



รายงาน

ระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความร้อนของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง

สมาชิก

นางสาวพลอยน้ำทอง	ไซยโยรา	รหัส 67050369
นายรติภัทร	บัวแก้ว	รหัส 67050465

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา ELECTRONICS CIRCUITS (05366023)

และ MICROCONTROLLER AND INTERFACING (05366036)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พุทธศักราช 2568

บทคัดย่อ

หัวข้อโครงการ

ระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความร้อนของ
คลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง

Prototype system for measuring and heatmapping of
high-frequency radio waves

ชื่อนักศึกษา

นางสาวพลอยน้ำทอง ไชயโยรา รหัสนักศึกษา 67050369

นายธีภัทร

บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 67050465

ภาควิชา

พิสิกส์

สาขาวิชา

พิสิกส์อุตสาหกรรมและวิศวกรรมระบบไฮโอดีและสารสนเทศ
(สองปริญญา)

คณะ

วิทยาศาสตร์

ปีการศึกษา

2568

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์.ดร. สาหร่าย เล็กฉะอุ่ม คณะวิทยาศาสตร์

รองศาสตราจารย์.ดร.บุณย์ชนะ ภู่ระหงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

คำนำ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเสนอเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ “ระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความร้อนของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง” ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์.ดร. สาหร่าย เล็กะอุ่ม คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำอย่างใกล้ชิดตลอดกระบวนการ รวมทั้ง รองศาสตราจารย์.ดร.บุณย์ชนะ ภู่ระหงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะอันมีคุณค่าในการปรับปรุงงานให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาบริการระบบป้องกันและสารสนเทศ และห้องปฏิบัติการ IERL ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ และทรัพยากรสำหรับการพัฒนา นอกจากนี้ ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมทีมและผู้ช่วยวิจัย ได้แก่ นายธนวรรณ อรุโณทัยพัฒน์, นายธีรภัทร ราชปัก, นายอังศุชival สมิตชาติ, นายธนทร กิญโภุเมธากุล, นายณัฐวิทย์ โนวঁহার ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนจบกระบวนการ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจด้านการตรวจวัดสัญญาณ วิทยุและการทำแผนที่เชิงพื้นที่ ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบทิติดตามและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมด้าน คลื่นวิทยุในอนาคต

ผู้จัดทำ

นางสาวพลอยน้ำทอง ไชโยรา

นายรติกัทร บัวแก้ว

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
คำนำ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
แผนที่ความร้อน (Heatmap)	4
สเปกตรัมອนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzer)	4
ย่านความถี่สัญญาณ 2.4 GHz	5
ແບບกรองความถี่ (Band-Pass Filter; BPF)	6
บทที่ 3 แผนการดำเนินการ	7
เตรียมวัสดุและอุปกรณ์	8
การประกอบต้นแบบ	8
ทดสอบและประเมินผลข้อมูล	9
การสร้างแผนที่ความร้อน (Heatmap)	10
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	12
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	14
บรรณานุกรม	15

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารไร้สายได้กลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญของชีวิตประจำวัน ตั้งแต่อินเทอร์เน็ตภายในบ้าน เครือข่ายในสถานศึกษา/สำนักงาน ไปจนถึงระบบ IoT ขนาดใหญ่ การเติบโตดังกล่าวทำให้สภาพแวดล้อมด้าน คลื่นวิทยุ มีความซับซ้อนขึ้น ทั้งในเรื่องความหนาแน่นของผู้ใช้งาน การทับซ้อนของช่องความถี่ และสภาพพื้นที่ที่ทำ ให้เกิดการสะท้อน หรือหักเห การมองเห็นการกระจายตัวของความแรงสัญญาณเชิงพื้นที่อย่างเป็นระบบจึงมีความ จำเป็นต่อการวางแผนเครือข่าย การแก้ปัญหาจุดอับสัญญาณ การจัดวางอุปกรณ์กระจายสัญญาณใหม่ ประสิทธิภาพ และการประเมินคุณภาพบริการในโลกจริง

ย่านความถี่สัญญาณ 2.4 GHz ถูกใช้อย่างแพร่หลายโดยเทคโนโลยี เช่น Wi-Fi และ Bluetooth ข้อดีคือใช้ งานได้ทั่วโลกและอุปกรณ์มีราคาถูก อย่างไรก็ดี ความหนาแน่นของผู้ใช้และจำนวนอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่ เดียว กันทำให้เกิดการแข่งขันแบบดีวิดท์และสัญญาณรบกวนสูง การทำ “แผนที่ความร้อน (heat map)” ของ ความแรงสัญญาณในย่านนี้จึงเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับทั้งวิศวกรและผู้ใช้ทั่วไป เพราะช่วยสรุปสภาพ RF ให้ เข้าใจได้ในทันที เทคนิคแห่งหอตสปอต จุดอับ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และช่วยวิเคราะห์ผลกระทบ การเปลี่ยนตำแหน่งอุปกรณ์

แม้จะมีเครื่องมือวัดระดับมืออาชีพ เช่น สเปกตรัมอนาไลเซอร์ แต่เครื่องมือเหล่านี้มักมีต้นทุนสูง ใช้ยาก และไม่เหมาะสมสำหรับงานเก็บข้อมูลเชิงเดินสำรวจ (walk-through) หรือการสาธิตเชิงการเรียนรู้ ระบบราคา ย่อมเยาที่อาศัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ และตัวตรวจจับกำลังแบบลอกการีทึมซึ่งอ่านค่าเป็นสเกล dB ได้โดยตรง จึง เป็นแนวทางที่น่าตึงดูดในการสร้างต้นแบบสำหรับงานภาคสนามจริง งานวิจัย/สิ่งประดิษฐ์นี้จึงมุ่งพัฒนา “ระบบ ต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความหนาแน่นสีของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง” โดยสนใจสัญญาณที่ย่าน 2.4 GHz และเน้นความ พกพา ใช้งานง่าย ราคาเข้าถึงได้ ขณะเดียวกันยังรักษาความถูกต้องในระดับที่เหมาะสมต่อ การใช้งานวิเคราะห์เชิงพื้นที่

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- พัฒนาระบบทันแบบที่ วัดและทำแผนที่ความหนาแน่นสีของความแรงสัญญาณ 2.4 GHz ได้จริงในภาคสนาม แบบพกพา ต้นทุนย่อมเยา และใช้งานง่ายเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ รูปแบบการกระจายตัวของสัญญาณไร้สาย ในพื้นที่จริง อันเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผนเครือข่ายและระบบ IoT
- เพื่อลดต้นทุนในการตรวจสอบและประเมินคุณภาพของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการสร้างอุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่าการใช้เครื่องมือมาตรฐาน เช่น Spectrum Analyzer
- เพื่อเป็นแนวทางในการ ต่อยอดการใช้งาน สู่ด้านการวางแผนโครงข่ายไร้สายในโรงงาน (Smart Factory), เมืองอัจฉริยะ (Smart City), และระบบ IoT อื่น ๆ ในอนาคต

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มของสัญญาณของย่านความถี่ที่สนใจ โดยมีองค์ประกอบดังนี้

- ย่านความถี่ที่ศึกษา: โฟกัสย่าน 2.4 GHz ด้วยแอบกรองความถี่ (BPF) เฉพาะย่าน
- ปริมาณที่วัด: วัดกำลังรวมของสัญญาณ ด้วยตัวตรวจจับลักษณะ AD8317
- แพลตฟอร์มต้นแบบ: ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ADC อ่านค่า V_{out} ของ AD8317 เก็บข้อมูลความเข้มของสัญญาณ และใช้ GPS Module เก็บค่าลองติจูดและละติจูด ณ ตำแหน่งที่วัดค่า
- การนำเสนอผล: แผนที่ความร้อน (heat map), ค่ากำลังของสัญญาณบนหน้าจอต้นแบบ

2. ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลา 2 เดือน ตั้งแต่เดือนกันยายน - ตุลาคม 2568

3. ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

พื้นที่ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และอาคารเรียนรวม 12 ชั้น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบต้นแบบสำหรับความเข้มสัญญาณแบบพกพาและราคาย่อมเยา
2. ได้ข้อมูลหันจุดอป-จุดแรง แนวทางสัญญาณและผลของสิ่งกีดขวางได้ทันที ช่วยตัดสินใจเชิงพื้นที่ได้แม่นยำ
3. ได้ข้อมูลอ้างอิงสำหรับแก้ปัญหาคุณภาพสัญญาณ สนับสนุนการวางแผนและปรับจูนเครือข่ายไร้สาย
4. ได้แผนที่การกระจายตัวของความเข้มสัญญาณ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการ ออกแบบและติดตั้งระบบ ให้ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมาย

บทที่ 2

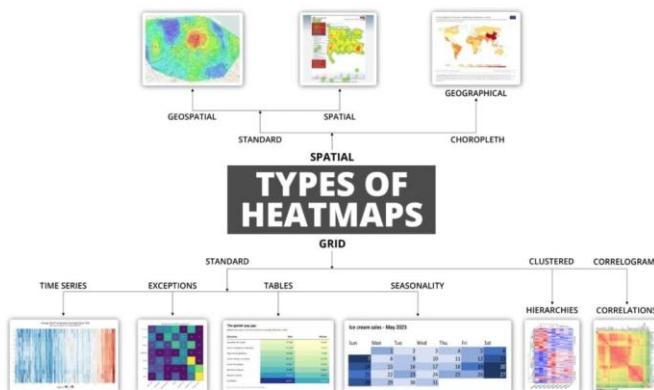
เอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

1. แผนที่ความร้อน (Heatmap)

เป็นเทคนิคการนำเสนอภาพข้อมูลแบบสองมิติที่ใช้สีเพื่อแสดงขนาดหรือค่าของแต่ละจุดข้อมูลในชุดข้อมูลนั้น ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงของสีสามารถเกิดขึ้นได้จากสีสันหรือความเข้มของสีเพื่อให้สามารถสังเกตได้ว่า ปรากฏการณ์นั้นมีการกระจายหรือรวมตัวกันอย่างไรในพื้นที่นั้น ๆ

ในการประยุกต์ใช้ในงานบางอย่าง เช่น การวิเคราะห์อาชญากรรม หรือการติดตามการคลิกบนเว็บไซต์ สีไม่ได้ใช้เพื่อแสดงถึงค่าของแต่ละจุดข้อมูลโดยตรง แต่ใช้เพื่อแสดงถึงความหนาแน่นของจุดข้อมูลแทน



ภาพที่ แสดงประเภทของแผนที่ความร้อน

2. สเปกตรัมอนาลайเซอร์ (Spectrum Analyzer)

เครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณที่สามารถแสดงผลการกระจายพลังงานของสัญญาณตามความถี่ ใช้ในการวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณความถี่ โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูงมากๆ เช่น คลื่นวิทยุ (RF) ที่ใช้ในการสื่อสารไร้สาย หรือระบบเบดาร์ต่างๆ เครื่องควบคุมอุณหภูมิความชื้น SCMA ใช้สเปกตรัมอนาลайเซอร์ในการทดสอบคุณภาพของเซนเซอร์และระบบควบคุมที่ต้องอาศัยการรับส่งสัญญาณความถี่ เพื่อให้แน่ใจว่าทำงานได้ตามมาตรฐาน

สเปกตรัมอนาไลเซอร์ทำงานโดยการรับสัญญาณเข้ามา แล้วใช้การกวัดความถี่ (Frequency Sweep) ผ่านตัวกรองความถี่แบบดิจิตอลๆ เช่น FFT หรือวิเคราะห์สัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ จากนั้นจะแสดงผลเป็นกราฟ 2 มิติ โดยแกน X แทนความถี่ และแกน Y แทนแอมเพลจูดหรือระดับของสัญญาณ ทำให้เห็นการกระจายตัวของสัญญาณในแต่ละย่านความถี่ได้ชัดเจน นอกจากนี้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิความชื้นของ SCMA ยังมีระบบประมวลผลและเปรียบเทียบสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบ ความผิดปกติ และสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ



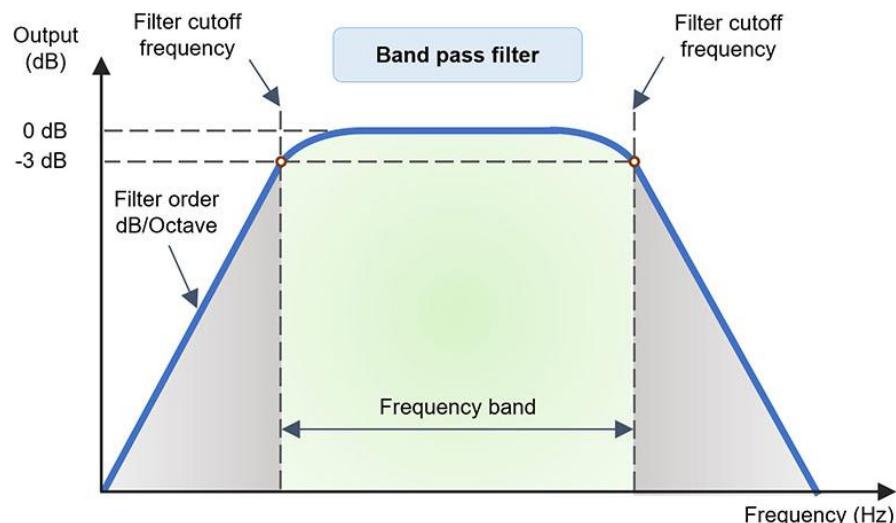
ภาพที่ เครื่องสเปกตรัมอนาไลเซอร์

3. ย่านความถี่สัญญาณ 2.4 GHz

ย่าน 2.4 GHz เป็นส่วนหนึ่งของ ISM band ที่เปิดให้ใช้งานแบบไม่ต้องขอใบอนุญาตในหลายประเทศ จึงถูกใช้แพร่หลายโดย Wi-Fi, Bluetooth และ Zigbee; Wi-Fi ในย่านนี้ใช้ช่องความถี่ 20 MHz (นิยมชุดช่องไม่ทับซ้อน 1/6/11), Bluetooth ทำงานที่ 2.402–2.480 GHz โดยแบ่งช่องย่อย (Classic 79 ช่องกว้าง 1 MHz; BLE 40 ช่องกว้าง 2 MHz), ส่วน Zigbee/IEEE 802.15.4 ใช้ช่อง 11–26 (คั่นกัน 5 MHz, กว้าง ~2 MHz) เพื่อเครือข่ายเซ็นเซอร์พลังงานต่ำ ซึ่งทั้งหมดต้องอยู่ร่วมกันในย่านเดียวกันต้องออกแบบการใช้งานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและการรับกวนรอบข้าง; ด้านกฎระเบียบ สหราชอาณาจักร (FCC §15.247) อนุญาตกำลังส่งเชิงสายสูงสุด 1 W (30 dBm) และ EIRP ได้ร้าว 4 W ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ขณะที่ ยุโรป (ETSI EN 300 328) จำกัด EIRP 20 dBm (100 mW) และด้านความปลอดภัยโดยรวมอ้างอิงแนวทาง ICNIRP 2020 สำหรับช่วง 100 kHz–300 GHz.

4. แอบกรองความถี่ (Band-Pass Filter; BPF)

แอบกรองความถี่ (Band-Pass Filter; BPF) คือวงจร/อุปกรณ์ที่ “ยอมให้ผ่านเฉพาะความถี่ในย่านหนึ่ง” (passband) และ กดทิ้ง ความถี่ต่ำ/สูงกว่าย่านนั้น (stopband) ใช้กันมากในงาน RF เพื่อคัดแยกย่านเป้าหมาย เช่น 2.4 GHz สำหรับ Wi-Fi/Bluetooth/Zigbee ให้หลุดจากสัญญาณนอกย่านก่อนเข้ารับหรือรับสัญญาณ ตัวกรองถูกนิยามด้วย ความถี่กึ่งกลาง f_0 , แบนด์วิธ $BW = f_H - f_L$ และ คิวแฟกเตอร์ $Q = f_0/BW$ (ยิ่ง Q สูง ย่านยิ่งแคบและเลือกย่านได้คม) โดยในงาน 2.4 GHz นิยมใช้ SAW/BAW BPF ซึ่งมักมี insertion loss ในย่านผ่านระดับ ~1–2 dB และแบนด์วิธระหว่าง 80–90 MHz รอบ 2.45 GHz เหมาะกับมาตรฐานที่นำไปในย่านนี้.



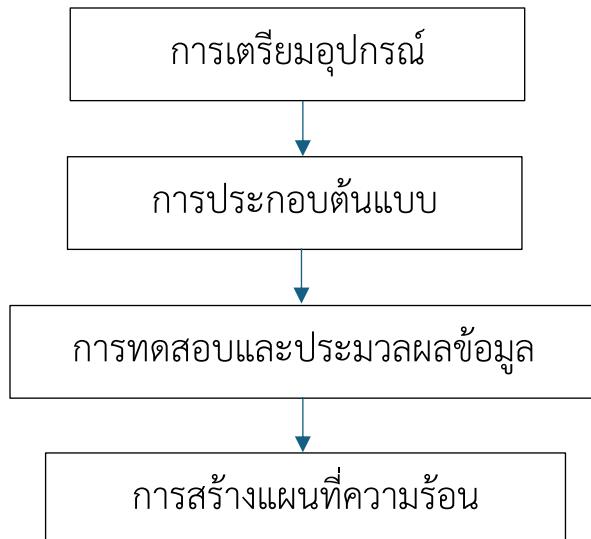
ภาพที่ กราฟการตอบสนองเชิงความถี่ของแอบกรองความถี่แบบผ่านย่าน (Band-Pass Filter; BPF)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานของโครงการระบบต้นแบบตรวจวัดและทำแผนที่ความหนาแน่นสีของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง ได้แบ่งการดำเนินโครงการออกเป็น 4 ขั้นตอนเพื่อจ่ายต่อการศึกษาและสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

1. การเตรียมอุปกรณ์
2. การประกอบต้นแบบ
3. การทดสอบและประเมินผลข้อมูล
4. การสร้างแผนที่ความร้อน (Heatmap)



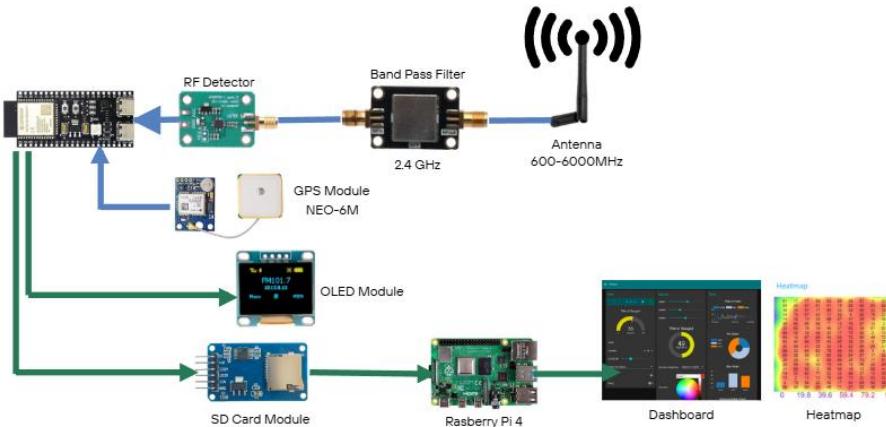
ภาพที่ 1 แผนภาพวิธีการดำเนินงาน

1. เตรียมวัสดุและอุปกรณ์

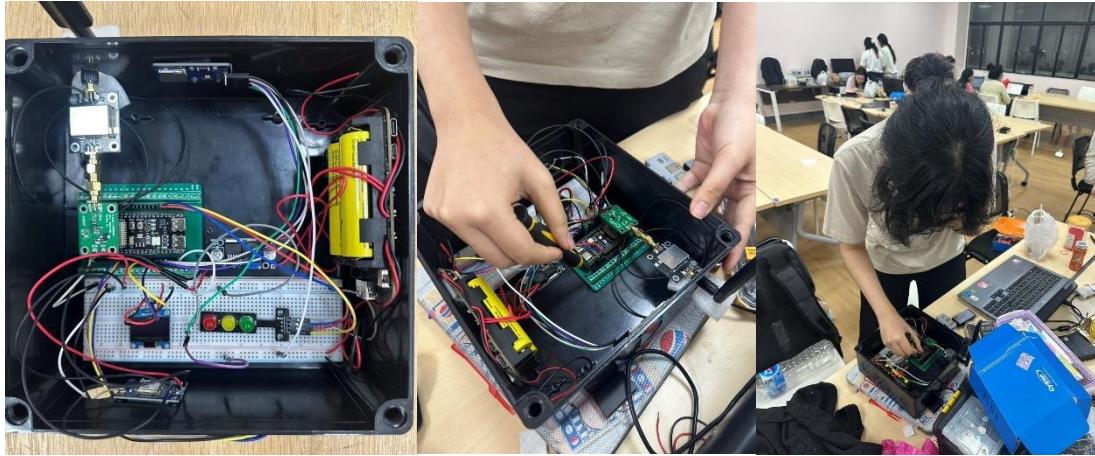
รายการวัสดุ	รายละเอียดของวัสดุ	หน้าที่
Microcontroller	Expressif ESP32-S3-DevKitC-1 WROOM-1-N16R8	ไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก อ่านค่า ADC จาก AD8317, คำนวณ dBm, ควบคุมจอ OLED และ GPS
	Raspberry Pi 4 model B 4 GB	คอมพิวเตอร์ขับเครื่อข่ายสำหรับเก็บ-ประมวลผล-แสดงผลขั้นสูง
RF-Detector	AD8317	ตรวจวัดกำลังสัญญาณ RF และแปลงเป็นแรงดัน DC
BPF Module	Saw BPF Module 2.4GHz	กรองสัญญาณเฉพาะย่าน 2.4 GHz เพื่อตัดสัญญาณนอกย่าน
GPS Module	Neo-6M	ให้พิกัดตำแหน่ง เป็นค่าละติจูดและลองติจูด
Antenna	MX1847 600-6000MHz 8dBi	เสาส่ง-รับสัญญาณ RF มีเกนช่วยเพิ่มความไวทิศทาง
OLED Module	0.96 inch SSD1315 Driver OLED LCD LED Display Module	แสดงสถานะระบบและค่าที่วัด

ตารางที่ 1 ตารางแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงาน

2. การประกอบต้นแบบ



ภาพที่ 2 ภาพรวมรูปแบบการประกอบต้นแบบ



ภาพที่ 3 ภาพต้นแบบเมื่อประกอบชิ้นส่วนเสร็จสิ้น

3. ทดสอบและประเมินผลข้อมูล

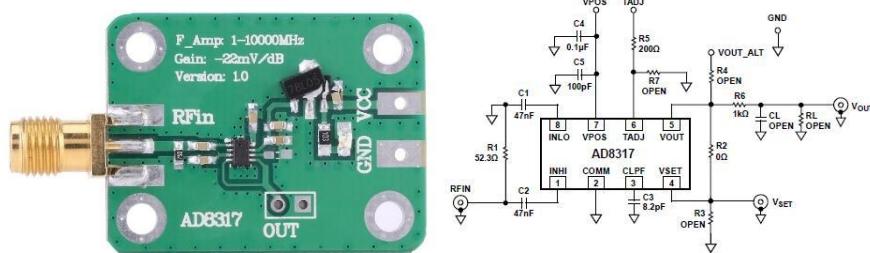
นำข้อมูลที่บันทึกได้มาทำการวิเคราะห์อย่างอัตโนมัติ โดยจากโมดูล AD8317 เป็นโมดูลวงจรรัดกำลัง ของสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) และให้เอาต์พุตเป็นแรงดัน ที่แบร์เพนเซิงเส้นกับสเกล dB เมื่ออ่านที่ ADC จะทำให้ได้ค่าเป็น analog 0-4095 จึงต้องนำไปเข้าสูตร ด้านล่าง โดย V_{ref} มีค่าเท่ากับ 3.3 V

$$V_{out} = \frac{ADC_raw}{4095} \times V_{REF}$$

จะทำให้ได้ค่า V_{out} เพื่อนำไปแปลงเป็นกำลัง โดยใช้สูตร

$$P_{in(dBm)} = \frac{V_{out} - V_{int}}{slope}$$

ซึ่งจาก datasheet ของโมดูล AD8317 ได้กำหนดค่า slope = -0.022 V และ Vint = 0.014 V



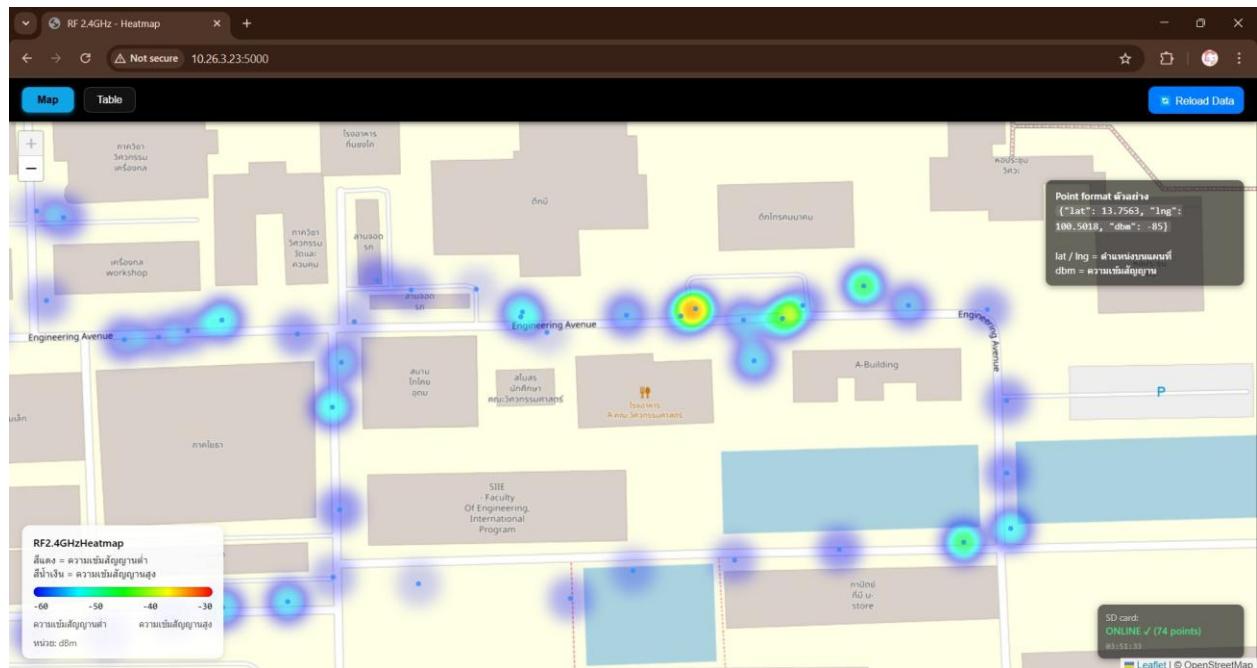
ภาพที่ 4 ภาพโมดูลประกอบ AD8317 และวงจรชิป AD8317



ภาพที่ 5 การทดสอบและประมวลผลข้อมูล

4. การสร้างแผนที่ความร้อน (Heatmap)

พัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน โดยใช้ Flask Framework ร่วมกับ JavaScript และไลบรารี Leaflet.js และ Heatmap.js โดยการเขียนภาษา Python บน Raspberry Pi 4 เพื่อแสดงแผนที่การกระจายตัวของค่าความเข้มของสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz แบบอินเทอร์แอคทีฟ ผู้ใช้สามารถดูข้อมูลและเลือกพื้นที่แสดงผลได้



ภาพที่ 6 แสดงแผนที่ความร้อนที่ผ่านการเก็บข้อมูล

#	lat	lng	dbm
0	13.727048	100.772289	-50.3
1	13.727065	100.772244	-48.9
2	13.726978	100.772283	-49.5
3	13.727029	100.772353	-48.8
4	13.726987	100.772289	-51.9
5	13.726714	100.772153	-51.3
6	13.726902	100.772153	-48.5
7	13.726902	100.772153	-48.5

ภาพที่ 7 ข้อมูลที่เก็บได้ที่ถูกแสดงผลในเว็บแอปพลิเคชัน

```

R 10.26.3.23 (WayVNC) - RealVNC Viewer
File Edit Options Window Help
from flask import Flask, jsonify, Response
import os, json, time
app = Flask(__name__)
# -----
# Config
# -----
SD_MOUNT_PATH = "/media/piony/025A-A181"
JSON_FILE_PATH = os.path.join(SD_MOUNT_PATH, "noise_samples.json")
# -----
# Functions
# -----
def check_sd_mount():
    """Check if SD card is mounted open(able) and exists"""
    return os.path.ismount(SD_MOUNT_PATH) and os.path.exists(JSON_FILE_PATH)

def read_measurements():
    """Read JSON samples (list of dicts)"""
    with open(JSON_FILE_PATH, "r", encoding="utf-8") as f:
        data = json.load(f)
    return data

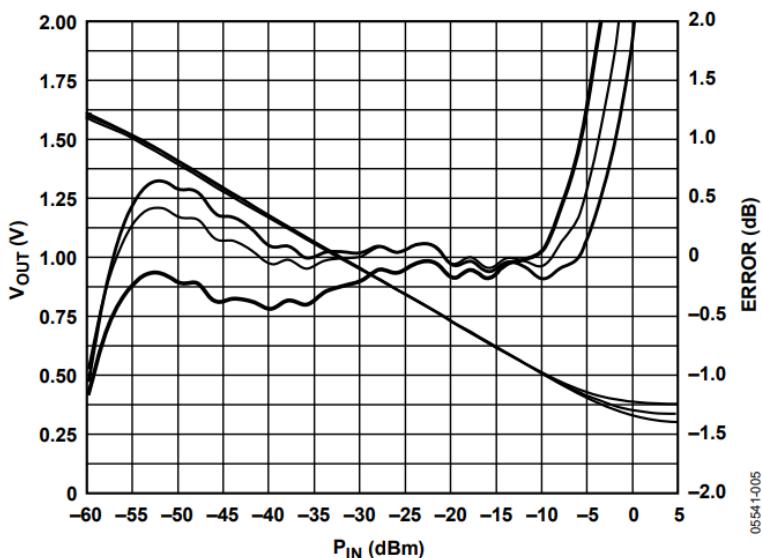
# -----
# Routes
# -----
@app.route("/")
def index():
    """Index page: shows 2 tab (Map / Table)
    html = f"{{<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>}}<html lang='th'><head>
    <meta charset='UTF-8'>
    <title>RF 2.4GHz - Heatmap</title>
    <meta name='viewport' content='width=device-width, initial-scale=1.0' />
    <!-- Leaflet CSS/JS -->
    <link rel='stylesheet' href='https://unpkg.com/leaflet@1.9.4/dist/leaflet.css' integrity='sha256-pbhX0JNl1n+H0RzCF9IDm12yom5obTR08RM=gz' crossorigin='anonymous' />
    <script src='https://unpkg.com/leaflet@1.9.4/dist/leaflet.js' integrity='sha256-pbhX0JNl1n+H0RzCF9IDm12yom5obTR08RM=gz' crossorigin='anonymous' />
    <!-- Leaflet heat -->
    <script src='https://unpkg.com/leaflet_heat/dist/leaflet-heat.js'></script>{{</xml>}}
```

ภาพที่ 8 การทำงานของโปรแกรม โดยรันผ่าน Terminal ของ Raspberry Pi 4

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการทดลองพบว่า ค่าที่วัดได้สอดคล้องกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 4 ระหว่างกำลังสัญญาณขาเข้า P_{IN} (dBm) กับแรงดันเอาร์พุต V_{OUT} (V) ของ AD8317 (V) ที่ทดสอบร้า 2.2 GHz โดยรวมเส้นโค้งหลักจะเอียงลงอย่างเกือบเป็นเส้นตรงในสเกล dB: เมื่อกำลังเพิ่มขึ้นทีละ 1 dB ค่า V_{OUT} จะเปลี่ยนประมาณ 22 mV ตามคุณสมบัติ “linear-in-dB” ของซิปตรวจจับกำลังแบบลอการิทึม ทำให้เราสามารถอ่านแรงดันแล้วแปลงเป็น dBm ได้ด้วยสมการเส้นตรง ช่วงที่เส้นโค้งคงรูปและไม่ตัดอย่างสม่ำเสมอคือช่วงใช้งานที่เหมาะสมที่สุด

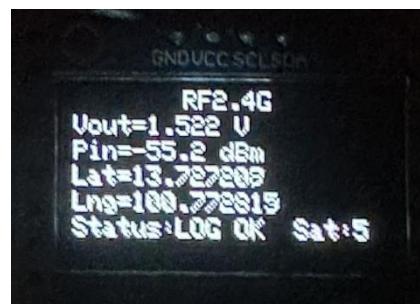


ภาพที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสัญญาณขาเข้า P_{IN} (หน่วย dBm บนแกนแนวนอน) กับแรงดันเอาร์พุต V_{OUT} ของ AD8317 (หน่วยโวลต์บนแกนแนวตั้งซ้าย) ที่ทดสอบร้า 2.2 GHz

```

23:48:16.922 -> Vout=1.504 V -> Pin= -54.38 dBm
23:48:17.245 -> Vout=1.504 V -> Pin= -54.37 dBm
23:48:17.555 -> Vout=1.530 V -> Pin= -55.54 dBm
23:48:17.863 -> Vout=1.530 V -> Pin= -55.53 dBm
23:48:18.186 -> Vout=1.546 V -> Pin= -56.27 dBm
23:48:18.510 -> Vout=1.510 V -> Pin= -54.65 dBm
23:48:18.776 -> Vout=1.531 V -> Pin= -55.61 dBm
23:48:19.085 -> Vout=1.320 V -> Pin= -46.02 dBm
23:48:19.394 -> Vout=1.439 V -> Pin= -51.43 dBm
23:48:19.702 -> Vout=1.521 V -> Pin= -55.13 dBm

```



ภาพที่ 10 ภาพส่วนแสดงผลการทดสอบของอุปกรณ์

ระบบสามารถสร้างและแสดงผลแผนที่การกระจายตัวของกำลังของสัญญาณในรูปแบบ Heatmap ได้คร่าวงจร โดยพัฒนาเป็น Web Application ด้วย Flask ทำหน้าที่ให้บริการข้อมูลผ่าน API และใช้ JavaScript ร่วมกับไลบรารี Leaflet.js และ Heatmap.js สำหรับเรนเดอร์แผนที่เชิงโตตอบ ผู้ใช้สามารถซูม-แพน เลือกพื้นที่แสดงผล เปิด-ปิดชั้นข้อมูล ปรับสเกลสี และตรวจสอบค่าที่ตำแหน่งสินใจได้ตามข้อมูลที่ระบบจัดเตรียมไว้



ภาพที่ 7 ภาพแผนที่ความหนาแน่นสีที่ผ่านการทดสอบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการพัฒนา “ระบบเก็บ–แปลง–แสดงผล” เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของสัญญาณในย่าน 2.4 GHz แบบภาคสนามนอกอาคาร โดยใช้ BPF 2.4 GHz คัดสัญญาณก่อนเข้า AD8317 (log power detector) แล้วอ่านค่าแรงดันด้วย ESP32-S3 แปลงเป็น dBm ด้วยโมเดลเชิงเส้นในสเกล dB (slope/intercept) พร้อมการเฉลี่ยหลายตัวอย่าง ข้อมูลแต่ละจุดถูกแนบพิกัดจาก GPS NEO-6M จึงผูกตำแหน่งกับค่ากำลังได้อย่างต่อเนื่อง ฝั่งซอฟต์แวร์พัฒนาเป็น Web Application (Flask + JavaScript) ใช้ Leaflet.js แสดงแผนที่ฐานและ Heatmap.js เรนเดอร์ค่าความแรง ผู้ใช้ชุม–แพน เลือกพื้นที่และสเกลสี ดูค่าที่พิกัดได้ทันที พร้อมลับชุดข้อมูลตามเวลา/เส้นทางเดินวัด ระบบรองรับส่งออก CSV/GeoJSON เพื่อวิเคราะห์ชำหรือซ้อนทับกับレイเยอร์ภูมิสารสนเทศอื่น ผลลัพธ์ Heatmap ภาคสนามจะหักพื้นที่ที่ไม่สามารถสัญญาณได้ เช่น ต้นไม้ ถนน ฯลฯ และการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมกลางแจ้งได้ชัดเจน จึงเหมาะสมสำหรับงานสำรวจความครอบคลุมสัญญาณ วางแผนอุปกรณ์ภายนอกอาคาร และติดตามคุณภาพเครือข่ายในพื้นที่เมือง/กึ่งเมือง ระบบของเราตอบโจทย์เพระเชื่อมครบถ้วนแต่การคัดย่านด้วย BPF การตรวจจับกำลังด้วย AD8317 และการอ่านประมวลผลด้วย ESP32-S3 จะได้ค่า dBm ที่ผูกกับพิกัด GPS จึงสร้าง Heatmap กลางแจ้งที่โต้ตอบได้บนเว็บ ช่วยดูสัญญาณจริงตามพื้นที่ เวลา และเส้นทางได้ทันที ผลลัพธ์ทำให้การตัดสินใจเชิงพื้นที่ เช่น วางแผนอุปกรณ์ภายนอกอาคารหรือประเมินความครอบคลุมเครือข่าย ทำได้แม่น ชัด และนำไปใช้ต่อในงานวิศวกรรมได้โดยตรง

บรรณานุกรม

- [1] Analog Devices, Inc., “AD8317: 1 MHz–10 GHz Demodulating Log Amplifier—Datasheet,” 2019. เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad8317.html>
- [2] Big Data Institute (BDI) Thailand, “ทำความรู้จักแผนภูมิปฏิทินความร้อน (Calendar Heatmaps),” ธ.ค. 2023. เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://bdi.or.th/big-data-101/calendar-heatmaps/>
- [3] Bluetooth SIG, “Bluetooth Technology Overview.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/>
- [4] Bluetooth SIG, “Bluetooth Low Energy (BLE) Primer.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- [5] Code of Federal Regulations (eCFR), “47 CFR § 15.247—Operation within the bands 902–928 MHz, 2400–2483.5 MHz, and 5725–5850 MHz.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/part-15/section-15.247>
- [6] ETSI, EN 300 328 V2.2.2: Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques, ก.ค. 2019. [ออนไลน์]. Available: <https://www.etsi.org>
- [7] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz–300 GHz),” Health Physics, 2020. เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.icnirp.org>
- [8] IEEE 802.15 Working Group, “IEEE 802.15.4—2.4 GHz channels (11–26) and PHY details.” เข้าถึง เมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://ieee802.org/15/>
- [9] Intel, “Guide to Configure Wi-Fi Channels and Channel Widths.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.intel.com>
- [10] Kistler, “Filter (electronics).” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available: <https://www.kistler.com/INT/en/filter-electronics-/C00000109>

[11] Leaflet, “Leaflet—JavaScript library for interactive maps.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์].

Available: <https://leafletjs.com>

[12] P. Wied, “heatmap.js—Dynamic Heatmaps for the Web.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์].

Available: <https://www.patrick-wied.at/projects/heatmapjs>

[13] SCMA, “สเปกตรัมอนาไลเซอร์: หลักการทำงานเป็นอย่างไร และทำไม่ถึง....” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568.

[ออนไลน์]. Available: <https://scma.co.th/blog/post/what-is-a-spectrum-analyzer>

[14] Wikipedia, “ISM radio band.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available:

https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_radio_band

[15] Wikipedia, “List of WLAN channels.” เข้าถึงเมื่อ 2 พ.ย. 2568. [ออนไลน์]. Available:

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels