารถสื่อสาร และเก็บข้อมูลได้
- 1.3.3 ผลงานในโครงการสามารถอ่านค่าได้ถูกต้องและแม่นยำ

1.4 ขอบเขตของโครงการ

ผลงานในโครงการมีขอบเขตการทำงานคือ

- 1.4.1 สามารถวัดค่า AQI ในอากาศ โดย Sensor MQ-135 ได้
- 1.4.2 สามารถวัดค่า PM ในอากาศได้
- 1.4.3 สามารถเก็บข้อมูลได้ในระยะทางไกลมาก ๆ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจจับมลพิษ
- 1.5.2 เข้าใจการสื่อสารข้อมูลโดยเทคโนโลยี LoRa
- 1.5.3 เข้าใจการใช้งาน Server มาเก็บข้อมูล
- 1.5.4 เข้าใจการใช้ภาษา C ใน Keil และ Arduino
- 1.5.5 สามารถนำผลงานในโครงการนี้ไปวัดค่ามลพิษในแหล่งอุตสาหกรรมได้
- 1.5.6 สามารถนำผลงานในโครงการนี้ไปพัฒนาใช้ในสถานที่ต่าง ๆ เพื่อลดปัญหาด้านมลพิษ

ได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2 ทฤษฎี

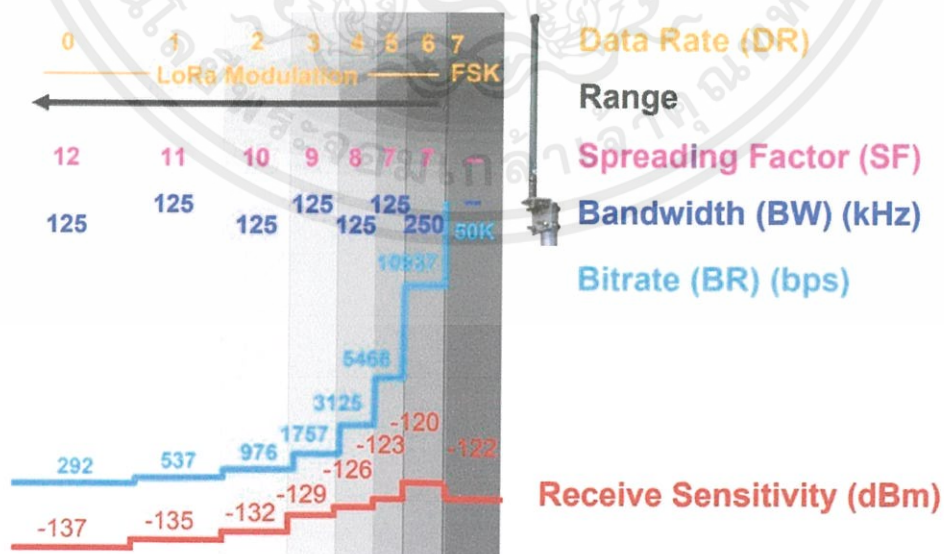
2.1 LoRa, LoRaWAN

LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) หรือเครือข่ายสื่อสารแบบกว้างที่เน้นใช้พลังงานต่ำ เป็นเทคโนโลยีที่ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญสำหรับงานทางด้าน Internet of Things

จุดเด่นของ LPWAN เทคโนโลยีได้แก่

- Secure — Bidirectional Communication
- Simple Star Network Topology
- Low data rate
- Low cost
- Long battery life

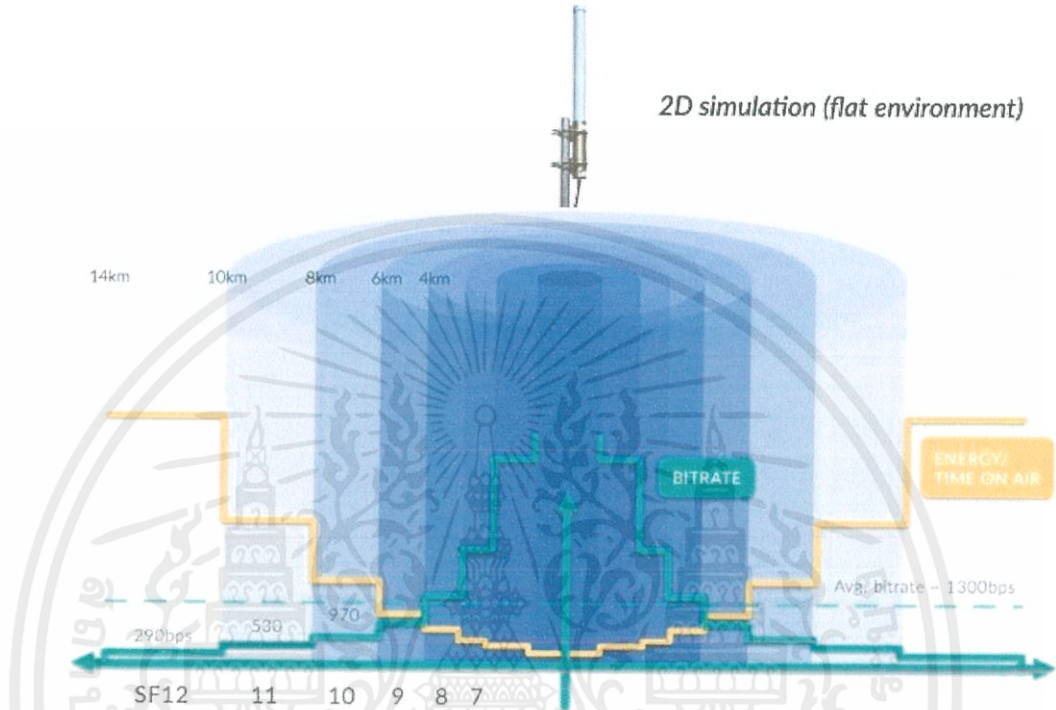
เทคโนโลยีทางด้าน LPWAN มีหลากหลายมากเช่น NB-IoT, SigFox และ LoRa มาตรฐาน LoRaWAN Protocol ซึ่งก็คือ LoRa Alliance นั้นเอง หน้าที่หลักๆ ของ LoRa Alliance คือเป็นผู้ออกมาตรฐาน LoRaWAN โดยใช้ความสามารถของ LoRa นั้นเอง LoRa เป็นเทคโนโลยีสัญญาณการสื่อสารอยู่โดยใช้เทคนิค Proprietary Spread Spectrum technology ซึ่งรูปแบบถูกพัฒนาโดย Semtech Corporation เอง



รูปที่ 2.1 Modulation Setting for Europe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างค่า Data Rate (DR) สังเกตจากรูป จะเห็นว่า DR เป็น 0 อุปกรณ์จะสามารถส่งข้อมูลได้ไกลที่สุด โดยสามารถส่งด้วย Bitrate ที่ต่ำที่สุดโดยการกำหนด Data Rate จะถูกกำหนดจาก Spreading Factor (SF) ตั้งแต่ 7- 12 โดยที่แบนวิทท์ ช่องสัญญาณ และค่า SF ที่ปรับได้อาจจะเปลี่ยนแปลงตาม Frequency plan ของแต่ละโซน



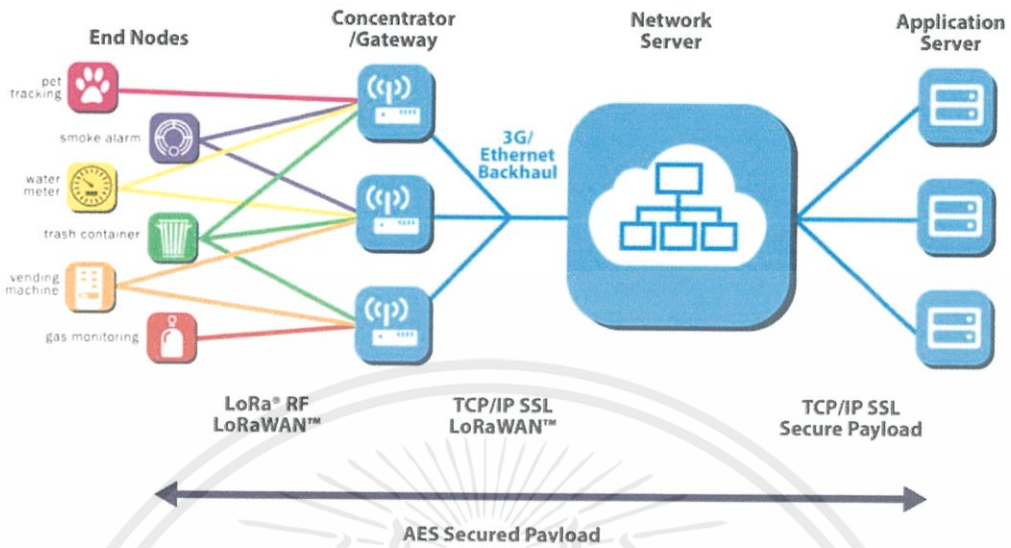
รูปที่ 2.2 Modulation Setting

ถ้าดูจากรูปด้านบนเพิ่มเติมจะเห็นว่าเมื่ออุปกรณ์เข้าใกล้ gateway มากก็จะสามารถที่จะส่งข้อมูลด้วย BITRATE ที่สูงขึ้นได้ และการส่งข้อมูลจะเร็วขึ้นอีกด้วย รวมถึงพลังงานที่ใช้ในการส่งถ้าเทียบต่อขนาดของแพคเกจก็จะน้อยกว่าอุปกรณ์ที่อยู่ไกล Gateway อีกด้วย

ซึ่งในระดับ LoRaWAN จะมีโหมด ADR (Adaptive Data Rate) ที่เซตในแพคเกจการส่งข้อมูล เพื่อให้การเชื่อมต่อระหว่าง Gateway และ Device สามารถปรับ Spreading Factor แบบอัตโนมัติเพื่อประสิทธิภาพในการส่งโดยดูจากระยะการเชื่อมต่อระหว่าง Gateway และ Device โดยสามารถเลือกได้ว่าต้องที่จะ ปรับเพื่อส่งข้อมูลได้เร็วที่สุด หรือ ปรับเพื่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่ยาวนานที่สุด เป็นต้น

คือพูดง่ายๆ เทคโนโลยี LoRa เป็นส่วนของ RF PHYSICAL Layer ในการสื่อสารที่เป็นลิขสิทธิ์ของบริษัท Semtech นั่นเอง

LoRaWAN



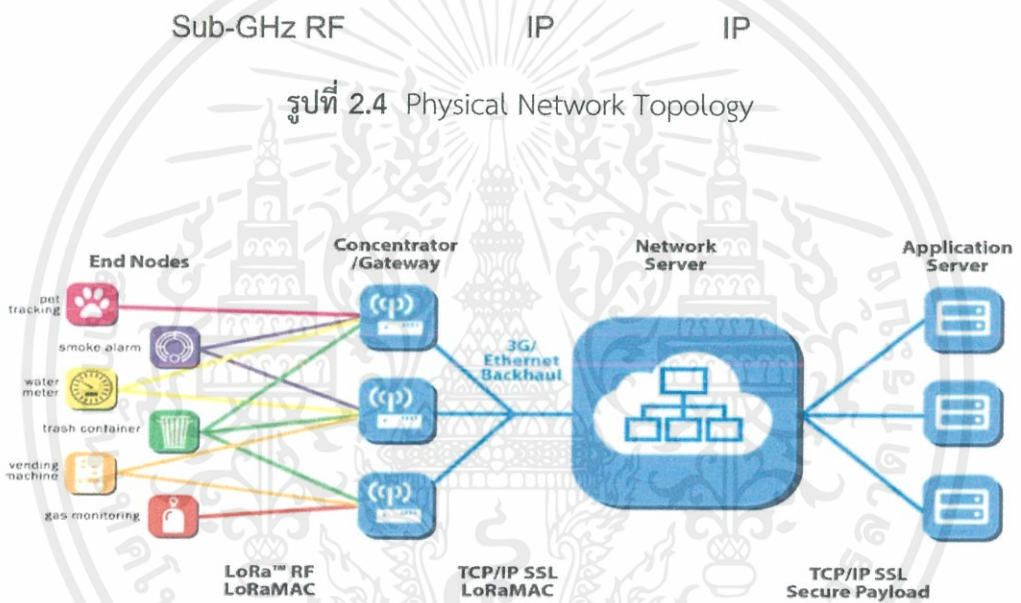
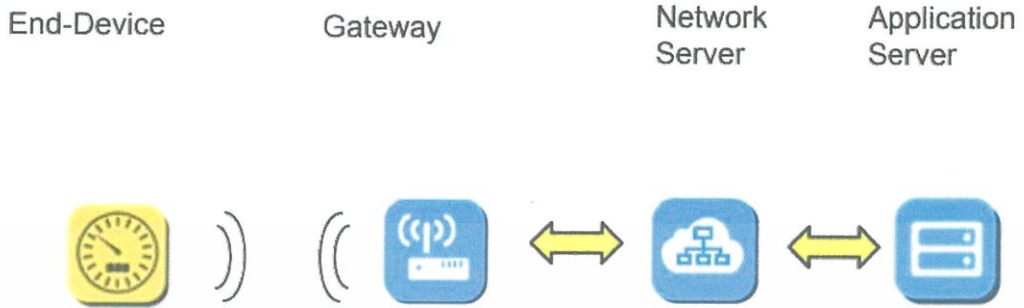
รูปที่ 2.3 LoRaWAN

LoRaWAN เป็นส่วนที่ถูกกำหนดขึ้นมาโดยใช้ประโยชน์จาก LoRa physical layer ที่กล่าวไว้ข้างต้น

เริ่มต้นถ้าพูดถึง LoRaWAN ขอให้แบ่งส่วนประกอบในการเชื่อมต่อออกเป็น 4 ส่วนได้แก่

- End-Devices
- Concentrator/Gateway
- Network Server
- Application Server

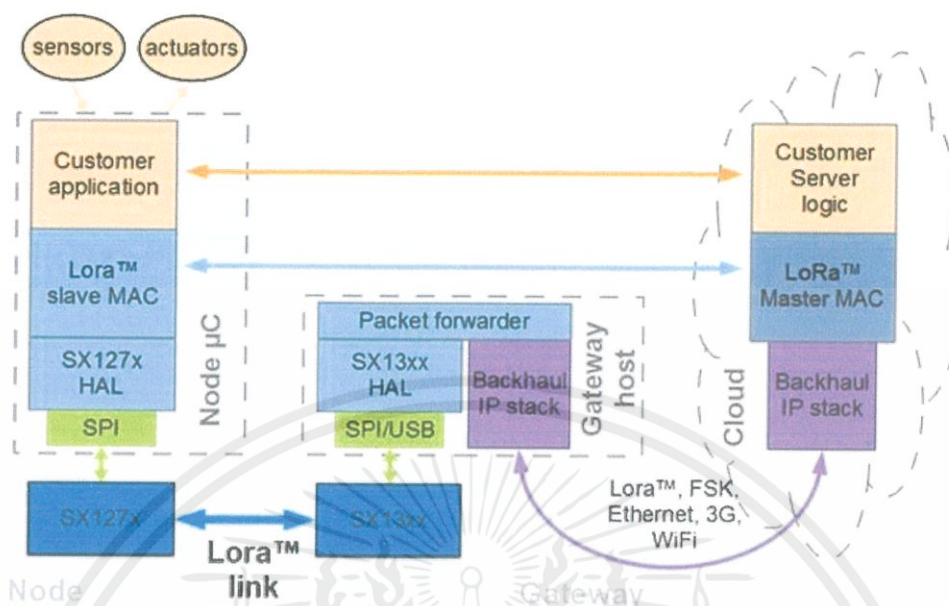
LoRaWan Physical Network Topology



รูปที่ 2.5 LoraWan Network Topology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 1 End-Device



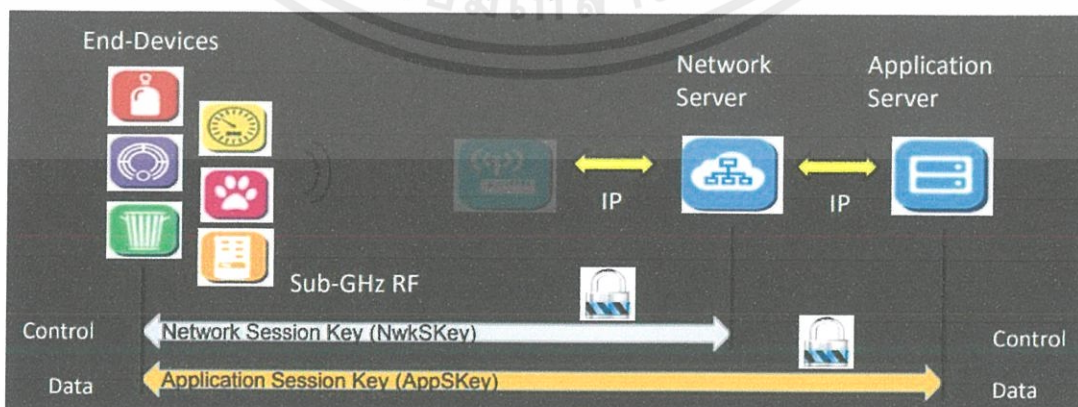
รูปที่ 2.6 End-Device เชื่อมต่อกับ Gateway

การเชื่อมต่อระหว่าง End-Device จะเชื่อมต่อเข้าไปที่ Gateway ได้เท่านั้น โดยที่ End-Device หนึ่งตัวสามารถส่งข้อมูลเข้าไปที่ Gateway ได้มากกว่า 1

การเชื่อมต่อระหว่าง End-Device กับ Gateway จะทำผ่าน LoRa แต่หลังจาก Gateway เป็นต้นไปจะเป็นระบบการเชื่อมต่อแบบ IP Base

ก่อนที่ End-Device จะเชื่อมต่อกับ LoRaWan Network จำเป็นจะต้องผ่านกระบวนการ Activated จาก Network ได้โดยข้อมูลดังต่อไปนี้ End-Device จำเป็นจะต้องใช้ได้แก่

- Device Address (DevAddr)
- Network Session Key (NwkSKey)
- Application Session Key (AppSKey)



รูปที่ 2.7 หลักการ End-Device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Device Address มีขนาด 32-bit ค่าของ Device Address จำเป็นจะต้อง Unique หรือไม่ซ้ำใครใน Network เลขของ Device Address จะไปปรากฏอยู่ในทุก ๆ เฟรมข้อมูลโดยเป็นข้อมูลที่มองเห็นทั้ง End-Device, Network Server และ Application Server

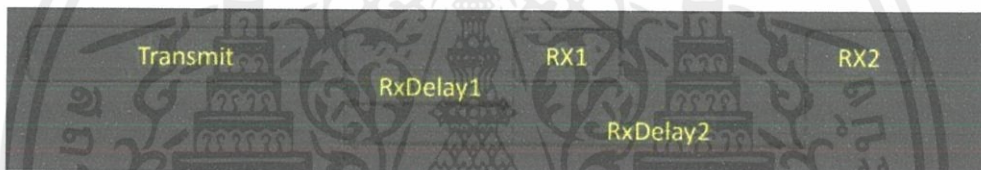
Network Session Key ใช้สำหรับบอก Network Server ว่าต่อเข้าระบบ Network กลุ่มใดซึ่งต้องเป็นหมายเลขที่ใช้แชร์กับ Network Server ที่เราต้องการเชื่อมต่อ ลักษณะเป็น 128bit AES encryption Key ข้อมูลส่วนนี้จะเห็นเฉพาะ End-device และ Network Server

Application Session Key ข้อมูลส่วนนี้ให้เห็นเฉพาะ End-device และ Application Server เท่านั้น ใช้สำหรับเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูลส่วนของ Application Data

End-Device Class

ฝั่ง Devices จะมีการแบ่ง Class ออกไปสามคลาสตามลักษณะความต้องการในการเชื่อมต่อได้แก่

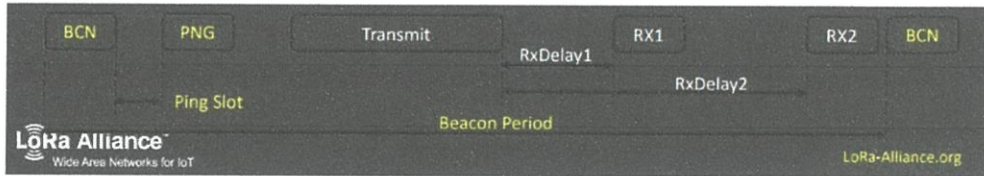
Battery Powered—Class A (ALL END-DEVICES)



รูปที่ 2.8 LoRa Class A

- เป็น Bidirectional communications
- เป็นแบบ unicast messages
- End-device จะหลับหลังจากส่งและตื่นขึ้นมารับภายในเวลาที่กำหนด และฝั่ง Application server ถ้าต้องการส่งค่าไปที่ End device จำเป็นต้องรอ End device ตื่นขึ้นมาเพื่อส่งข้อมูลก่อน
- จุดเด่นของ Class A ประหยัดพลังงานมากที่สุด
- ข้อด้อยของ Class A มี Latency ในการรับส่งที่นานที่สุด
- Class A จึงเหมาะกับ Application ประเภท Sensor ที่วัดค่าโดยใช้ แบตเตอรี่เป็นพลังงานหลัก

Low Latency—Class B



รูปที่ 2.9 LoRa Class B

- สามารถใช้ได้ทั้ง Unicast และ Multicast Message
- การส่งข้อมูลจะมีการกำหนดรอบในการส่งจาก Periodic beacon จาก gateway ข้อดีคือสามารถกำหนดความเร็วและรอบในการส่งข้อมูลจากฝั่ง Server ได้
- จุดเด่นของ Class B มี Latency ที่สามารถกำหนดได้
- ข้อด้อยของ Class B ใช้พลังงานสูงขึ้นถ้าเทียบกับ Class A
- Class B จึงเหมาะกับ Application ประเภท Sensor ที่วัดค่า รวมถึง Actuator ที่ต้องการส่งค่ากลับจาก Server

No Latency—Class C



รูปที่ 2.10 LoRa Class C

- เป็นแบบที่ End-device แทบจะไม่มี การ sleep โดยจะเปิด RX slot เพื่อรอรับข้อมูลจาก gateway ตลอดเวลาทำให้การรับส่งข้อมูลแทบจะทันเวลา และ Server สามารถส่งข้อมูลไปที่ End-device ได้ตลอดเวลา แต่แลกกับการใช้พลังงานของ End-device ที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแบบอื่น
- ข้อเด่นของ Class C Latency ในการรับข้อมูลต่ำที่สุด End-device เปิดรับข้อมูลตลอดเวลา
- ข้อด้อยของ Class C ใช้พลังงานสูงที่สุด จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแหล่งจ่าย

วิธีการขอ join network ของ End-Device

กระบวนการเชื่อมต่อเข้าระบบ Network จะมีอยู่สองวิธีได้แก่

1. **Over-the-Air Activation (OTAA)** เป็นกระบวนการที่ใช้ Globally Unique Identifier และมีการแชร์ key ผ่านกระบวนการ Hand shaking ในระหว่างการเชื่อมต่อ กระบวนการในขั้นตอนแรกจึงยุ่งยากกว่าแบบ ABP โดยมีขั้นตอนในการเชื่อมต่อดังต่อไปนี้

End-device จะส่ง Join Request ไปที่ Server โดยในข้อมูลประกอบไปด้วย Globally Unique End-Device Identifier (DevEUI), Application Identifier (AppEUI) และ Application key (AppKey) เพื่อขอ Session Key จาก Server

Server จะคำนวณ session keys เช่น NetworkSKey, AppSKey และส่ง Join Accept กลับไป

End-device จะได้รับ Join Accept

End-device ถอดข้อมูล Join Accept

End-device นำข้อมูล DevAddr ที่ได้รับมาเก็บไว้ในหน่วยความจำ

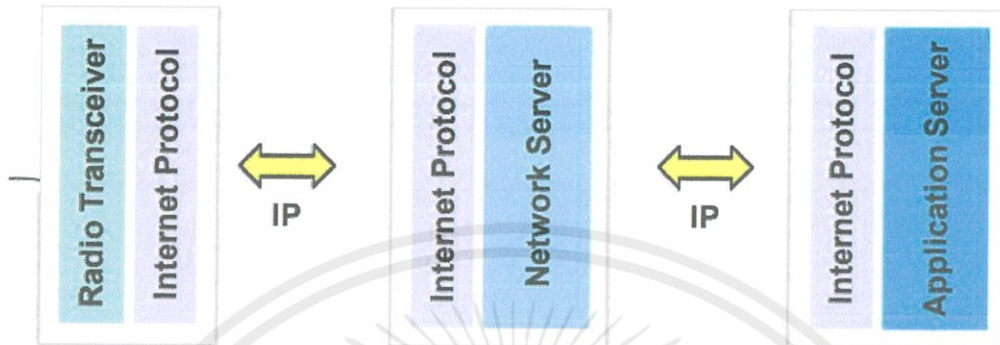
End-device ได้รับ Network Session Key และ Application Session Key

2. **Activation By Rationalization (ABP)** กระบวนการนี้จำเป็นจะต้อง share key ลง ไปที่อุปกรณ์ ในตอนผลิตหรือตอนดาวน์โหลดโปรแกรม วิธีการนี้เป็นวิธีที่สะดวกในการเชื่อมต่อเข้าระบบ Network เพราะ End-Device สามารถเชื่อมต่อเข้าระบบได้เลยโดยไม่ต้อง hand shaking เพื่อเชื่อมต่อ แต่ข้อเสียจะเป็นการ Locked ระบบ Network ให้ใช้ได้เฉพาะ Key นี้เท่านั้น

Gateway เชื่อมต่อกับ Network Server

การเชื่อมต่อระหว่าง Gateway กับ Network Server จะกระทำผ่าน โพรโตคอล UDP ผ่าน network packet forwarder Protocol ของ Semtech

Network Server



รูปที่ 2.11 การทำงาน Network Server

- มีหน้าที่จัดการเรื่อง Authenticates data ของ End-Devices ที่ถูกส่งมา
 - ถ้าข้อมูลที่ส่งมามี addressed มาที่ Network server ข้อมูลนั้นจะถูกประมวลผล
 - Network Server จะเชื่อมต่อกับ Application Server ผ่าน Standard IP โดยที่ Network Server สามารถลงบนเครื่องเซอเวอร์เครื่องเดียวกับ Application Server ได้
- Network Server จึงเป็นตัวกำหนด Deployment model ในการออกแบบระบบ Lora ได้แก่ แบบ

- **Private Network**
 - ใช้ Network server ที่ติดตั้งเองเพื่อใช้โครงข่ายแบบส่วนตัว
 - เหมาะกับเครือข่ายขนาดเล็กถึงกลาง
- **Centralized Public Network**
 - ผู้ให้บริการเป็นผู้จัดการระบบ Network
 - เหมาะกับเครือข่ายขนาดใหญ่
- **Distributed/Cooperative Public network**
 - ไม่มีใครเป็นเจ้าของ Network Server
 - ใช้ Internet Model เช่น THE THINGS NETWORK

Application Server



Electric Meter



Vending Machine

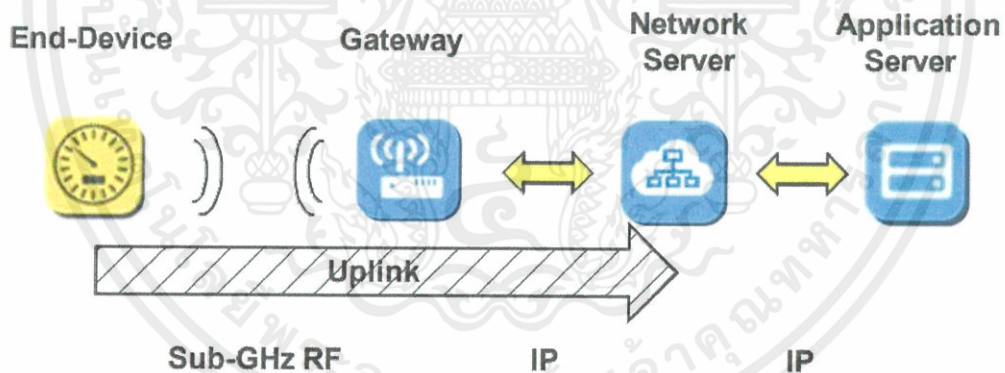


Smoke alarms

รูปที่ 2.12 ตัวอย่าง Application Server

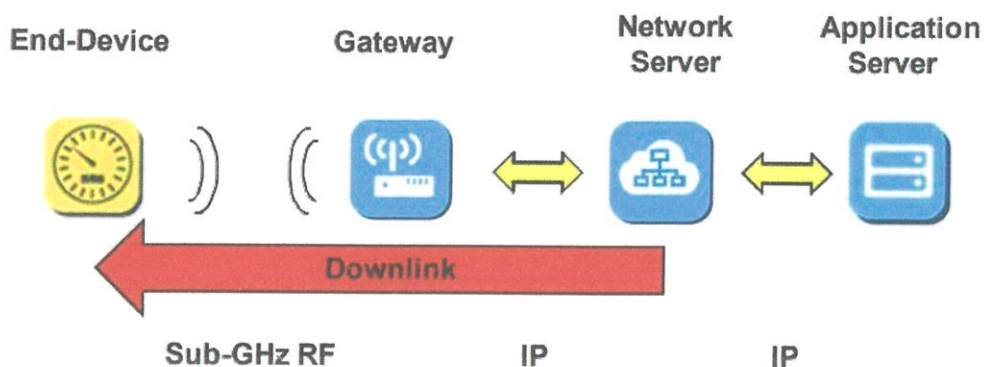
- เป็นหลายทางที่รับข้อมูลมาจาก End-device
- Application จะถอดข้อมูลที่รับมาจาก End-device และประมวลผล
- สามารถมี Application Server ได้หลายชนิด ใน LoRaWan Network เดียวกัน

การส่งข้อมูลจาก End-Device ถึง Application Server



รูปที่ 2.13 การส่งข้อมูลจาก End-Device ถึง Application Server

การส่งข้อมูลจาก End-device ขึ้นไปที่ Network server จะสามารถผ่าน Gateway หนึ่งหรือ หลายตัวได้ โดยที่ Network Server จะเป็นคนเลือกและจัดการข้อมูลก่อนส่งต่อไปที่ Application Server

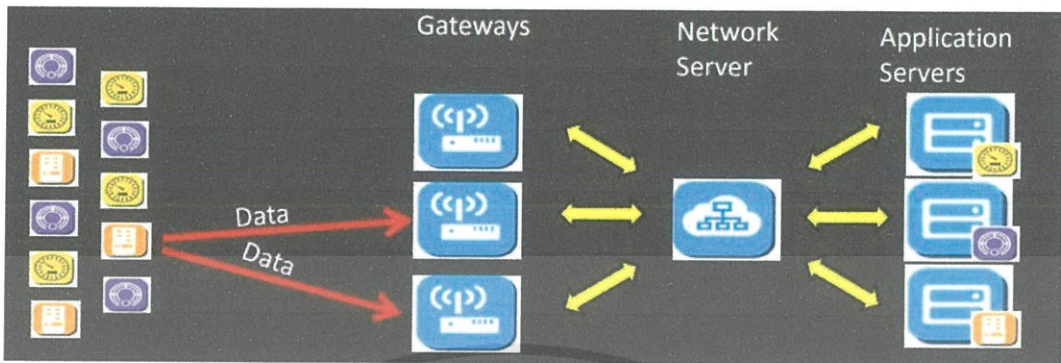


รูปที่ 2.14 การส่งข้อมูลจาก Application Server ถึง End-Device

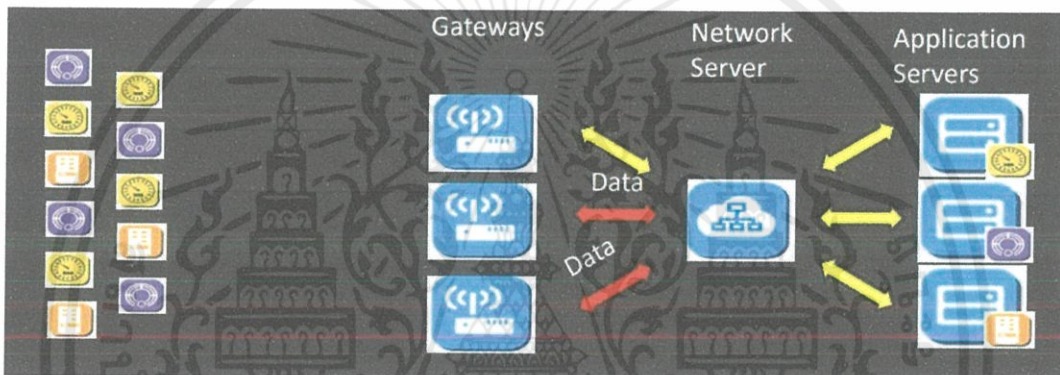
การส่งข้อมูลจาก Network Server จะผ่าน Gateway เพียงแค่ตัวเดียว โดยที่ Network Server เป็นคนเลือก Gateway ที่จะส่งข้อมูลกลับไป End-Device

การส่งข้อมูลจาก End-device ไปที่ Application Server จะแบ่งออกเป็น Unconfirmed-Data Message และ Confirmed-Data Message โดยจะต่างกันว่า Unconfirmed-Data Message จะไม่มีการส่ง Acknowledge กลับจาก Application Server มาที่ End-Device

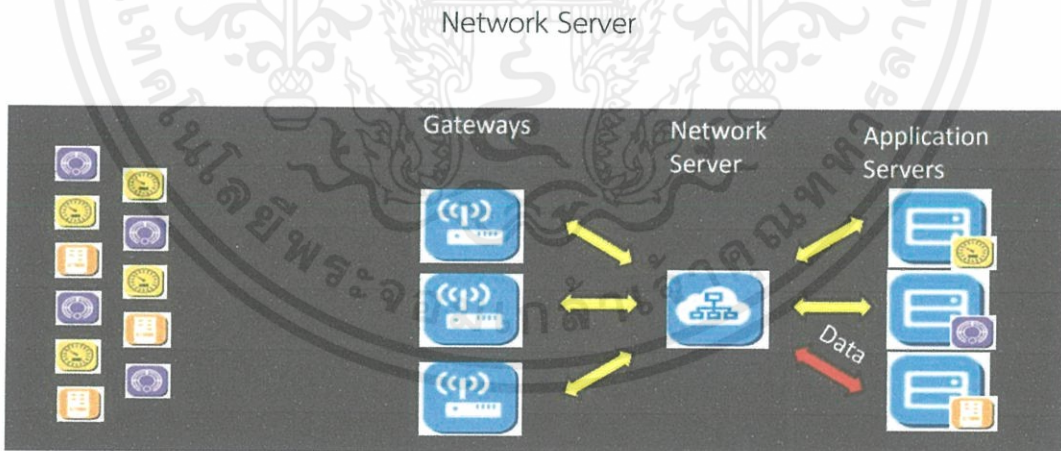
ตัวอย่างการรับส่งข้อมูลแบบ Confirmed-Data Message



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ End-device ส่งข้อมูลโดยมี Gateways สองตัวที่ได้รับ

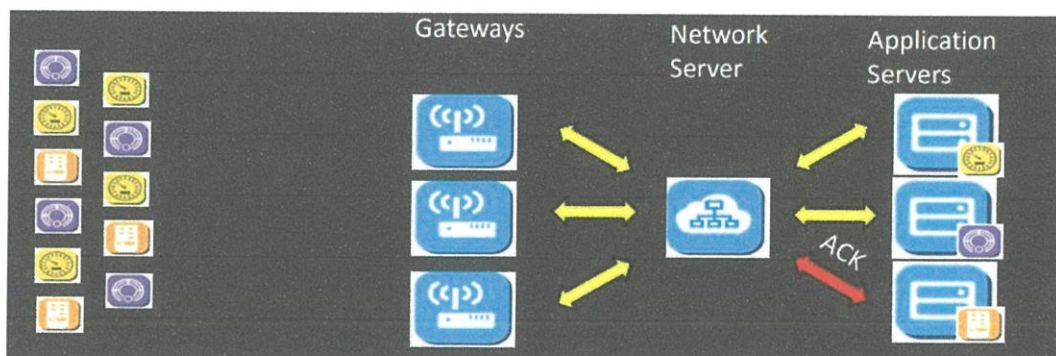


รูปที่ 2.16 gateway ทั้งสองตัวได้รับข้อมูลและ forward ข้อมูลผ่าน UDP Protocol IP base ไปที่

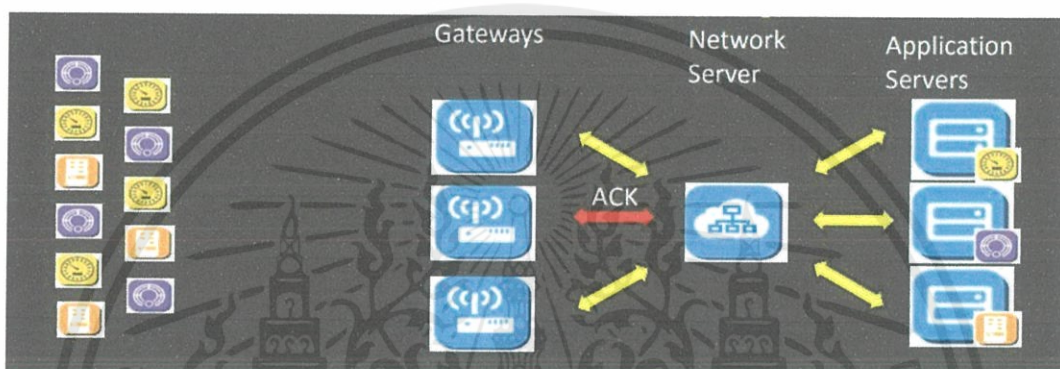


รูปที่ 2.17 Network Server จัดการเรื่องการ duplicate ข้อมูลและส่งต่อไปที่ Application Server ถ้าเป็นแบบ Unconfirmed-Data Message จะจบที่ขั้นตอนนี้

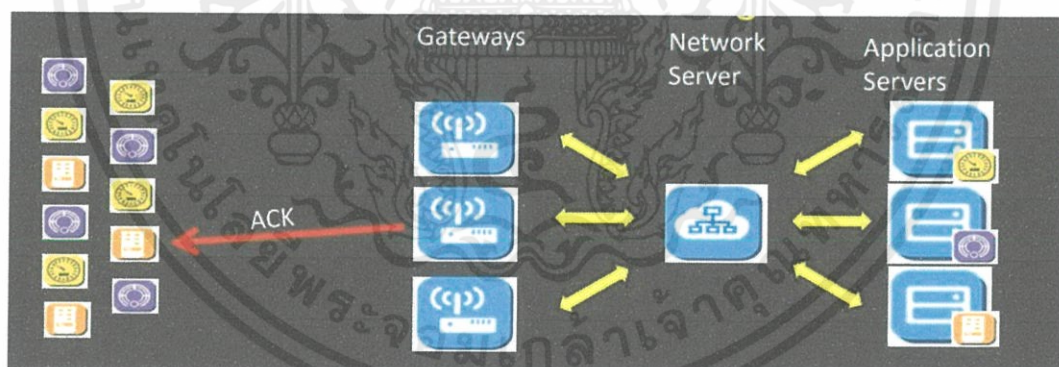
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 Application Server ส่ง Acknowledgement กลับไปที่ Network Server



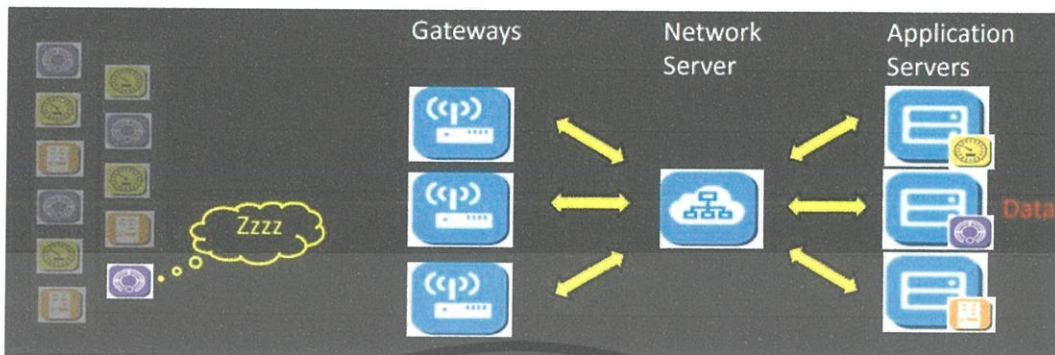
รูปที่ 2.19 Network Server จะเลือก Gateway เพียงหนึ่งตัวเพื่อส่งข้อมูล Acknowledgement กลับไปที่ End-Device



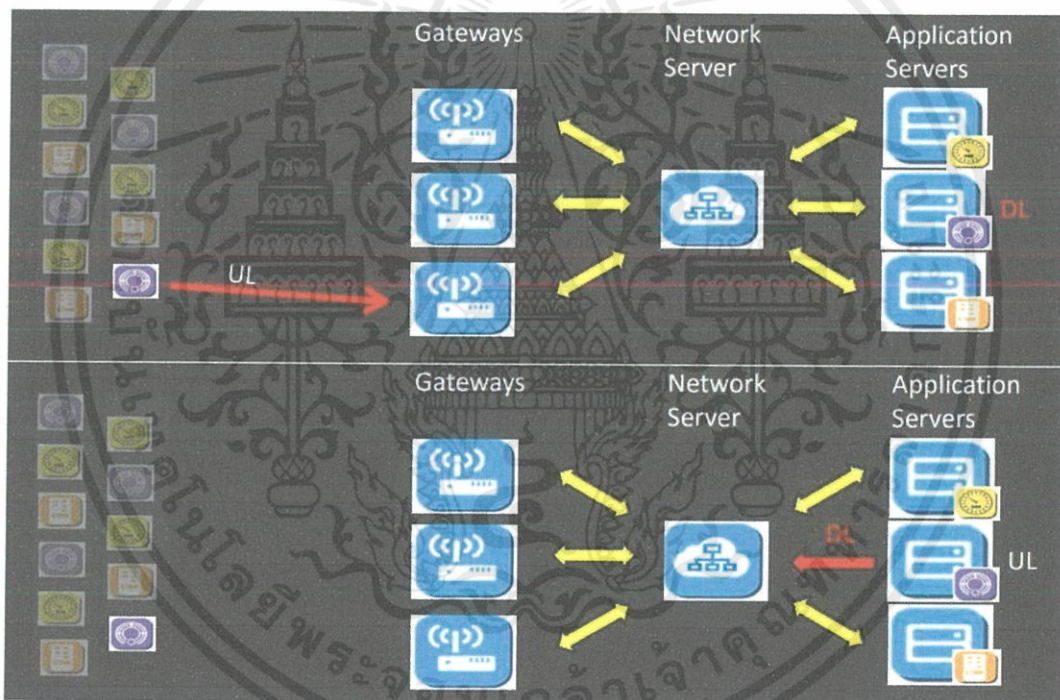
รูปที่ 2.20 Gateway จะส่ง Acknowledgement กลับไปที่ End-Device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ Application Server ต้องการส่งข้อมูลไปหา End-Device ตัวอย่าง Class-A



รูปที่ 2.21 Application Server ต้องการจะส่งข้อมูลบางอย่างไปที่ End-Device



รูปที่ 2.22 จำเป็นจะต้องรอจนกว่า End-Device จะตื่นขึ้นมาและเริ่มต้น Transmits ข้อมูลจึงจะสามารถส่งข้อมูลกลับไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ดัชนีชี้วัดผลกระทบต่อสุขภาพของมลพิษทางอากาศในประเทศไทย

ตัวชี้วัด หมายถึง การนำเสนอสิ่งที่แสดงถึงนัยสำคัญหรือสิ่งที่แสดงแนวโน้มเกี่ยวกับปรากฏการณ์หนึ่งๆที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ทันที

ตัวชี้วัดมลพิษทางอากาศ (Indicator of Air Pollution) หมายถึง สิ่งที่แสดงนัยสำคัญและแนวโน้มของคุณลักษณะและปริมาณของอากาศ

ปัจจุบันอากาศทั่วโลกซึ่งรวมประเทศไทยด้วยนั้นมีมลพิษปนเปื้อนอยู่มาก ทั้งอากาศที่หายใจภายนอกอาคาร (Outdoor Air Pollution) และภายในอาคาร (Indoor Air Pollution) และเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจ็บป่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้เกิดโรกระบบทางเดินหายใจ ซึ่งทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลเป็นอย่างมาก แหล่งของสารปนเปื้อนเหล่านี้มาจากการประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ในสังคมเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังเกิดจากแหล่งตามธรรมชาติอีกด้วย ซึ่งอาจจำแนกได้ดังนี้

- แหล่งก่อมลพิษทางอากาศจากการประกอบกิจกรรมในสังคม ได้แก่ การประกอบอาชีพในการประกอบกิจการอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การบริการ การก่อสร้าง การจราจร การเผาเศษ และพฤติกรรมของบุคคลในสังคม ได้แก่ การสูบบุหรี่ การทิ้งและการเผาขยะ การเผาป่า เป็นต้น

- แหล่งก่อมลพิษทางอากาศจากธรรมชาติ ได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซและรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซ และรังสีจากพื้นผิวโลก จากการระเบิดของภูเขาไฟ แหล่งก๊าซเรดอนจากพื้นผิวโลก

ในประเทศไทยนั้นประสบปัญหากับมลพิษทางอากาศและมีผู้เจ็บป่วยด้วยโรกระบบทางเดินหายใจ ภูมิแพ้ มะเร็งบางชนิด ซึ่งคาดว่าอาจเนื่องมาจากมลพิษทางอากาศดังกล่าวได้

ปัจจุบัน ในประเทศไทยนั้นมีหลายหน่วยงานที่ดำเนินการตรวจวัดคุณภาพอากาศ แต่หน่วยงาน กรมควบคุมมลพิษ โดยมีสถานีตรวจวัดอากาศทั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และจังหวัดในภูมิภาค รวมทั้งสิ้น 19 จังหวัด ได้แก่ สถานีตรวจวัดอากาศจังหวัด กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ สมุทรสาคร ปทุมธานี นนทบุรี เชียงใหม่ ลำปาง นครสวรรค์ สระบุรี นครราชสีมา ขอนแก่น อยุธยา ราชบุรี ชลบุรี ระยอง ฉะเชิงเทรา สุราษฎร์ธานี ภูเก็ต สงขลา โดยมีการตรวจวัดคุณภาพอากาศจากพารามิเตอร์หลายชนิด ได้แก่ ความเข้มข้นของก๊าซ ฝุ่นละออง (จำแนกตามขนาด) อุณหภูมิ และสภาพของการเปลี่ยนแปลงของอากาศและแสงแดด ดังนี้

1. ตรวจวัดก๊าซที่สำคัญบางชนิด โดยคิดความเข้มข้นเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซแต่ละชนิดในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide: CO₂) ก๊าซในกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) (เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogenoxide: NO₂)) มีเทน(Methane) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur dioxide: SO₂) โอโซน (Ozone: O₃) ซีเอฟซี (CFC)

2. ตรวจวัดฝุ่นละออง โดยคิดความเข้มข้นเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละอองแต่ละชนิดในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง ได้แก่ ฝุ่นละอองโดยรวม (Total Suspended Particulate: TSP) ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM 10) และฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน
3. รังสี ได้แก่ รังสีโดยรวมของดวงอาทิตย์ (Net Rad) และรังสีตกกระทบ
4. ทิศทางลม
5. ความเร็วลม
6. ปริมาณน้ำฝน
7. ความชื้นสัมพัทธ์

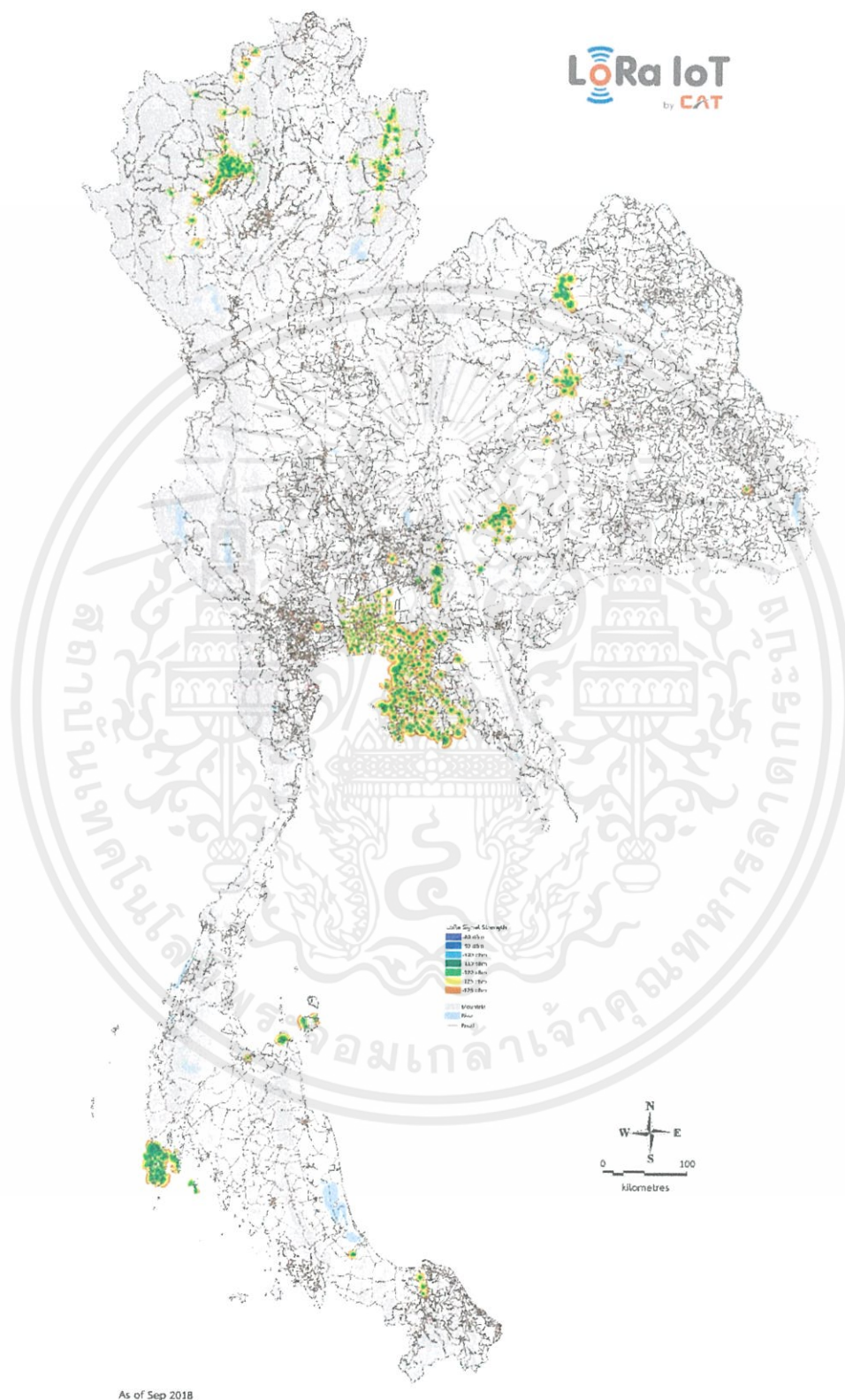
ในกรณีของดัชนีคุณภาพอากาศ นั้น สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ ได้กำหนดเกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย โดยมีการคำนวณเทียบมาตรฐานคุณภาพบรรยากาศทั่วไปของสารมลพิษทางอากาศ 5 ประเภท ได้แก่ ก๊าซโอโซน เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เฉลี่ย 8 ชั่วโมง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เฉลี่ย 24 ชั่วโมง และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ดัชนีคุณภาพอากาศที่คำนวณได้ของสารมลพิษทางอากาศประเภทใดมีค่าสูงสุด จะใช้เป็นดัชนีคุณภาพอากาศของวันนั้น ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือตั้งแต่ 0 ถึงมากกว่า 300 ซึ่งแต่ละระดับจะใช้สีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย โดยดัชนีคุณภาพอากาศ 100 จะมีค่าเทียบเท่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป หากดัชนีคุณภาพอากาศสูงเกินกว่า 100 แสดงว่าค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศมีค่าเกินมาตรฐาน และคุณภาพอากาศในวันนั้นจะเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งดัชนีเปรียบเทียบคุณภาพอากาศในระดับต่าง ๆ นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ส่วนกรณีของรังสีทิศทางลม ความเร็วลม ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์นั้นไม่ได้ทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง มีการตรวจวัดเป็นบางกรณีและไม่ได้เผยแพร่ข้อมูลโดยทั่วไป

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย

AQI	ความหมาย	สีที่ใช้	แนวทางการป้องกันผลกระทบ
0-50	คุณภาพดี	ฟ้า	ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ
51-100	คุณภาพปานกลาง	เขียว	ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ
101-200	มีผลกระทบต่อสุขภาพ	เหลือง	ผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจ ควรหลีกเลี่ยงการออกกำลังกายกลางแจ้งนอกอาคาร บุคคลทั่วไป โดยเฉพาะเด็กและผู้สูงอายุ ไม่ควรทำกิจกรรมกลางแจ้งนอกอาคารเป็นเวลานาน
201-300	มีผลกระทบต่อสุขภาพมาก	ส้ม	ผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจ ควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมกลางแจ้งนอกอาคาร บุคคลทั่วไป โดยเฉพาะเด็กและผู้สูงอายุ ควรจำกัดการออกกำลังกายกลางแจ้งนอกอาคาร
มากกว่า 300	อันตราย	แดง	บุคคลทั่วไป ควรหลีกเลี่ยงการออกกำลังกายกลางแจ้งนอกอาคาร สำหรับผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจ ควรอยู่ในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 พื้นที่ให้บริการของ CAT Telecom



รูปที่ 2.23 พื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ LoRa ของ CAT Telecom

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการจัดทำปริญญาานิพนธ์

3.1 วิธีการดำเนินงาน

- 3.1.1 กำหนดหัวข้อโครงงาน
- 3.1.2 ศึกษาข้อมูลและการทำงานของ Sensor แต่ละตัว
- 3.1.3 ศึกษาการส่งข้อมูลโดย LoRa
- 3.1.4 ศึกษาการทำงานของ STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1
- 3.1.5 ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C
- 3.1.6 ทดลองการส่งข้อมูลผ่าน LoRa ผ่านเครือข่ายของ CAT
- 3.1.7 ออกแบบกล่องโดย Adobe Illustrator และตัดเป็นตัวกล่อง
- 3.1.8 นำ Sensor ทุกตัวมาเชื่อมต่อกัน ภายใต้ออกแบบ
- 3.1.9 ทำการ Monitor ข้อมูลที่ถูกส่งมายัง Server
- 3.1.10 ปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาด
- 3.1.11 จัดทำรายงาน

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

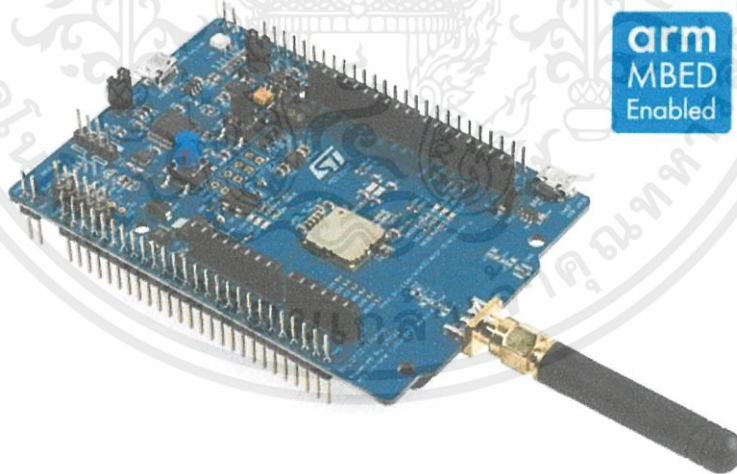
3.2.1 STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1

LoRaWAN™ STM32 B-L072Z-LRWAN1 ของ STMicroelectronics เป็นเครื่องมือพัฒนาสำหรับการเรียนรู้และพัฒนาโซลูชันบนพื้นฐานเทคโนโลยี LoRa™ และ/หรือ FSK/OOK เครื่องมือนี้นำเสนอโซลูชันโมดูลอเนกประสงค์แบบเปิด (โดย Murata) เพื่อแก้ปัญหาเครือข่ายที่ครอบคลุมพื้นที่กว้างแต่ใช้พลังงานต่ำ (Low-Power Wide Area Network - LPWAN) และรองรับโปรโตคอลไร้สายระยะไกล LoRaWAN

B-L072Z-LRWAN1 มาพร้อมกับซอฟต์แวร์ (I-CUBE-LRWAN) แบบเอ็มเบ็ดเด็ดที่ผ่านการรับรองเพื่อกำหนดโหนด LoRaWAN ได้อย่างสมบูรณ์ I-CUBE-LRWAN เป็น LoRaWAN ที่ผ่านการรับรองประเภท A และรองรับประเภท C

บอร์ดนี้นำเสนอตัวเชื่อมต่อ Arduino สำหรับบอร์ดส่วนขยายของเซ็นเซอร์, เครื่องมือดีบักในตัว (ST-Link V3), พอร์ต USB ของอุปกรณ์ USB 2.0 FS, ช่องใส่ชุดแบตเตอรี่ (ด้านหลัง), ตัวเชื่อมต่อ SMA และเสาอากาศ 50 โอห์ม

เนื่องจากโมดูลนี้เป็นแบบเปิด จึงไม่จำเป็นต้องใช้ MCU ภายนอกเพื่อเรียกใช้แอปพลิเคชัน สามารถโฮสต์ชั้นวางในหน่วยความจำแฟลชภายใน STM32L0 ได้



รูปที่ 3.1 STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1

3.2.2 Air Quality Control Gas sensor MQ-135

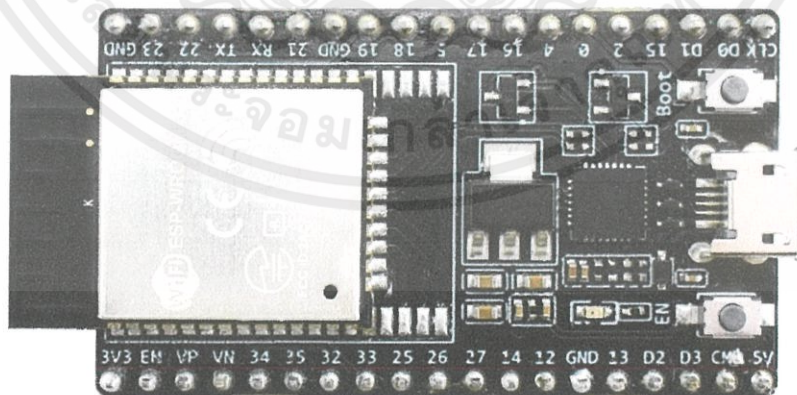
MQ-135 โมดูลเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพอากาศ โดยตรวจจับแก๊ส NH₃, NO_x, Benzene, Alcohol และ Smoke วัดระดับความเข้มข้นของแก๊สได้ตั้งแต่ 10 ถึง 1000ppm สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมหรือในครัวเรือน



รูปที่ 3.2 Air Quality Control Gas sensor MQ-135

3.2.3 Arduino ESP32

จะใช้งานร่วมกับ Arduino IDE โดย Arduino ESP32 จะถูกนำเข้ามาต่อกับ PM2.5 Sensor - SPS30 เพื่ออ่านค่าและส่งข้อมูลไปยัง STM32 LoRa B-L072Z-LRWAN1 เพื่อติดต่อกับ Server ต่อไป



รูปที่ 3.3 Arduino ESP32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 PM2.5 Sensor - SPS30

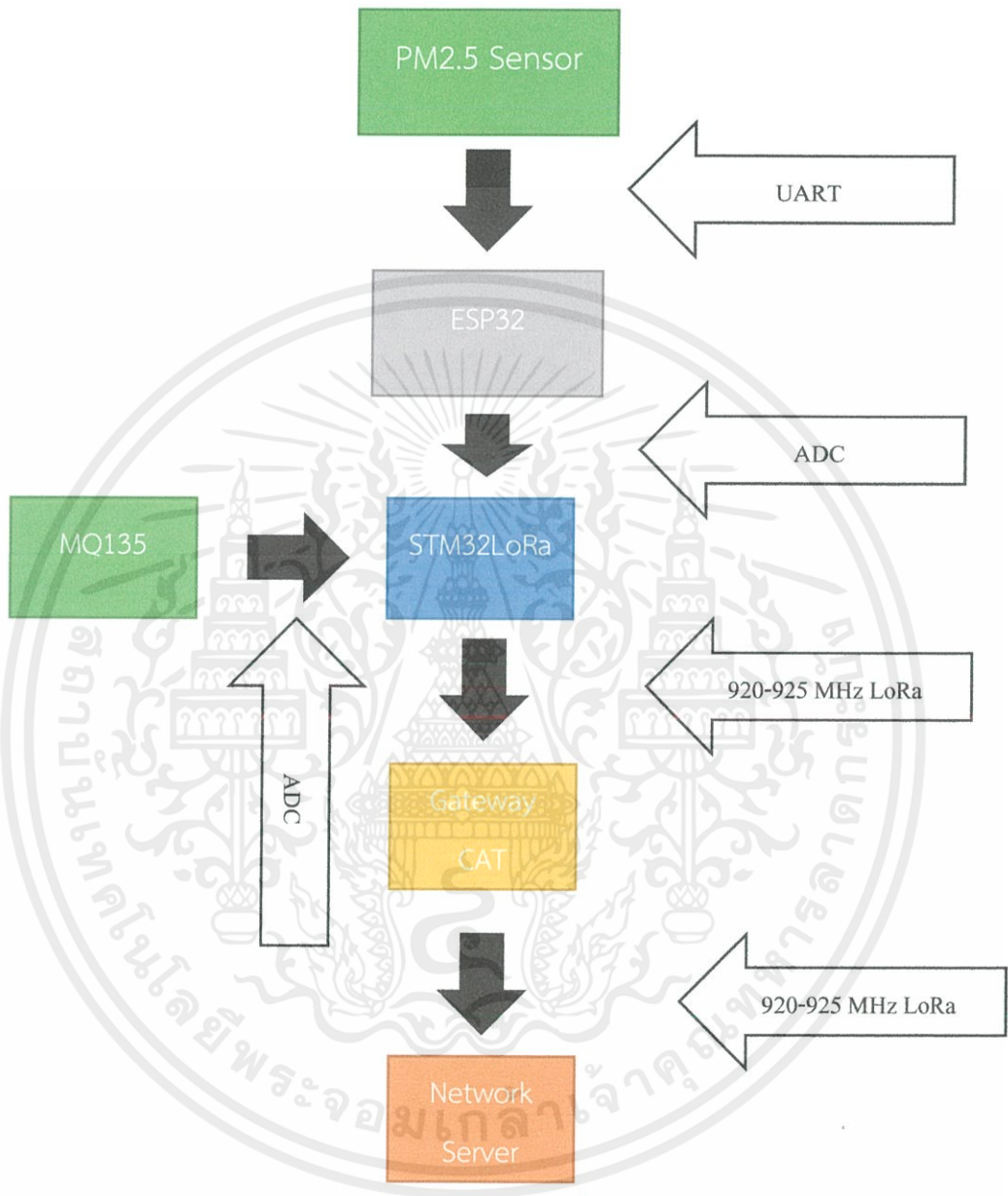
เป็น Server ตรวจจับอนุภาคฝุ่น โดยขนาดอนุภาคที่ตรวจจับได้คือ PM1.0, PM2.5, PM4 และ PM10 ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ตรวจจับได้คือ 0.3 μm ใช้ไฟเลี้ยง 5V ต่อกับ Microcontroller ได้ สื่อสารแบบ I²C และ UART ทำงานแบบ Laser scattering



รูปที่ 3.4 PM2.5 Sensor - SPS30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 Block Diagram



รูปที่ 3.6 แสดง Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ตอนที่ 1 ทำการ config ให้อุปกรณ์ออนไลน์บนเครือข่าย

ทำการทดลองเขียนโปรแกรมเพื่อให้อุปกรณ์เชื่อมต่อเข้ากับเครือข่าย LoRa WAN ของ CAT TELECOM โดยกำหนดค่าดังต่อไปนี้

ความถี่ 923 MHz (เครือข่าย LoRa ในไทยที่ กสทช กำหนดให้ใช้อยู่ในช่วงความถี่ 920-925 Mhz)

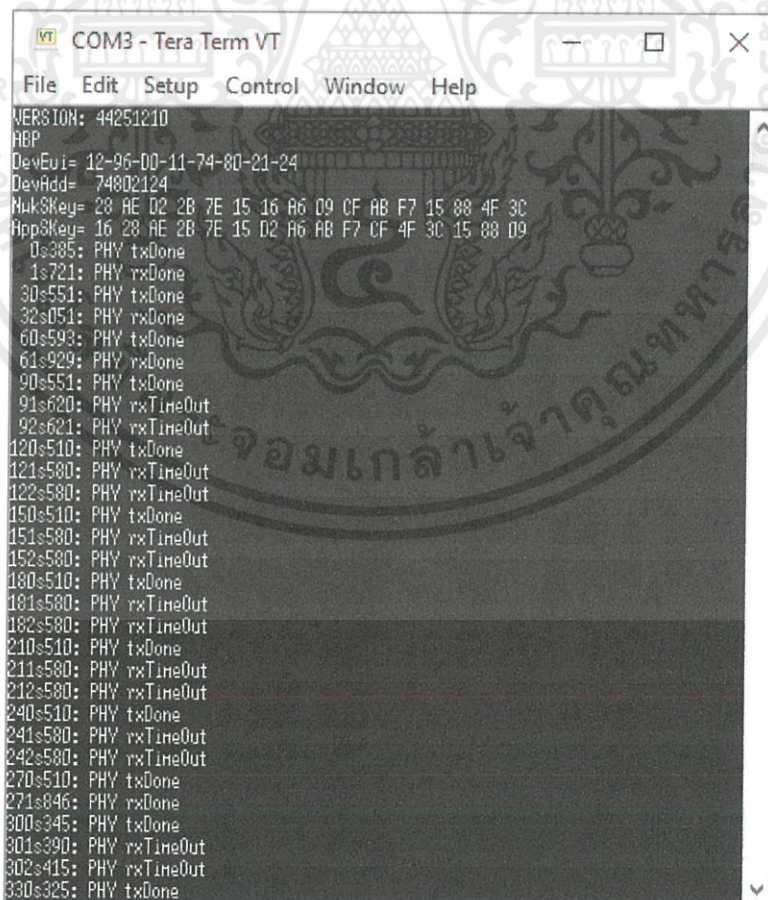
Device EUI 1296D01174802124

Device Address 74802124

Network Session Key 28AED22B7E1516A609CFABF715884F3C

Application Session Key 1628AE2B7E15D2A6ABF7CF4F3C158809

เช็คค่า Config ค่าของ B-L072Z-LRWAN1 ที่ทำการเขียนโปรแกรมลงไป ด้วย Tera Term



```
VT COM3 - Tera Term VT
File Edit Setup Control Window Help
VERSION: 44251210
ABP
DevEui= 12-96-00-11-74-80-21-24
DevAddr= 74802124
NwkSKey= 28 AE D2 2B 7E 15 16 A6 09 CF AB F7 15 88 4F 3C
AppSKey= 16 28 AE 2B 7E 15 D2 A6 AB F7 CF 4F 3C 15 88 09
0s385: PHY txDone
1s721: PHY rxDone
30s551: PHY txDone
32s051: PHY rxDone
60s593: PHY txDone
61s929: PHY rxDone
90s551: PHY txDone
91s620: PHY rxTimeOut
92s621: PHY rxTimeOut
120s510: PHY txDone
121s580: PHY rxTimeOut
122s580: PHY rxTimeOut
150s510: PHY txDone
151s580: PHY rxTimeOut
152s580: PHY rxTimeOut
180s510: PHY txDone
181s580: PHY rxTimeOut
182s580: PHY rxTimeOut
210s510: PHY txDone
211s580: PHY rxTimeOut
212s580: PHY rxTimeOut
240s510: PHY txDone
241s580: PHY rxTimeOut
242s580: PHY rxTimeOut
270s510: PHY txDone
271s846: PHY rxDone
300s345: PHY txDone
301s390: PHY rxTimeOut
302s415: PHY rxTimeOut
330s325: PHY txDone
```

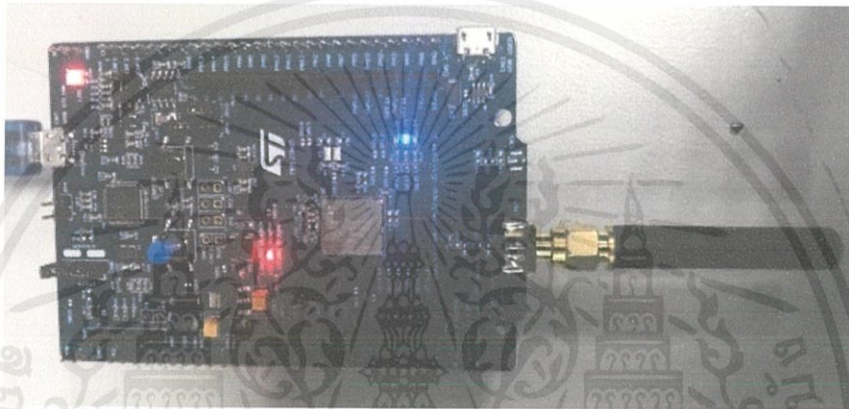
รูปที่ 4.1 เช็คค่า Config ด้วย Tera Term

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตอนที่ 2 ทหาค่า Delay ของเครือข่ายในการสั่งการตัวบอร์ด

ทดลอง Input Data กลับมาเข้าที่ตัวอุปกรณ์ โดยสั่งงานให้ไฟ LED สีฟ้าที่บอร์ดติด

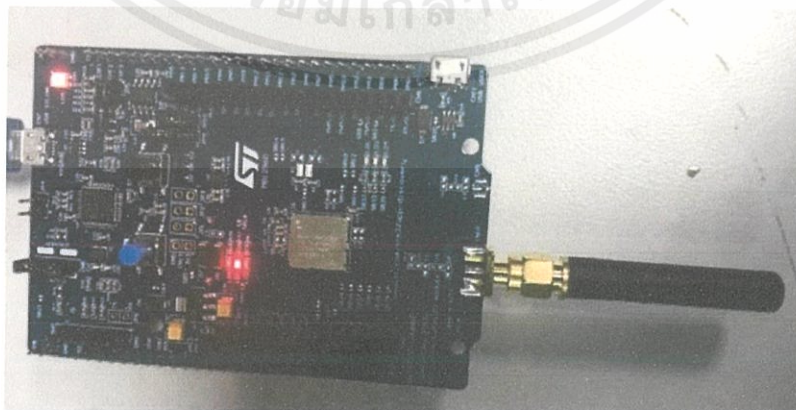
```
{
  "payloadHex": "01",
  "targetPorts": "2",
  "status": "QUEUED"
}
```



รูปที่ 4.3 ทดลอง Input Data โดยสั่งงานให้ไฟ LED สีฟ้าที่บอร์ดติด

ทดลอง Input Data กลับมาเข้าที่ตัวอุปกรณ์ โดยสั่งงานให้ไฟ LED สีฟ้าที่บอร์ดดับ

```
{
  "payloadHex": "00",
  "targetPorts": "2",
  "status": "QUEUED"
}
```

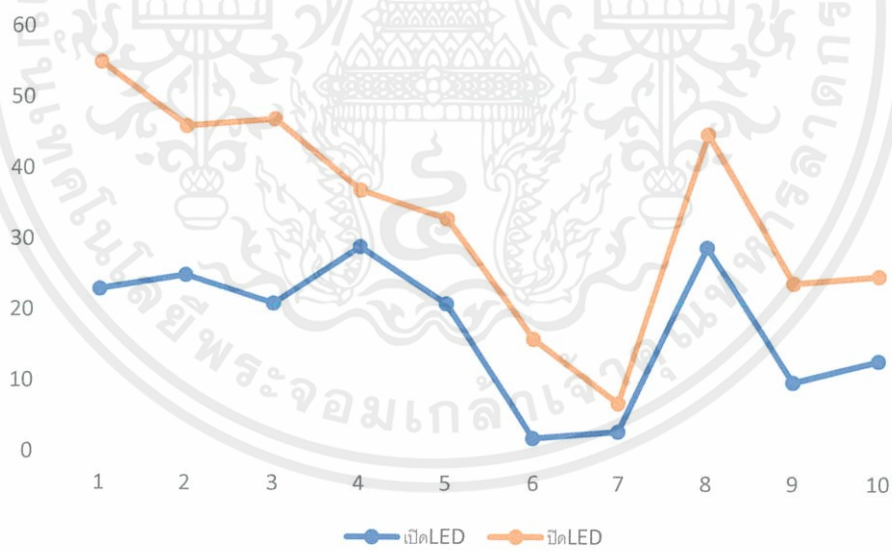


รูปที่ 4.4 ทดลอง Input Data โดยสั่งงานให้ไฟ LED สีฟ้าที่บอร์ดดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า Delay ในการส่งข้อมูล

ครั้งที่	เวลาส่งให้ไฟติด(วินาที)	เวลาส่งให้ไฟดับ(วินาที)
1	23	32
2	25	21
3	21	26
4	29	8
5	21	12
6	2	14
7	3	4
8	29	16
9	10	14
10	13	12
เฉลี่ย	17.6	15.9

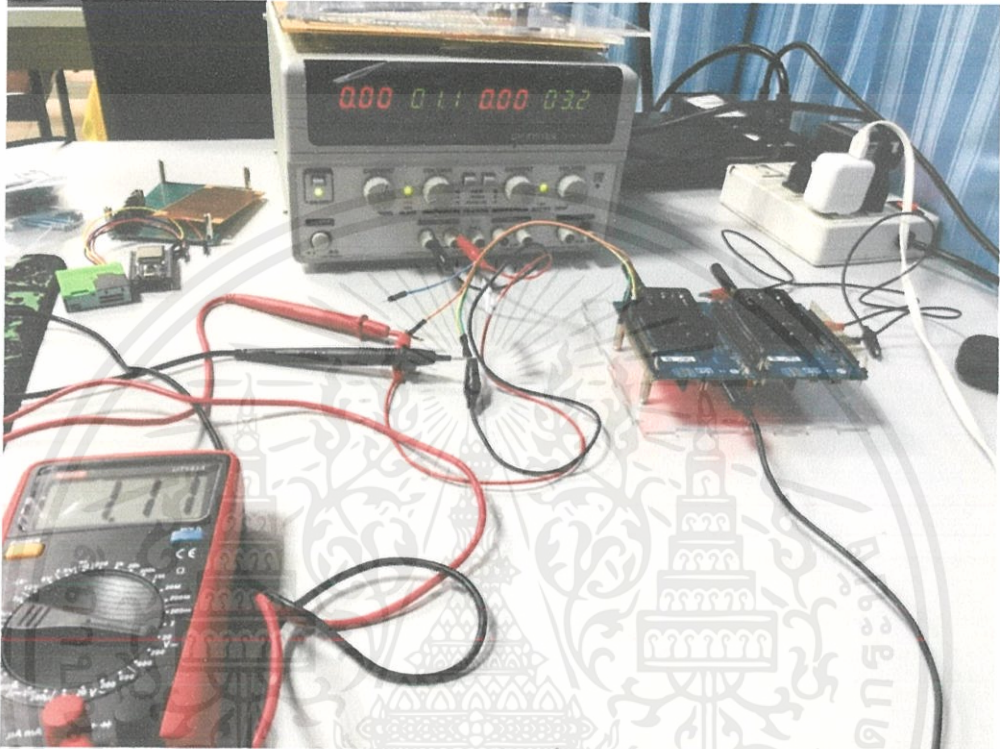


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า Delay ในการส่งข้อมูลต่อครั้ง

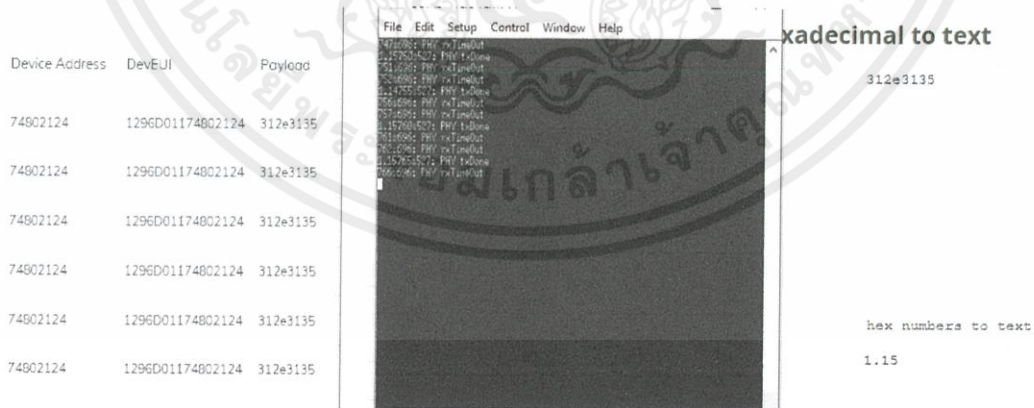
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ตอนที่ 3 ทดลองอ่านค่า V โดยโปรแกรมในตัวบอร์ดและ Server

ทำการทดลองโดยป้อนแรงดัน Input เข้าที่ตัวบอร์ดเพื่อทำการอ่านค่าและบันทึกผล พร้อมเทียบกับที่แสดงในตัว Server



รูปที่ 4.6 ทดลองอ่านค่า V โดยมีเตอร์นั้นแสดงค่าที่อ่านได้จาก Power supply



รูปที่ 4.7 ค่า V ที่อ่านได้จาก Tera และจาก Server อ่านว่า ค่าที่ Input จ่ายไปนั้นมีค่าเท่าไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า input และตัว Server ที่อ่านได้

input (V)	Read Tera (V)	Read Server Logger(16bit)	16bit to text (V)
0.00	0.04	302e3034	0.04
0.10	0.14	302e3134	0.14
0.20	0.24	302e3234	0.24
0.30	0.34	302e3334	0.34
0.40	0.44	302e3434	0.44
0.50	0.54	302e3534	0.54
0.60	0.64	302e3634	0.64
0.70	0.74	302e3734	0.74
0.80	0.84	302e3834	0.84
0.90	0.94	302e3934	0.94
1.00	1.04	312e3034	1.04
1.10	1.14	312e3134	1.14
1.20	1.24	312e3234	1.24
1.30	1.34	312e3334	1.34
1.40	1.44	312e3434	1.44
1.50	1.54	312e3534	1.54
1.60	1.64	312e3634	1.64
1.70	1.74	312e3734	1.74
1.80	1.84	312e3834	1.84
1.90	1.94	312e3934	1.94
2.00	2.04	322e3034	2.04
2.10	2.14	322e3134	2.14
2.20	2.24	322e3234	2.24
2.30	2.33	322e3333	2.33
2.40	2.44	322e3434	2.44
2.50	2.54	322e3534	2.54
2.60	2.64	322e3634	2.64
2.70	2.74	322e3733	2.74
2.80	2.84	322e3834	2.84
2.90	2.94	322e3934	2.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.00	3.04	332e3034	3.04
3.10	3.14	332e3134	3.14
3.20	3.24	332e3234	3.24
3.30	3.30	332e3330	3.30

จากตารางจะเห็นว่า ค่าที่อ่านได้จาก Server และ Tera นั้น จะมีค่ามากกว่าค่า Input อยู่ที่ 0.04 และที่ Input 3.3V จะอ่านค่าได้จาก Server และ Tera เท่ากันที่ 3.3V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ตอนที่ 4 ทดลองการทำงานของ Sensor MQ-135

ทำการทดลองโดยใช้ MQ-135 โปรแกรมเข้ากับบอร์ด Arduino Uno เพื่อวัดค่ามลพิษที่มาจากรถจักรยานยนต์

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าที่อ่านได้จาก MQ-135

RAW ครั้งที่ 1	RAW ครั้งที่ 2	AVG. Raw	ระยะทางรถ (km)	ปีรถ	น้ำมันเครื่องที่ถ่ายครั้งล่าสุด (เดือน)
402	411	406.5	4931	2018	1
414	407	410.5	2012	2019	1
411	409	410	8854	2016	1
602	599	600.5	11715	2018	2
430	429	429.5	8612	2017	2
436	432	434	9206	2016	2
455	460	457.5	12062	2016	3
450	448	449	25849	2015	3
474	477	475.5	7956	2018	4
650	644	647	18553	2017	4
477	476	476.5	15468	2016	4
499	502	500.5	20541	2016	5
511	509	510	9855	2017	6
513	508	510.5	13545	2016	6
522	519	520.5	24544	2015	7
533	539	536	14545	2016	8
420	416	418	7562	2016	9
584	589	586.5	21105	2015	9
588	581	584.5	20284	2014	9
602	603	602.5	7445	2017	10
604	609	606.5	9875	2017	10
625	619	622	10251	2016	11
633	639	636	29854	2015	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

650	653	651.5	11125	2016	13
450	443	446.5	22501	2014	13
655	648	651.5	13524	2014	13
700	703	701.5	26547	2015	15
715	718	716.5	23144	2015	18
719	710	714.5	26584	2015	19
725	729	727	29854	2014	28
789	782	785.5	27559	2014	32

หมายเหตุ จากการจำลองสถานการณ์ข้างต้น พบว่า Sensor มีการทำงานได้จริง (แต่ไม่สามารถอิงมาตรฐานได้) เป็นเพียงการทดสอบตัว Sensor เท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ตอนที่ 5 ทดลองการทำงานของ PM2.5 Sensor

ทำการทดลองโดยใช้ PM2.5 Sensor โปรแกรมเข้ากับบอร์ด ESP32 เพื่อวัดค่าฝุ่น PM2.5

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าที่อ่านได้จาก PM2.5 Sensor

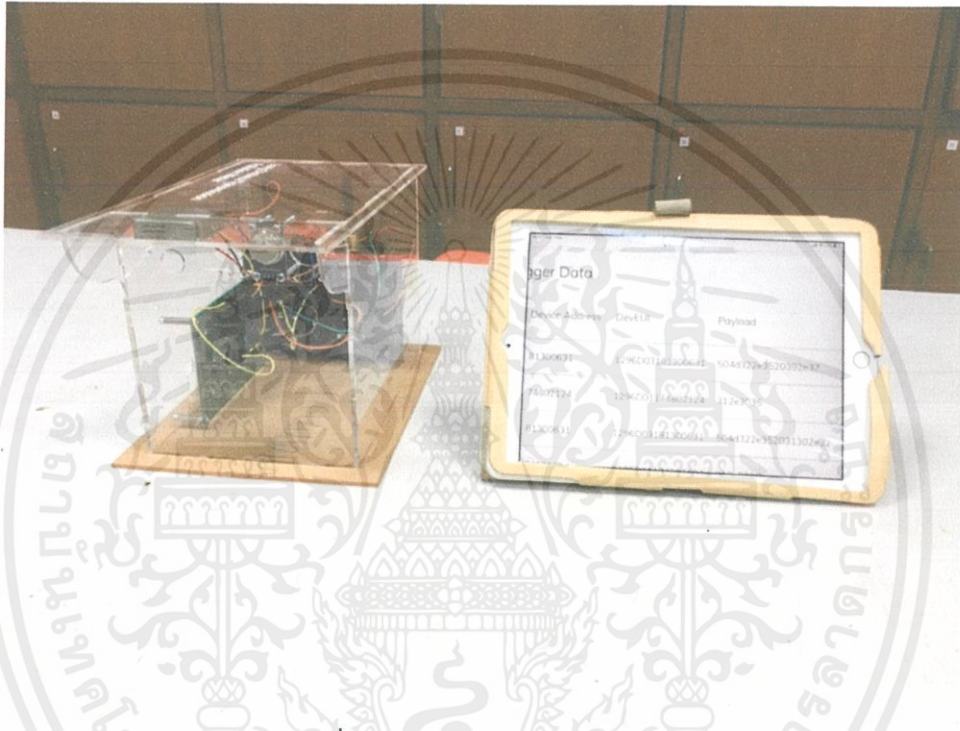
ครั้งที่	PM2.5 (ug/m ³)	Vout (V)
1	17.49	0.17
2	17.45	0.17
3	17.59	0.17
4	17.65	0.17
5	17.61	0.17
6	17.57	0.17
7	17.65	0.17
8	17.90	0.17
9	18.03	0.18
10	17.55	0.17

หมายเหตุ ค่า Vout ได้จากการนำค่า PM2.5 ที่ได้ไปหาร 100 เพื่อส่ง ADC กลับมายังบอร์ด STM32

4.6 ตอนที่ 6 ทดลองใช้งานอุปกรณ์

การทดลองข้างต้น ไม่สามารถบอกได้ว่า ค่าที่อ่านได้นั้น เป็นจริงหรือไม่ โดยการทดลองนี้เป็นจำลองสถานการณ์ที่กำหนดขึ้นมา เพื่อวัดค่าและอ่านค่าที่ได้ ว่าแตกต่างกันบ้างอย่างไร

ตอนที่ 6.1 ภายในห้อง



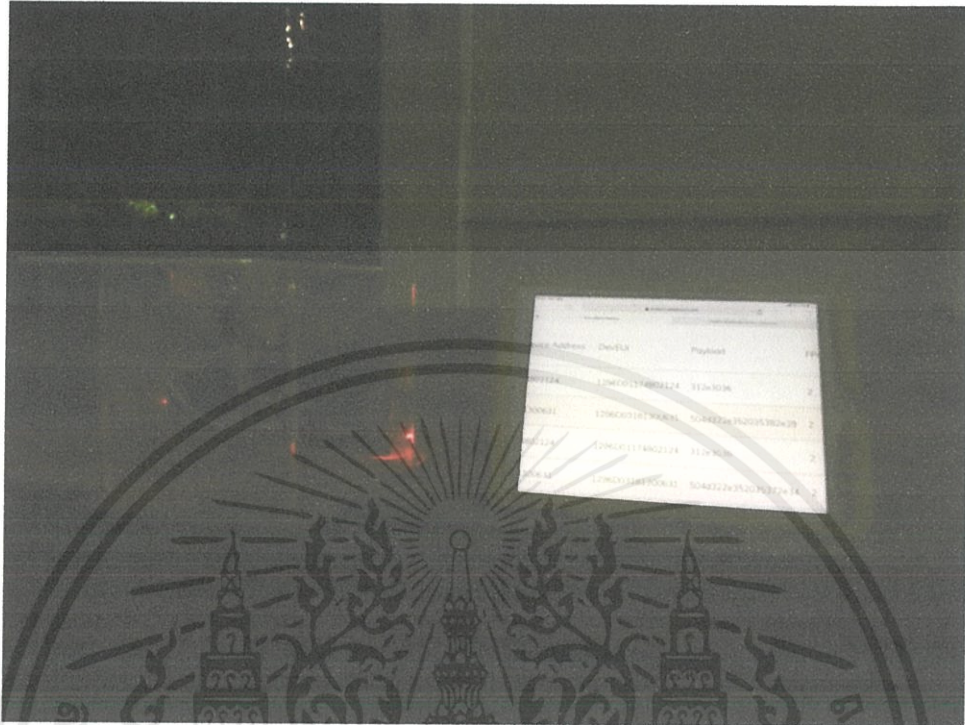
รูปที่ 4.8 สถานการณ์ภายในห้อง

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าสถานการณ์ภายในห้อง

ครั้งที่	PM2.5(hex)	PM2.5(text)	MQ135(hex)	MQ135(text)
1	504d322e3520392e37	PM2.5 9.7	312e3035	1.05
2	504d322e352033302e31	PM2.5 30.1	312e3037	1.07
3	504d322e352031302e32	PM2.5 10.2	312e3035	1.05
AVG		16.67		1.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 6.2 พื้นที่โล่งตอนเช้า



รูปที่ 4.9 สถานการณ์พื้นที่โล่งตอนเช้า

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าสถานการณ์พื้นที่โล่งตอนเช้า

ครั้งที่	PM2.5(hex)	PM2.5(text)	MQ135(hex)	MQ135(text)
1	504d322e352035372e34	PM2.5 57.4	312e3036	1.06
2	504d322e352035382e39	PM2.5 58.9	312e3036	1.06
3	504d322e352036302e31	PM2.5 60.1	312e3038	1.08
AVG		58.8		1.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 6.3 ใกล้จุดที่มีรถ



รูปที่ 4.10 สถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถ

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าสถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถ

ครั้งที่	PM2.5(hex)	PM2.5(text)	MQ135(hex)	MQ135(text)
1	504d322e35203130352e38	PM2.5 105.8	302e3934	0.94
2	504d322e35203132312e34	PM2.5 121.4	302e3836	0.86
3	504d322e35203132372e35	PM2.5 127.5	302e3934	0.94
AVG		118.2		0.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ตอนที่ 1 ทำการ config ให้อุปกรณ์ออนไลน์บนเครือข่าย

จากการทดลองของ B-L072Z-LRWAN1 หลังจากทำการ Flash ด้วยโปรแกรม Keil และใช้โปรแกรม Tera Term ตรวจสอบ Port ได้ถูกต้องตามที่กำหนดและสามารถติดต่อสื่อสารกับ Server CAT ได้ สามารถส่งงานทางไกลผ่านย่านความถี่ 920-925 MHz ได้

5.1.2 ตอนที่ 2 ทหาค่า Delay ของเครือข่ายในการสั่งการตัวบอร์ด

B-L072Z-LRWAN1 เชื่อมต่อ Server ได้ แต่มีค่า Delay ไม่นิ่ง เร็วบ้าง และช้าบ้าง

5.1.3 ตอนที่ 3 ทดลองอ่านค่า V โดยโปรแกรมในตัวบอร์ดและ Server

ใช้โปรแกรม Tera และตัว Server ค่าที่ได้นั้นเหมือนกัน แต่ในช่วงค่า input 0-3.2V ค่าที่อ่านได้จาก Tera และตัว Server มากกว่าค่าที่ input จริงเข้าไปที่ 0.04 V ส่วน input 3.3V สามารถอ่านได้จริง

5.1.4 ตอนที่ 4 ทดลองการทำงานของ Sensor MQ-135

รถที่ไม่ค่อยได้ถ่ายน้ำมันเครื่อง และรถที่ถูกใช้มานาน มีผลต่อค่า RAW ที่อ่านได้

5.1.5 ตอนที่ 5 ทดลองการทำงานของ PM2.5 Sensor

จาก Library ที่ใช้สามารถวัดค่า PM2.5 ได้ค่อนข้างนิ่ง

5.1.6 ตอนที่ 6 ทดลองใช้งานอุปกรณ์

จากการทดลองตอนที่ 6.1 สถานการณ์ภายในห้องพบว่ามีค่า PM2.5 เฉลี่ย=16.67 ug/m³ และอ่านค่าได้ MQ135= 1.06 V

จากการทดลองตอนที่ 6.2 สถานการณ์พื้นที่โล่งตอนเช้าพบว่ามีค่า PM2.5 เฉลี่ย=58.8 ug/m³ และอ่านค่าได้ MQ135= 1.07 V

จากการทดลองตอนที่ 6.3 สถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถพบว่ามีค่า PM2.5 เฉลี่ย= 118.2 ug/m³ และอ่านค่าได้ MQ135= 0.91 V

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.2.1 ตอนที่ 1 ทำการ config ให้อุปกรณ์ออนไลน์บนเครือข่าย

ค่าที่ได้นั้นตรงตามที่ config ไว้ ตัวบอร์ดสามารถทำงานได้บนเครือข่ายที่กำหนด

5.2.2 ตอนที่ 2 หาค่า Delay ของเครือข่ายในการสั่งการตัวบอร์ด

B-L072Z-LRWAN1 เชื่อมต่อ Server ได้ แต่มีค่า Delay ไม่นิ่ง เร็วบ้าง และช้าบ้าง อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนหรือความเข้ม-อ่อนของค่าสัญญาณ จุดอับสัญญาณ รวมถึงย่านความถี่ที่ใช้มีค่าช่วง 920-925 MHz เท่านั้น

5.2.3 ตอนที่ 3 ทดลองอ่านค่า V โดยโปรแกรมในตัวบอร์ดและ Server

ค่าที่เกินมา 0.04 V นั้นคาดว่าเกิดจาก Noise ที่เกิดขึ้นภายในวงจรของบอร์ด

5.2.4 ตอนที่ 4 ทดลองการทำงานของ Sensor MQ-135

อายุรถและน้ำมันเครื่องที่ถ่ายครั้งล่าสุด มีผลต่อค่า RAW ที่ Sensor อ่านได้ (ค่า RAW ยิ่งมากแปลว่า AQI มากด้วย) โดยเฉลี่ยรถที่อายุการใช้งานมาก และไม่คอยได้ถ่ายน้ำมันเครื่อง มีผลต่อค่า AQI

5.2.5 ตอนที่ 5 ทดลองการทำงานของ PM2.5 Sensor

จาก Library ที่ใช้สามารถวัดค่า PM2.5 ได้จริง และสามารถนำค่าที่ได้มาคำนวณแปลงให้เป็น V เพื่อส่งค่าไปยังอีกอุปกรณ์ได้ถูกต้อง และ V ที่จ่ายออกไปมีค่าตามคำนวณ

5.2.6 ตอนที่ 6 ทดลองใช้งานอุปกรณ์

จากค่า PM2.5 ในสถานการณ์ข้างต้น ถือว่าใกล้เคียงกับสิ่งที่คาดไว้ โดยมีค่ามากที่สุดในสถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถ สถานการณ์พื้นที่โล่งตอนเช้า สถานการณ์ภายในห้อง ตามลำดับ แต่ทว่าค่าที่ได้จาก MQ135 นั้น ไม่ตรงตามคาดไว้ เพราะว่า สถานการณ์ใกล้จุดที่มีรถ ควรจะมีค่ามากที่สุด แต่ค่าที่ได้จากการทดลองกลับมีค่าน้อยที่สุด

5.3 การแก้ปัญหา

5.3.1 การที่ B-L072Z-LRWAN1 เชื่อมต่อ Server แล้วมี Delay ค่อนข้างสูงนั้น เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของย่านความถี่ที่ใช้ ถูกกำหนดโดย กสทช. หากต้องการส่งโดยเร็วจะต้อง เปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์หรือสัญญาณของ NB-IOT ของทางเครือข่ายอื่นที่ใช้รูปแบบการส่งเป็น 3G/4G แทน

5.3.2 Noise ที่เกินมา 0.4 V นั้น สามารถเขียนโปรแกรมให้อ่านค่า V ที่ได้แล้วทำการลบด้วย 0.4 V ได้ก่อนนำเข้ามาคำนวณ

5.3.3 ถ่านที่ใช้หมดค่อนข้างไว แต่เนื่องจากเป็นแบบจำลองเลยไม่ได้สนใจในจุดนี้ แต่หากจะนำไปใช้งานจริง ควรแนะนำมีระบบช่องทางสำรองไฟหลายช่องทาง เนื่องจากจะได้ไม่ต้องดูแลบ่อย



เอกสารอ้างอิง

- [1] STMicroelectronics Co., Ltd. พ.ศ. 2561. B-L072Z-LRWAN1 (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-l072z-lrwan1.html>. 1 พฤศจิกายน 2561
- [2] Kritsada Arjchariyaphat. พ.ศ. 2561. LoRA, LoRaWAN คืออะไร มารู้จักกันดีกว่า (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://medium.com/deaware/lora-lorawan-คืออะไร-มารู้จักกันดีกว่า-98d20055a4ca>. 1 พฤศจิกายน 2561
- [3] กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ. พ.ศ. 2562. ข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://air4thai.pcd.go.th/webV2/aqi_info.php. 3 เมษายน 2562
- [4] CAT TELECOM Co., Ltd. พ.ศ. 2561. LoRa IoT (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://loraiot.cattelcom.com>. 3 เมษายน 2562



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Discovery kit for LoRaWAN™, Sigfox™, and LPWAN protocols with STM32L0

Introduction

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit embeds the CMWX1ZZABZ-091 LoRa®/Sigfox™ module (Murata). This Discovery kit allows users to develop easily applications with the STM32L072CZ and the LoRa®/Sigfox™ RF connectivity in one single module.

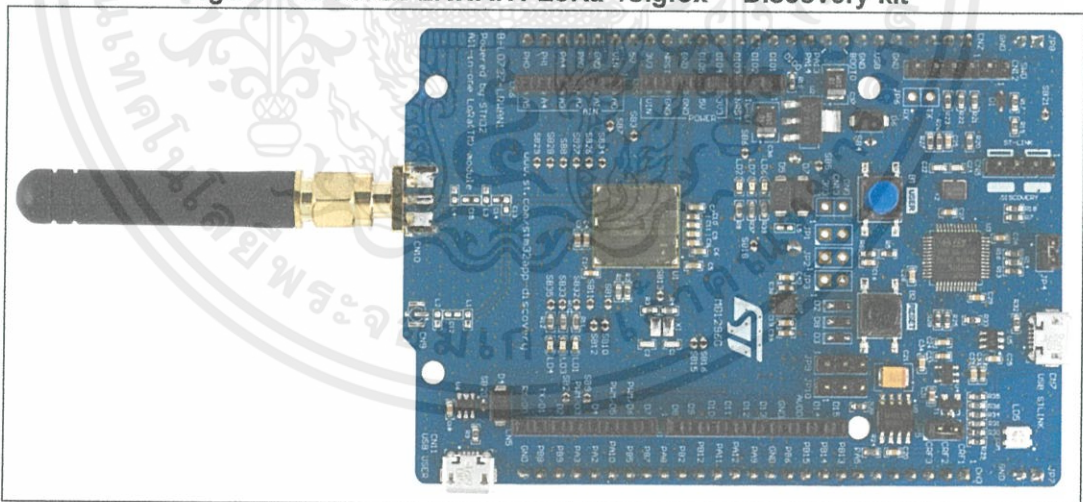
The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit has the full set of features available in the STM32L0 Series and offers ultra-low-power and LoRa®/Sigfox™ RF features. The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit is a low-cost and easy-to-use development kit to quickly evaluate and start a development with an STM32L072CZ microcontroller.

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit includes LoRa®/Sigfox™ RF interface, LEDs, push-buttons, antenna, Arduino™ Uno V3 connectors, USB 2.0 FS connector in Micro-B format. The integrated ST-LINK/V2-1 provides an embedded in-circuit debugger and programmer for the STM32L0 MCUs.

The LoRaWAN™ stack is certified class A and C compliant. It is available inside the I-CUBE-LRWAN firmware package. The Sigfox™ stack is RCZ1, RCZ2, and RCZ4 certified. It is available inside the X-CUBE-SFOX expansion package.

To help users setting up a complete node (LoRaWAN™, Sigfox™, or both), the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit comes with the STM32 comprehensive free software libraries and examples available with the STM32Cube package, as well as a direct access to the Arm® Mbed Enabled™ resources at the <http://mbed.org> website.

Figure 1. B-L072Z-LRWAN1 LoRa®/Sigfox™ Discovery kit



Picture is not contractual.



Contents

1	Features	6
2	Product marking	7
3	Conventions	7
4	System requirements	8
5	Development toolchains	8
6	Demonstration software	8
7	Ordering and product information	8
8	Hardware layout and configuration	9
8.1	B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit mechanical drawing	12
8.2	Embedded ST-LINK/V2-1	13
8.2.1	Drivers	13
8.2.2	ST-LINK/V2-1 firmware upgrade	13
8.3	Power supply	14
8.4	IDD measurements	15
8.5	Clock sources	15
8.6	Reset sources	15
8.7	Antenna and RF connection	16
8.8	Virtual COM port	16
8.9	Buttons and LEDs	16
8.10	USB FS	17
9	Connectors	18
9.1	Arduino Uno V3 connectors	18
9.2	B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit CN2 and CN3 connectors	20
9.3	Other connectors	22
9.3.1	Debug connector SWD	22
9.3.2	SWD Interface	22

9.3.3	External +3.3 V	22
9.4	Description of the jumpers	22
9.5	Configuration of the solder bridges	23
10	B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit information	27
10.1	Identification	27
10.2	Board revision history	27
10.3	Known limitations	27
Appendix A Schematic diagrams		28
Appendix B Federal Communications Commission (FCC), Industry Canada (IC) Compliance and other Certifications		35
B.1	FCC Compliance Statement	35
B.1.1	ANSI C63.4 (2014) American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz	35
B.2	IC Compliance Statement	35
B.2.1	Industry Canada Licence-Exempt Radio Apparatus	35
B.2.2	Radio Frequency (RF) Exposure Compliance of Radiocommunication Apparatus	36
B.3	Other certifications	36
B.3.1	EN 55032 (2012) / EN 55024 (2010) ETSI EN 301 489-1 (v1.9.2) / ETSI EN 301 489-3 (v1.6.1) EN 60950-1 (2006+A11/2009+A1/2010+A12/2011+A2/2013) CFR 47, FCC Part 15, Subpart B (Class B Digital Device) and Industry Canada ICES-003 (Issue 6/2016)	36
B.3.2	Electrical Safety qualification for CE marking: EN 60950-1 (2006+A11/2009+A1/2010+A12/2011+A2/2013) IEC 60650-1 (2005+A1/2009+A2/2013)	36
B.3.3	EMC qualification accordingly to standard CFR 47, FCC Part 15, Subpart B & Industry Canada ICES-003 (Issue 6/2016) Class B Digital Device	36
B.3.4	CE qualification according to standards: ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012) / V3.1.1 (2017) ETSI EN 300 220-2 V2.4.1 (2012) / V3.1.1 (2017) RF Module already certified – Partial test only	36
Revision history		37

List of tables

Table 1.	ON/OFF conventions	7
Table 2.	Ordering information	8
Table 3.	IDD measurements and solder-bridge settings	15
Table 4.	Assignment of the control ports	17
Table 5.	Arduino Uno V3 connectors	18
Table 6.	Connector CN2	20
Table 7.	Connector CN3	21
Table 8.	Debug connector SWD (CN12)	22
Table 9.	External +3.3 V (CN13)	22
Table 10.	Description of the jumpers	22
Table 11.	Configuration of the solder bridges	23
Table 12.	Document revision history	37



List of figures

Figure 1.	B-L072Z-LRWAN1 LoRa®/Sigfox™ Discovery kit	1
Figure 2.	Hardware block diagram	9
Figure 3.	B-L072Z-LRWAN1 top layout	10
Figure 4.	B-L072Z-LRWAN1 bottom layout	11
Figure 5.	B-L072Z-LRWAN1 mechanical drawing	12
Figure 6.	USB composite device	13
Figure 7.	RF signal path and connectors	16
Figure 8.	B-L072Z-LRWAN1: location of the solder bridges (top view)	25
Figure 9.	B-L072Z-LRWAN1: location of the solder bridges (bottom view)	26
Figure 10.	B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit, Top view	29
Figure 11.	Power	30
Figure 12.	ST-LINK/V2-1	31
Figure 13.	LoRa®/Sigfox™ module	32
Figure 14.	USB 2.0 FS and antenna	33
Figure 15.	Connectors	34



1 Features

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit offers the following features:

- CMWX1ZZABZ-091 LoRa[®]/Sigfox[™] module (Murata)
 - Embedded ultra-low-power STM32L072CZ Series MCUs, based on Arm[®] Cortex[®]-M0+ core, with 192 Kbytes of Flash memory, 20 Kbytes of RAM, 20 Kbytes of EEPROM
 - Frequency range: 860 MHz - 930 MHz
 - Frequency MHz (min): 860 MHz
 - Frequency MHz (max): 930 MHz
 - USB 2.0 FS
 - 4-channel, 12-bit ADC, 2xDAC
 - 6-bit timers, LP-UART, I²C and SPI
 - Embedded SX1276 transceiver
 - LoRa[®], FSK, GFSK, MSK, GMSK and OOK modulations (+ Sigfox[™] compatibility)
 - +14 dBm or +20 dBm selectable output power
 - 157 dB maximum link budget
 - Programmable bit rate up to 300 kbit/s
 - High sensitivity: down to -137 dBm
 - Bullet-proof front end: IIP3 = -12.5 dBm
 - 89 dB blocking immunity
 - Low RX current of 10 mA, 200 nA register retention
 - Fully integrated synthesizer with a resolution of 61 Hz
 - Built-in bit synchronizer for clock recovery
 - Sync word recognition
 - Preamble detection
 - 127 dB+ dynamic range RSSI
- Including 50 ohm SMA RF antenna
- 1 user and reset push-buttons
- Board connectors:
 - USB FS connector
 - SMA and U.FL RF
- Board expansion connectors:
 - Arduino[™] Uno V3
- 7 LEDs:
 - 4 general-purpose LEDs
 - 5 V-power LED
 - ST-LINK-communication LED
 - Fault-power LED
- Flexible power-supply options: ST-LINK USB V_{BUS} or external sources

- On-board ST-LINK/V2-1 debugger/programmer with USB re-enumeration capability: mass storage, virtual COM port and debug port
- Comprehensive free software libraries and examples available with the STM32Cube package
- Support of a wide choice of Integrated Development Environments (IDES) including IAR™, Keil®, GCC-based IDEs, Arm® Mbed™^(a)
- Arm® Mbed Enabled™ compliant

2 Product marking

Evaluation tools marked as "ES" or "E" are not yet qualified and are therefore not ready to be used as reference designs or in production. Any consequences arising from such usage will not be at ST's charge. In no event will ST be liable for any customer usage of these engineering sample tools as reference designs or in production.

"E" or "ES" marking examples of location:

- On the targeted microcontroller that is soldered on the board (for illustration of microcontroller marking, refer to the section "Package information" of the microcontroller datasheet at www.st.com).
- Next to the evaluation tool ordering part number, that is stuck or silkscreen printed on the board

3 Conventions

Table 1 provides the definition of some conventions used in the present document.

Table 1. ON/OFF conventions

Convention	Definition
Jumper JPx ON	Jumper fitted
Jumper JPx OFF	Jumper not fitted
Solder bridge SBx ON	SBx connections closed by solder
Solder bridge SBx OFF	SBx connections left open

a. Arm and Mbed are registered trademarks or trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.

4 System requirements

- Windows® OS (7, 8 and 10), Linux® 64-bit or macOS®(a)
- USB Type-A to Micro-B cable

5 Development toolchains

- Keil® MDK-ARM(b)
- IAR™ EWARM(b)
- GCC-based IDEs including free SW4STM32 from AC6
- Arm® Mbed Enabled™ online (see <http://mbed.org>)

6 Demonstration software

The demonstration software, included in the STM32Cube package, is preloaded in the STM32 Flash memory for easy demonstration of the device peripherals in standalone mode. The latest versions of the demonstration source code and associated documentation can be downloaded from the www.st.com/i-cube-lrwan webpage.

7 Ordering and product information

Before installing and using the product, accept the Evaluation Product License Agreement at the www.st.com/stm32app-discovery webpage.

For more information on the STM32L072 Discovery kit visit the www.st.com/stm32app-discovery webpage.

To order the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit refer to [Table 2](#).

Table 2. Ordering information

Order code	Target STM32
B-L072Z-LRWAN1	STM32L072CZ

a. macOS® is a trademark of Apple Inc., registered in the U.S. and other countries.

b. On Windows® only.

8 Hardware layout and configuration

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit has been designed around the Murata LoRa®/Sigfox™ module including the STM32L072CZ microcontroller in a 49-pin WLCSP package.

Figure 2 illustrates the connection between the Murata LoRa®/Sigfox™ module and the peripherals (ST-LINK/V2, RF Antenna, LEDs, push-buttons, USB 2.0 FS Micro-B connector, 3xAAA battery holder).

Figure 3 and Figure 4 help users to locate these features on the STM32L072 Discovery kit.

Figure 2. Hardware block diagram

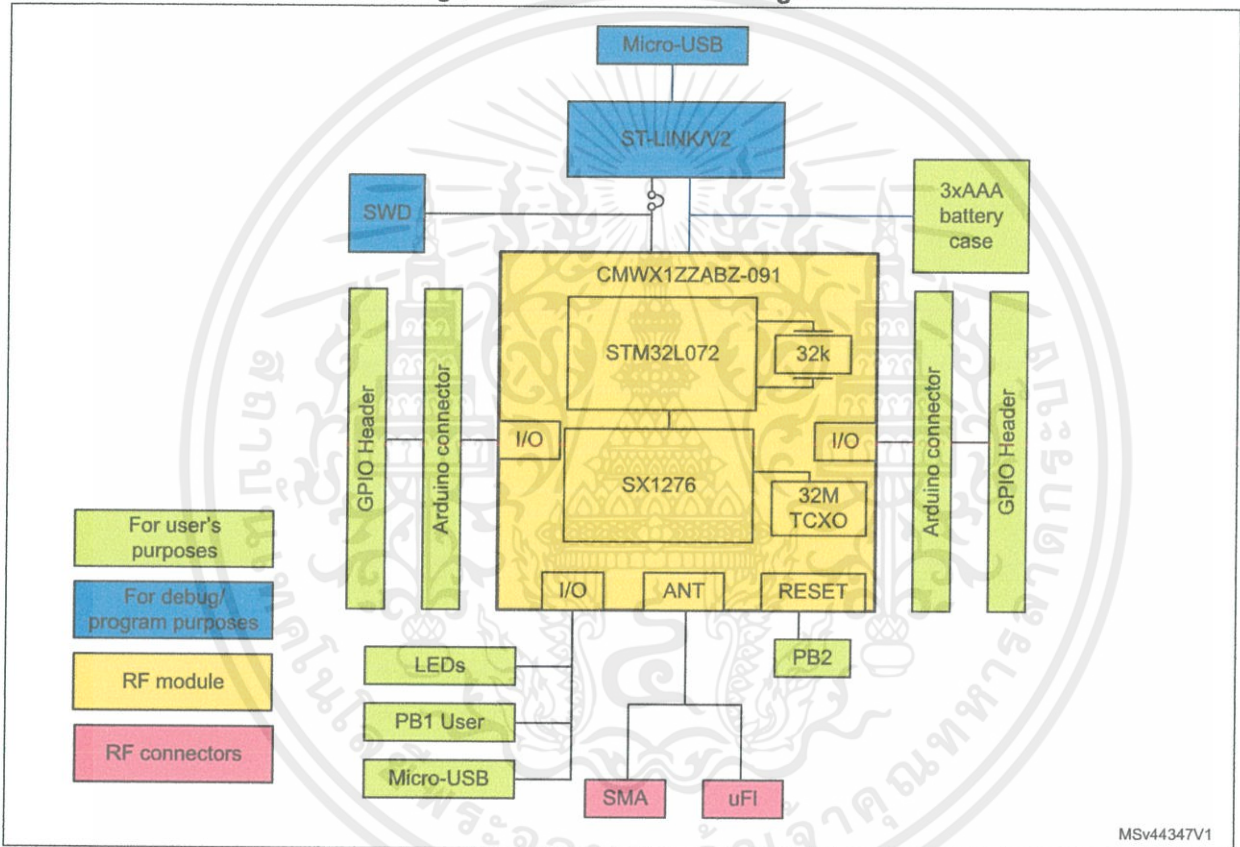


Figure 3. B-L072Z-LRWAN1 top layout

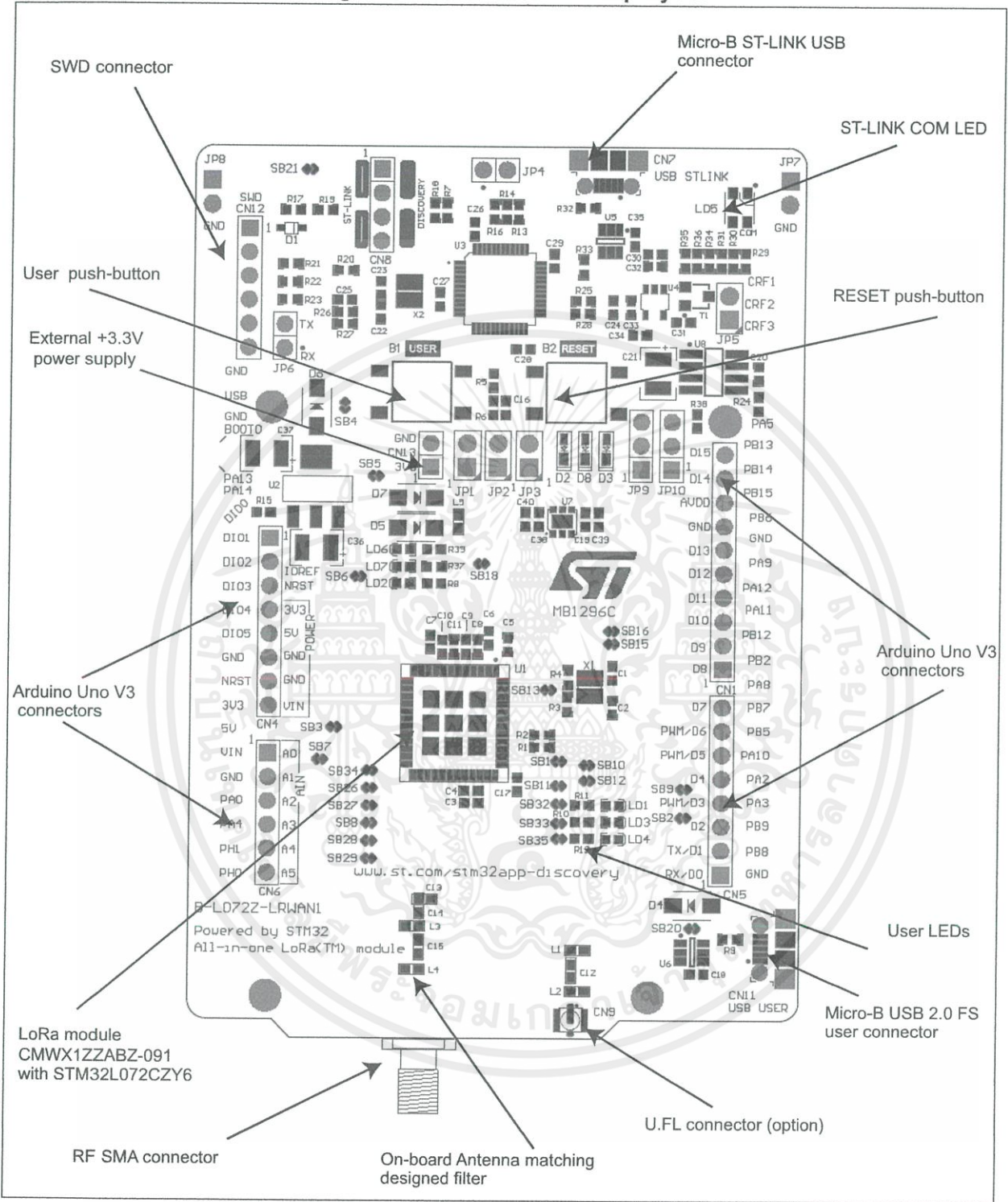
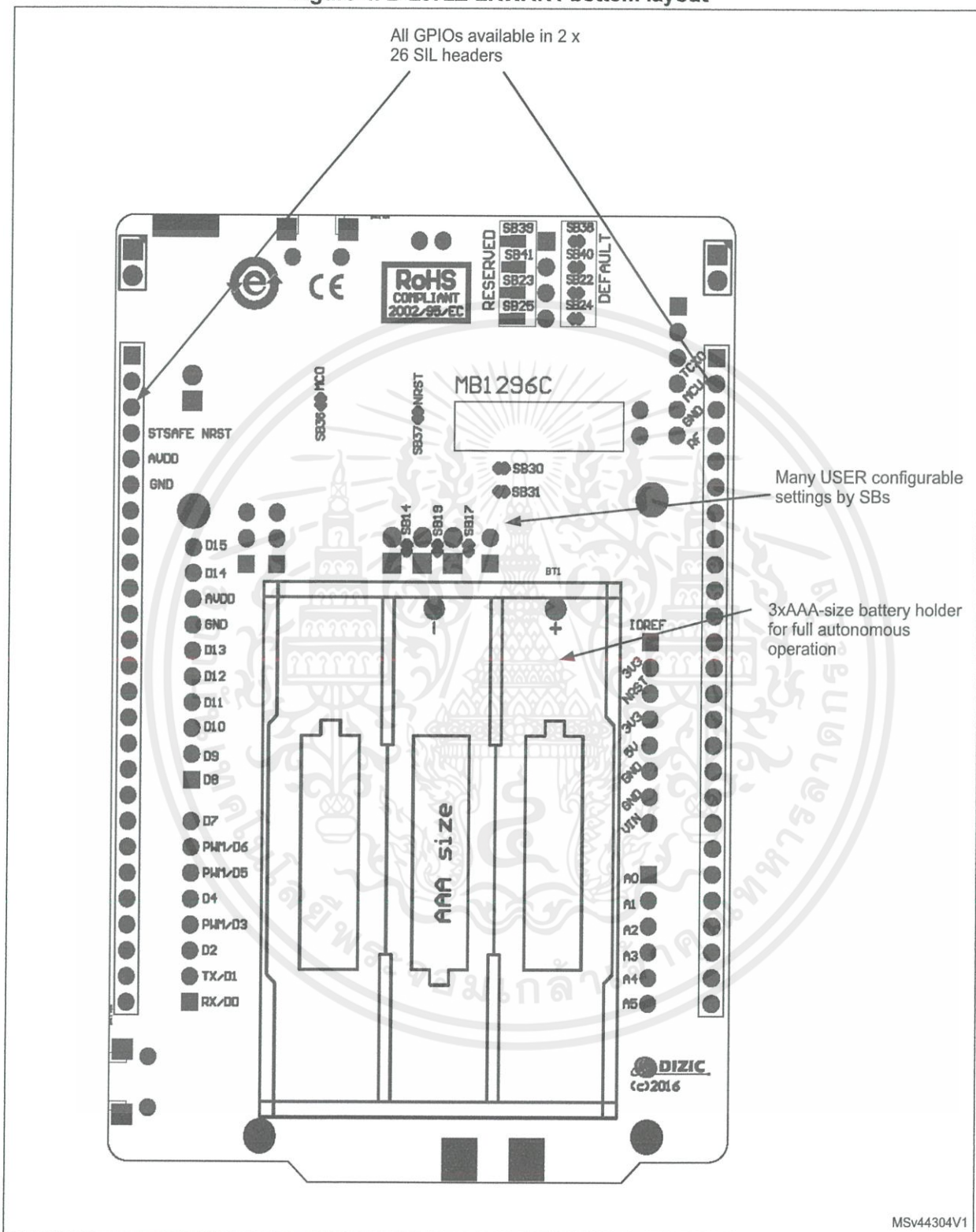
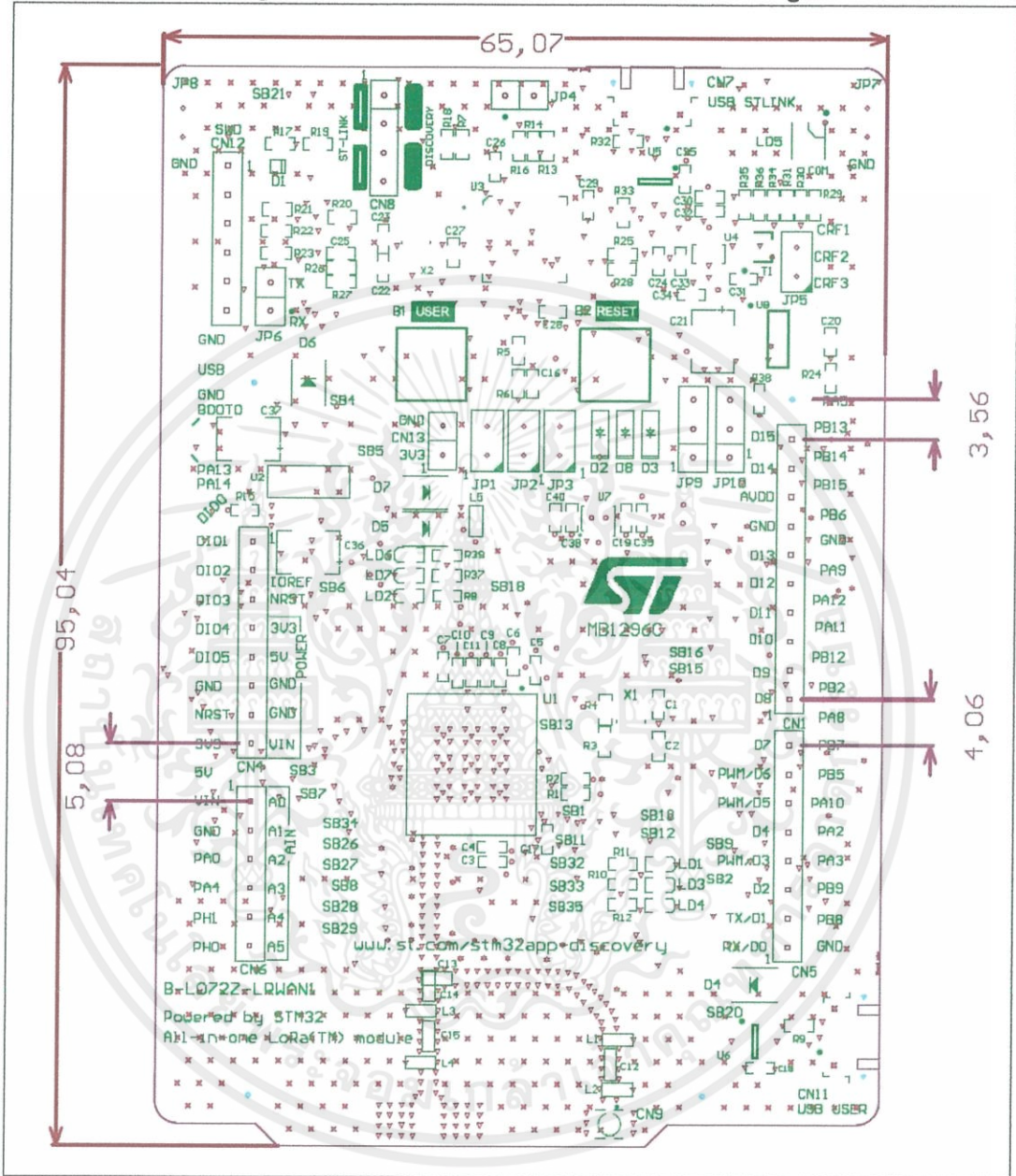


Figure 4. B-L072Z-LRWAN1 bottom layout



8.1 B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit mechanical drawing

Figure 5. B-L072Z-LRWAN1 mechanical drawing



1. Plastic spacer height = 14 mm, overall height = 22 mm +/- 1 mm.
2. The overall dimensions of the B-L072Z-LRWAN1 is 106 x 65,07 mm including antenna and USB connectors.

8.2 Embedded ST-LINK/V2-1

The ST-LINK/V2-1 programming and debugging tool is integrated on the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit. Compared to ST-LINK/V2 the changes are listed below.

The new features supported on ST-LINK/V2-1 are:

- USB software re-enumeration
- Virtual COM port interface on USB
- Mass storage interface on USB
- USB power management request for more than 100mA power on USB

These features are no more supported on ST-LINK/V2-1:

- SWIM interface
- Application voltage lower than 3 V

For general information concerning the debugging and programming features that are common to both versions V2 and V2-1, refer to *ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32 User manual (UM1075)*.

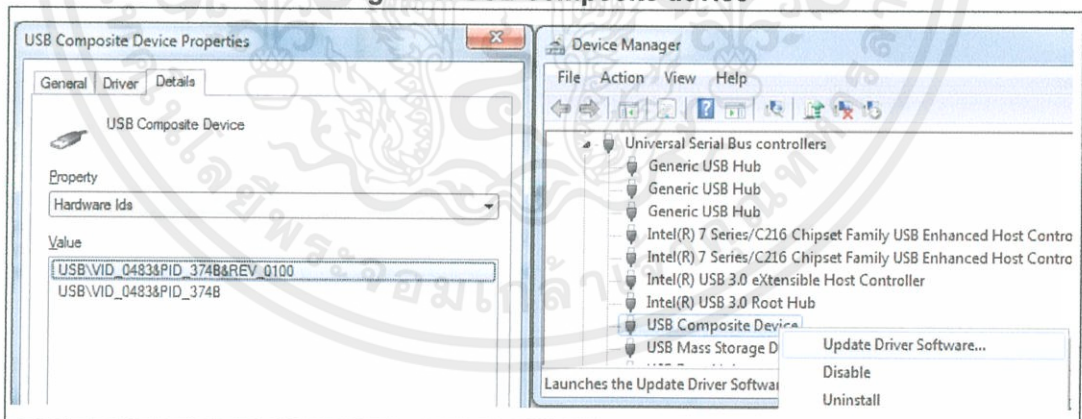
8.2.1 Drivers

The ST-LINK/V2-1 requires a dedicated USB driver, which, for Windows® 7, 8 and 10 is available at the www.st.com website.

In case the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit is connected to the PC before the driver is installed, some B-L072Z-LRWAN1 interfaces may be declared as "unknown" in the PC device manager. In this case the user must install the driver files and update the driver of the connected device from the device manager.

Note: Prefer using the "USB Composite Device" handle for a full recovery.

Figure 6. USB composite device



8.2.2 ST-LINK/V2-1 firmware upgrade

The ST-LINK/V2-1 embeds a firmware upgrade mechanism for in-situ upgrade through the USB port. As the firmware may evolve during the life time of the ST-LINK/V2-1 product (for example new functionalities, bug fixes, support for new microcontroller families), it is recommended to visit the www.st.com website before starting to use the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit and periodically, to stay up-to-date with the latest firmware version.

8.3 Power supply

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit is designed to be powered in various ways. It can be simply plugged on a USB PC port with a Micro-B USB cable. In this mode, the board is programmed and debugged via the ST-LINK/V2-1 USB port on CN7. It is possible to use one of the different following sources:

- External +3.3 V connected to CN13 (+3.3 V and GND pins of CN13 must be connected).
- 7-12 V DC power supply plugged on Arduino™ Uno V3 connectors: VIN on pin 8 and GND on pin 7 of CN4 (VIN and GND pins must be both connected)
- USB 2.0 FS Micro-B on CN11 connector (Device mode). The power supply is provided by the USB port connected to CN11.
- On-board 3xAAA-sized battery holder BT1 located on the bottom side of the Discovery kit (batteries are not delivered inside the Discovery kit package). Respect the battery polarities mentioned in the battery case.
- 5V_ST_LINK DC power with limitation from ST-LINK USB connector. The USB type Micro-B connector CN7 of ST-LINK/V2-1. If the USB enumeration succeeds (as explained below), the ST-LINK 5 V link power is enabled, by asserting the PWR_ENn signal. This pin is connected to a power switch ST890, which powers the board. This power switch features also a current limitation to protect the PC in case of a short-circuit on board (more than 625mA). The Discovery kit can be powered from the ST-LINK USB connector, but only the ST-LINK circuit has the power before USB enumeration, because the host PC only provides 100 mA to the board at that time. During the USB enumeration, the Discovery kit requires 300 mA power from the host PC. If the host is able to provide the required power, the enumeration finishes by a "SetConfiguration" command and then, the power transistor ST890 is switched ON, the red LED LD7 is turned ON, thus the Discovery kit can consume maximum 300 mA current, but no more. If the host is not able to provide the requested current, the enumeration fails. Therefore the ST890 remains OFF and the STM32 part including the extension board is not powered. As a consequence the red LED LD7 remains turned OFF. In this case it is mandatory to use an external power supply.

To further decrease the current consumption of the board, the LED7 must be disconnected by opening SB18.

Users do not have to manage the different configurations with jumpers or switches. The power supplies are internally managed by a set of diodes on the respective power supply branches.

If the board is supplied by CN13, by battery or by CN11, SB37 must be removed to release the RESET pin managed by ST-LINK. In that case the ST-LINK is no more powered.

The red LED LD7 (+5 V power supply) is turned on (with SB18 ON) as soon as one of the power sources listed above is present.

Note: *The Discovery kit must be powered by a power supply unit or by an auxiliary equipment complying with the standard EN-60950-1: 2006+A11/2009, and must be Safety Extra Low Voltage (SELV) with limited power capability.*

8.4 IDD measurements

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit power consumption is measured by mean of three connectors (not fitted initially) JP1, JP2 and JP3. These three connectors are respectively connected to the power-supply inputs VDD_RF_LRA, VDD_USB_LRA and VDD_MCU_LRA of the LoRa[®]/Sigfox[™] module. The purpose is to monitor separately the different power consumptions by branches which are divided in three sections: RF, USB and MCU. To be able to insert a multimeter in each branch where the measurements must take place, users have to remove the associated solder bridge that initially shortcut the JPx connectors in the default configuration.

The [Table 3](#) below summarizes the possible configurations:

Table 3. IDD measurements and solder-bridge settings

Jumper name	Status	IDD Measurement
JP1 VDD_RF_LRA	SB17 ON (default)	N/A
	SB17 OFF	IDD VDD_RF_LRA
JP2 VDD_USB_LRA	SB19 ON (default)	N/A
	SB19 OFF	IDD VDD_USB_LRA
JP3 VDD_MCU_LRA	SB14 ON (default)	N/A
	SB14 OFF	IDD VDD_MCU_LRA

8.5 Clock sources

The Murata LoRa[®]/Sigfox[™] module embeds its own TCXO running at 32 MHz when enabled.

The TCXO is either controlled by the STM32 pin PA12 (when pin 1 of JP9 is connected to pin 2 of JP9) or always enabled (when pin 2 of JP9 is connected to pin 3 of JP9). For the description of the jumpers refer to [Table 10](#).

When an accurate external-high-speed clock is needed by the STM32, the TCXO_OUT clock pin is supplied by the module pin PH0_OSC_IN by closing SB13.

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit can be equipped, if needed, with an external crystal oscillator. An 8 MHz oscillator with 20 pF capacitors can be added on the board (X1, C1 and C2 are not fitted by default) for user needs.

8.6 Reset sources

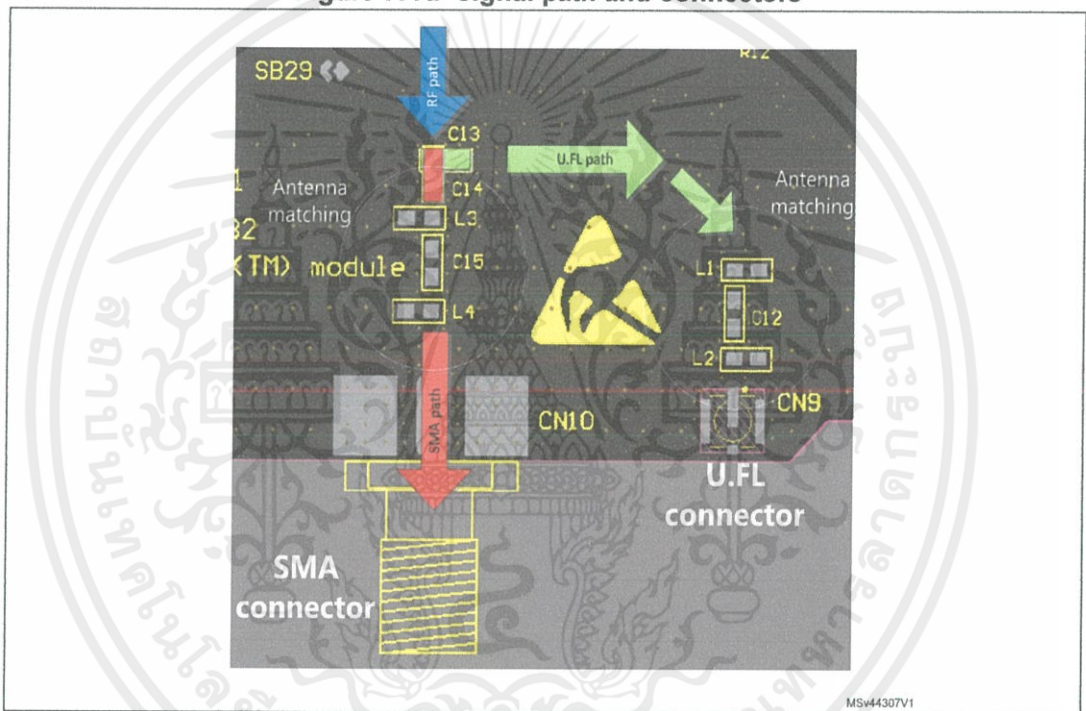
The reset signal of the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit is active low and the reset sources is one of the following:

- Reset button B2
- Arduino Uno V3 shield board from CN4
- LoRa[®]/Sigfox[™] module internal reset coming either from STSAFE security IC or STM32L072CZ (selectable by jumper JP10)
- Embedded ST-LINK/V2-1

8.7 Antenna and RF connection

The B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit includes a stubby straight 900 MHz 50 ohm antenna that must be connected to the SMA connector CN10 for any RF communication purpose. There are two paths designed for RF signal (the blue arrow in the *Figure 7*), the default path is connected to the SMA connector output (the red arrow in the *Figure 7*) and the second one is U.FL CN9 connector (the green arrow in the *Figure 7*). Each RF signal path includes an antenna matching circuitry that can be mounted and adjusted by advanced users. Initially, the default path connects the LoRa®/Sigfox™ module RF signal to the SMA connector through 0 Ohm resistors that are fitted at the location of C14 and C15. Notice that C13 and C14, as shown below in *Figure 7*, have a common pad on layout from antenna circuitry. If the users want to connect the U.FL connector instead of the SMA, they need to redirect the RF signal through C13 and then rotate the component on the expected footprint.

Figure 7. RF signal path and connectors



8.8 Virtual COM port

The serial interface USART2 is directly available as a virtual COM port of the PC, connected to the ST-LINK/V2-1 USB connector CN7. For configuration details refer to the *STM32 LoRa® software expansion for STM32Cube user manual (UM2073)* and to the *Sigfox™ software expansion for STM32Cube user manual (UM2245)*.

8.9 Buttons and LEDs

The black button B2 located at the top side of the Discovery kit, is the reset of the microcontroller STM32L072CZ.

The blue button B1 located at the top side is available to be used as a digital input or as a wakeup-alternate function. When the button is depressed the logic state is 1, otherwise the logic state is 0.

By default the user button is connected to PB2, it can also be connected to PA0 as wakeup source. In this case, SB31 must be removed and SB30 must be fitted.

Seven LEDs located at the top side are available, four of which are general purpose LEDs for user needs. To light a LED write a high-logic state 1 in the corresponding GPIO register. [Table 4](#) shows the assignment of the control ports to the LED indicators.

Table 4. Assignment of the control ports

Reference	Color	Name	Comment/function
B1	Blue	USER	Alternate function wakeup
B2	Black	RESET	Microcontroller reset
LD1	Green	GP	User defined
LD2	Green	GP	User defined
LD3	Blue	GP	User defined
LD4	Red	GP	User defined
LD5	Red/Green	ST-LINK COM	Green when communication
LD6	Red	Fault power	Current upper than 625mA
LD7	Red	5 V Power	5 V present

8.10 USB FS

The B-L072Z-LRWAN1 board supports USB FS 2.0 communication via a USB Micro-B connector. V_{BUS} is powered by another USB host when B-L072Z-LRWAN1 board works as a USB device.

Note: When the B-L072Z-LRWAN1 board is powered by an external power supply through USB FS connector (CN11), in device mode, do not use a PC as power source if the current consumption is greater than 100 mA, otherwise the PC can be damaged.

Table 5. Arduino Uno V3 connectors (continued)

Connector	Pin	Pin name	STM32 Pin	Function
CN6	1	A0	PA0	ADC_IN0
	2	A1	NC or PA0	NC or ADC_IN0
	3	A2	PA4	ADC_IN4
	4	A3	NC or PA4	NC or ADC_IN4
	5	A4	PH1 or PB9	OSC_IN or I2C1_SDA
	6	A5	PH0 or PB8	OSC_OUT or I2C1_SCL



9.2 B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit CN2 and CN3 connectors

Table 6. Connector CN2

Connector	Pin	Pin name	STM32 Pin	Function
CN2	1	TCXO_VCC	-	LoRa®/Sigfox™ module TCXO power
	2	VDD_MCU_LRA	-	MCU section power supply
	3	GND	-	Ground
	4	VDD_RF_LRA	-	MCU section power supply
	5	GND	-	Ground
	6	VDD_USB_LRA	-	MCU section power supply
	7	GND	-	Ground
	8	BOOT0	BOOT0	BOOT0
	9	PA13	PA13	SWDIO
	10	PA14	PA14	SWCLK
	11	SX1276_DIO0	-	LoRa®/Sigfox™ module debug pin
	12	SX1276_DIO1	-	LoRa®/Sigfox™ module debug pin
	13	SX1276_DIO2	-	LoRa®/Sigfox™ module debug pin
	14	SX1276_DIO3	-	LoRa®/Sigfox™ module debug pin
	15	SX1276_DIO4	-	LoRa®/Sigfox™ module debug pin
	16	SX1276_DIO5	-	LoRa®/Sigfox™ module debug pin
	17	GND	-	Ground
	18	MCU_nRST	NRST	RESET
	19	+3.3 V	-	+3.3 V power supply input/output
	20	+5 V	-	+5 V power supply input
	21	VIN	-	VIN power supply input (7-12Vdc)
	22	GND	-	Ground
	23	PA0	PA0	ADC_IN0
	24	PA4	PA4	ADC_IN4
	25	PH1	PH1	OSC_OUT
	26	PH0	PH0	OSC_IN

Table 7. Connector CN3

Connector	Pin	Pin name	STM32 Pin	Function
CN3	1	CRF1	PA1	LoRa [®] /Sigfox [™] module dedicated pin
	2	CRF2	PC2	LoRa [®] /Sigfox [™] module dedicated pin
	3	CRF3	PC1	LoRa [®] /Sigfox [™] module dedicated pin
	4	STSAFE_nRST	-	STSAFE security IC reset pin
	5	AVDD	VREF+	VREF+
	6	GND	-	Ground
	7	PA5	PA5	ADC_IN5
	8	PB13	PB13	SPI2_SCK
	9	PB14	PB14	SPI2_MISO
	10	PB15	PB15	SPI2_MOSI
	11	PB6	PB6	LPTIM1_ETR
	12	GND	-	Ground
	13	PA9	PA9	USART1_TX
	14	PA12	PA12	USB_DP
	15	PA11	PA11	USB_DM
	16	PB12	PB12	SPI2_NSS
	17	PB2	PB2	LPTIM1_OUT
	18	PA8	PA8	MCO
	19	PB7	PB7	LPTIM1_IN2
	20	PB5	PB5	LPTIM1_IN1
	21	PA10	PA10	USART1_RX
	22	PA2	PA2	ADC_IN2
	23	PA3	PA3	ADC_IN3
	24	PB9	PB9	I2C1_SDA
	25	PB8	PB8	I2C1_SCL
	26	GND	-	Ground

9.3 Other connectors

9.3.1 Debug connector SWD

Table 8. Debug connector SWD (CN12)

Connector	Pin	Pin name	Function
CN12	1	VDD_TARGET	VDD from application
	2	SWCLK	SWD clock
	3	GND	Ground
	4	SWDIO	SWD data input/output
	5	NRST	RESET of target MCU
	6	SWO	Reserved

9.3.2 SWD Interface

It is very easy to use ST-LINK/V2-1 to program an STM32 microcontroller on an external application. Simply remove the two jumpers from CN8 and connect the application to the CN12 debug connector according to [Table 8](#).

9.3.3 External +3.3 V

Table 9. External +3.3 V (CN13)

Connector	Pin	Pin name	Function
CN13	1	+3.3 V external	External +3.3 V power supply input
	2	GND	Ground

Caution: When using the external +3.3 V power supply input, SB6 must be OFF.

9.4 Description of the jumpers

Table 10. Description of the jumpers

Jumper	Pin number	Designation	Default state	Function
JP1	2	VDD_RF_LRA	OFF	Allows IDD VDD_RF_LRA measurement
JP2	2	VDD_USB_LRA	OFF	Allows IDD VDD_USB_LRA measurement
JP3	2	VDD_MCU_LRA	OFF	Allows IDD VDD_MCU_LRA measurement
JP5	2	USB charger	OFF	USB charger
JP7, JP8	2	GND	ON	Ground
JP6	2	ST-LINK TX/RX	OFF	ST-LINK TX/RX signals

Table 10. Description of the jumpers (continued)

Jumper	Pin number	Designation	Default state	Function
JP9	3	TCXO selection	2-3	Selection TCXO to VDD or external TCXO power
JP10	3	Reset source selection	1-2	Reset source selection between STSAFE or PA11

9.5 Configuration of the solder bridges

Refer to [Figure 8](#) and [Figure 9](#) to locate the solder bridges.

Table 11. Configuration of the solder bridges

Solder bridges	Designation	Default state	Function
SB19	Short VDD_USB_LRA	ON	Short VDD_USB_LRA connection
SB14	Short VDD_MCU_LRA	ON	Short VDD_MCU_LRA connection
SB17	Short VDD_RF_LRA	ON	Short VDD_RF_LRA connection
SB20	Short D4	OFF	D4 bypass
SB4	Short D6	OFF	D6 bypass
SB5	Short D7	OFF	D7 bypass
SB18	+5 V LED	ON	+5 V power supply ON
SB6	+3.3 V regulator output	ON	Used to disconnect internal +3.3 V regulator when external source applied on External 3.3 V pin
SB38, SB40, SB22, SB24	ST-LINK default	ON	Reserved
SB39, SB41, SB23, SB25	ST-LINK reserved	OFF	Reserved
SB37	ST-LINK RESET	ON	Connection between ST-LINK reset signal and LoRa [®] /Sigfox [™] module reset
SB36	ST-LINK MCO	OFF	Optional ST-LINK MCO redirected to LoRa [®] /Sigfox [™] module input clock OSC_IN
SB6	ST-LINK +5 V power	ON	Optional ST-LINK regulator disconnected from +5 V
SB21	ST-LINK force RESET	OFF	Reserved
SB26	PA5 to DIO4	OFF	Reserved to LoRa [®] /Sigfox [™] module debug
SB27	PA4 to DIO5	OFF	Reserved to LoRa [®] /Sigfox [™] module debug
SB28	ST-LINK TX	ON	Virtual COM port TX
SB29	ST-LINK RX	ON	Virtual COM port RX
SB15	LRA_USB_DP	OFF	Optional USB_DP connection
SB16	LRA_USB_DM	OFF	Optional USB_DM connection

Table 11. Configuration of the solder bridges (continued)

Solder bridges	Designation	Default state	Function
SB13	TCXO_OUT to OSC_IN	OFF	Allows connection of TXCO output to STM32L072CZY6 OSC_IN input
SB31	USER button PB2	ON	User push-button connected to PB2
SB30	USER button PA0	OFF	User push-button connected to PA0
SB32	LED LD1	ON	LD1 ON
SB33	LED LD3	ON	LD3 ON
SB35	LED LD4	ON	LD4 ON
SB34	LED LD2	ON	LD2 ON
SB10	PH1 Arduino	OFF	Connection A5(CN6) Arduino to PH1
SB3	PA5 Arduino	ON	Connection D13(CN1) Arduino to PA5
SB9	PB13 Arduino	ON	Connection D3(CN5) Arduino to PB13
SB2	PB13 Arduino	OFF	Connection D13(CN5) Arduino to PB13
SB7	PA0 alias Arduino	OFF	Connection A1(CN6) Arduino to PA0
SB8	PA4 alias Arduino	OFF	Connection A3(CN6) Arduino to PA4
SB11	PB9 Arduino	OFF	Connection A4(CN6) Arduino to PB9
SB12	PB8 Arduino	OFF	Connection A54(CN6) Arduino to PB8
SB1	PH0 Arduino	OFF	Connection A4(CN6) Arduino to PH0

Figure 8. B-L072Z-LRWAN1: location of the solder bridges (top view)

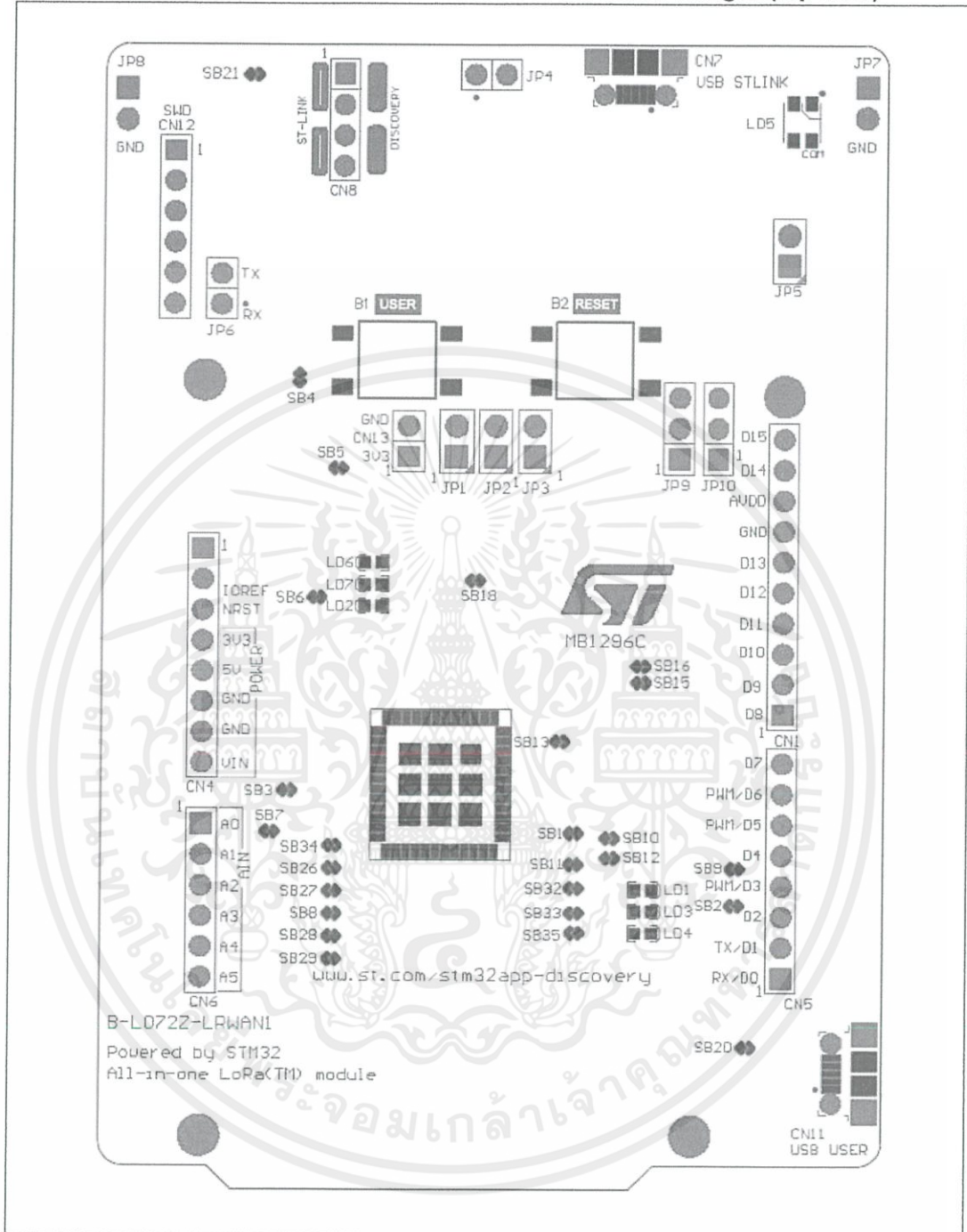


Figure 9. B-L072Z-LRWAN1: location of the solder bridges (bottom view)



10 B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit information

10.1 Identification

The sticker located on the bottom side of the PCB board shows the information about the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit identification such as board reference, revision and serial number. The format of the identification is the following:

- MBxxxx p-bb:
the board reference is MB1296, "p" corresponds to the PCB revision and "bb" to the BOM revision: for example A-01.
- yywwnnnnn:
"yy" are the two last digits of the manufacturing year, "ww" identifies the manufacturing week and "nnnnn" is the board serial number.

10.2 Board revision history

Revision C-01

The revision C-01 of the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit is the initial released version.

Revision D-01

The revision D-01 of the B-L072Z-LRWAN1 Discovery removes the limitations of the revision C-01.

Revision D-03

The revision D-03 of the B-L072Z-LRWAN1 Discovery changes the value of capacitor C24 from 100 nF to 20 pF. The component had a wrong value in previous revisions. Additionally, this C24 capacitor is now set to "Not fitted".

10.3 Known limitations

Revision C-01

The power current consumption on VDD_MCU_LRA and on VDD_USB_LRA cannot be measured as independent branches. To measure the total power consumption including the MCU LRA and the USB LRA currents, both SB14 and SB19 must be removed. A multimeter can be placed indifferently where JP2 or JP3 connectors are located. No workaround is available.

Revision D-01

All VDD_MCU_LRA, VDD_USB_LRA, VDD_RF_LRA branches can be measured separately.

Revision D-03

The value of capacitor C24 has been changed in order to allow the correct operation of MCO. This capacitor is not fitted by default but can be mounted later.

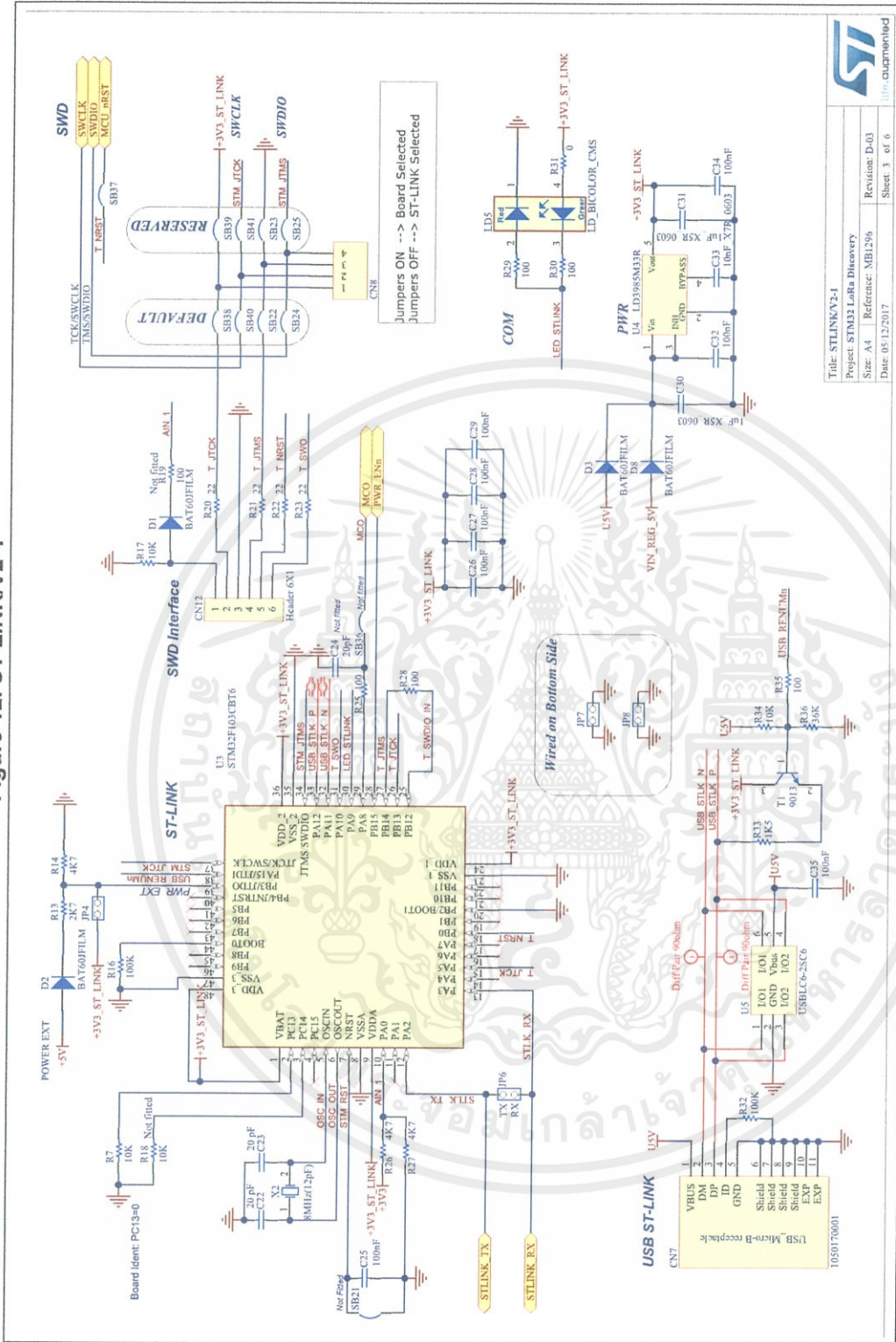
Appendix A Schematic diagrams

This section provides design schematics for the B-L072Z-LRWAN1 Discovery kit features:

- Top view of the Discovery kit, see [Figure 10](#)
- Internal/External Power Supply section, see [Figure 11](#)
- Embedded ST-LINK/V2-1, see [Figure 12](#)
- LoRa[®]/Sigfox[™] module connections, see [Figure 13](#)
- USB 2.0 FS antenna and miscellaneous features, see [Figure 14](#)
- Arduino Uno V3 extension connectors and headers, see [Figure 15](#)



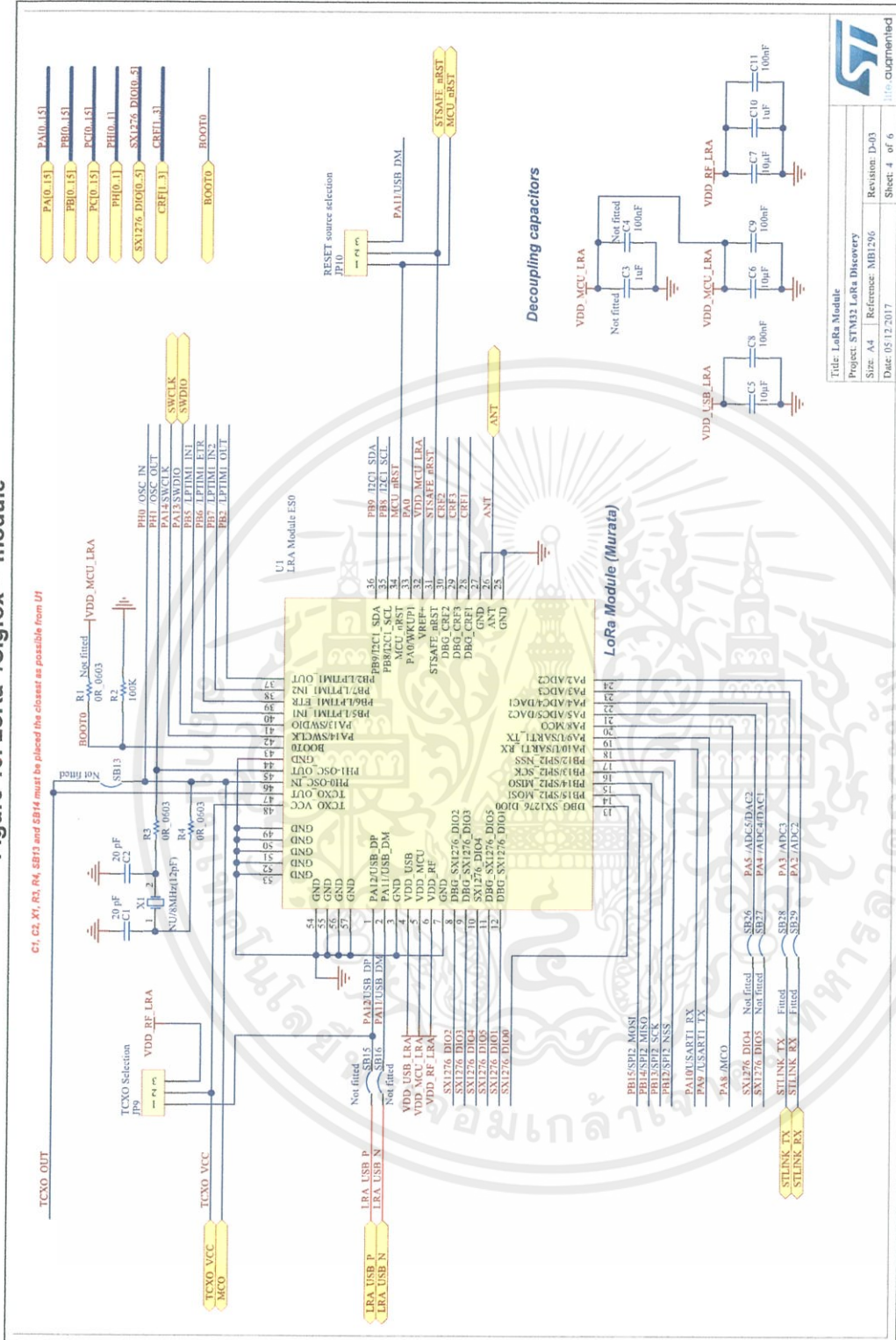
Figure 12. ST-LINK/V2-1



			
Title: ST-LINK/V2-1			
Project: STM32 LoRa Discovery			
Size: A4	Reference: MBI296	Revision: D-03	
Date: 05/12/2017	Sheet: 3	of 6	lib: augmented

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 13. LoRa®/Sigfox™ module

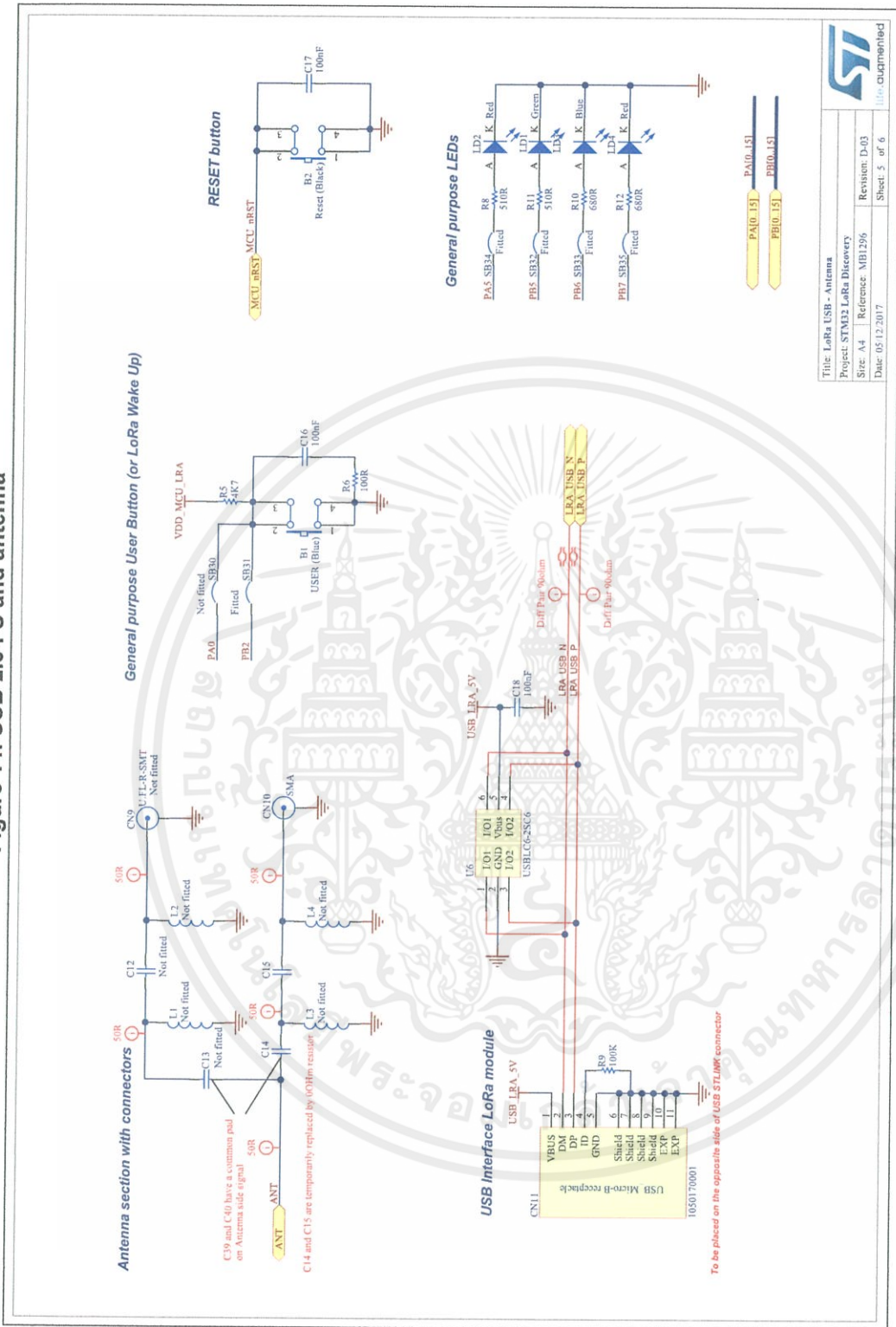


Title: LoRa Module
 Project: STM32 LoRa Discovery
 Size: A4 Reference: MB1296 Revision: D-03
 Date: 05/12/2017 Sheet: 4 of 6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 14. USB 2.0 FS and antenna



Title	LoRa USB - Antenna
Project	STM32 LoRa Discovery
Size	A4
Reference	MB1296
Revision	D-03
Date	05/12/2017
Sheet	5 of 6
http://www.st.com	

Appendix B Federal Communications Commission (FCC), Industry Canada (IC) Compliance and other Certifications

B.1 FCC Compliance Statement

B.1.1 ANSI C63.4 (2014) American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz

- FCC CFR 47, PART 15, Subpart B
- Industry Canada ICES-003 (Information Technology Equipment (ITE)) — Limits and methods of measurement. Issue 6 (2016)
- FCC Part 15 compliance statement

This device complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) This device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation. This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, pursuant to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates, uses, radiates radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instruction, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation. If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct interference by one or more of the following measures:

- Reorient or relocate the receiving antenna.
- Increase the separation between the equipment and receiver.
- Connect the equipment into an outlet on circuit different from that to which the receiver is connected.
- Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.

B.2 IC Compliance Statement

B.2.1 Industry Canada Licence-Exempt Radio Apparatus

This device complies with Industry Canada licence-exempt RSS standard(s). Operation is subject to the following two conditions: (1) this device may not cause interference, and (2) this device must accept any interference, including interference that may cause undesired operation of the device.

Le présent appareil est conforme aux CNR d'Industrie Canada applicables aux appareils radio exempts de licence.

L'exploitation est autorisée aux deux conditions suivantes : (1) l'appareil ne doit pas produire de brouillage, et (2) l'utilisateur de l'appareil doit accepter tout brouillage radioélectrique subi, même si le brouillage est susceptible d'en compromettre le fonctionnement.



B.2.2 Radio Frequency (RF) Exposure Compliance of Radiocommunication Apparatus

To satisfy FCC and IC RF Exposure requirements for mobile devices, a separation distance of 20 cm or more should be maintained between the antenna of this device and persons during operation. To ensure compliance, operation at closer than this distance is not recommended. This transmitter must not be co-located or operating in conjunction with any other antenna or transmitter.

Pour satisfaire aux exigences FCC et IC concernant l'exposition aux champs RF pour les appareils mobiles, une distance de séparation de 20 cm ou plus doit être maintenue entre l'antenne de ce dispositif et les personnes pendant le fonctionnement. Pour assurer la conformité, il est déconseillé d'utiliser cet équipement à une distance inférieure. Cet émetteur ne doit pas être co-situé ou fonctionner conjointement avec une autre antenne ou un autre émetteur.

Measures and tests performed on the sample of the product B-L072Z-LRWAN1, show compliance with standards FCC CFR 47, PART 15, Subpart B and ICES-003.

B.3 Other certifications

B.3.1 EN 55032 (2012) / EN 55024 (2010) ETSI EN 301 489-1 (v1.9.2) / ETSI EN 301 489-3 (v1.6.1) EN 60950-1 (2006+A11/2009+A1/2010+A12/2011+A2/2013) CFR 47, FCC Part 15, Subpart B (Class B Digital Device) and Industry Canada ICES-003 (Issue 6/2016)

The sample examined is in conformance with the requirements of above standards.

Note: The sample examined shall be powered by a power supply unit or auxiliary equipment complying with standard:

EN 60950-1: 2006+A11/2009+A1/2010+A12/2011+A2/2013, and shall be Safety Extra Low Voltage (SELV) with limited power capability.

B.3.2 Electrical Safety qualification for CE marking: EN 60950-1 (2006+A11/2009+A1/2010+A12/2011+A2/2013) IEC 60650-1 (2005+A1/2009+A2/2013)

The appliance complies with requirements of above mentioned standards.

B.3.3 EMC qualification accordingly to standard CFR 47, FCC Part 15, Subpart B & Industry Canada ICES-003 (Issue 6/2016) Class B Digital Device

The appliance complies with requirements of above mentioned standards.

B.3.4 CE qualification according to standards: ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012) / V3.1.1 (2017) ETSI EN 300 220-2 V2.4.1 (2012) / V3.1.1 (2017) RF Module already certified – Partial test only

The appliance complies with requirements of above mentioned standards.

Revision history

Table 12. Document revision history

Date	Revision	Changes
14-Feb-2017	1	Initial version.
26-Sep-2017	2	Added <i>Section Appendix A: Schematic diagrams</i> . Updated <i>Section 10.2: Board revision history</i> and <i>Section 10.3: Known limitations</i> . Updated <i>Section Appendix A: Schematic diagrams</i> with Rev. D board schematics.
16-Jan-2018	3	Updated <i>Section 10.2: Board revision history</i> , <i>Section 10.3: Known limitations</i> and <i>Appendix A: Schematic diagrams</i> with revision D-03. Updated <i>Section 10.3: Known limitations</i> for revision D-01.
31-Jan-2018	4	Extended the document scope to Sigfox™: – Updated <i>Introduction</i> and <i>Figure 1</i> – Updated <i>Chapter 1: Features</i> – Updated <i>Section 8.8: Virtual COM port</i> – Replaced 'LoRa® module' occurrences with 'LoRa®/Sigfox™ module'
29-Jun-2018	5	Updated <i>Chapter 1: Features</i> with frequency range.



IMPORTANT NOTICE – PLEASE READ CAREFULLY

STMicroelectronics NV and its subsidiaries (“ST”) reserve the right to make changes, corrections, enhancements, modifications, and improvements to ST products and/or to this document at any time without notice. Purchasers should obtain the latest relevant information on ST products before placing orders. ST products are sold pursuant to ST’s terms and conditions of sale in place at the time of order acknowledgement.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection, and use of ST products and ST assumes no liability for application assistance or the design of Purchasers’ products.

No license, express or implied, to any intellectual property right is granted by ST herein.

Resale of ST products with provisions different from the information set forth herein shall void any warranty granted by ST for such product.

ST and the ST logo are trademarks of ST. All other product or service names are the property of their respective owners.

Information in this document supersedes and replaces information previously supplied in any prior versions of this document.

© 2018 STMicroelectronics – All rights reserved

ESP32-WROOM-32

Datasheet



Version 2.8
Espressif Systems
Copyright © 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www.espressif.com

About This Document

This document provides the specifications for the ESP32-WROOM-32 module.

Revision History

For revision history of this document, please refer to the [last page](#).

Documentation Change Notification

Espressif provides email notifications to keep customers updated on changes to technical documentation. Please subscribe at www.espressif.com/en/subscribe.

Certification

Download certificates for Espressif products from www.espressif.com/en/certificates.

Disclaimer and Copyright Notice

Information in this document, including URL references, is subject to change without notice. THIS DOCUMENT IS PROVIDED AS IS WITH NO WARRANTIES WHATSOEVER, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY, NON-INFRINGEMENT, FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, OR ANY WARRANTY OTHERWISE ARISING OUT OF ANY PROPOSAL, SPECIFICATION OR SAMPLE.

All liability, including liability for infringement of any proprietary rights, relating to use of information in this document is disclaimed. No licenses express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights are granted herein. The Wi-Fi Alliance Member logo is a trademark of the Wi-Fi Alliance. The Bluetooth logo is a registered trademark of Bluetooth SIG.

All trade names, trademarks and registered trademarks mentioned in this document are property of their respective owners, and are hereby acknowledged.

Copyright © 2019 Espressif Inc. All rights reserved.

Contents

1 Overview	1
2 Pin Definitions	3
2.1 Pin Layout	3
2.2 Pin Description	3
2.3 Strapping Pins	4
3 Functional Description	6
3.1 CPU and Internal Memory	6
3.2 External Flash and SRAM	6
3.3 Crystal Oscillators	6
3.4 RTC and Low-Power Management	7
4 Peripherals and Sensors	8
5 Electrical Characteristics	9
5.1 Absolute Maximum Ratings	9
5.2 Recommended Operating Conditions	9
5.3 DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)	9
5.4 Wi-Fi Radio	10
5.5 BLE Radio	11
5.5.1 Receiver	11
5.5.2 Transmitter	11
5.6 Reflow Profile	12
6 Schematics	13
7 Peripheral Schematics	14
8 Physical Dimensions	16
9 Recommended PCB Land Pattern	17
10 Learning Resources	18
10.1 Must-Read Documents	18
10.2 Must-Have Resources	18
Revision History	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

List of Tables

1	ESP32-WROOM-32 Specifications	1
2	Pin Definitions	3
3	Strapping Pins	5
4	Absolute Maximum Ratings	9
5	Recommended Operating Conditions	9
6	DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)	9
7	Wi-Fi Radio Characteristics	10
8	Receiver Characteristics – BLE	11
9	Transmitter Characteristics – BLE	11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

List of Figures

1	ESP32-WROOM-32 Pin Layout (Top View)	3
2	Reflow Profile	12
3	ESP32-WROOM-32 Schematics	13
4	ESP32-WROOM-32 Peripheral Schematics	14
5	Discharge Circuit for VDD33 Rail	14
6	Reset Circuit	15
7	Physical Dimensions of ESP32-WROOM-32	16
8	Recommended PCB Land Pattern	17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Overview

ESP32-WROOM-32 is a powerful, generic Wi-Fi+BT+BLE MCU module that targets a wide variety of applications, ranging from low-power sensor networks to the most demanding tasks, such as voice encoding, music streaming and MP3 decoding.

At the core of this module is the ESP32-D0WDQ6 chip*. The chip embedded is designed to be scalable and adaptive. There are two CPU cores that can be individually controlled, and the CPU clock frequency is adjustable from 80 MHz to 240 MHz. The user may also power off the CPU and make use of the low-power co-processor to constantly monitor the peripherals for changes or crossing of thresholds. ESP32 integrates a rich set of peripherals, ranging from capacitive touch sensors, Hall sensors, SD card interface, Ethernet, high-speed SPI, UART, I²S and I²C.

Note:

* For details on the part numbers of the ESP32 family of chips, please refer to the document [ESP32 Datasheet](#).

The integration of Bluetooth, Bluetooth LE and Wi-Fi ensures that a wide range of applications can be targeted, and that the module is all-around: using Wi-Fi allows a large physical range and direct connection to the Internet through a Wi-Fi router, while using Bluetooth allows the user to conveniently connect to the phone or broadcast low energy beacons for its detection. The sleep current of the ESP32 chip is less than 5 μ A, making it suitable for battery powered and wearable electronics applications. The module supports a data rate of up to 150 Mbps, and 20 dBm output power at the antenna to ensure the widest physical range. As such the module does offer industry-leading specifications and the best performance for electronic integration, range, power consumption, and connectivity.

The operating system chosen for ESP32 is freeRTOS with LwIP; TLS 1.2 with hardware acceleration is built in as well. Secure (encrypted) over the air (OTA) upgrade is also supported, so that users can upgrade their products even after their release, at minimum cost and effort.

Table 1 provides the specifications of ESP32-WROOM-32.

Table 1: ESP32-WROOM-32 Specifications

Categories	Items	Specifications
Certification	RF certification	FCC/CE-RED/IC/TELEC/KCC/SRRC/NCC
	Wi-Fi certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS/REACH
Test	Reliability	HTOL/HTSL/uHAST/TCT/ESD
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
		A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μ s guard interval support
	Frequency range	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity
		Class-1, class-2 and class-3 transmitter
		AFH

Categories	Items	Specifications
	Audio	CVSD and SBC
Hardware	Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I ² C, LED PWM, Motor PWM, I ² S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC
	On-chip sensor	Hall sensor
	Integrated crystal	40 MHz crystal
	Integrated SPI flash	4 MB
	Operating voltage/Power supply	2.7 V ~ 3.6 V
	Operating current	Average: 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating temperature range	-40 °C ~ +85 °C
	Package size	(18.00±0.10) mm × (25.50±0.10) mm × (3.10±0.10) mm



2. Pin Definitions

2.1 Pin Layout

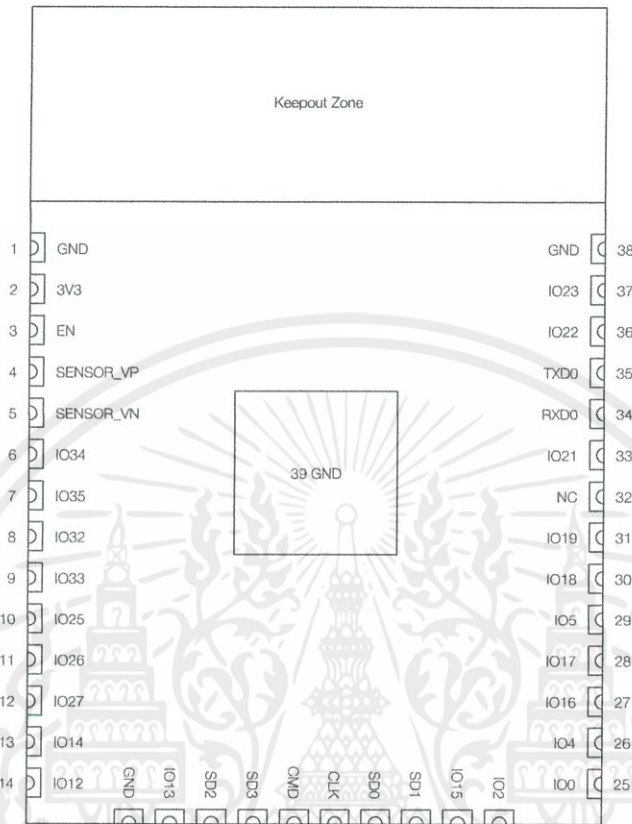


Figure 1: ESP32-WROOM-32 Pin Layout (Top View)

2.2 Pin Description

ESP32-WROOM-32 has 38 pins. See pin definitions in Table 2.

Table 2: Pin Definitions

Name	No.	Type	Function
GND	1	P	Ground
3V3	2	P	Power supply
EN	3	I	Module-enable signal. Active high.
SENSOR_VP	4	I	GPIO36, ADC1_CH0, RTC_GPIO0
SENSOR_VN	5	I	GPIO39, ADC1_CH3, RTC_GPIO3
IO34	6	I	GPIO34, ADC1_CH6, RTC_GPIO4
IO35	7	I	GPIO35, ADC1_CH7, RTC_GPIO5
IO32	8	I/O	GPIO32, XTAL_32K_P (32.768 kHz crystal oscillator input), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9
IO33	9	I/O	GPIO33, XTAL_32K_N (32.768 kHz crystal oscillator output), ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8

Name	No.	Type	Function
IO25	10	I/O	GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, EMAC_RXD0
IO26	11	I/O	GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, EMAC_RXD1
IO27	12	I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17, EMAC_RX_DV
IO14	13	I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK, HS2_CLK, SD_CLK, EMAC_TXD2
IO12	14	I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPIQ, HS2_DATA2, SD_DATA2, EMAC_TXD3
GND	15	P	Ground
IO13	16	I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, HS2_DATA3, SD_DATA3, EMAC_RX_ER
SHD/SD2*	17	I/O	GPIO9, SD_DATA2, SPIHD, HS1_DATA2, U1RXD
SWP/SD3*	18	I/O	GPIO10, SD_DATA3, SPIWP, HS1_DATA3, U1TXD
SCS/CMD*	19	I/O	GPIO11, SD_CMD, SPICS0, HS1_CMD, U1RTS
SCK/CLK*	20	I/O	GPIO6, SD_CLK, SPICLK, HS1_CLK, U1CTS
SDO/SD0*	21	I/O	GPIO7, SD_DATA0, SPIQ, HS1_DATA0, U2RTS
SDI/SD1*	22	I/O	GPIO8, SD_DATA1, SPID, HS1_DATA1, U2CTS
IO15	23	I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, MTDO, HSPICS0, RTC_GPIO13, HS2_CMD, SD_CMD, EMAC_RXD3
IO2	24	I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPIWP, HS2_DATA0, SD_DATA0
IO0	25	I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1, EMAC_TX_CLK
IO4	26	I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPID, HS2_DATA1, SD_DATA1, EMAC_TX_ER
IO16	27	I/O	GPIO16, HS1_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT
IO17	28	I/O	GPIO17, HS1_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180
IO5	29	I/O	GPIO5, VSPICS0, HS1_DATA6, EMAC_RX_CLK
IO18	30	I/O	GPIO18, VSPIQ, HS1_DATA7
IO19	31	I/O	GPIO19, VSPIQ, U0CTS, EMAC_TXD0
NC	32	-	-
IO21	33	I/O	GPIO21, VSPIHD, EMAC_TX_EN
RXD0	34	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
TXD0	35	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2
IO22	36	I/O	GPIO22, VSPICLK, U0RTS, EMAC_TXD1
IO23	37	I/O	GPIO23, VSPID, HS1_STROBE
GND	38	P	Ground

Notice:

* Pins SCK/CLK, SDO/SD0, SDI/SD1, SHD/SD2, SWP/SD3 and SCS/CMD, namely, GPIO6 to GPIO11 are connected to the integrated SPI flash integrated on the module and are not recommended for other uses.

2.3 Strapping Pins

ESP32 has five strapping pins, which can be seen in Chapter 6 Schematics:

- MTDI
- GPIO0
- GPIO2
- MTDO
- GPIO5

Software can read the values of these five bits from register "GPIO_STRAPPING".

During the chip's system reset release (power-on-reset, RTC watchdog reset and brownout reset), the latches of the strapping pins sample the voltage level as strapping bits of "0" or "1", and hold these bits until the chip is powered down or shut down. The strapping bits configure the device's boot mode, the operating voltage of VDD_SDIO and other initial system settings.

Each strapping pin is connected to its internal pull-up/pull-down during the chip reset. Consequently, if a strapping pin is unconnected or the connected external circuit is high-impedance, the internal weak pull-up/pull-down will determine the default input level of the strapping pins.

To change the strapping bit values, users can apply the external pull-down/pull-up resistances, or use the host MCU's GPIOs to control the voltage level of these pins when powering on ESP32.

After reset release, the strapping pins work as normal-function pins.

Refer to Table 3 for a detailed boot-mode configuration by strapping pins.

Table 3: Strapping Pins

Voltage of Internal LDO (VDD_SDIO)					
Pin	Default	3.3 V		1.8 V	
MTDI	Pull-down	0		1	
Bootling Mode					
Pin	Default	SPI Boot		Download Boot	
GPIO0	Pull-up	1		0	
GPIO2	Pull-down	Don't-care		0	
Enabling/Disabling Debugging Log Print over U0TXD During Bootling					
Pin	Default	U0TXD Active		U0TXD Silent	
MTDO	Pull-up	1		0	
Timing of SDIO Slave					
Pin	Default	Falling-edge Sampling Falling-edge Output	Falling-edge Sampling Rising-edge Output	Rising-edge Sampling Falling-edge Output	Rising-edge Sampling Rising-edge Output
MTDO	Pull-up	0	0	1	1
GPIO5	Pull-up	0	1	0	1

Note:

- Firmware can configure register bits to change the settings of "Voltage of Internal LDO (VDD_SDIO)" and "Timing of SDIO Slave" after bootling.
- The module integrates a 3.3 V SPI flash, so the pin MTDI cannot be set to 1 when the module is powered up.

3. Functional Description

This chapter describes the modules and functions integrated in ESP32-WROOM-32.

3.1 CPU and Internal Memory

ESP32-D0WDQ6 contains two low-power Xtensa® 32-bit LX6 microprocessors. The internal memory includes:

- 448 KB of ROM for booting and core functions.
- 520 KB of on-chip SRAM for data and instructions.
- 8 KB of SRAM in RTC, which is called RTC FAST Memory and can be used for data storage; it is accessed by the main CPU during RTC Boot from the Deep-sleep mode.
- 8 KB of SRAM in RTC, which is called RTC SLOW Memory and can be accessed by the co-processor during the Deep-sleep mode.
- 1 Kbit of eFuse: 256 bits are used for the system (MAC address and chip configuration) and the remaining 768 bits are reserved for customer applications, including flash-encryption and chip-ID.

3.2 External Flash and SRAM

ESP32 supports multiple external QSPI flash and SRAM chips. More details can be found in Chapter SPI in the [ESP32 Technical Reference Manual](#). ESP32 also supports hardware encryption/decryption based on AES to protect developers' programs and data in flash.

ESP32 can access the external QSPI flash and SRAM through high-speed caches.

- The external flash can be mapped into CPU instruction memory space and read-only memory space simultaneously.
 - When external flash is mapped into CPU instruction memory space, up to 11 MB + 248 KB can be mapped at a time. Note that if more than 3 MB + 248 KB are mapped, cache performance will be reduced due to speculative reads by the CPU.
 - When external flash is mapped into read-only data memory space, up to 4 MB can be mapped at a time. 8-bit, 16-bit and 32-bit reads are supported.
- External SRAM can be mapped into CPU data memory space. Up to 4 MB can be mapped at a time. 8-bit, 16-bit and 32-bit reads and writes are supported.

ESP32-WROOM-32 integrates a 4 MB SPI flash, which is connected to GPIO6, GPIO7, GPIO8, GPIO9, GPIO10 and GPIO11. These six pins cannot be used as regular GPIOs.

3.3 Crystal Oscillators

The module uses a 40-MHz crystal oscillator.

3.4 RTC and Low-Power Management

With the use of advanced power-management technologies, ESP32 can switch between different power modes.

For details on ESP32's power consumption in different power modes, please refer to section "RTC and Low-Power Management" in [ESP32 Datasheet](#).



4. Peripherals and Sensors

Please refer to Section Peripherals and Sensors in [ESP32 Datasheet](#).

Note:

External connections can be made to any GPIO except for GPIOs in the range 6-11. These six GPIOs are connected to the module's integrated SPI flash. For details, please see Section 6 Schematics.



5. Electrical Characteristics

5.1 Absolute Maximum Ratings

Stresses beyond the absolute maximum ratings listed in Table 4 below may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and do not refer to the functional operation of the device that should follow the recommended operating conditions.

Table 4: Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Min	Max	Unit
VDD33	Power supply voltage	-0.3	3.6	V
I_{output}^1	Cumulative IO output current	-	1,100	mA
T_{store}	Storage temperature	-40	150	°C

1. The module worked properly after a 24-hour test in ambient temperature at 25 °C, and the IOs in three domains (VDD3P3_RTC, VDD3P3_CPU, VDD_SDIO) output high logic level to ground. Please note that pins occupied by flash and/or PSRAM in the VDD_SDIO power domain were excluded from the test.
2. Please see Appendix IO_MUX of [ESP32 Datasheet](#) for IO's power domain.

5.2 Recommended Operating Conditions

Table 5: Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	Min	Typical	Max	Unit
VDD33	Power supply voltage	2.7	3.3	3.6	V
I_{VDD}	Current delivered by external power supply	0.5	-	-	A
T	Operating temperature	-40	-	85	°C

5.3 DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)

Table 6: DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)

Symbol	Parameter		Min	Typ	Max	Unit
C_{IN}	Pin capacitance		-	2	-	pF
V_{IH}	High-level input voltage		$0.75 \times VDD^1$	-	$VDD^1 + 0.3$	V
V_{IL}	Low-level input voltage		-0.3	-	$0.25 \times VDD^1$	V
I_{IH}	High-level input current		-	-	50	nA
I_{IL}	Low-level input current		-	-	50	nA
V_{OH}	High-level output voltage		$0.8 \times VDD^1$	-	-	V
V_{OL}	Low-level output voltage		-	-	$0.1 \times VDD^1$	V
I_{OH}	High-level source current ($VDD^1 = 3.3$ V, $V_{OH} \geq 2.64$ V, output drive strength set to the maximum)	VDD3P3_CPU power domain ^{1, 2}	-	40	-	mA
		VDD3P3_RTC power domain ^{1, 2}	-	40	-	mA
		VDD_SDIO power domain ^{1, 3}	-	20	-	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
I_{OL}	Low-level sink current ($V_{DD}^1 = 3.3\text{ V}$, $V_{OL} = 0.495\text{ V}$, output drive strength set to the maximum)	-	28	-	mA
R_{PU}	Resistance of internal pull-up resistor	-	45	-	$k\Omega$
R_{PD}	Resistance of internal pull-down resistor	-	45	-	$k\Omega$
V_{IL_nRST}	Low-level input voltage of CHIP_PU to power off the chip	-	-	0.6	V

Notes:

1. Please see Appendix IO_MUX of [ESP32 Datasheet](#) for IO's power domain. VDD is the I/O voltage for a particular power domain of pins.
2. For VDD3P3_CPU and VDD3P3_RTC power domain, per-pin current sourced in the same domain is gradually reduced from around 40 mA to around 29 mA, $V_{OH} \geq 2.64\text{ V}$, as the number of current-source pins increases.
3. Pins occupied by flash and/or PSRAM in the VDD_SDIO power domain were excluded from the test.

5.4 Wi-Fi Radio

Table 7: Wi-Fi Radio Characteristics

Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Unit
Input frequency	-	2412	-	2484	MHz
Output impedance*	-	-	*	-	Ω
TX power	11n, MCS7	12	13	14	dBm
	11b mode	17.5	18.5	20	dBm
Sensitivity	11b, 1 Mbps	-	-98	-	dBm
	11b, 11 Mbps	-	-89	-	dBm
	11g, 6 Mbps	-	-92	-	dBm
	11g, 54 Mbps	-	-74	-	dBm
	11n, HT20, MCS0	-	-91	-	dBm
	11n, HT20, MCS7	-	-71	-	dBm
	11n, HT40, MCS0	-	-89	-	dBm
	11n, HT40, MCS7	-	-69	-	dBm
Adjacent channel rejection	11g, 6 Mbps	-	31	-	dB
	11g, 54 Mbps	-	14	-	dB
	11n, HT20, MCS0	-	31	-	dB
	11n, HT20, MCS7	-	13	-	dB

*For the modules that use IPEX antennas, the output impedance is 50 Ω . For other modules without IPEX antennas, users do not need to concern about the output impedance.

5.5 BLE Radio

5.5.1 Receiver

Table 8: Receiver Characteristics – BLE

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Sensitivity @30.8% PER	-	-	-97	-	dBm
Maximum received signal @30.8% PER	-	0	-	-	dBm
Co-channel C/I	-	-	+10	-	dB
Adjacent channel selectivity C/I	$F = F_0 + 1 \text{ MHz}$	-	-5	-	dB
	$F = F_0 - 1 \text{ MHz}$	-	-5	-	dB
	$F = F_0 + 2 \text{ MHz}$	-	-25	-	dB
	$F = F_0 - 2 \text{ MHz}$	-	-35	-	dB
	$F = F_0 + 3 \text{ MHz}$	-	-25	-	dB
	$F = F_0 - 3 \text{ MHz}$	-	-45	-	dB
Out-of-band blocking performance	30 MHz ~ 2000 MHz	-10	-	-	dBm
	2000 MHz ~ 2400 MHz	-27	-	-	dBm
	2500 MHz ~ 3000 MHz	-27	-	-	dBm
	3000 MHz ~ 12.5 GHz	-10	-	-	dBm
Intermodulation	-	-36	-	-	dBm

5.5.2 Transmitter

Table 9: Transmitter Characteristics – BLE

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
RF transmit power	-	-	0	-	dBm
Gain control step	-	-	3	-	dBm
RF power control range	-	-12	-	+9	dBm
Adjacent channel transmit power	$F = F_0 \pm 2 \text{ MHz}$	-	-52	-	dBm
	$F = F_0 \pm 3 \text{ MHz}$	-	-58	-	dBm
	$F = F_0 \pm > 3 \text{ MHz}$	-	-60	-	dBm
Δf_{1avg}	-	-	-	265	kHz
Δf_{2max}	-	247	-	-	kHz
$\Delta f_{2avg}/\Delta f_{1avg}$	-	-	-0.92	-	-
ICFT	-	-	-10	-	kHz
Drift rate	-	-	0.7	-	kHz/50 μ s
Drift	-	-	2	-	kHz

5.6 Reflow Profile

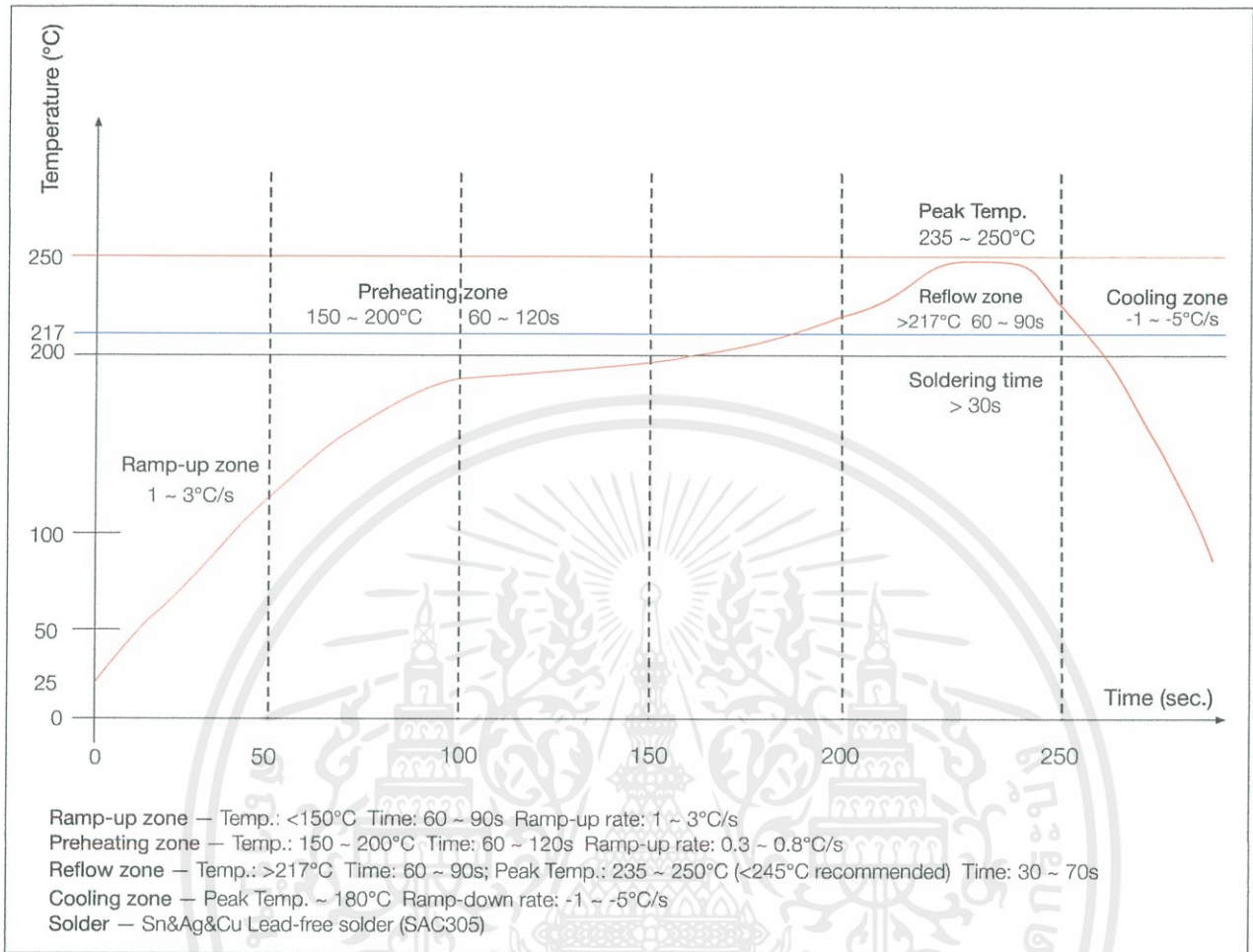


Figure 2: Reflow Profile

6. Schematics

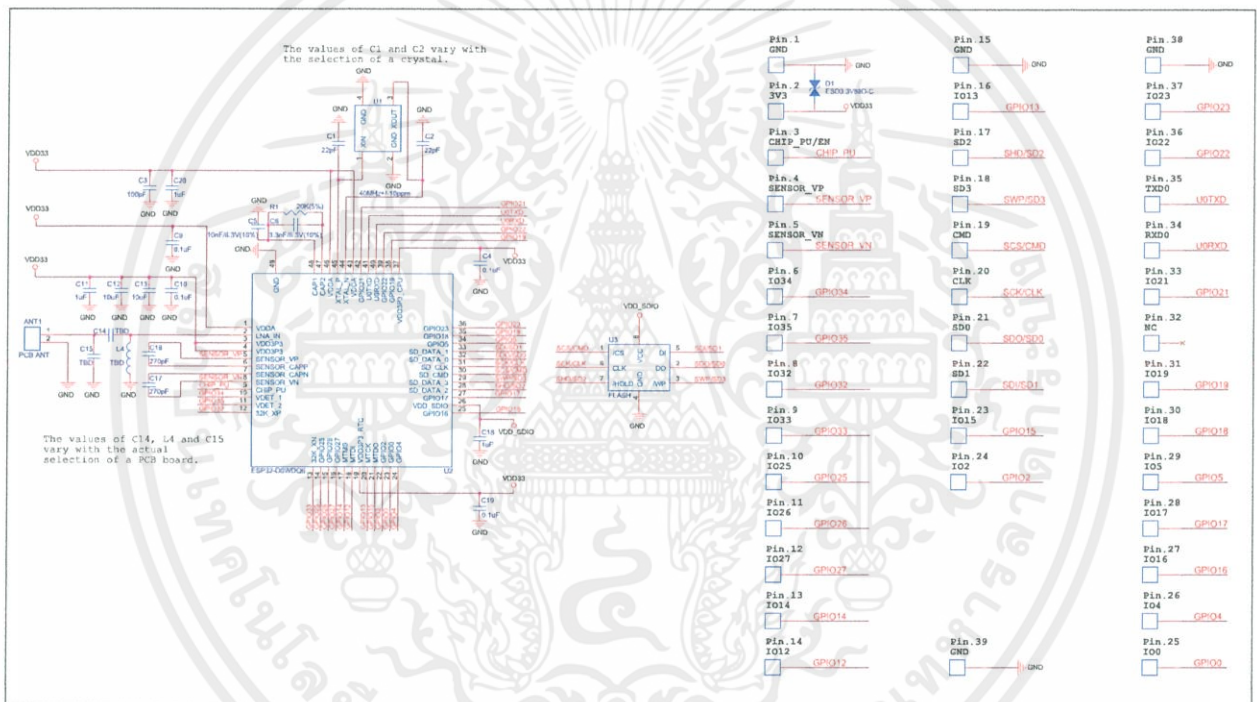


Figure 3: ESP32-WROOM-32 Schematics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Peripheral Schematics

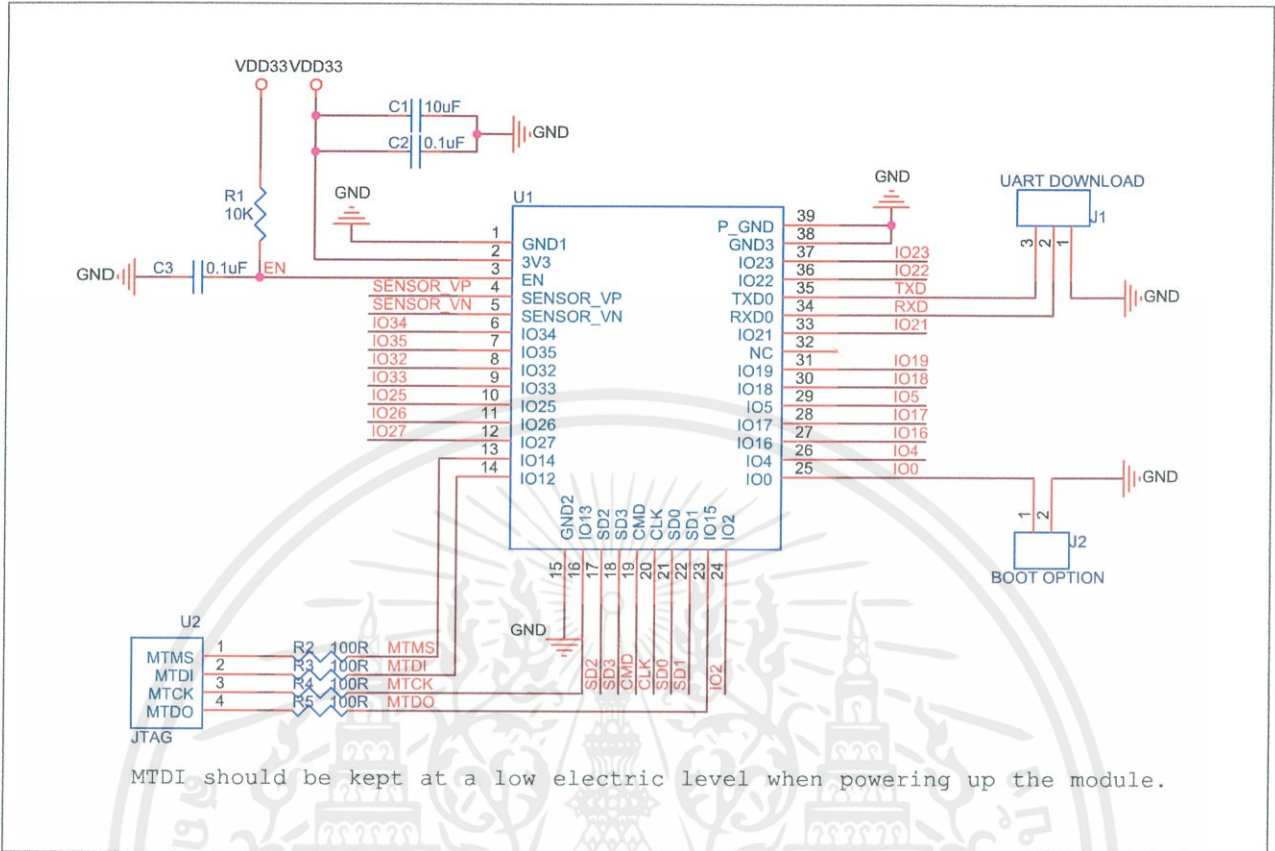


Figure 4: ESP32-WROOM-32 Peripheral Schematics

Note:

Soldering Pad 39 to the Ground of the base board is not necessary for a satisfactory thermal performance. If users do want to solder it, they need to ensure that the correct quantity of soldering paste is applied.

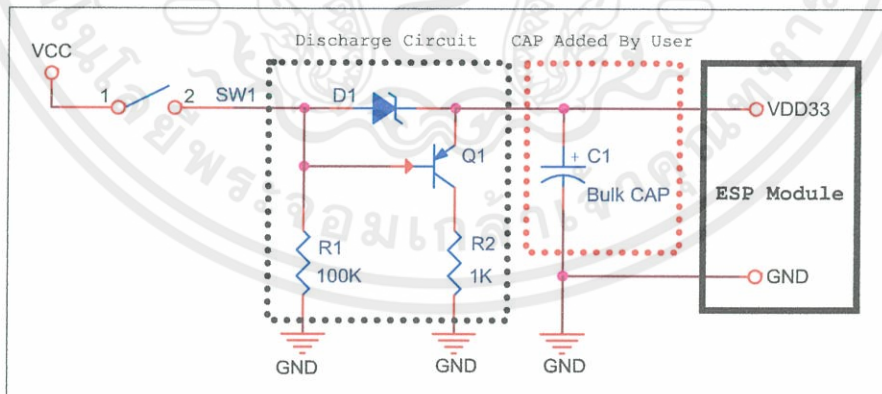


Figure 5: Discharge Circuit for VDD33 Rail

Note:

The discharge circuit can be applied in scenarios where ESP32 is powered on and off repeatedly by switching the power rails, and there is a large capacitor on the VDD33 rail. For details, please refer to Section **Power Scheme** in [ESP32 Datasheet](#).

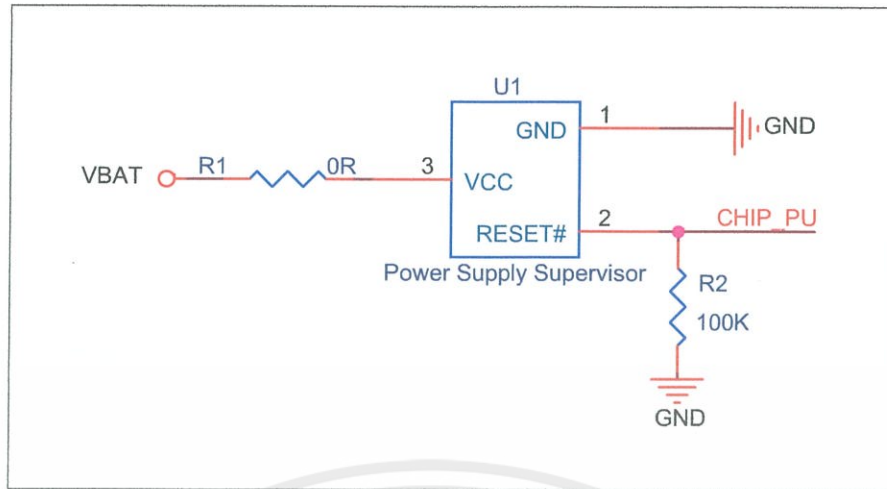


Figure 6: Reset Circuit

Note:

When battery is used as the power supply for ESP32 series of chips and modules, a supply voltage supervisor is recommended to avoid boot failure due to low voltage. Users are recommended to pull CHIP_PU low if the power supply for ESP32 is below 2.3 V.

8. Physical Dimensions

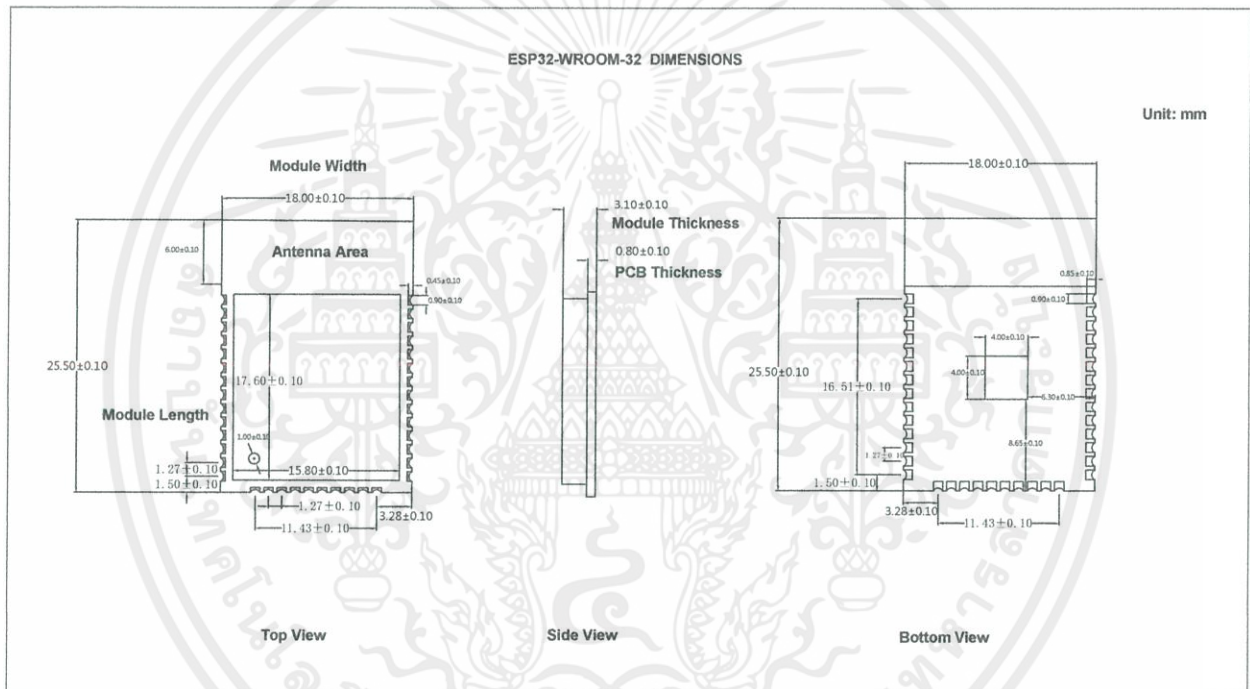


Figure 7: Physical Dimensions of ESP32-WROOM-32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Learning Resources

10.1 Must-Read Documents

The following link provides documents related to ESP32.

- [ESP32 Datasheet](#)
This document provides an introduction to the specifications of the ESP32 hardware, including overview, pin definitions, functional description, peripheral interface, electrical characteristics, etc.
- [ESP-IDF Programming Guide](#)
It hosts extensive documentation for ESP-IDF ranging from hardware guides to API reference.
- [ESP32 Technical Reference Manual](#)
The manual provides detailed information on how to use the ESP32 memory and peripherals.
- [ESP32 Hardware Resources](#)
The zip files include the schematics, PCB layout, Gerber and BOM list of ESP32 modules and development boards.
- [ESP32 Hardware Design Guidelines](#)
The guidelines outline recommended design practices when developing standalone or add-on systems based on the ESP32 series of products, including the ESP32 chip, the ESP32 modules and development boards.
- [ESP32 AT Instruction Set and Examples](#)
This document introduces the ESP32 AT commands, explains how to use them, and provides examples of several common AT commands.
- [Espressif Products Ordering Information](#)

10.2 Must-Have Resources

Here are the ESP32-related must-have resources.

- [ESP32 BBS](#)
This is an Engineer-to-Engineer (E2E) Community for ESP32 where you can post questions, share knowledge, explore ideas, and help solve problems with fellow engineers.
- [ESP32 GitHub](#)
ESP32 development projects are freely distributed under Espressif's MIT license on GitHub. It is established to help developers get started with ESP32 and foster innovation and the growth of general knowledge about the hardware and software surrounding ESP32 devices.
- [ESP32 Tools](#)
This is a webpage where users can download ESP32 Flash Download Tools and the zip file "ESP32 Certification and Test".
- [ESP-IDF](#)
This webpage links users to the official IoT development framework for ESP32.
- [ESP32 Resources](#)
This webpage provides the links to all available ESP32 documents, SDK and tools.

Revision History

Date	Version	Release notes
2019.01	V2.8	Changed the RF power control range in Table 9 from $-12 \sim +12$ to $-12 \sim +9$ dBm.
2018.10	V2.7	Added "Cumulative IO output current" entry to Table 4: Absolute Maximum Ratings; Added more parameters to Table 6: DC Characteristics.
2018.08	V2.6	<ul style="list-style-type: none"> Added reliability test items the module has passed in Table 1: ESP32-WROOM-32 Specifications, and removed software-specific information; Updated section 3.4: RTC and Low-Power Management; Changed the module's dimensions from (18 ± 0.2) mm x (25.5 ± 0.2) mm x (3.1 ± 0.15) mm to (18.00 ± 0.10) mm x (25.50 ± 0.10) mm x (3.10 ± 0.10) mm; Updated Figure 8: Physical Dimensions; Updated Table 7: Wi-Fi Radio.
2018.06	V2.5	<ul style="list-style-type: none"> Changed the module name to ESP32-WROOM-32; Deleted Temperature Sensor in Table 1: ESP32-WROOM-32 Specifications; Updated Chapter 3: Functional Description; Added Chapter 8: Recommended PCB Land Pattern; Changes to electrical characteristics: <ul style="list-style-type: none"> Updated Table 4: Absolute Maximum Ratings; Added Table 5: Recommended Operating Conditions; Added Table 6: DC Characteristics; Updated the values of "Gain control step", "Adjacent channel transmit power" in Table 9: Transmitter Characteristics - BLE.
2018.03	V2.4	Updated Table 1 in Chapter 1.
2018.01	V2.3	Deleted information on LNA pre-amplifier; Updated section 3.4 RTC and Low-Power Management; Added reset circuit in Chapter 7 and a note to it.
2017.10	V2.2	Updated the description of the chip's system reset in Section 2.3 Strapping Pins; Deleted "Association sleep pattern" in Table "Power Consumption by Power Modes" and added notes to Active sleep and Modem-sleep; Updated the note to Figure 4 Peripheral Schematics; Added discharge circuit for VDD33 rail in Chapter 7 and a note to it.
2017.09	V2.1	Updated operating voltage/power supply range updated to $2.7 \sim 3.6$ V; Updated Chapter 7.
2017.08	V2.0	Changed the sensitivity of NZIF receiver to -97 dBm in Table 1; Updated the dimensions of the module; Updated Table "Power Consumption by Power Modes" Power Consumption by Power Modes, and added two notes to it; Updated Table 4, 7, 8, 9; Added Chapter 8; Added the link to certification download .
2017.06	V1.9	Added a note to Section 2.1 Pin Layout; Updated Section 3.3 Crystal Oscillators; Updated Figure 3 ESP-WROOM-32 Schematics;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Date	Version	Release notes
		Added Documentation Change Notification.
2017.05	V1.8	Updated Figure 1 Top and Side View of ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32).
2017.04	V1.7	Added the module's dimensional tolerance; Changed the input impedance value of 50Ω in Table 7 Wi-Fi Radio Characteristics to output impedance value of $30+j10\Omega$.
2017.04	V1.6	Added Figure 2 Reflow Profile.
2017.03	V1.5	Updated Section 2.2 Pin Description; Updated Section 3.2 External Flash and SRAM; Updated Section 4 Peripherals and Sensors Description.
2017.03	V1.4	Updated Chapter 1 Preface; Updated Chapter 2 Pin Definitions; Updated Chapter 3 Functional Description; Updated Table Recommended Operating Conditions; Updated Table 7 Wi-Fi Radio Characteristics; Updated Section 5.6 Reflow Profile; Added Chapter 10 Learning Resources.
2016.12	V1.3	Updated Section 2.1 Pin Layout.
2016.11	V1.2	Added Figure 7 Peripheral Schematics.
2016.11	V1.1	Updated Chapter 6 Schematics.
2016.08	V1.0	First release.