การออกแบบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ

Design of The RF Measuring for Low-power Radio Frequency Transceiver Detection System

พีรสัณฑ์ คำสาลี[1], รังสรรค์ วงศ์สรรค์[1], ประโยชน์ คำสวัสดิ์[1]และ อาทิตย์ ศรีแก้ว[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000

โทร 09-7956-9241 E-mail: d5840496@g.sut.ac.th, rangsan@sut.ac.th, prayoth@sut.ac.th, ra@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เพื่อตรวจสอบและแก้ไขปัญหาการรบกวนทางคลื่นความถี่วิทยุจากอุปกรณ์ไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ 1) เทคโนโลยีการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ (RF Measuring Sensor Network) เพื่อรับสัญญาณจากเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำในพื้นที่ที่กำหนด 2) เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Networks) เพื่อให้อุปกรณ์การตรวจหาการใช้คลื่นความถี่ แต่ละหน่วยสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของเน็ตเวิร์คที่ทำงานสอดประสานกันได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งานจริงโดยใช้ความสามารถในการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายแบบไร้สาย 3) เทคโนโลยีการประมวลข้อมูลเชิงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Based Software Computation) เพื่อให้ข้อมูลผลการตรวจวัดที่ได้จาก RF Measuring Sensor ถูกทำการประมวลผล สั่งการและแสดงผล อย่างถูกต้องและแม่นยำ 4) เทคโนโลยีการแสดงผลและการเฝ้าระวังบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Mobile Displaying and Monitoring) เพื่อใช้ในการรายงานผลการวัดทดสอบสัญญาณไวไฟในรูปของความหนาแน่นการใช้งานในพื้นที่ที่ทำการวัดทดสอบ โดยการแสดงภาพของข้อมูลการใช้งานความถี่บนพื้นที่เป้าหมาย (Heat Map)

คำสำคัญ: ระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่กำลังส่งต่ำ

Abstract

This paper proposes the design of the mobile RF measuring for a low-power radio frequency transceiver detection system in order to effectively detect and resolve the problem of radio frequency interference from the wireless devices. This system consists of 4 technologies which are 1) the RF Measuring Sensor Network technology for detecting the signal from the low power transceiver in the specification areas, 2) the wireless Sensor Networks for controlling the RF Measuring Sensor Network devices which can operate according to the objective that in the form of a network, (3) the Artificial Intelligence Based Software Computation technology for processing, command, and display the accurate measurement results from the RF Measuring Sensor Network, and (4) the Mobile Displaying and Monitoring technology for reporting the Wi-Fi measurement results which displaying the frequency usage data on the Heat Map.

Keywords: The low-power RF measurement system.

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้งานอุปกรณ์ไร้สายในพื้นที่ต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงทำให้มีโอกาสเกิดปัญหาการรบกวนคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) จนทำให้อุปกรณ์การสื่อสารใกล้เคียงไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ ตัวอย่างเช่น การรบกวนคลื่นความถี่วิทยุที่ส่งผลต่อระบบควบคุมรถไฟฟ้าบีทีเอสในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ทำให้รถไฟเกิดความล่าช้าและส่งผลกระทบต่อผู้โดยสารจำนวนมาก เนื่องจากไม่สามารถระบบตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ปล่อยสัญญาณออกมารบกวนทางระบบควบคุมรถไฟฟ้าได้ โดยทางสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) มีหน้าที่ตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนข้อมูลในการบริหารคลื่นความถี่ในประเทศไทย

การวัดสัญญาณคลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่ทราบสถานที่ใช้งานที่ชัดเจน หรือต้องการตรวจสอบการกระจายตัวของการใช้คลื่นความถี่ที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมากในปัจจุบัน เช่น การใช้คลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz ในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless local area network, WLAN) ซึ่งมักจะเรียกสั้น ๆว่า Wi-Fi (Wireless Fidelity) หรือการใช้คลื่นความถี่ย่าน (Ultra High Frequency, UHF) ของโดรน เป็นต้น โดยเฉพาะมีการใช้งานในพื้นที่ที่มีรัศมีครอบคลุมบริเวณกว้างจะไม่สามารถทำการวัดตรวจสอบด้วยสถานีวัดที่อยู่ระยะไกลได้ จึงมีความจำเป็นต้องนำเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องเข้าไปในบริเวณพื้นที่เป้าหมายให้ใกล้ที่สุด นอกจากนี้อุปกรณ์

The manuscript received July 12, 2020; revised November 1, 2020; accepted December 21, 2020; available online August 31, 2021.

*Corresponding author: พีรสัณฑ์ คำสาลี, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (E-mail: d5840496@g.sut.ac.th)

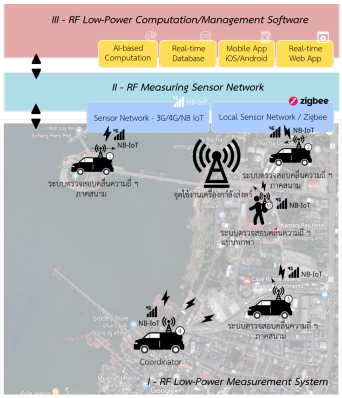
เครื่องมือวัดที่จำเป็นต้องใช้เป็นขั้นต่ำ ได้แก่ เครื่องมือวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ (Spectrum Analyzer) ที่มีความแม่นตรงตลอดความกว้างของแถบความถี่ (Frequency Bandwidth) ที่กำหนดและมีความไวในการตรวจวัด (Sensitivity) ค่อนข้างสูง รวมทั้งสายอากาศอัตราขยายสูงด้านหน้า (High Directive Gain Antenna) [1 - 2] มีความจำเป็นต้องถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์หลักของชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการวัดตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ฯ แต่ละชุด

ด้วยสาเหตุที่ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัดตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ฯ ต้องถูกนำไปติดตั้งในพื้นที่ที่ไกลจากส่วนกลางที่ทำหน้าที่เฝ้าติดตาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีส่งผ่านข้อมูลของระดับสัญญาณของแต่ละพื้นที่ที่วัดสัญญาณได้กลับไปยังศูนย์กลางเพื่อทำการประมวลผลในภาพรวมอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบัน มีเทคโนโลยีในการส่งผ่านข้อมูลด้วยวิธีการสื่อสารที่ทันสมัยและหลายวิธีการมาก [3] เช่น การสื่อสารแบบไร้สายทั้งแบบจุดต่อจุดและแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Point and Point-to-Multiple Point Communications) การส่งผ่านข้อมูลผ่านเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายทั้งจากระบบเครือข่ายที่ให้บริการในปัจจุบันรวมทั้งเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายที่เป็นแบบส่วนตัว (Private network) การส่งข้อมูลผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Phone Service Networks) ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยได้ให้บริการด้วยเทคโนโลยียุคที่ 4 (The 4th Generation: 4-G) ตามความเหมาะสมตามสภาพของพื้นที่

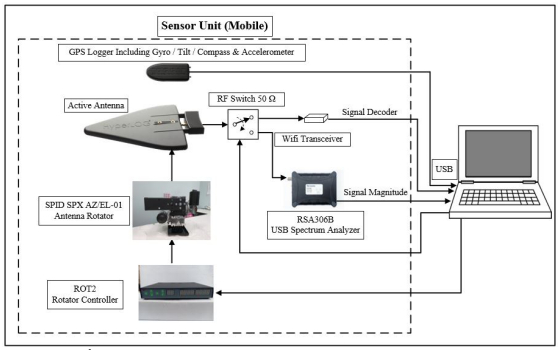
ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ โดยการนำเทคโนโลยีทั้ง 4 ส่วนมาทำงานร่วมกัน ได้แก่ 1) เทคโนโลยีการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ 2) เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย 3) เทคโนโลยีการประมวลข้อมูลเชิงปัญญาประดิษฐ์ 4) เทคโนโลยีการแสดงผลและการเฝ้าระวังบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ เพื่อช่วยให้ทางสำนักงาน กสทช. ได้มีระบบตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพต่อไป

2. การออกแบบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบวัดตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำที่ออกแบบ โดยจะมีรายละเอียดของการทำงานในแต่ละองค์ประกอบหลักในระบบดังต่อไปนี้ 1) การทำงานของฮาร์ดแวร์ในส่วนของ RF Measuring Sensor ประกอบไปด้วยการทำงานของระบบวัดตรวจสอบการใช้คลื่น ฯ ที่ติดตั้งบนรถยนต์เคลื่อนที่ได้พร้อมทั้งสายอากาศอัตราขยายสูงที่สามารถหมุนในระนาบมุมกวาด (Azimuthal Plane) เพื่อตรวจหาคลื่นความถี่ได้ตั้งแต่ 0 - 360 องศา และในระนาบมุมเงย (Elevation Plane) ได้ตั้งแต่ 0 - 90 องศา 2) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จะมีการทำงานในลักษณะเครือข่ายไร้สายเพื่อร่วมกันค้นหาทิศทางและตำแหน่งของเป้าหมายเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำในพื้นที่ที่ต้องการ โดยจะทำการทดสอบแบบโหมดทำงานร่วมกัน (Cooperative Mode) 3) การประมวลข้อมูลเชิงปัญญาประดิษฐ์ ในการประยุกต์ใช้เพื่อการใช้งานจริงนั้น ระบบที่ออกแบบขึ้นจะประกอบด้วยซอฟต์แวร์ประมวลผลกลางเพื่อทำการประมวลผลแบบออฟไลน์ (Offline Processing) ในช่วงของการเก็บข้อมูลและให้ส่วนประมวลผลเชิงปัญญาประดิษฐ์ ได้ทำการเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นในการตรวจสอบหาคลื่นความถี่ฯ 4) เทคโนโลยีการแสดงผลและการเฝ้าระวังบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ เพื่อใช้ในการรายงานผลการวัดทดสอบสัญญาณไวไฟในรูปของความหนาแน่นการใช้งานในพื้นที่ที่ทำการวัดทดสอบ โดยการแสดงภาพของข้อมูลการใช้งานความถี่บนพื้นที่เป้าหมาย (Heat Map)



รูปที่ 1 ระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ

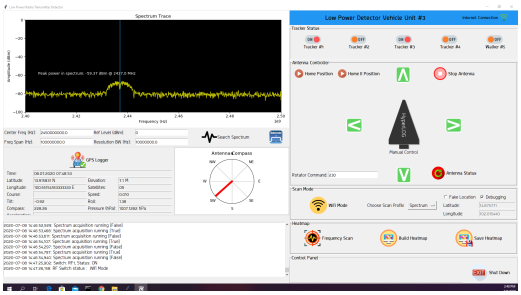


รูปที่ 2 ระบบ RF Measuring Sensors สำหรับใช้งานในรถยนต์

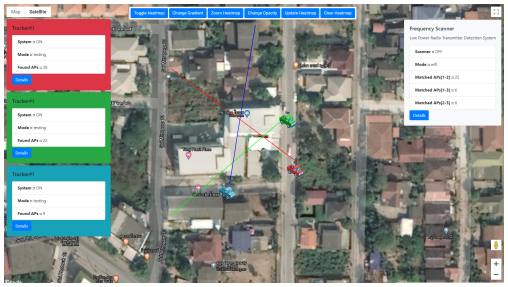
ระบบ RF Measuring Sensor [4 - 5] ที่จะถูกติดตั้งในรถยนต์ที่เคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 2ประกอบไปด้วยครื่องคอมพิวเตอร์แบบ Notebook ส่งคำสั่งให้สายอากาศแบบแอกทีฟ (Active Antenna) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนชุดหมุนสายอากาศ (Antenna Rotator) โดยถูกควบคุมผ่านชุดควบคุม (Rotator Controller) ทำการหมุนในระนาบมุมกวาด ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยบนตัวสายอากาศแบบแอกทีฟจะมีอุปกรณ์ GPS Logger สำหรับระบุตำแหน่งของตัวสายอากาศพร้อมอุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับวัดทิศทาง (Compass) การวางตัว (Tilt) และการเคลื่อนที่ (Accelerometer) อุปกรณ์ RF switch 50 โอห์ม เพื่อให้สายอากาศเลือกอ่านข้อมูลที่บ่งบอกความถี่และ ระดับของสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ (Frequency & Signal Magnitude) ผ่านทางอุปกรณ์ Spectrum Analyzer หรือเลือกที่จะอ่านข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของ

อุปกรณ์เข้าถึงสัญญาณไวไฟที่เป็นเป้าหมาย โดยผ่านทางอุปกรณ์ Wi-Fi Transceiver

สำหรับในส่วนระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย การประมวลข้อมูลเชิงปัญญาประดิษฐ์ และเทคโนโลยีการแสดงผลและการเฝ้าระวังบนอุปกรณ์เคลื่อนที่จะถูกเขียนซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบที่ได้จากระบบ RF Measuring Sensor โดยโครงสร้างซอฟต์แวร์ระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ชั้นการประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (cloud computing layer) ชั้นฮาร์ดแวร์ (hardware layer) ชั้นแสดงผล (display layer) และชั้นอุปกรณ์ภาคสนาม (field equipment layer) สำหรับภาษาหลักที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์คือภาษา Python โดยมีภาษา JavaScript (NodeJS) ใช้ในส่วนของการแสดงผลแผนที่ในชั้นแสดงผล สำหรับหน้าจอหลักของระบบจะถูกดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะประกอบไปด้วย 1) มอดูลการเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ต มีสถานะแสดงด้วย icon ในมุมบนขวามือ 2) มอดูล frequency scanner ประกอบไปด้วย spectrum analyzer สำหรับสแกนความถี่ทั่วไป (Spectrum Mode) และ Wi-Fi analyzer สำหรับสแกนสัญญาณ Wi-Fi (Wi-Fi Mode) 3) มอดูล GPS สำหรับใช้ในการระบุตำแหน่ง (ละติจูด, ลองจิจูด) และทิศทางการชี้ทิศของสายอากาศ (เข็มทิศดิจิตอล) และ 4) มอดูล Antenna Controller สำหรับควบคุมการหมุนสายอากาศ 5) ส่วนของการสร้างและบันทึก Heat Map ขึ้น Firebase โดยมีอีกหน้าต่างหนึ่งสำหรับแสดงแผนที่ของตำแหน่งรถตรวจจับความถี่ในระบบขณะปฏิบัติการ พร้อมทิศทางของสายอากาศ และจำนวนของ Access Point ที่รถแต่ละคันค้นพบจะถูกแสดงอยู่ท้างด้ายซ้ายของหน้าจอดังแสดงในรูปที่ 4



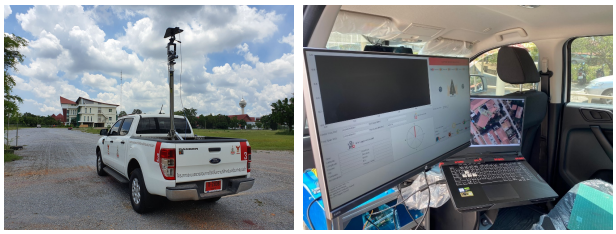
รูปที่ 3 หน้าจอหลักในการควบคุมการทำงานของระบบการตรวจจับความถี่



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงผลการสแกนความถี่ Access Point ของรถตรวจจับความถี่แต่ละคัน

3. การทดสอบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ

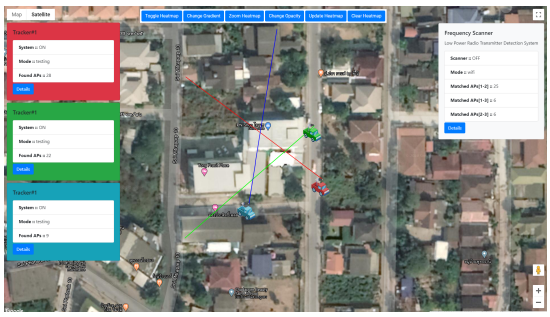
จากการออกแบบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ นำอุปกรณ์และระบบทั้งหมดติดตั้งบน



(ก) (ข)

(ก) ภายนอกรถยนต์ (ข) ภายในรถยนต์

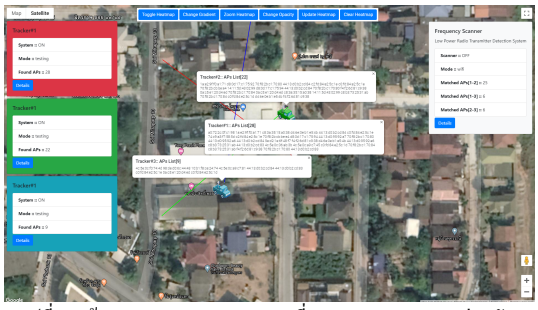
รูปที่ 5 รถยนต์สำหรับตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่



รูปที่ 6 หน้าจอแสดงสถานการณ์ทำงานของรถที่มีการ sync ข้อมูลแบบเวลาจริง

รถยนต์สำหรับตรวจสอบ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ส่วนที่อยู่ภายในรถและ 2) ส่วนที่อยู่ด้านนอกตัวรถ ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำการวัดทดสอบระบบการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ด้วยการนำรถสำหรับทดสอบเข้าล้อมอาคารที่ต้องการทดสอบ ข้อมูลของสถานะของรถตรวจจับความถี่ทั้งหมดในระบบจะถูก sync ไปยังแม่ข่ายประมวลผลได้ถูกต้องเกี่ยวกับจุดตรวจความถี่ ดังแสดงหน้าจอตัวอย่างในรูปที่ 6ซึ่งจะมีการแสดงแผนที่ของตำแหน่งรถตรวจจับความถี่ในระบบขณะปฏิบัติการพร้อมทิศทางของสายอากาศสำหรับตรวจจับความถี่ การปรับตำแหน่งทิศทางของสายอากาศจำเป็นจะต้องให้เกิดจุดตัดดังรูป ตำแหน่งจุดตัดต่าง ๆ จะถูกประมวลผลผ่านแม่ข่ายประมวลผล พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลที่จำเป็นเก็บไว้ในระบบ จากนั้นเริ่มทำการสแกนความถี่ในทิศทางของสายอากาศ โดยสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด ได้แก่โหมดความถี่ทั่วไป (Spectrum Mode) ซึ่งจะเป็นการตรวจจับความถี่จาก spectrum analyzer และโหมด wifi (Wifi Mode) สำหรับตรวจจับความถี่สัญญาณ Wi-Fi โดยเฉพาะ หลังจากนั้นทำการการสแกนความถี่ ระบบของรถตัวตรวจจับความถี่แต่ละคันจะบันทึกข้อมูลแหล่งกำเนิดความถี่ที่สแกนได้พร้อมทั้ง sync ข้อมูล โดยโครงสร้างข้อมูลที่ได้โดยข้อมูลที่สแกนได้ประกอบไปด้วย BSSID, channel และ radio_type ขึ้นไปยังแม่ข่ายเพื่อประมวลผลและแสดงผลต่อไป ตัวอย่างการสแกนความถี่ของ access point ในโหมด Wi-Fi แสดงในรูปที่ 7

เมื่อรถตรวจจับความถี่แต่ละคันทำการสแกนหา access point เรียบร้อยแล้ว จำนวนของ access point ที่สแกนพบ พร้อมทั้ง BSSID จะถูกแม่ข่ายประมวลผลใช้ในการคำนวณหา heatmap โดยทำการ match BSSID ซึ่งเป็น mac address ของ access point แต่ละเครื่อง บนจุดตัดของ



รูปที่ 7 หน้าจอแสดงผลการสแกนความถี่ access point ของรถแต่ละคัน

สายอากาศของรถตรวจจับความถี่แต่ละคัน จำนวน access point ที่ match ได้ในแต่ละจุดตัด จะถูกกำหนดเป็นค่า weight ของ heatmap เพื่อแสดงความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณ เมื่อประมวลผลเรียบร้อยแล้ว ระบบจะทำการแสดงผล heatmap ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งผลการ match โดยรถตรวจจับความถี่หมายเลข 1 และ 2 พบ access point จำนวน 25 ตัว โดยรถตรวจจับความถี่หมายเลข 1 และ 3 พบ access point จำนวน 13 ตัว และโดยรถตรวจจับหมายเลข 2 และ 3 พบ access point จำนวน 12 ตัว รูปที่ 9 แสดงการสร้าง heatmap ใหม่ โดยทำการปรับทิศทางสายอากาศของรถตรวจจับความถี่หมายเลข 3 ใหม่ ซึ่งทำให้ผลการสแกน access point ของรถตรวจจับความถี่หมายเลข 3 ลดลงจาก 12 ตัวเหลือเพียง 9 ตัว และผลการ match เปลี่ยนเป็น 25, 6 และ 6 ตัว สำหรับจุดตัดสายอากาศหมายเลข 1-2 หมายเลข 1-3 และหมายเลข 2-3 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูล heatmap แต่ละครั้งจะถูกบันทึกเก็บไว้ที่ฐานข้อมูลกลาง โดยสามารถนำมาแสดงผลตามลักษณะของพื้นที่ที่ต้องการ หรือตามวันและเวลาที่ต้องการได้

รูปที่ 8 heat map ที่ได้จากการวัดทดสอบ

รูปที่ 9 heat map ที่ได้จากการวัดทดสอบ

4. สรุป

บทความนี้ได้เสนอการออกแบบการออกแบบระบบตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ สำหรับวิทยุคมนาคมที่ใช้กำลังส่งต่ำ ประกอบไปด้วย 4 ส่วนคือ 1) เทคโนโลยีการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ 2) เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย 3) เทคโนโลยีการประมวลข้อมูลเชิงปัญญาประดิษฐ์ 4) เทคโนโลยีการแสดงผลและการเฝ้าระวังบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ เพื่อตรวจสอบหาตำแหน่งของ access point ซึ่งเป็นต้นเหตุที่ก่อให้เกิดการรบกวน จากการทดสอบระบบการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่พบว่า ตัวระบบสามารถค้นหาและเก็บข้อมูล access point ในทิศทางของสายอากาศที่รถแต่ละคันนั้นชี้ทิศไป และเก็บข้อมูลที่สแกนได้ไว้บนแม่ข่าย เพื่อดึงข้อมูลที่ได้มาทำ heat map สำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อเพิ่มเติมคือ เขียนระบบปัญญาประดิษฐ์เพื่อเปรียบเทียบระดับความแรงสัญญาณที่รับได้จาก access point เพื่อระบุทิศทางที่แท้จริงของอุปกรณ์ access point ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Celep, Y. Abdo, K. Dražil, J. Grajciar, M. HudliČka, and B. Pinter, “Harmonics Effects on Microwave Low-Power Measurement”, *In Proc. 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, July, 2018

[2] Wolfgang Damm, Wireless Telecom Group, RF Power Measurement Basics: Why Bandwidth and Speed Matters. [Online].Available: https://boonton.com/~/media/Boonton/Webinars/RF%20Power%20Measurement%20Basics/RF_Power_Measurement_Basics.ashx

[3] L. Garcia, J. M. Jimenez, M. Taha and J. Lloret, “Wireless Technologies for IoT in Smart Cities,” *International Journal of Network Protocols and Algorithms*, Vol. 10 (1), pp. 23-64, 2018.

[4] Andrew H. Brush, “Measurement of Microwave Power: A review of techniques used for measurement of high-frequency RF power”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol. 10 (2), April 2007.

[5] Radio-frequency identification, Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification