

การตรวจจับค้ำควาโดยใช้เทคนิคทางเรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่อง
ที่ความถี่ 24 จิกะเฮิรตซ์



นางสาวมนัญชยา ถาวรสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

BAT DETECTION USING FMCW RADAR TECHNIQUE AT 24 GHz



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การตรวจจับค้ำควาโดยใช้เทคนิคทางเรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่อง
ที่ความถี่ 24 จิกะเฮิรตซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



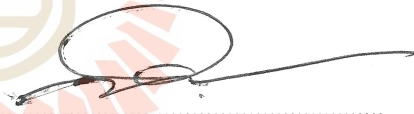
(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.สำราญ สันทาลุนย์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มัญญา ถาวรสวัสดิ์ : การตรวจจับค้ำควาโดยใช้เทคนิคทางเรดาร์แบบมอดูเลตความถี่
ต่อเนื่อง ที่ความถี่ 24 จิกะเฮิรตซ์ (BAT DETECTION USING FMCW RADAR TECHNIQUE
AT 24 GHz) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 87 หน้า.

คำสำคัญ: เรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่อง/เรดาร์/ความถี่ที่ 24 GHz/ไดโอดีทริก

ผลผลิตทางการเกษตรที่เสียหายจากค้ำควานับว่าเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญของเกษตรกร
จึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาของเกษตรกรด้วยเทคโนโลยี งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาและ
พัฒนาเรดาร์ FMCW โดยใช้ความถี่ที่มีค่าสูงในการตรวจจับวัตถุและสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก 2)
วิเคราะห์ข้อมูลผลการตรวจจับวัตถุและสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก และ 3) พัฒนาอุปกรณ์เรดาร์ตรวจจับที่
ใช้ความถี่สูงให้มีการตรวจจับที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น วิธีการศึกษาคือ การใช้เทคนิคทาง
เรดาร์ FMCW ที่ความถี่ 24 GHz การออกแบบระบบเรดาร์ใช้คำสั่ง API ในการปรับค่าพารามิเตอร์ใน
ระบบการปรับปรุงตัวโมดูลภายนอกโดยการวัดสนามไกลของโมดูลเรดาร์ OPS243-C เพื่อหาช่วงของ
การตรวจจับที่มีความกว้างของลำแสงแคบที่ 20° (-3 dB) ในระดับแนวราบ และ 24° (-3 dB) ใน
ระดับแนวตั้ง จากนั้น เพิ่มความสามารถของเรดาร์โดยใช้ Arduino เชื่อมต่อและสั่งการไปยังเซอร์โวม
อเตอร์เพื่อให้เรดาร์มีระยะการตรวจจับที่กว้างขวางขึ้น 360 องศา จากนั้น สร้างแบบจำลองค้ำควา
ที่มีค่าไดโอดีทริกที่เท่าหรือใกล้เคียงกับค้ำควาตัวจริงเพื่อนำมาทดสอบความสามารถของการ
ตรวจจับระบบเรดาร์ของโมดูล OPS243-C พบว่า ความสามารถในการตรวจจับมีระยะสูงสุด คือ
1.2 เมตร โดยแบ่งระยะทดสอบเพิ่มขึ้นทุก ๆ 30 เซนติเมตร จากผลการทดลองทำให้ได้ข้อมูลของการ
สะท้อนกลับของค้ำควาที่มีต่อเรดาร์ OPS243-C อยู่ในช่วงระหว่าง 8.78-9.49 เมตร ค่าเฉลี่ย
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของค้ำควาจำลองที่มีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 27.14-
30.77 เมตรต่อวินาที และค่าเฉลี่ยความเร็วในการเคลื่อนที่ของค้ำควาจำลองที่มีการเคลื่อนไหวที่เพิ่ม
ความเร็วมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 31.25-53.73 เมตรต่อวินาที เมื่อนำวัตถุจำลองหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์
เพื่อตรวจสอบความสามารถที่เพิ่มขึ้นของระยะในการตรวจจับของเรดาร์พบว่า ระยะที่สามารถ
ตรวจจับได้สูงสุดคือ 240 เซนติเมตร เมื่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา มัญญา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

MANANCHAYA THAWONSAWAT : BAT DETECTION USING FMCW RADAR
TECHNIQUE AT 24 GHz. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHANCHAI
THONGSOPA, Ph.D., 87 PP.

Keywords: frequency modulation continuous wave/radar/24 ghz/dielectric

Agricultural products damaged by bat is one of major problems that farmers encounter. Such a problem must be solved using technology. The objectives of this study were: 1) to study and develop FMCW radar using high frequency to detect small objects and lives, 2) analyze result of small objects and lives detection, and 3) develop radar equipment using high frequency for precise and efficient detection. Method used was 24 GHz FMCW radar. In designing radar, API command was used to adjust parameters in system. External module was improved by measuring far field of OPS243-C radar module to determine detection range with narrow beam width of 20° (-3 dB) in horizontal plane and 24° (-3 dB) in vertical plane. Then, radar capability was enhanced using Arduino to connect and direct to servo motor so that detection range of radar is greater to 360 degrees. Then, a bat model was made with the same dielectric as real bats and used to test capability of OPS243-C radar module. Results showed that the greatest detection range was 1.2 m, although the test range increased every 30 cm. From experimental results, the reflection data of OPS243-C radar range 8.78-9.49 m. The average of normal movement speed of bat model ranged from 27.14 to 30.77 m/s. The average of increased movement speed of bat model ranged from 31.25 to 53.73 m/s. When using simulated object covered by aluminum foil to test increased detectability of radar, it was found that the greatest detectability range was 240 cm with foil coverage.

School of Electronics Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature.....*Mananchaya T.*.....
Advisor's Signature.....*T. Chanchai*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิริพัฒน์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการตีพิมพ์บทความในประชุมวิชาการระดับนานาชาติ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมืออุปกรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

มนัญญา ถาวรสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	3
1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ปรัชญาหรือบรรณกรรม.....	4
1.7.1 การตรวจสอบแมลงพร้อมการอ้างอิงพิเศษเกี่ยวกับเทคนิคเรดาร์.....	4
1.7.2 การตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก.....	9
1.7.3 การใช้แบบจำลองในการทดลองดูการกระเจิงของคลื่น.....	10
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 เรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่อง.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2	หลักการเรดาร์.....	17
2.2.1	สมการเรดาร์.....	17
2.3	ความถี่ที่ 24 GHz.....	18
2.4	สายอากาศ.....	20
2.4.1	สนามระยะไกล.....	20
2.5	สมบัติไดอิเล็กทริก.....	21
2.5.1	วัสดุไดอิเล็กทริก.....	21
3	ระเบียบวิธีวิจัยการออกแบบเรดาร์ FMCW ความถี่ 24 GHz.....	24
3.1	บทนำ.....	24
3.2	การออกแบบสร้างโมดูลเรดาร์ที่ความถี่ 24 GHz.....	24
3.2.1	OPS243-C FMCW Radar.....	25
3.3	การปรับค่าพารามิเตอร์ภายในตัวโมดูลเรดาร์.....	30
3.3.1	ชุดคำสั่งหมวดตัว “ I ” เพื่อตั้งค่า UART Control.....	32
3.3.2	ชุดคำสั่งหมวด “ T ” เพื่อตั้งค่าความถี่.....	33
3.3.3	ชุดคำสั่งหมวด “ S ” และ “ X ” เพื่อการตั้งค่า buffer.....	35
3.3.4	ชุดคำสั่ง “ M ” เพื่อใช้ในการควบคุมขนาด และควบคุมความไว เพื่อตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุ.....	36
3.3.5	ชุดคำสั่ง “ R ” เพื่อเป็นตัวกรองความเร็ว/ช่วง/ทิศทางที่รายงาน โดยใช้การตั้งค่าเหล่านี้เพื่อกำหนดช่วงของข้อมูลที่รายงาน.....	37
3.3.6	ชุดคำสั่ง “ F ” เพื่อการกำหนดจำนวนทศนิยมที่จะแสดงค่า.....	38
3.3.7	ชุดคำสั่ง “ B ” เลือกตั้งค่าแสดงผลเมื่อไม่มีการตรวจจับ.....	38
3.3.8	ชุดคำสั่ง “ A ” เพื่อบันทึกและรีเซ็ตค่า.....	38
3.4	การสร้างเซอร์โวมอเตอร์.....	41
3.5	ขนาดของแบบจำลองค่างคาวที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.6	การหาค่าไดอิเล็กทริกที่เท่ากันเพื่อสร้างแบบจำลอง.....	43
3.6.1	ค่าไดอิเล็กทริกค่างคาว.....	47
3.6.2	ค่าไดอิเล็กทริกแบบจำลองพลาสติก ABS.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.3 ค่าไดอิเล็กทริกแบบจำลองพลาสติก ABS ที่เพิ่มกระดาศ.....	49
3.6.4 การเก็บข้อมูลการทดลอง.....	50
3.7 สรุปผล.....	50
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	51
4.1 กล่าวนำ.....	51
4.2 การรายงานผลวิจัย.....	51
4.2.1 ผลการทดลองที่ระยะต่าง ๆ.....	53
4.3 การอภิปรายผล.....	75
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	77
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	จำนวนสิ่งพิมพ์เกี่ยวกับเรดาร์กีฏวิทยาจากฐานข้อมูล Google Scholar.....5
1.2	จำนวนสิ่งพิมพ์โดยประมาณที่กล่าวถึงกลุ่มเรดาร์แมลงที่เกี่ยวข้อง7
2.1	ตารางแสดงวัสดุและค่าไดอิเล็กทริก..... 22
3.1	ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้าของโมดูล..... 27
3.2	ชุดคำสั่งหมวด “ I ” 32
3.3	ชุดคำสั่งหมวด “ T ” 33
3.4	ชุดคำสั่งหมวด “ S ” และ “ X ” 35
3.5	ค่าขนาดบัฟเฟอร์..... 35
3.6	ชุดคำสั่งหมวด “ M ” 36
3.7	ชุดคำสั่งหมวด “ R ” 37
3.8	ชุดคำสั่งหมวด “ F ” 38
3.9	ชุดคำสั่งหมวด “ B ” 38
3.10	ชุดคำสั่งหมวด “ A ” 38
4.1	สรุปผลในการทดลองที่ระยะต่าง ๆ..... 70
4.2	สรุปผลการทดลองเมื่อหุ้มวัตถุด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 75

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่รวบรวมในช่วงเวลา 5 ปี จากช่วง ค.ศ. 1950-2020.....	5
1.2	กราฟแสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่รวบรวมในช่วงเวลา 1 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2005 ถึง 2020	6
1.3	การจำแนกประเภทระบบเรดาร์แมลงสองระดับ	6
1.4	การทดลองโดยใช้กับดักแสง.....	7
1.5	กับดักแสงพร้อมเรดาร์ที่ติดตั้งบนรถของเล่น.....	8
1.6	การสังเกตเป้าหมายแมลงที่สูงขึ้นโดยใช้เรดาร์เมฆ.....	8
1.7	โดรนนาโนที่ใช้ในการทดสอบเรดาร์ FMCW.....	10
1.8	ผลการทดสอบการตรวจจับของโดรนนาโน.....	10
1.9	การจำลองการกระเจิงของคลื่นวิทยุจากค้างคาว.....	11
2.1	(a) สัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับ (b) ความถี่บีท.....	13
2.2	กราฟแสดงระบบความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลต.....	15
2.3	ความสัมพันธ์กับการมอดูเลตรูปแบบสามเหลี่ยม.....	16
2.4	แผนผังการทำงานของเรดาร์	17
2.5	ภาพแสดงความยาวคลื่น ความถี่ และตัวอักษรแบนด์เรดาร์.....	19
2.6	ระยะสนามใกล้และสนามไกล	20
3.1	โมดูลเรดาร์ OPS243-C	25
3.2	สาย Micro USB Type B to USB 2.0 Type A ยาว 1 เมตร	26
3.3	ขนาดโดยละเอียดของโมดูล.....	26
3.4	แผนภาพของ OPS243-C.....	27
3.5	ชุดจานหมุน 360 องศาวัตแบบแผนรูปแบบการกระจายของคลื่น.....	29
3.6	เครื่อง Spectrum Analyzer แสดงความถี่ 24.005 GHz.....	29
3.7	รูปแบบการกระจายของคลื่นของโมดูล OPS243-C.....	30
3.8	โปรแกรม Tera Term	31
3.9	พีเจอร์การเก็บบันทึกเก็บผลของข้อมูล.....	31
3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ n และความถี่	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการตั้งค่า T และผลลัพธ์ความถี่..... 34
3.12	การตั้งค่าขอบเขตของการตรวจจับ..... 36
3.13	การตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดภายในตัวโมดูลเรดาร์..... 39
3.14	การตั้งค่าคำสั่งการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์..... 40
3.15	เซอร์โวมอเตอร์..... 40
3.16	ระบบเรดาร์..... 41
3.17	พลาสติก ABS สีดำที่ใช้ในการขึ้นรูป..... 42
3.18	สร้างค้ำคาวจำลองด้วย 3D Printing 42
3.19	ขนาดของแบบจำลองค้ำคาว..... 43
3.20	ชุดหัววัดไดอิเล็กทริก N1501A..... 44
3.21	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าไดอิเล็กทริก..... 44
3.22	เครื่องมือวัด Network Analyzer (Keysight, E5071C ENA series 300 kHz –20 GHz)..... 45
3.23	วิธีการวัดค่าไดอิเล็กทริก..... 45
3.24	การวัดค่าไดอิเล็กทริกของค้ำคาวจำลอง..... 46
3.25	กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกของค้ำคาว..... 46
3.26	กราฟแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของค้ำคาว..... 47
3.27	กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS..... 47
3.28	กราฟแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS..... 48
3.29	กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS ที่อัดกระดาศ..... 48
3.30	กราฟแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS ที่อัดกระดาศ..... 49
3.31	การเตรียมการทดลอง..... 50
4.1	ภาพการทดลองโดยการนำค้ำคาวจำลองเคลื่อนไหวเข้าสู่เรดาร์..... 51
4.2	ภาพแสดงสัญญาณไฟสีแดงเมื่อวัดมุมการเคลื่อนที่เข้าสู่เรดาร์..... 52
4.3	ภาพการทดลองโดยการนำค้ำคาวจำลองเคลื่อนไหวออกจากเรดาร์..... 52
4.4	ภาพแสดงสัญญาณไฟสีฟ้าเมื่อวัดมุมการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์..... 53
4.5	การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัดอยู่นิ่งที่ระยะ 30 เซนติเมตร..... 53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุอยู่นิ่งที่ระยะ 150 เซนติเมตร..... 67
4.34	ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 150 เซนติเมตร..... 68
4.35	การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 150 เซนติเมตร..... 68
4.36	ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 150 เซนติเมตร... 69
4.37	การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 150 เซนติเมตร..... 69
4.38	การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์อยู่นิ่งที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 71
4.39	ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร 71
4.40	ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 72
4.41	การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 72
4.42	ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 73
4.43	ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 74
4.44	การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการเพิ่มความเร็วการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร..... 74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเกษตรเป็นงานที่สำคัญมากสำหรับโลกเพราะเป็นงานที่สร้างเสริมความสุขสมบูรณ์ให้แก่พลเมืองโลกโดยส่วนรวม ผลผลิตทางการเกษตรเป็นปัจจัยสนับสนุนให้เกิดสินค้า อาหาร รวมถึงผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ใช้ภายในประเทศและส่งออก ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นฐานทางการเกษตร แม้จะมีการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในหลายด้าน ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศยังคงประกอบอาชีพทางเกษตร โดยเฉพาะในต่างจังหวัด จากผลการสำรวจภาวะการทำงานของประชากรไทยโดยสำนักงานสถิติแห่งชาติในเดือนกุมภาพันธ์ 2565 พบว่า ผู้ที่ทำงานในภาคเกษตรกรรมมีจำนวน 11.39 ล้านคน จากจำนวนผู้มีงานทำทั้งหมด 38.74 ล้านคน คิดเป็นร้อยละ 30.10 (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2565) ดังนั้น การเกษตรเป็นงานที่สำคัญต่อประชากรไทย

นอกเหนือจากความสำคัญในด้านอาชีพแล้ว การเกษตรมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ปี 2565 ประเทศไทยมีการส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ คิดเป็นมูลค่า 1,816,433 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจาก 1,503,024 ล้านบาทของปี 2564 เนื่องจากการฟื้นตัวทางเศรษฐกิจของประเทศคู่ค้า ส่งผลให้มีกำลังซื้อมากขึ้น จากสถิติปี 2565 ผลไม้จัดเป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่มีความสำคัญเป็นลำดับที่ 2 โดยมีมูลค่าการส่งออกเท่ากับ 265,515 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 14.62 ของมูลค่าส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ ผักจัดเป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่มีความสำคัญเป็นลำดับที่ 9 มูลค่า 30,330 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 1.67 ของมูลค่าส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2566) การรักษาสินค้าเกษตรให้มีคุณภาพสูงจึงมีความสำคัญต่อมูลค่าของสินค้า

ในการรักษาสินค้าเกษตรให้มีมูลค่าสูง จำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของสินค้าเกษตร ศัตรูพืชเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ผักและผลไม้เสียหาย เช่น แมลงวันผลไม้ ซึ่งสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจไม่ต่ำกว่าปีละ 3,000 ล้านบาท (สัณญาณี ศรีคชา, 2555) นอกจากนี้แล้ว ค้างคาวเป็นศัตรูพืชชนิดหนึ่งที่ทำลายผลผลิตทางการเกษตรได้รับความเสียหายประมาณร้อยละ 5 ของความเสียหายจากศัตรูพืชทั้งหมด (Handley, 1991) วิธีการป้องกันกำจัดศัตรูพืชมีหลายวิธี ได้แก่ การป้องกันกำจัดโดยวิธีเขตกรรม การป้องกันกำจัดโดยวิธีทางกล การป้องกันกำจัดโดยวิธีทางชีวภาพ การป้องกันกำจัดโดยวิธีใช้พันธุ์ต้านทาน การป้องกันกำจัดโดยวิธีการทำหมันแมลง การป้องกันกำจัดโดยวิธีใช้สารเคมี และการบริหารศัตรูพืช (แสงมณี เกิดพงษ์ และคณะ, 2550)

การใช้เรดาร์ในการตรวจจับเป็นหนึ่งในวิธีการป้องกันกำจัดศัตรูพืชโดยวิธีทางกล เรดาร์เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจหาวัตถุที่อยู่ในระยะรัศมีของเรดาร์และแสดงให้เห็นบนจอได้ (ซรีตัน มงคลสวัสดิ์, 2540) การใช้เรดาร์เป็นวิธีการที่กำลังได้รับความสนใจในการวิจัยและการพัฒนาเพื่อสนับสนุนกิจกรรมการรักษามูลค่าของสินค้าเกษตร เนื่องจากเรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตได้ในระยะไกลในเวลาอันรวดเร็ว คุณสมบัติดังกล่าวสามารถใช้ในการระบุตำแหน่งและการเคลื่อนไหวของศัตรูพืชในพื้นที่ที่ใหญ่ เช่น แมลง ค้างคาว ได้เป็นอย่างดี ข้อมูลที่ได้รับจากเรดาร์เป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรและเจ้าหน้าที่ดูแลด้านการจัดการศัตรูพืชในการระบุและกำหนดพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการกักกินผลผลิตหรือการกระทำที่อาจทำให้เกิดความเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันนำไปสู่การจัดทำแผนการจัดการที่เป็นระบบเพื่อลดความเสี่ยงและควบคุมศัตรูพืชในพื้นที่ที่สำคัญ

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การประยุกต์งานวิจัยด้านเรดาร์ในด้านการเกษตรยังมีอยู่จำนวนจำกัดในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การพัฒนาเรดาร์ FMCW 24GHz เพื่อใช้ในการเกษตรยังมีอยู่น้อยมากเรดาร์ FMCW 24GHz สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับระยะทางและความเคลื่อนไหวของวัตถุ ด้วยการวัดแบบความเข้มสัญญาณเป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วได้ และสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุได้ มีความละเอียดที่ค่อนข้างสูง ทำให้สามารถแยกแยะวัตถุขนาดเล็กหรือคุณสมบัติภายในวัตถุขนาดใหญ่ได้ด้วยความแม่นยำที่มากกว่าเมื่อเทียบกับเรดาร์ความถี่ต่ำ สามารถสะท้อนพื้นผิวและทะลุผ่านวัสดุบางอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก 24 GHz จะมีโอกาสน้อยที่จะถูกดูดซับหรือลดทอนโดยวัตถุเป้าหมาย อีกทั้งสามารถทำงานในสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศที่เลวร้าย เช่น ฝนตก หมอก หรือฝุ่นละออง ซึ่งอาจขัดขวางประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการตรวจจับอื่นๆ (Wolff, 1997) ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเรดาร์ FMCW เพื่อใช้ตรวจจับวัตถุและสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กที่สามารถนำไปใช้กับงานเกษตรกรรมได้ ซึ่งจะช่วยเกษตรกรในการรักษาผลผลิตซึ่งมีผลต่อรายได้ของเกษตรกรในพื้นที่ต่างๆและมีผลกระทบต่อมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรของประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและพัฒนาเรดาร์ FMCW โดยใช้ความถี่ที่มีค่าสูงในการตรวจจับวัตถุและสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก

1.2.2 วิเคราะห์ข้อมูลผลการตรวจจับวัตถุและสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก

1.2.3 พัฒนาอุปกรณ์เรดาร์ตรวจจับที่ใช้ความถี่สูงให้มีการตรวจจับที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

งานวิจัยนี้มีข้อตกลงเบื้องต้นในการออกแบบกระบวนการทำงานดังนี้

- 1.3.1 ตรวจสอบจับศัตรูพืช โดยต้องการทราบช่วงเวลาที่สามารถพบศัตรูพืชออกมาเป็นจำนวนมาก
- 1.3.2 นำข้อมูลที่ได้มาจัดทำในรูปแบบกราฟเพื่อแสดงพฤติกรรมของศัตรูพืช
- 1.3.3 ออกแบบระบบสร้างเครื่องมือตรวจสอบโดยใช้ความรู้และเทคนิคทางเรดาร์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรดาร์และการตรวจสอบ เพื่อจัดทำเครื่องมือการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคเรดาร์ FMCW ที่ความถี่ 24GHz
- 1.4.2 ทดสอบและเก็บผลเรดาร์ในการตรวจสอบศัตรูพืชในรูปแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาความถี่ ข้อมูลของเรดาร์และเลือกอุปกรณ์โมดูลให้เหมาะสมกับงานวิจัย
- 3) ออกแบบระบบและสร้างอุปกรณ์เรดาร์
- 4) ทดสอบ เก็บผล และวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 5) จัดทำรายงานและเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการ ถึงวิธีการนำคลื่นเรดาร์มาใช้ในการตรวจจับวัตถุและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก
- 3) สร้างเรดาร์ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานและปรับปรุงเครื่องให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) โมดูลเรดาร์ FMCW OPS243-C

- 2) สายอากาศ
- 3) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 4) ตัวอย่างศัตรูพืชที่ใช้ในการทดลอง

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปříทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้างและทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ผลการพัฒนาเรดาร์และการวิเคราะห์ข้อมูลช่วยในการวางแผนจัดการศัตรูพืชและยกระดับผลผลิตทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.6.2 ความรู้ที่ได้จากการพัฒนาเรดาร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

1.7 ปรัชศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

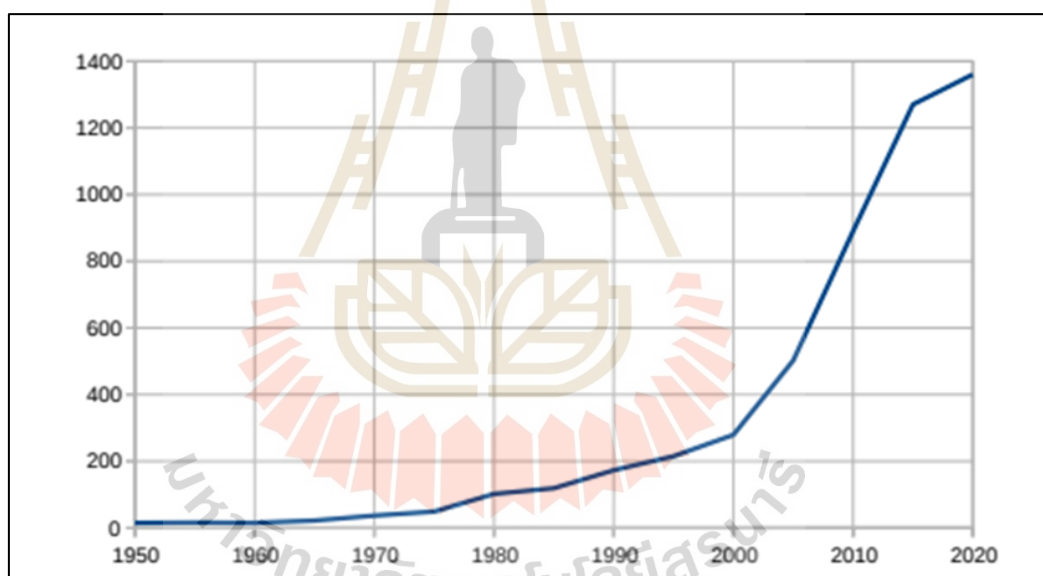
ในบรรดาวิธีการสำรวจระยะไกลทั้งหมด เรดาร์เป็นระบบที่ใหญ่ที่สุดและมีแนวโน้มมากที่สุด อีกทั้งเรดาร์มีประวัติอันยาวนานที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว และมีศักยภาพที่ดีในการเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว การตรวจจับที่ล้ำสมัย ช่วยให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบและเป็นสากล แม้ว่าจะมีประวัติศาสตร์อันยาวนาน แต่เรดาร์ในสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กยังคงเป็นหัวข้อที่กำลังเติบโตพร้อมกับความท้าทายหลายประการและปัญหาที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้

1.7.1 การตรวจสอบแมลงพร้อมการอ้างอิงพิเศษเกี่ยวกับเทคนิคเรดาร์

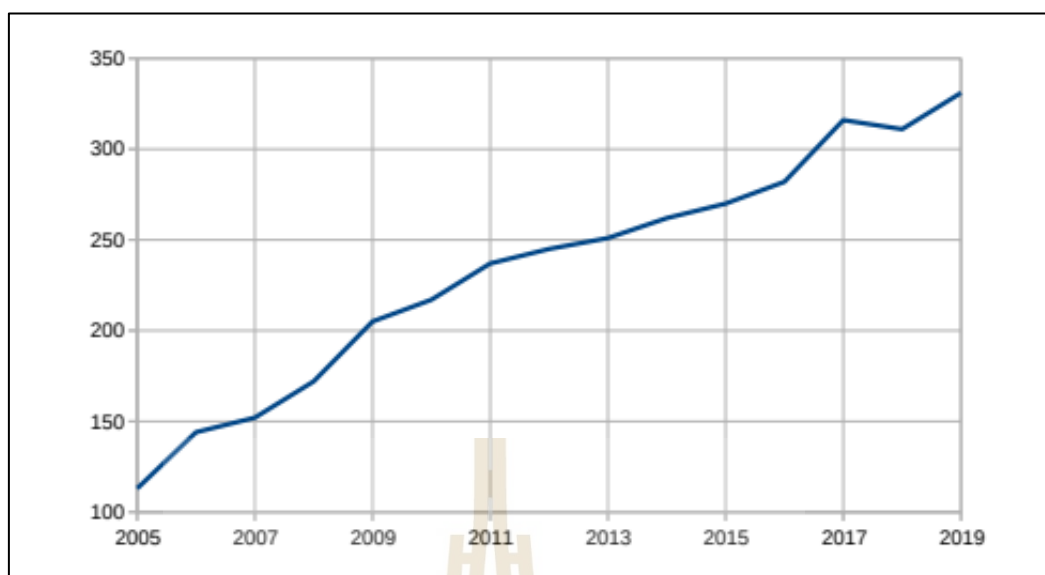
การติดตามเป็นสิ่งสำคัญจำเป็นต้องมีเทคนิคการตรวจสอบอย่างเป็นระบบอย่างครอบคลุม โดยเน้นไปที่เทคนิคเรดาร์ และศักยภาพของเทคนิคเหล่านี้ในการแก้ปัญหาในการติดตาม โดยเน้นถึงความสำคัญของเทคโนโลยีขั้นสูงและการใช้วิทยาการทางคอมพิวเตอร์เข้ามาเพื่อช่วยในการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพของเครื่องมือเรดาร์ให้มีขนาดที่กะทัดรัดและสามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวเลขดังกล่าวของสิ่งพิมพ์ที่เกี่ยวข้องในช่วงเวลา ใช้เป็นเอกสารอ้างอิงจากฐานข้อมูล Google Scholar ด้วยวลีค้นหาที่วิทยาศาสตร์ และเรดาร์ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.1 แสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่รวบรวมในช่วงเวลาห้าปี เริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 1946–1950 และสิ้นสุดในปี ค.ศ. 2016–2020 และในรูปที่ 1.2 แสดงจำนวนของสิ่งพิมพ์ที่รวบรวมในช่วงเวลาหนึ่งเริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 2005

ตารางที่ 1.1 จำนวนสิ่งพิมพ์เกี่ยวกับเรดาร์ก็ฏวิทยาจากฐานข้อมูล Google Scholar

Years (1946–2020)	Amount	Years (2005–2019)	Amount
1946–1950	15	2005	113
1951–1955	16	2006	144
1956–1960	15	2007	152
1961–1965	22	2008	172
1966–1970	37	2009	205
1971–1975	49	2010	217
1976–1980	102	2011	237
1981–1985	119	2012	245
1986–1990	173	2013	251
1991–1995	215	2014	262
1996–2000	279	2015	270
2001–2005	502	2016	282
2006–2010	890	2017	316
2011–2015	1270	2018	311
2016–2020	1360	2019	331

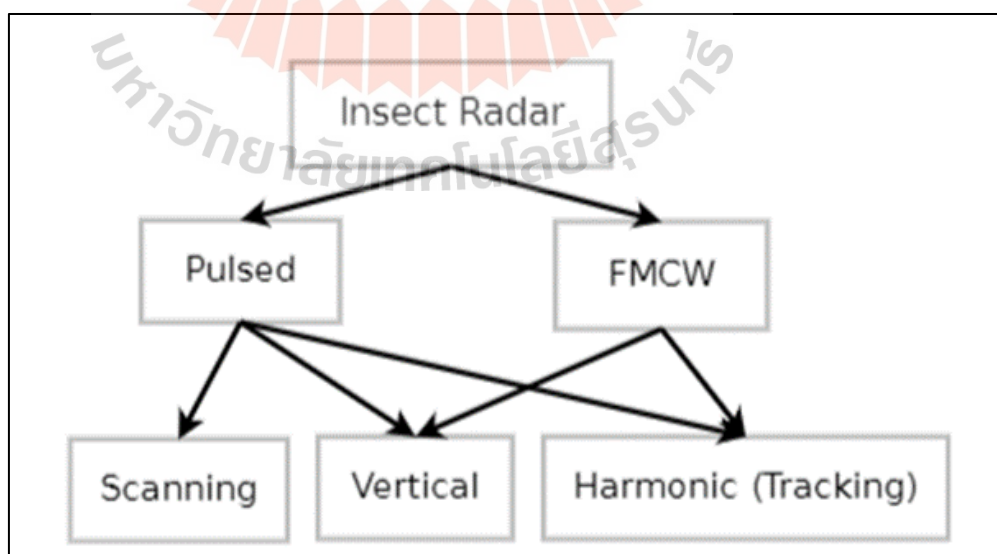


รูปที่ 1.1 กราฟแสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่รวบรวมในช่วงเวลา 5 ปีจากช่วง ค.ศ.1950-2020



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่รวบรวมในช่วงเวลา 1 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2005 ถึง 2020

การนำเสนอการจำแนกประเภทอย่างง่ายของชุดเรดาร์แมลงโดยพิจารณาจากสิ่งพิมพ์ดังกล่าวโดยคำนึงถึงหลักการทำงานของเรดาร์ กล่าวถึงกลุ่มเรดาร์หลักในการอ้างอิงหลายรายการดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งแสดงการจำแนกประเภทระบบเรดาร์แมลงสองระดับโดยใช้แนวคิดที่กล่าวถึงความนิยมที่เพิ่มขึ้นของเรดาร์ FMCW และการอัปเดตของจำนวนสิ่งพิมพ์โดยประมาณที่กล่าวถึงกลุ่มเรดาร์แมลงที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 1.2

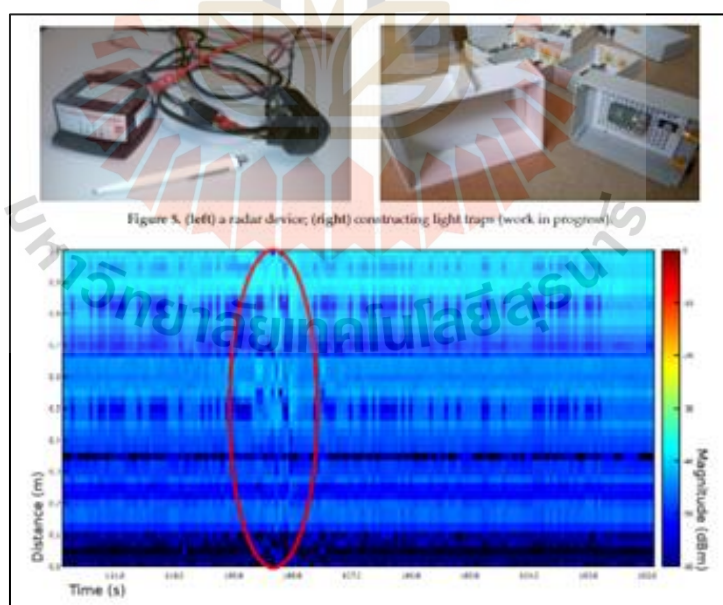


รูปที่ 1.3 การจำแนกประเภทระบบเรดาร์แมลงสองระดับ

ตารางที่ 1.2 จำนวนสิ่งพิมพ์โดยประมาณที่กล่าวถึงกลุ่มเรดาร์แมลงที่เกี่ยวข้อง

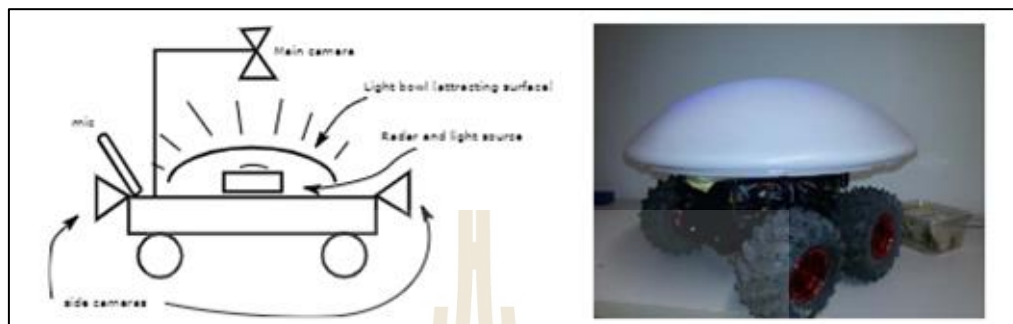
	Pulsed	FMCW	Scanning	Vertical	Harmonic	C-Band	S-Band	X-Band	Ku-Band	Ka-Band
All-time	5100	50	29,900	500	2890	440	210	290	20	30
Since 2015	1240	20	8331	140	1010	110	80	90	10	10
% since 2015	24	40	28	28	35	25	38	31	50	33

หลักการ FMCW ช่วยให้สามารถสังเกตการณ์ได้ในระยะสั้น ๆ นอกจากนั้น ยังมีแนวคิดและวิธีแก้ปัญหาเกี่ยวกับช่วงที่มีขนาดเล็กกะทัดรัดรวมไปถึงการประหยัดพลังงาน จึงสามารถชี้ให้เห็นว่ามีเพียงเรดาร์ FMCW เท่านั้นที่สามารถตอบสนองต่อแนวคิดนี้ได้ ตารางที่ 1.2 ซึ่งแสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่กล่าวถึงกลุ่มเรดาร์แมลงที่ตีพิมพ์ตลอดเวลาและช่วงเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์ของเอกสารที่เผยแพร่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 อยู่ในแถวสุดท้ายของตารางย่อทั้งหมด เพื่อแสดงการเน้นย้ำสัดส่วนของกลุ่มเรดาร์ที่แตกต่างกัน และจากตารางที่ 1.2 แสดงจำนวนสิ่งพิมพ์ที่กล่าวถึงเรดาร์ของแถบความถี่เรดาร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งยืนยันถึงความสนใจที่เพิ่มขึ้น สามารถปรับปรุงความก้าวหน้าทางเทคนิค ความก้าวหน้าในการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่และการเรียนรู้ของเครื่องมือ และความต้องการที่เพิ่มขึ้นให้มีขนาดที่กะทัดรัดและประหยัดทรัพยากรซึ่งเป็นผลให้ระบบ FMCW ได้รับความนิยมที่มากขึ้น



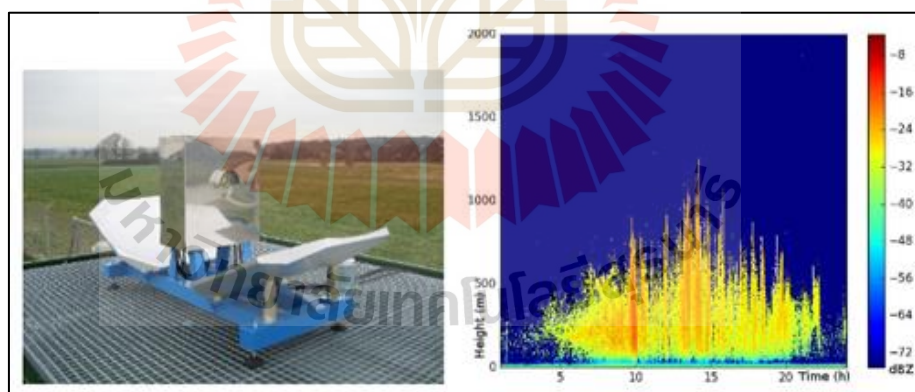
รูปที่ 1.4 การทดลองโดยใช้กับดักแสง

รูปที่ 1.4 ใช้กับดักแสงสำหรับการทดลองและอุปกรณ์เรดาร์ FMCW สำหรับการตั้งค่าจาก การประมาณการเบื้องต้นพบว่า สามารถตรวจจับแมลงที่บินเข้าหาแสงได้และมีการแสดงผลใน รูปแบบแผนภาพเวลาที่มีการมีอยู่ของแมลง



รูปที่ 1.5 กับดักแสงพร้อมเรดาร์ที่ติดตั้งบนรถของเล่น

จากรูปที่ 1.5 แสดงการติดตั้งเรดาร์ที่ล้อมรอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงยูวีที่ตรงกลางของรถของ เล่นและครอบด้วยเครื่องกระจายแสง สามารถติดตามและตรวจจับชนิดของแมลงได้รอบทิศทาง โดย จุดสำคัญในการติดตั้งคือเรดาร์ที่จะสามารถประเมินมวลชีวภาพของแมลงได้ในปริมาณมากรอบ ๆ



รูปที่ 1.6 การสังเกตเป้าหมายแมลงที่สูงขึ้นโดยใช้เรดาร์เมฆ

รูปที่ 1.6 แสดงการสังเกตเป้าหมายแมลงที่สูงขึ้นโดยใช้เรดาร์เมฆ 94 GHz FMCW เพื่อ วัตถุประสงค์ทางอุตุนิยมวิทยาเรดาร์สามารถตรวจจับเมฆได้ต่ำสุด 30 เมตร สามารถตรวจจับ เป้าหมายที่ความสูงอย่างน้อย 8 กิโลเมตร เพื่อตรวจสอบปรากฏการณ์ไบโอแอโรซอลเนื่องจากเป็น ส่วนผสมของแมลงและวัสดุชีวภาพอื่น ๆ และแสดงการสะท้อนแสงเรดาร์เนื่องจากแมลงสามารถบิน

ได้สูงขึ้นเมื่ออากาศอุ่นขึ้น การรวมระบบเรดาร์ที่อธิบายไว้จะช่วยให้เราสามารถดำเนินการหลายระบบ
อย่างเป็นระบบ

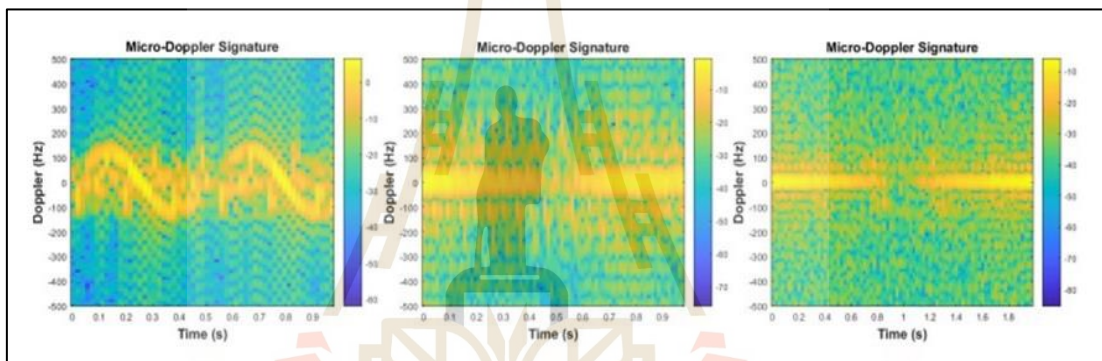
บทความนี้เป็นบทความทบทวนที่ให้การวิเคราะห์ที่ครอบคลุมเกี่ยวกับแนวทางการตรวจสอบ
แมลง โดยเน้นที่เทคนิคเรดาร์ ผู้เขียนทบทวนและวิเคราะห์วรรณกรรมที่มีอยู่เกี่ยวกับการตรวจสอบ
แมลงและเทคนิคเรดาร์เพื่อระบุวิธีการตรวจสอบแมลงที่สำคัญทางประวัติศาสตร์และสมัยใหม่ มีการ
จำแนกประเภทของชุดเรดาร์แมลงที่ปรับปรุงใหม่ และแยกแยะโซลูชันเรดาร์แมลงสามกลุ่มหลัก: การ
สแกน การมองแนวตั้ง และฮาร์มอนิก เอกสารนี้ไม่ได้นำเสนอข้อมูลต้นฉบับ แต่เป็นการสังเคราะห์
และวิเคราะห์ข้อมูลที่นำเสนอในเอกสารเกี่ยวกับการตรวจสอบแมลงและเทคนิคเรดาร์แทน ดังนั้น
บทความนี้จึงไม่มีผลลัพธ์เฉพาะเจาะจงใด ๆ ในความหมายแบบดั้งเดิม แต่ให้ภาพรวมที่ครอบคลุม
เกี่ยวกับสถานะปัจจุบันของการตรวจสอบแมลงและเทคนิคเรดาร์

1.7.2 การตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก

เรดาร์ FMCW ยังไม่ได้รับในการใช้งานเพื่อตรวจจับเป้าหมายที่มีขนาดเล็กในรูปที่
1.7 โดยมีจุดมุ่งหมายในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบ เพื่อให้สามารถตรวจจับเป้าหมายนาโนและ
แยกสัญญาณดอปเพลอร์ได้ โดยได้รับการทดสอบกับโดรนและสัญญาณไมโครดอปเพลอร์ของ
เป้าหมายถูกดึงออกมาโดยใช้เทคนิค Short-Time Fourier Transform (STFT) เป้าหมายที่เล็กที่สุด
ที่จับได้โดยเรดาร์ FMCW คือโดรนนาโนขนาด 5 ซม. ความเร็วของโดรนนาโนมีความสามารถในการ
ตรวจจับอยู่ที่ 0.05m/s (ช้า), 0.13m/s (ปานกลาง), 0.5m/s (เร็ว) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 การตรวจจับ
เป้าหมายที่มีขนาดเล็กมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับเพื่อใช้งานในฟาร์ม
ซึ่งมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเกษตร ด้วยผลลัพธ์ที่น่ายินดีในการตรวจจับและจำแนก
เป้าหมายระดับนาโน ซึ่งส่วนใหญ่มองไม่เห็นด้วยเรดาร์ทั่วไป โดยการใช้เทคนิค Short-Time Fourier
Transform (STFT) ทำให้สามารถแยกสัญญาณไมโครดอปเพลอร์ของเป้าหมายได้ เทคโนโลยีนี้มี
ศักยภาพในการตรวจจับระยะใกล้ โดยไม่มีช่วงบอดและมีความละเอียดสูงมากทำให้เหมาะที่จะนำมา
พัฒนาต่อยอดได้



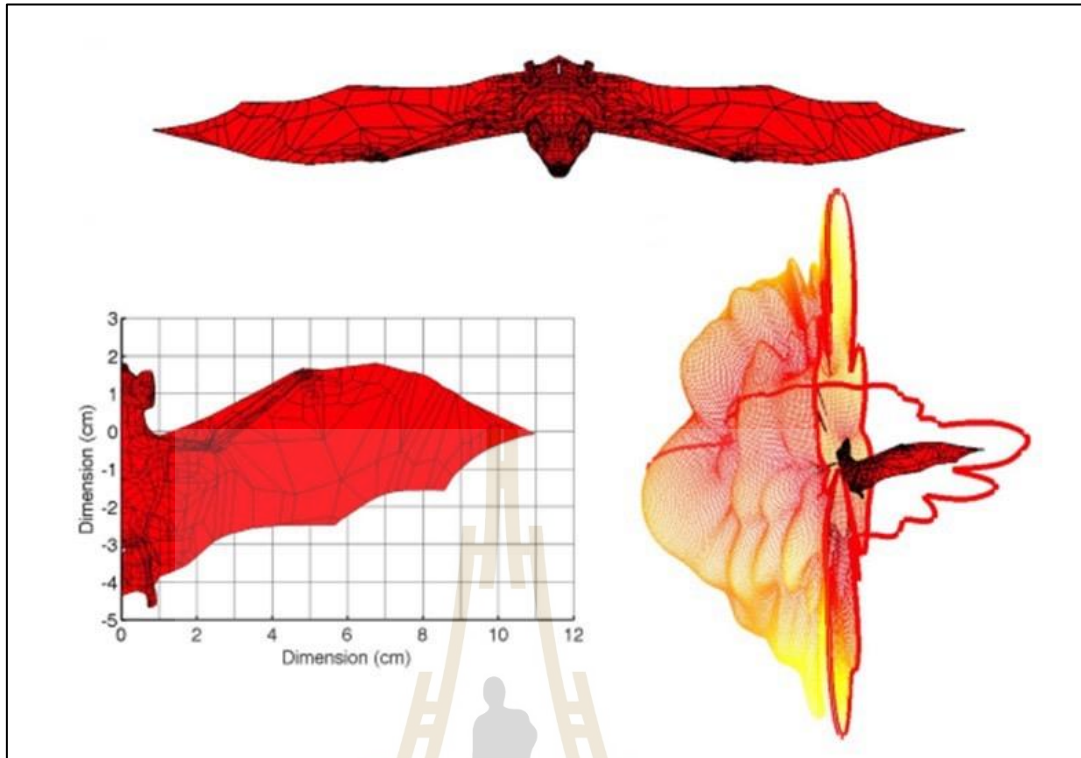
รูปที่ 1.7 โดรนนาโนที่ใช้ในการทดสอบเรดาร์ FMCW



รูปที่ 1.8 ผลการทดสอบการตรวจจับของโดรนนาโน

1.7.3 การใช้แบบจำลองในการทดลองดูการกระเจิงของคลื่น

จากการศึกษาค้นคว้าการทำนายลักษณะการกระเจิงเรดาร์ของสัตว์ปีกโดยใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 1.9 โดยการสร้างลักษณะการกระเจิงแบบโพลาริเมตริกเชิงปริมาณและช่วยในการประมาณค่าเชิงปริมาณของความหนาแน่นของสัตว์และการระบุอนุกรมวิธานได้ โดยได้เสนอการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำนายสมบัติการกระเจิงของสัตว์ปีกโดยมุ่งเน้นไปที่ค่างคาวทางพริบราซิลมาเป็นแบบจำลองทางกายวิภาคแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการนี้ และแสดงให้เห็นว่ากรอบการสร้างแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้กับสัตว์ปีกอื่น ๆ เช่น นก และแมลงหลากหลายชนิด เพื่อช่วยในการประมาณปริมาณของความหนาแน่นของสัตว์



รูปที่ 1.9 การจำลองการกระเจิงของคลื่นวิทยุจากค้างคาว

บทที่ 2

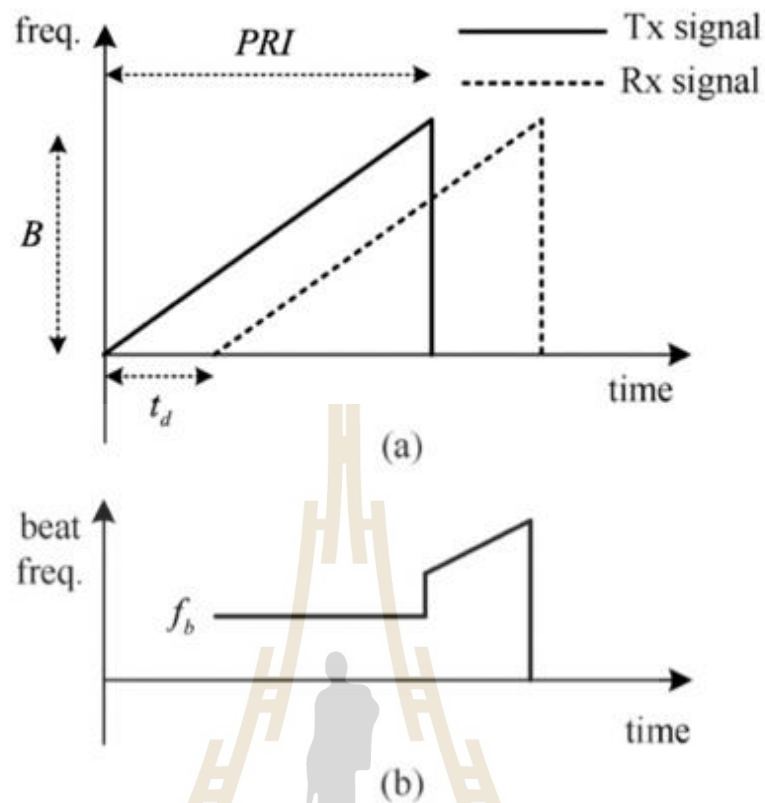
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การบุกเบิกและทำลายผลพืชผลทางเกษตรของค้างคาวได้สร้างปัญหาอย่างมากต่อการเกษตร จำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างเป็นระบบโดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาช่วยดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ทำให้เล็งเห็นถึงความสามารถที่จำกัดของเทคโนโลยีและวิทย์ที่ทันสมัยสำหรับการตรวจสอบ เนื่องจากขาดข้อมูลการเฝ้าติดตามจึงควรเริ่มต้นจากการพิจารณาและประเมินแนวโน้มการบุกเบิกและทำลายพืชผลทางเกษตรในแต่ละช่วงเวลาที่เกิดขึ้น ในบรรดาวิธีการสำรวจระยะไกลทั้งหมด การใช้เรดาร์มีแนวโน้มดีที่สุดในการช่วยแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบและเป็นสากลอีกทั้งยังคงเป็นหัวข้อที่กำลังได้รับความนิยมนับที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้ การประยุกต์ใช้เรดาร์จึงมุ่งเน้นไปที่ความหลากหลายทางชีวภาพ การอนุรักษ์ หรือเกษตรกรรม ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งเป็นเนื้อหา ดังนี้

1. Frequency-Modulated Continuous Wave Radar
2. หลักการเรดาร์
3. ความถี่ที่ 24 GHz
4. สายอากาศ
5. สมบัติไดอิเล็กทริก

2.1 เรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่อง

เรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่อง (Frequency-Modulated Continuous Wave Radar, FMCW) เป็นวิธีที่ใช้ในระบบเรดาร์เพื่อวัดช่วงและความเร็วของเป้าหมาย มีหลักการทำงานโดยการส่งรูปคลื่นที่มอดูเลตความถี่อย่างต่อเนื่องและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับนอกจากพิสัยแล้ว เรดาร์ FMCW ยังสามารถวัดความเร็วสัมพัทธ์ของเป้าหมายได้อีกด้วย สิ่งนี้ทำได้โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ เป้าหมายที่เคลื่อนไหวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในความถี่ของจังหวะ และด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนความถี่นี้ทำให้เรดาร์สามารถระบุความเร็วของเป้าหมายได้ โดยเรดาร์ FMCW มีหลักการดังแสดงในรูปที่ 2.1 เรดาร์ FMCW เป็นการส่งคลื่นไมโครเวฟแบบมอดูเลตความถี่อย่างต่อเนื่องโดยแสดงความถี่สัญญาณที่ส่ง (Tx Signal) ด้วยการมอดูเลตแบบฟันเลื่อย สัญญาณที่ได้รับ (Rx Signal) จะสะท้อนจากเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a) โดยที่ t_d คือเวลาหน่วงระหว่างสัญญาณที่ส่งและรับ สัญญาณทั้งสองจะรวมกันในโดเมนความถี่ สัญญาณนี้เรียกว่าสัญญาณพัลส์ 2.1(b) ด้วยว่าความถี่บีตส์ (Beat) เกิดขึ้นเมื่อเสียงจากแหล่งกำเนิดสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันในเวลาและทิศจะรวมกัน



รูปที่ 2.1 (a) สัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับ (b) ความถี่บีตส์

วิธีการมาตรฐานสำหรับเรดาร์ FMCW คือ การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณบีตส์กล่าวคือ ความถี่บีตส์สามารถได้รับผ่านการประมวลผล FFT (Fast Fourier Transform) ดังนี้

$$R = (C \cdot PRI \cdot f_b) / (2 \cdot B) \quad (2.1)$$

R = ช่วงของเป้าหมาย

C = ความเร็วของแสง

B = แบนด์วิธมอดูเลต

f_b = ความถี่บีตส์

PRI = ช่วงเวลาการทำซ้ำของพัลส์ซึ่งเป็นคาบของสัญญาณซิงค์

ช่วง ΔR คำนวณดังนี้

$$\Delta R = (C \cdot PRI \cdot f_b) / (2 \cdot B)$$

$$= (C \cdot PRI)(f_s/N_{fft})/(2 \cdot B) \quad (2.2)$$

N_{fft} = จุดของ Fast Fourier Transform
 f_s = การสุ่มตัวอย่าง ADC (ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล)
 ค่า PRI สูงสุดถูกกำหนดโดย

$$PRI = 1/(2f_{maxD}) \quad (2.3)$$

$$N = c(2 \cdot f_c \cdot PRI \cdot \Delta v) \quad (2.4)$$

N = จำนวนของแรมป์
 f_c = ความถี่บีตส์ที่เพิ่มขึ้น
 Δv = ค่าความละเอียดของความเร็ว
 f_{maxD} = ความถี่ดอปเพลอร์ สูงสุดที่จะตรวจจับได้

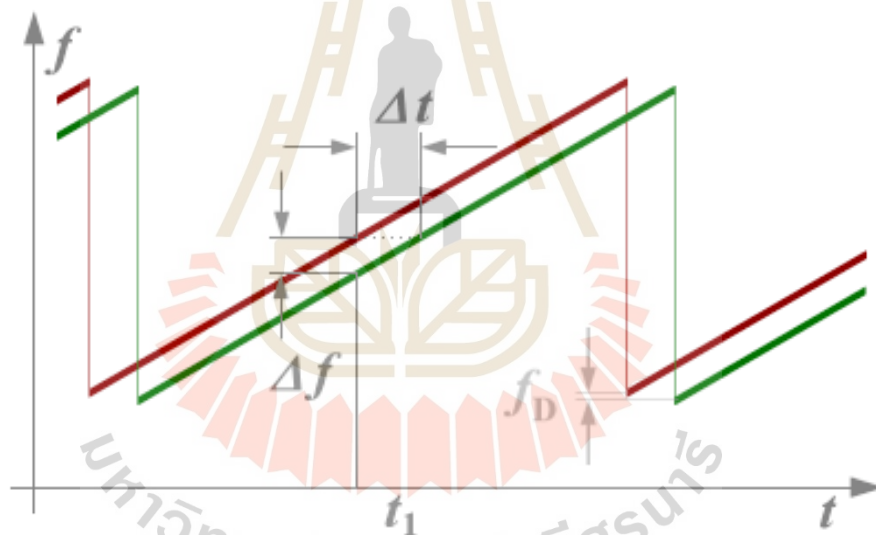
หลักการวัดระยะทางทำได้โดยการเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณที่ได้รับกับค่าอ้างอิง
 ระยะเวลาของรูปคลื่นที่ส่ง T นั้นมากกว่าเวลาที่รับที่ต้องการสำหรับช่วงการวัดระยะทางที่ติดตั้ง
 ระยะทาง R ถึงวัตถุสะท้อนแสงสามารถกำหนดได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{c_0 |\Delta t|}{2} = \frac{c_0 |\Delta f|}{2 \left(\frac{d(f)}{d(t)} \right)} \quad (2.5)$$

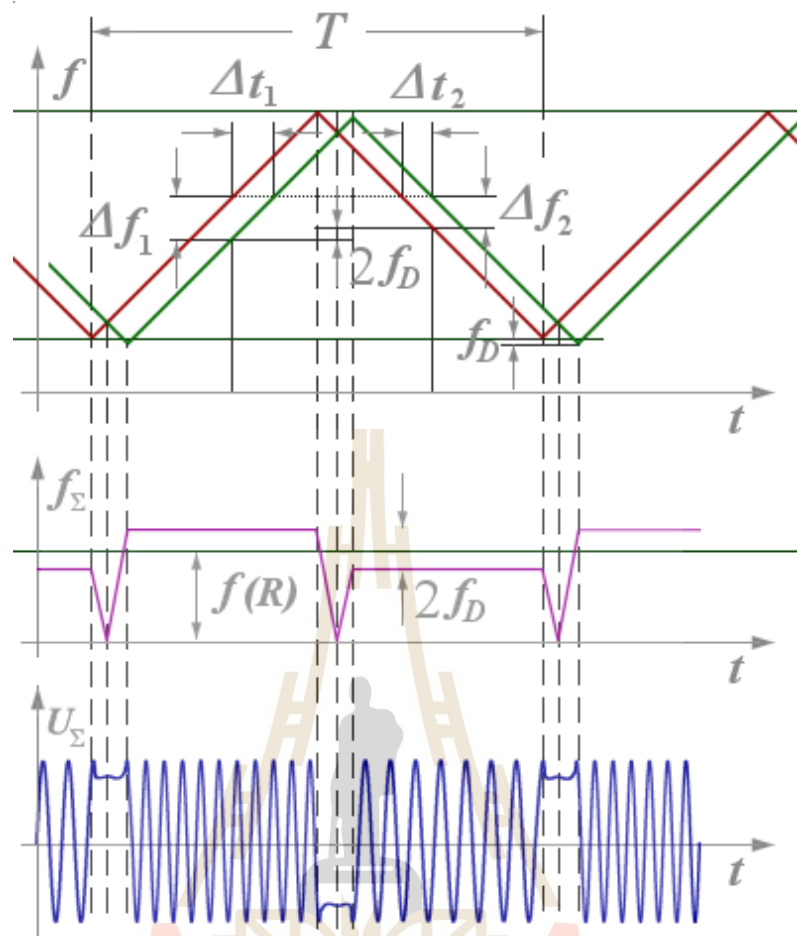
c_0 = ความเร็วแสง
 Δt = เวลาที่เปลี่ยนแปลง
 Δf = ความแตกต่างของความถี่ที่วัดได้
 R = ระยะห่างระหว่างเสาอากาศกับวัตถุสะท้อน
 $\frac{d(f)}{d(t)}$ = การเปลี่ยนความถี่ต่อหน่วยเวลา

การเปรียบเทียบความถี่สามารถกำหนดช่วงของเรดาร์ได้ หากการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็น
 เส้นทางในพื้นทีขนาดใหญ่ เมื่อความแตกต่างของความถี่เป็นสัดส่วนกับระยะทางระหว่างเสาอากาศ
 กับวัตถุสะท้อนเนื่องจากสามารถวัดได้เฉพาะ จำนวนสัมบูรณ์ของความถี่ความแตกต่างเท่านั้น
 ผลลัพธ์จึงอยู่ที่ความถี่ที่เพิ่มขึ้นเชิงเส้นเท่ากับความถี่ที่ลดลง หากวัตถุสะท้อนแสงมีความเร็วในแนว

รัศมีเทียบกับเสาอากาศรับสัญญาณ สัญญาณเสียงสะท้อนจะได้รับความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดจากความเร็ว เรดาร์ไม่เพียงวัดความแตกต่างของความถี่กับความถี่ปัจจุบัน แต่ยังเพิ่มความถี่ดอปเพลอร์ที่เกิดจากความเร็ว จากนั้นเรดาร์จะตรวจวัดขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่และทิศทางของการมอดูเลตเชิงเส้นเฉพาะผลรวมหรือผลต่างระหว่างความถี่ที่ต่างกันในฐานะพาหะของข้อมูลระยะทาง และความถี่ดอปเพลอร์ ในฐานะพาหะของข้อมูลความเร็ว การวัดจะทำระหว่างของพื้นเลื่อยดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากนั้น ความถี่ดอปเพลอร์จะถูกกลบออกด้วยการเปลี่ยนแปลงความถี่รัศมีใหม่ หากวัตถุสะท้อนแสงเคลื่อนที่ออกห่างจากเรดาร์ ความถี่ของสัญญาณเสียงสะท้อนจะลดลงตามความถี่ดอปเพลอร์ นอกจากนี้ หากทำการวัดด้วยพื้นเลื่อยตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 สัญญาณเสียงสะท้อนที่ได้รับ (กราฟเส้นสีเขียว) จะถูกย้ายไม่เพียงแต่ตามเวลาที่ใช้ไปทางขวาเท่านั้น แต่ยังเคลื่อนที่ด้วยความถี่ดอปเพลอร์ ที่ลดลงด้วยความถี่ความแตกต่างที่วัดได้ Δf คือ ความถี่ดอปเพลอร์สูงกว่าตามเวลาจริงที่ควร



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงระบบความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลต



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์กับการมอดูเลตแบบสามเหลี่ยม

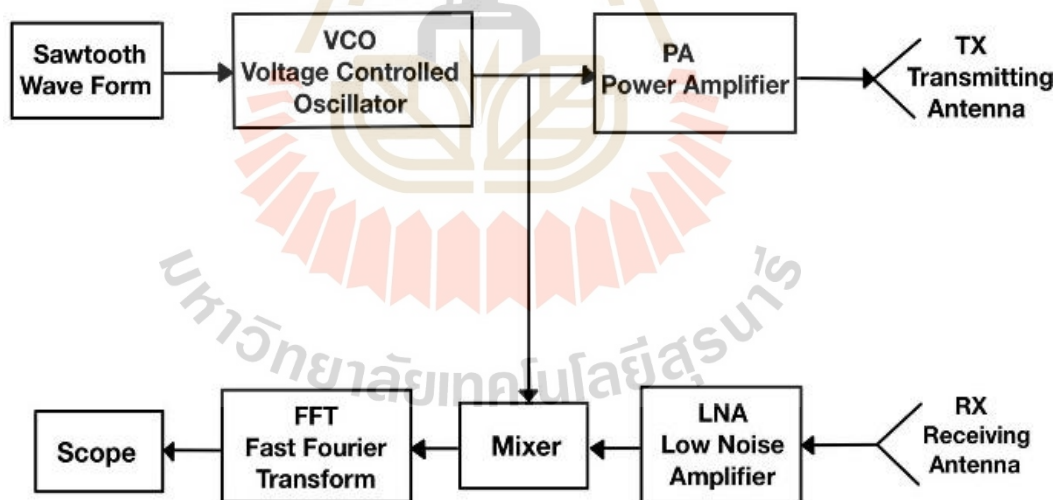
ช่วงสูงสุดและความละเอียดช่วงความเหมาะสมของการเบี่ยงเบนความถี่ต่อหน่วยเวลาสามารถกำหนดความละเอียดของเรดาร์ได้โดยการเลือกระยะเวลาของการเพิ่มความถี่ขอบที่ยาวขึ้นของฟันเลื่อย (กราฟเส้นสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สามารถกำหนดได้สูงสุดที่ช่วงที่ชัดเจน การเลื่อนความถี่สูงสุดและความชันของขอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับความสามารถของวงจรที่ใช้เทคโนโลยีช่วงที่ชัดเจนสูงสุดถูกกำหนดโดยการล้อมเวลาที่จำเป็นของสัญญาณที่ได้รับกับสัญญาณที่ส่ง ซึ่งมักจะใหญ่กว่าช่วงที่มีกำลังมาก เช่น ข้อจำกัดจากการสูญเสียพื้นที่ว่าง สำหรับความละเอียดช่วงของเรดาร์แบนด์วิธของสัญญาณที่ส่งจะขีดจำกัดที่เรียกว่าเซิร์ปเรดาร์ อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการแปลงฟูริเยร์ถูกจำกัดด้วยเวลา เช่น ตามระยะเวลาของฟันเลื่อยความละเอียดของเรดาร์จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นภายในเวลาที่กำหนด

$$\Delta f_{FFT} = \frac{1}{T} = \frac{d(f)}{d(t) \cdot (f_{up} - f_{down})} \quad (2.6)$$

Δf_{FFT} = ความแตกต่างของความถี่ที่วัดได้น้อยที่สุด
 $d(f)/d(t)$ = ความชันของการเบี่ยงเบนความถี่
 f_{up} = ความถี่บน
 f_{down} = ความถี่ล่าง

ส่วนกลับของระยะเวลาของพัลส์ที่วนกลับไปสู่ความถี่ที่ตรวจพบได้น้อยที่สุด สามารถแสดงในสมการที่ 5 เป็น $|\Delta f|$ และส่งผลถึงความสามารถความละเอียดช่วงของเรดาร์ FMCW นอกเหนือจากแบนด์วิธ ลำแสงของเสาอากาศจะกำหนดความละเอียดเชิงมุมในการตรวจจับวัตถุ เช่นเดียวกับเรดาร์ใด ๆ ในเรดาร์ FMCW นอกเหนือจากแบนด์วิธที่จัดสรรแล้ว ลำแสงของเสาอากาศจะกำหนดความละเอียดเชิงมุมในการตรวจจับของวัตถุ

2.2 หลักการเรดาร์



รูปที่ 2.4 แผนผังการทำงานของเรดาร์

เรดาร์ FMCW ประกอบด้วยตัวรับส่งสัญญาณและหน่วยควบคุมที่มีไมโครโพรเซสเซอร์เป็นหลัก ตัวรับส่งสัญญาณเป็นโมดูลที่มีขนาดกะทัดรัด และมักจะมีเสาอากาศแพทช์ที่ใช้เป็นเสาอากาศส่งและรับ จาก Block diagram แสดง FMCW Radar Block Diagram Chirp Signal ซึ่งมักเรียกกันว่า

สัญญาณเรดาร์ FMCW ถูกสร้างขึ้นโดยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นต่อเนื่องด้วยสัญญาณเชิงเส้นเป็นระยะ สิ่งนี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการกำหนดช่วงและความเร็วของเป้าหมายที่ตรวจพบ ด้วยการส่งรูปคลื่นคาบเชิงเส้นไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (Voltage Controlled Oscillator, VCO) ขยายสัญญาณเชิงรีปที่สร้าง และส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศที่มีทิศทางเหมาะสม จึงสามารถสร้างระบบเรดาร์ FMCW ได้ สัญญาณเสียงสะท้อนได้รับและขยายโดย Low Noise Amplifier (LNA) และผสมกับสัญญาณเดิมเพื่อรับสัญญาณที่ได้รับความถี่จิงหวะ สำหรับการแปลงครั้งล่าสุด สัญญาณผลลัพธ์ไปยังโดเมนความถี่ (Fast Fourier Transform) FFT เพื่อรับข้อมูลช่วง

2.2.1 สมการเรดาร์

สมการเรดาร์เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการรับส่งสัญญาณของระบบเรดาร์ โดยสามารถใช้สมการนี้เพื่อประเมินแรงสัญญาณที่ได้รับหรือส่งออก สมการเรดาร์ใช้งานในทางปฏิบัติอย่างแพร่หลายในการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบเรดาร์กำลังที่เรดาร์สามารถรับได้สามารถคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

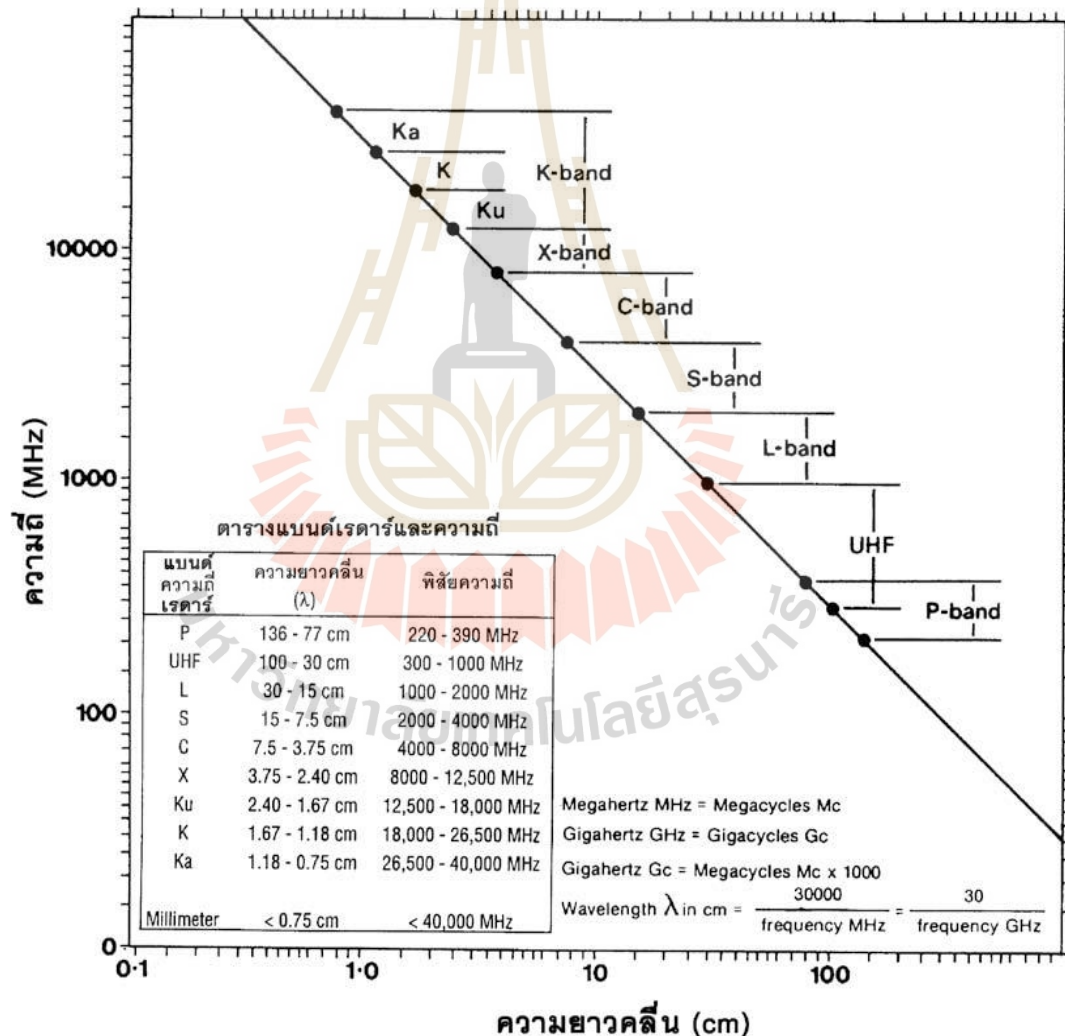
$$P_R = P_T(\sigma^0 A) \left[\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right] \quad (2.5)$$

P_R	=	พลังงานสัญญาณที่สามารถรับได้ทั้งหมด (Watts)
P_T	=	พลังงานสัญญาณที่ใช้ในการส่ง (Watts)
σ^0	=	การกระจายเรดาร์ต่อหน่วยพื้นที่หรือค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเรดาร์
G	=	อัตราขยายของเสาอากาศ (dBi)
R	=	ระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับ (Meter, m)
λ	=	ความยาวคลื่นของสัญญาณ (Meter, m)

2.3 ความถี่ที่ 24 GHz

ระบบเรดาร์ที่ทำงานที่ความถี่ 24 GHz เป็นแถบความถี่ที่อยู่ในช่วง 10^8 - 10^{12} Hz หรือความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร-10 เซนติเมตร ที่ใช้ในแอปพลิเคชันเรดาร์จำนวนมาก รวมถึงเรดาร์ยานยนต์ การตรวจจับในอุตสาหกรรม และการเฝ้าระวังระยะสั้น หรือสำหรับใช้ในโทรคมนาคมทางไกล โดยเฉพาะเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อนโลหะได้ดี โดยทั่วไประบบเรดาร์ 24 GHz ได้รับการออกแบบมาสำหรับการใช้งานระยะสั้นถึงระยะกลาง ช่วงที่มีประสิทธิภาพของเรดาร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงกำลังส่ง การออกแบบเสาอากาศ และลักษณะของเป้าหมาย ตัวอย่างเช่น ในการใช้งานเรดาร์ในรถยนต์ ระยะโดยทั่วไปอาจแตกต่างกันจากหลักหน่วยถึงหลักร้อย และความละเอียด

ความสามารถในการแยกความแตกต่างระหว่างเป้าหมายหลายตัวที่อยู่ใกล้กัน ความละเอียดของเรดาร์ 24 GHz โดยทั่วไปต่ำกว่า เมื่อเทียบกับระบบเรดาร์ความถี่สูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมกับเทคนิคการประมวลผลสัญญาณขั้นสูง และข้อดีอย่างหนึ่งของเรดาร์ 24 GHz คือ ความสามารถในการเจาะวัสดุบางอย่าง เช่น พลาสติกและแก้ว ทำให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับยานพาหนะ ยิ่งไปกว่านั้นยังให้ประสิทธิภาพที่ดีในสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย เช่น ฝนหรือหมอก เมื่อเทียบกับระบบเรดาร์ความถี่สูงช่วงคลื่นเรดาร์เป็นช่วงคลื่นที่สูงกว่าคลื่นแสงสว่างและคลื่นความร้อน ซึ่งในทางเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล อยู่ระหว่าง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นในการศึกษาเรื่องเรดาร์นั้นได้มีการจัดกลุ่มเรดาร์จำแนกตามคลื่นความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงความยาวคลื่น ความถี่ และตัวอักษรแบนด์เรดาร์

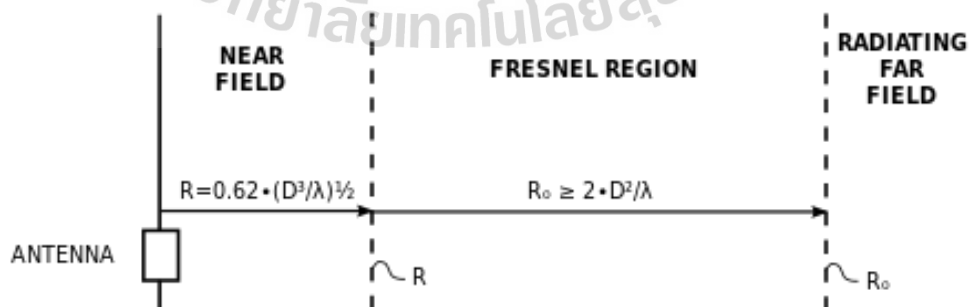
กลุ่ม Ku-band ให้ความละเอียดสูงแต่ละช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูป 2.3 เป็นที่รู้จักกันดีและนำไปใช้ประโยชน์มากมาย คลื่นที่มีความถี่จิกะเฮิรตซ์เป็นคลื่นไมโครเวฟชนิดหนึ่งที่มีความถี่ในช่วง 10^8 - 10^{12} Hz หรือมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร- 10 เซนติเมตร ใช้สำหรับโทรคมนาคมทางไกลโดยเฉพาะใช้เป็นสัญญาณเรดาร์ เนื่องจากไมโครเวฟสามารถสะท้อนโลหะได้ดี

2.4 สายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารต่าง ๆ รวมถึงวิทยุ โทรทัศน์ เครื่องข่ายไร้สาย ระบบเรดาร์ และอื่นๆ หน้าที่หลักของสายอากาศคือการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการส่งหรือแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับเป็นสัญญาณไฟฟ้าสำหรับการรับสัญญาณโดยสายอากาศมีหลากหลายชนิดและหลายขนาด รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศมีการแผ่หรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ รูปร่างของรูปแบบการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับการออกแบบของสายอากาศและการวางแผนสายอากาศสามารถมีรูปแบบการแผ่รังสีแบบกำหนดทิศทาง ซึ่งพลังงานจะถูกเน้นในทิศทางเฉพาะ หรือรูปแบบการแผ่รังสีแบบรอบทิศทาง ซึ่งพลังงานถูกกระจายอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทางเพื่อสร้างสายอากาศในการวัดรูปแบบการแผ่รังสีจึงต้องมีการคำนวณตามทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.4.1 สนามระยะไกล

สนามไกล (Far Field Method) คือ บริเวณที่ห่างไกลจากเสาอากาศในบริเวณนี้รูปแบบการแผ่รังสีไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างตามระยะทาง (R) แม้ว่าสนาม E และ H จะแปรผันตรงตาม $1/R$ ความหนาแน่นของพลังงานจะลดลงเป็น $1/R^2$ สนามระยะไกลจะถูกครอบงำด้วยสนามที่แผ่รังสีโดยที่สนาม E และ H ที่ตั้งฉากกันและทิศทางของการแพร่กระจาย เช่นเดียวกับคลื่นระนาบ



รูปที่ 2.6 ระยะสนามใกล้และสนามไกล

การวัดรูปแบบการแผ่รังสีของเสาอากาศของขนาดสัมพัทธ์และเฟสของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับถูกนำมาใช้ในการออกแบบสร้างเสาอากาศระบบสื่อสารไร้สาย และการวิเคราะห์รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสนามไกลถูกคำนวณสำหรับการออกแบบโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.6)$$

λ = ความยาวคลื่น (Metre, m)

D = ขนาดใหญ่ที่สุดของเสาอากาศ (Metre, m)

R = ระยะห่างจากเสาสัญญาณไปยังพื้นที่ภาคสนามระยะไกล (Metre, m)

สมการความยาวคลื่นอธิบายความยาวของคลื่นในเกณฑ์ฟลศาสตร์

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.7)$$

c = 3×10^8 (Metre per Second, m/s)

λ = ความยาวคลื่น (Metre, m)

f = ความถี่ (Hertz, Hz)

2.5 สมบัติไดอิเล็กทริก

สมบัติของไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของวัสดุในการจัดเก็บและส่งต่อพลังงานไฟฟ้าคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าความคงที่ไฟฟ้า (Permittivity) ของวัสดุซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้าในวัสดุไดอิเล็กทริกนอกจากนี้ยังมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Dielectric resistance) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานของวัสดุต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะที่ไม่มีการเคลื่อนไหวคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกเป็นหลายส่วนดังนี้ :

ความคงที่ไฟฟ้า (Permittivity) : เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก ค่าความคงที่ไฟฟ้าสูงแสดงว่าวัสดุมีความสามารถในการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า ในทางกลับกันค่าความคงที่ไฟฟ้าต่ำแสดงถึงความจำกัดในการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ

ความต้านทานไฟฟ้า (Dielectric resistance) : เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานของวัสดุต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะที่ไม่มีการเคลื่อนไหวค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงแสดงว่าวัสดุมีความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าสูงกว่า

ค่าการสูญเสียพลังงาน (Loss tangent) : เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ ค่าน้อยแสดงถึงการสูญเสียพลังงานน้อยในการส่งผ่านไฟฟ้า ในทางกลับกันค่ามากแสดงถึงการสูญเสียพลังงานมากในการส่งผ่านไฟฟ้า

2.5.1 วัสดุไดอิเล็กทริก

วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถทำให้มีขั้วไฟฟ้าได้โดยใช้สนามไฟฟ้าเมื่อไดอิเล็กทริกหนึ่งถูกวางอยู่ในสนามไฟฟ้าประจุไฟฟ้าจะไม่ไหลผ่านตัววัสดุเหมือนอย่างที่ผ่านมา เพียงแต่ขยับเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจากตำแหน่งสมดุลเฉลี่ยเดิมก่อให้เกิดความเป็นขั้วไดอิเล็กทริกในการนี้ประจุบวกจะถูกผลักไปในทิศทางของสนามและประจุลบจะขยับไปในทิศทางตรงกันข้าม ปรากฏการณ์นี้จะสร้างสนามไฟฟ้าภายในที่ช่วยลดสนามโดยรวมภายในตัวไดอิเล็กทริกเอง ถ้าไดอิเล็กทริกหนึ่งประกอบด้วยโมเลกุลที่มีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ด้วยกันที่อ่อน โมเลกุลเหล่านั้นไม่เพียงแต่จะกลายเป็นขั้วเท่านั้นแต่จะยังเรียงตัวเพื่อให้แกนสมมาตรของมันอยู่ในแนวเดียวกันกับสนาม

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงวัสดุและค่าไดอิเล็กทริก

ชนิดของวัสดุ	ค่าไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1MHz
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	3.1-3.4
Paper	3.5-6.0
Polyethylene (PP)	2.2
Polyethylene Terephthalate (PET)	3.3
Polyphenylene Sulfide (PPS)	3.0
Polyethylene Naphthalate (PEN)	3.0
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	2.0
Silicone Rubber	3.1
Reclaim Rubber	2.0
Brown crepe rubber	1.7
Glass	3.7-10.0
Mice	5.0-8.0

จากตารางที่ 2.1 ค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) อยู่ในช่วงประมาณ 3.1-3.14 ตามความถี่และสภาวะทางไฟฟ้า ค่านี้อาจมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ

สูตรผสมและวิธีการผลิตของ ABS ที่ใช้กันในแต่ละกรณี โดยพลาสติกนี้มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น ทนต่อสภาพอากาศ และทนต่อแรงบีบ จึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปแบบจำลอง มีจุดหลอมเหลวที่สูง ถึง 200°C - 250°C จึงทนความร้อนได้สูงกว่าพลาสติกชนิดอื่น และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย



บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัยการออกแบบเรดาร์ FMCW ความถี่ 24 GHz

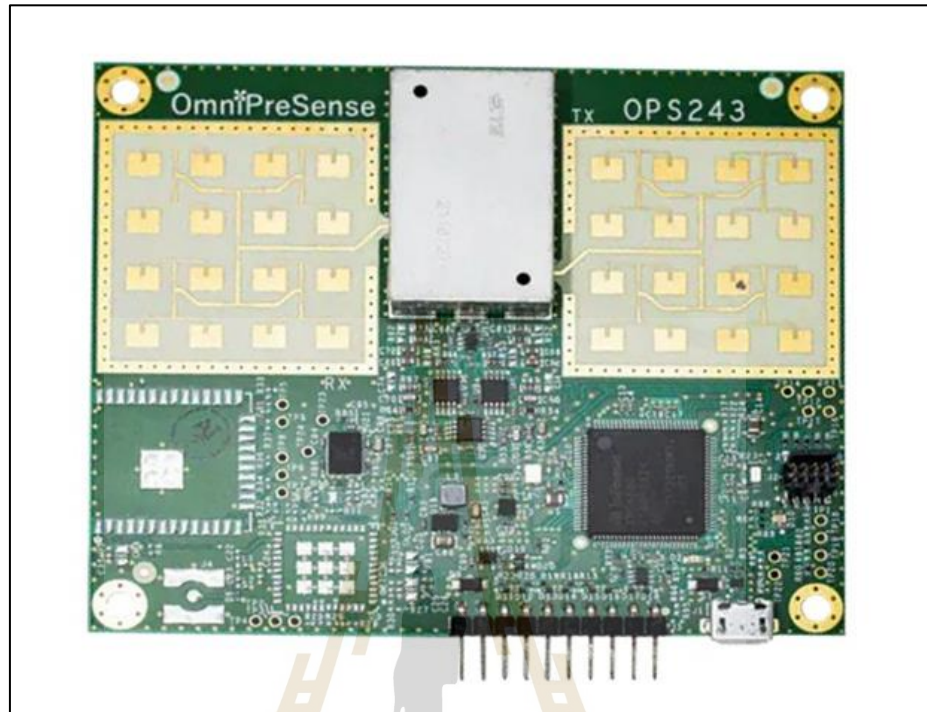
3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบเรดาร์ การจำลองชิ้นงานและวิธีการเก็บข้อมูล เพื่อนำไปวิเคราะห์เบื้องต้น เริ่มจากจัดทำสายอากาศไดโพลตามความยาวคลื่นของความถี่ 24 GHz หาค่าเพื่อทำการวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับเรดาร์ โดยคลื่นความถี่ต่อเนื่องแบบมอดูเลตความถี่ (FMCW Radar) จะส่งสัญญาณพัลส์ของพลังงานไมโครเวฟเป็นช่วงเท่ากัน และปรับระยะโดยจางตั้งฉากกับทิศทางคลื่นที่ลงสู่เป้าหมายเป็นมุมเอียง เมื่อคลื่นเรดาร์กระทบกับเป้าหมายสัญญาณจะกระจัดกระจายกลับไปยังเครื่องรับสัญญาณ ตรวจจับตำแหน่ง สามารถวัดทิศทาง ความสูง ระยะทาง เส้นทาง และความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ และระยะห่างของวัตถุจากจุดที่วางเรดาร์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะทำให้สามารถนำผลไปวิเคราะห์เพิ่มเติมได้ในบทต่อไป

3.2 การออกแบบสร้างโมดูลเรดาร์ที่ความถี่ 24 GHz

โมดูลเรดาร์ 24 GHz จะหมายถึงโมดูลสำเร็จรูปที่บรรจุส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับระบบเรดาร์ที่ทำงานที่ความถี่ 24 GHz โมดูลนี้จะรวมเครื่องส่งสัญญาณที่สร้างและขยายสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) ที่ 24 GHz สำหรับการส่งสัญญาณ สิ่งนี้อาจเกี่ยวข้องกับวงจรสร้างความถี่ เพาเวอร์แอมป์ และความสามารถในการมอดูเลต โมดูลจะมีวงจรรับสัญญาณที่ออกแบบมาเพื่อรับและประมวลผลเสียงสะท้อนหรือสัญญาณสะท้อนจากเป้าหมาย เครื่องรับโดยทั่วไปจะประกอบด้วยเครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ มิกเซอร์ ตัวกรอง และส่วนประกอบการประมวลผลสัญญาณอื่นๆ โมดูลเรดาร์ 24 GHz จะติดตั้งเสาอากาศที่ออกแบบมาสำหรับความถี่เฉพาะของการทำงาน เสาอากาศจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณเรดาร์ไปในอวกาศและรับเสียงสะท้อนที่สะท้อนจากเป้าหมาย โมดูลนี้อาจรวมถึงความสามารถในการประมวลผลสัญญาณเพื่อดึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากสัญญาณเรดาร์ที่ได้รับ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เพื่อดำเนินการต่างๆ เช่น การวัดช่วง การประมวลผลดอปเพลอร์ สำหรับการประมาณความเร็ว และการตรวจจับเป้าหมาย โมดูลนี้น่าจะมีวงจรควบคุมและอินเทอร์เฟซเพื่ออำนวยความสะดวกในการสื่อสารกับระบบหรืออุปกรณ์ภายนอก ซึ่งอาจรวมถึงอินเทอร์เฟซเช่น UART, SPI หรือ I2C สำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลและการกำหนดค่า

3.2.1 OPS243-C FMCW Radar

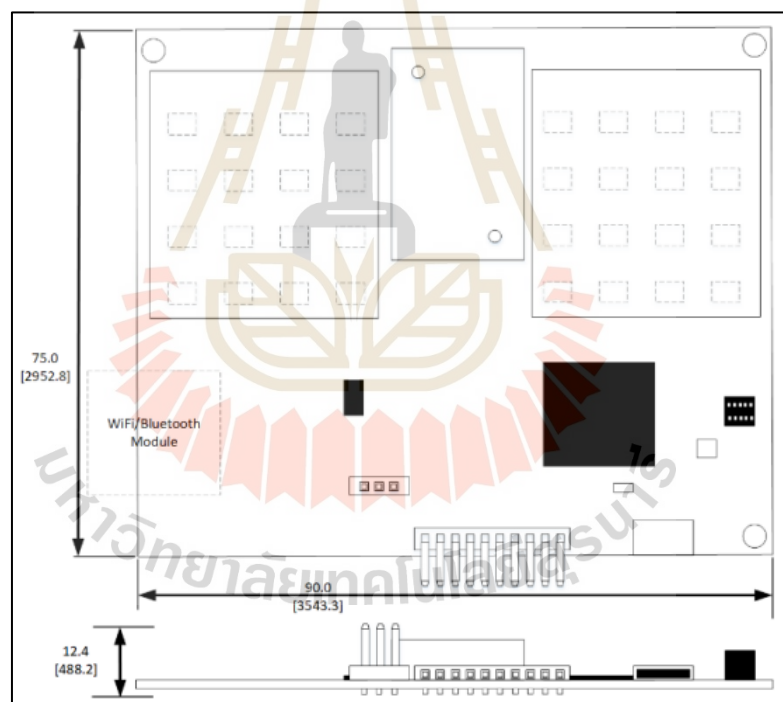


รูปที่ 3.1 โมดูลเรดาร์ OPS243-C

OPS243-C เป็นโมดูลเรดาร์ FMCW (คลื่นต่อเนื่องที่ปรับคลื่นความถี่) ที่พัฒนาโดย OmniPreSense เรดาร์ FMCW เป็นเทคนิคเรดาร์ที่ใช้สัญญาณคลื่นต่อเนื่องที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเพื่อวัดระยะและความเร็วของวัตถุ OPS243-C ได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานเรดาร์ระยะสั้นและทำงานที่ความถี่ 24 GHz โมดูลทำงานที่ความถี่กลาง 24 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นไมโครเวฟของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่ OPS243-C ใช้เทคนิค FMCW ซึ่งความถี่ของสัญญาณเรดาร์จะเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป โดยการวิเคราะห์ความแตกต่างของความถี่ระหว่างสัญญาณที่ส่งและรับสัญญาณ จะสามารถดึงข้อมูลช่วงและความเร็วได้ โดยเชื่อมต่อและทำงานผ่านสาย Micro USB Type B to USB 2.0 ผ่านคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



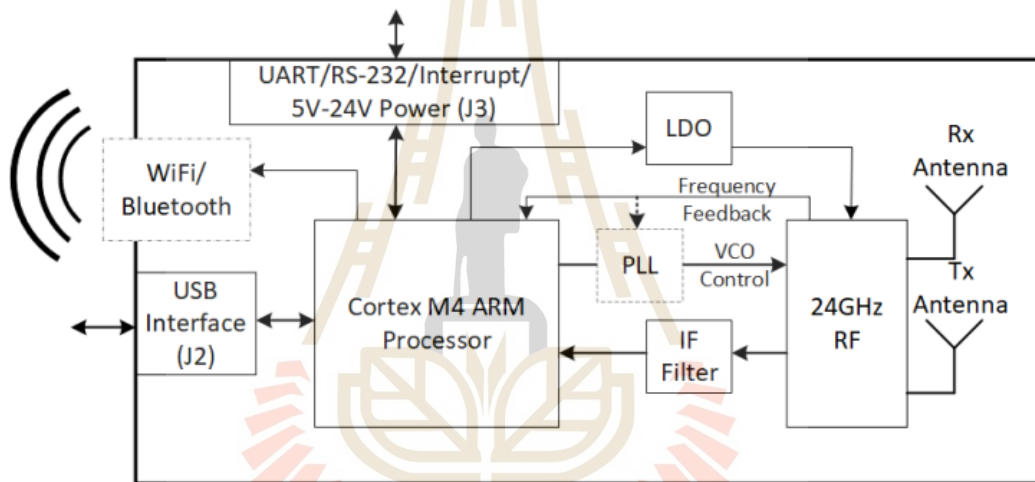
รูปที่ 3.2 สาย Micro USB Type B to USB 2.0 Type A ยาว 1 เมตร



รูปที่ 3.3 ขนาดโดยละเอียดของโมดูล

OPS243-C มีเซ็นเซอร์เรดาร์บอร์ดเดียวที่สามารถตรวจจับวัตถุได้สูงถึงระยะ 100 เมตร เซ็นเซอร์นี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานต่าง ๆ เช่น การรักษาความปลอดภัย การตรวจสอบการจราจร การชนกันของโดรน การประมวลผลสัญญาณเรดาร์ทั้งหมดฝังอยู่ในเซ็นเซอร์ และ API แบบง่ายช่วยให้การรวมระบบง่ายขึ้น ข้อมูลถูกสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ตเฟสแบบมีสายเช่น USB,

UART และ RS-232 นอกจากนี้ ยังมีอินเตอร์เฟซไร้สายสำหรับการสื่อสารกับคลาวด์ และการสื่อสารระยะไกล API อย่างง่ายให้การควบคุมรูปแบบเอาต์พุตของข้อมูล (หน่วย ตัวเลข ฯลฯ) ข้อมูลที่รายงานประกอบด้วยการตรวจนับการเคลื่อนไหว ความเร็ว ทิศทาง (ขาเข้า/ขาออก) และช่วงข้อมูล ความเร็วมีความแม่นยำภายใน ± 1 ไมล์ต่อชั่วโมง ข้อมูลช่วงมีความแม่นยำไม่เกิน $\pm 10\%$ ของระยะทางจริง ระยะการตรวจนับคือ 10-20 เมตร (82 ฟุต) สำหรับบุคคล และ 50-100 เมตร (328 ฟุต) สำหรับวัตถุโลหะขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์ API ให้การควบคุมกำลังส่งซึ่งทำให้สามารถควบคุมช่วงการตรวจนับได้เอง และควบคุมการส่งนอกจากนี้ยังมีรอบการทำงานที่ช่วยให้การใช้พลังงานต่ำลง ที่กำลังไฟต่อเนื่องเต็มโมดูลกินไฟ 1.7 W และไม่ได้ใช้งาน (ปิดใช้งาน RF) คือ 0.8 W โหมดไฮเบอร์เนตพลังงานต่ำมากสามารถลดพลังงานได้เฉลี่ย 100-300 mW



รูปที่ 3.4 แผนภาพของ OPS243-C

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้าของโมดูล

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes
Supply Voltage	V_{dd}	4.75		5.25	V	USB interface, per USB specification
Supply Voltage	V_{dd}	4.75		24.0*	V	Pin 9 on header J3
Power Dissipation	P_{max}			1.8	W	
Operating Temperature	T_a	-40		85	$^{\circ}\text{C}$	
Storage Temperature	T_{stg}	-40		105	$^{\circ}\text{C}$	

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้าของโมดูล (ต่อ)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units	Notes
Transmit Frequency	F_{tx}	24		24.25	GHz	
Transmit Power	P_{tx}	6	11	15	dBm	$24\text{GHz} \leq F_{tx} \leq 24.25\text{GHz}$
Transmit Power Adjustment	P_{txadj}	3	9		dB	Adjustable via API
Idle Transmit Power	P_{txadj}			-30	dBm	Not transmitting
Antenna Gain	G_{ant}		11		dBi	
Transmit Antenna Azimuth	RA_{azi}		20		°	-3 dB beam width
Transmit Antenna Altitude	RA_{alt}		24		°	-3 dB beam width
Active Current Consumption (OPS243-C)	I_{cc}		330	375	mA	5V input
			390	450	mA	5V input, WiFi
			70	85	mA	24V input
			90	105	mA	24V input, WiFi
Idle Current Consumption	I_{idi}		140	158	mA	5V input
			180	200	mA	5V input, WiFi
			30	35	mA	24V input
Hibernate Current Consumption (OPS243-C)	I_{hib}		34		mA	1 second duty cycle*, 5V input
			24		mA	1 second duty cycle*, 24V input
Reset Time	T_{RST}	200			ns	
Startup Time	T_{SRT}			2	μs	Processor startup time after release of T_{RST}

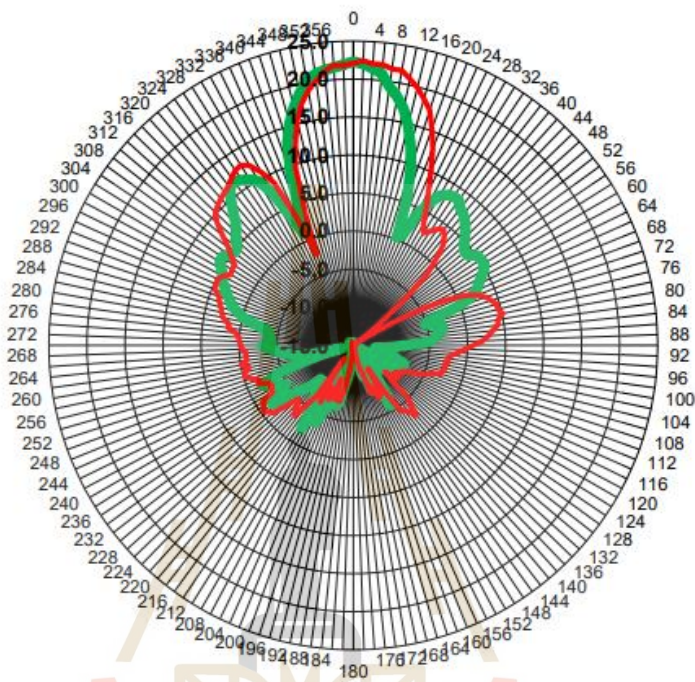


รูปที่ 3.5 ชุดจางานหมุน 360 องศาวัตแบบแผนรูปแบบการกระจายของคลื่น



รูปที่ 3.6 เครื่อง Spectrum Analyzer แสดงความถี่ 24.005 GHz

N9020A MXA Signal Analyzer ความสามารถของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณนี้คือสามารถวัดและวิเคราะห์คลื่นสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 26.5 GHz โดยในการวัดนี้สามารถวัดสัญญาณคลื่นของโมดูล OPS243-C ได้ค่าความถี่ที่ 24.005 GHz



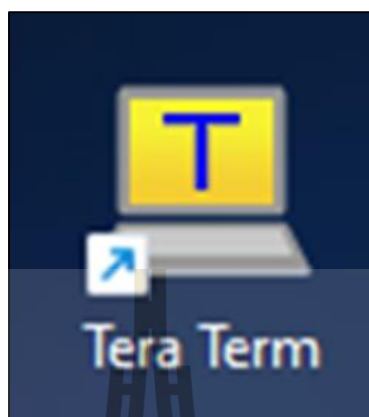
รูปที่ 3.7 รูปแบบการกระจายของคลื่นของโมดูล OPS243-C

การออกแบบเสาของอากาศ OPS243 ให้ความกว้างของลำแสงแคบที่ 20° (-3 dB) ในแนวราบ และ 24° (-3 dB) ในระดับแนวตั้ง สัญญาณขึ้นต่ำจะถูกส่งไปด้านหลังโมดูลเนื่องจากโครงสร้างที่ช่วยกำจัดการตรวจจับที่ผิดพลาด รูปแบบเสาอากาศจึงมีค่าที่แสดงในรูปที่ 3.7

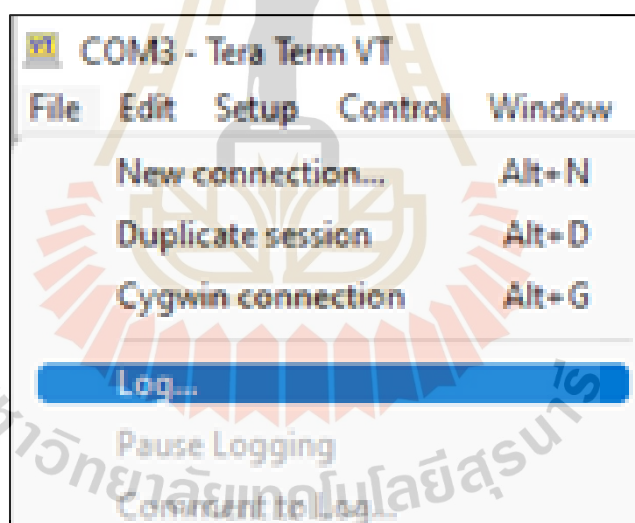
3.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ภายในตัวโมดูลเรดาร์

การเชื่อมต่อ OPS243 กับคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์/แท็บเล็ต Android, Arduino, Raspberry Pi, หรือตัวประมวลผลแบบฝังอื่น ๆ สามารถจัดการได้อย่างง่ายดายตามค่าเริ่มต้น ข้อมูลจะถูกส่งเป็นตัวเลขใน ASCII ตัวอักษร ข้อความอื่น ๆ ทั้งหมดมีให้ในรูปแบบ JSON เพื่อให้แยกวิเคราะห์และจัดการได้ง่าย (สามารถส่งความเร็วหรือช่วงโดย JSON) เอาต์พุต JSON เข้ากันได้กับ IoT ที่เกิดขึ้นใหม่มาตรฐานและเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น Node-RED ซึ่งเป็นมาตรฐานของ Raspberry Pi สิ่งนี้ทำให้

โมดูลพร้อมที่จะเสียบเข้ากับโซลูชันแบบไฮบริดที่ใช้เซ็นเซอร์หลายตัวและทำงานร่วมกันด้วยโซลูชันบนคลาวด์ของ IoT



รูปที่ 3.8 โปรแกรม Tera Term



รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันการเก็บบันทึกเก็บผลของข้อมูล

โปรแกรม Tera Term ใช้ในการเชื่อมต่อและจัดการกับอุปกรณ์ทางเครือข่ายผ่านทางโปรโตคอลต่าง ๆ เช่น Telnet, SSH, หรือ Serial. โปรแกรม TeraTerm มีลักษณะเป็นโปรแกรมอินเทอร์เฟซผู้ใช้งานกราฟิกแบบตัวอักษร (Graphical User Interface) ที่ใช้งานง่าย โดยมีฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ช่วยในการเชื่อมต่อและจัดการกับอุปกรณ์เครือข่ายอย่างง่าย โดยเชื่อมต่อผ่านทาง Serial Port สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผ่านทาง Serial Port เช่น รีโมทคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้สื่อสารผ่าน Serial Port ได้ และใช้ฟังก์ชันการเก็บบันทึก (Logging) ดังรูปที่ 3.9

เพื่อบันทึกการสื่อสารระหว่างการเชื่อมต่อ เพื่อใช้ในการตรวจสอบหรือการวิเคราะห์ข้อมูลในภายหลัง อีกทั้งยังสามารถรองรับการกำหนดค่าและการปรับแต่งตามความต้องการ โดยการปรับแต่งการตั้งค่าต่าง ๆ เช่น การตั้งค่าพอร์ตเชื่อมต่อ ความเร็วบอทเรท ตัวสีและแบบอักษร โดยใช้คำสั่ง API command (Application Programming Interface command) ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้ในการเรียกใช้หรือสื่อสารกับ Application Programming Interface (API) ของระบบซอฟต์แวร์เพื่อทำงานหรือเรียกใช้ฟังก์ชันต่าง ๆ

3.3.1 ชุดคำสั่งหมวดตัว “ I ” เพื่อตั้งค่า UART Control

ตารางที่ 3.2 ชุดคำสั่งหมวด “ I ”

Command	Name	R/W	Value
I?	Query Baud Rate	Read	Outputs current baud rate and oversampling setting.
In	Baud Rate	Write	Set n to values 1, 2, 3, 4, or 5 based on desired baud rate. I1 = 9,600 I2 = 19,200 (default) I3 = 57,600 I4 = 115,200 I5 = 230,400
IS	RS-232/UART Interface Selection	Write	OPS243-C rev D boards only. Starting with rev D boards, both UART and RS-232 are available on the same sensor. UART is the default communication over the J3 header. Use IS command to set the communication out the RS-232 pins on the J3 header. Use persistent memory command (A!) to save RS-232 as the default communication upon power-up. Use Is command to change back to UART interface.

คำสั่ง “ I? ” ตรวจสอบค่าการรับส่งข้อมูลแรกเริ่มของโมดูลเรดาร์ จากนั้นใช้คำสั่ง “ I2 ” จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าค่าเริ่มต้นของโมดูลมีค่า 19200 Baud (ค่า n หลัง I มีการเรียกใช้งานเมื่อต้องการกำหนดค่าบอท (Baud) โดยสามารถเลือกค่าของ n = 1,2,3,4,5 ให้เหมาะสมตามที่ต้องการจะใช้งานได้) ตั้งค่าคำสั่ง “ IS ” เพื่อเลือกการเชื่อมต่อ โดยตัวโมดูลของ OPS243-C จะใช้ RS-232 และ UART ร่วมกัน (โมดูลตัวอื่นสามารถเลือกได้ว่าจะเชื่อมต่อ RS-232 หรือ UART โดยจะมีคำสั่งที่แตกต่างกันออกไป)

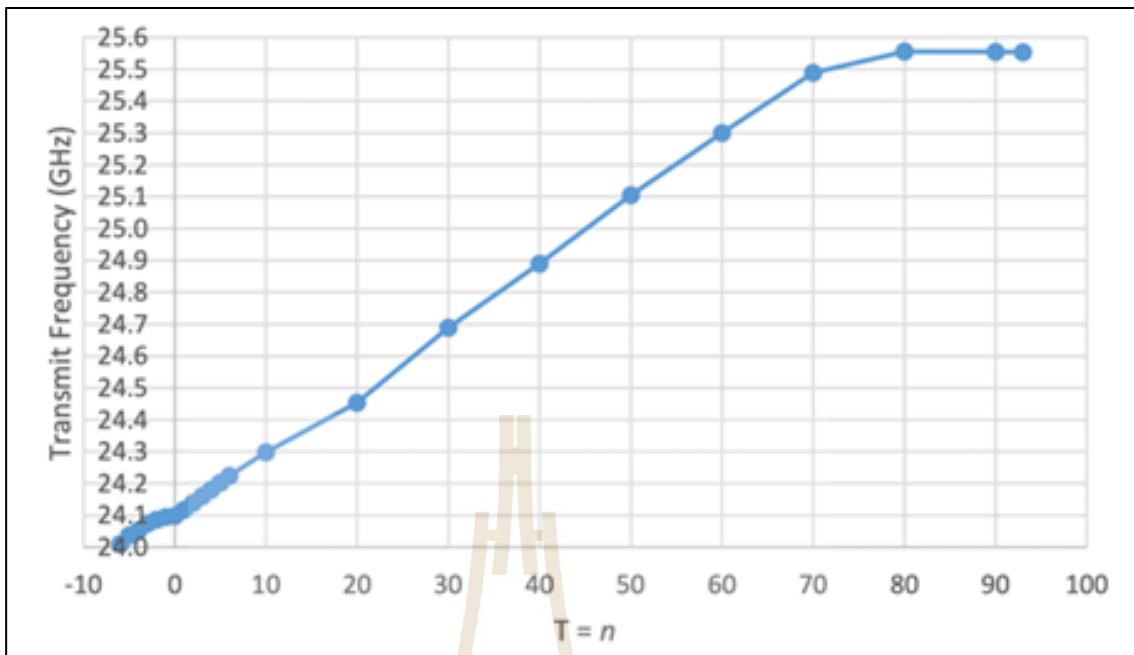
3.3.2 ชุดคำสั่งหมวด “ T ” เพื่อตั้งค่าความถี่

ตารางที่ 3.3 ชุดคำสั่งหมวด “ T ”

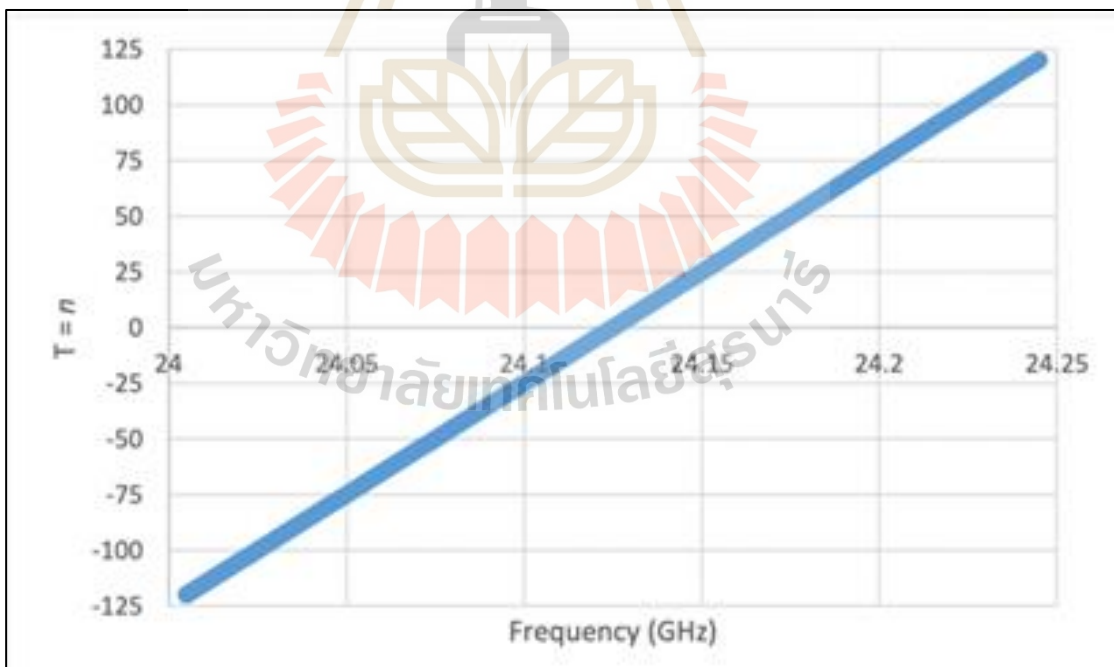
Command	Name	R/W	Value
t?	Chirp Bandwidth	Read	Returns the chirp bandwidth setting and the start and stop frequencies.
t=n	Chirp Bandwidth Setting	Write	Set the bandwidth for the OPS241-B between 100-1,000MHz. Default is 990MHz. <i>n</i> is value between 100 and 1,000 in MHz.
t>n	Chirp Ramp Start	Write	Sets the starting frequency for the chirp ramp in GHz between 24-24.9GHz. For example, t>24.01 will start the chirp ramp at 24.01GHz. The total chirp bandwidth ramp from the starting frequency must be less than or equal to 25GHz.
s?	Sample Rate	Read	Returns the current sample rate.
s=n	Sample Rate Setting	Write	Sets the sample rate. <i>n</i> is restricted for a chirp of between 1-3ms.

Command	Name	R/W	Value
T=n	Frequency Setting	Write	T=0 is the default setting for 24.125GHz.
?F	Frequency Output	Read	Returns the output CW frequency of the transmitter in GHz for the OPS241-A, OPS242-A, and OPS243-A.
T?	Frequency Output	Read	Returns the output CW frequency of the transmitter in GHz for the OPS243-C.

คำสั่ง “ T? ” เพื่อตรวจสอบการส่งกลับความถี่ CW เอาต์พุตของเครื่องส่งสัญญาณ ในหน่วย “GHz” สำหรับโมดูล OPS243-C ใช้คำสั่ง “ T = -120 ” เพื่อตั้งค่าให้ความถี่ส่งออกของ โมดูลเป็น 24.005 GHz (โดยเริ่มต้นที่ T=n ค่า n สามารถดูได้จากกราฟแกน x และแกน y ดังแสดง ในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะแสดงช่วงของความถี่ที่จะเลือกใช้ตั้งค่าให้กับโมดูลเรดาร์)



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ n และความถี่



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการตั้งค่า T และผลลัพธ์ความถี่

3.3.3 ชุดคำสั่งหมวด “ S ” และ “ X ” เพื่อการตั้งค่า buffer

ตารางที่ 3.4 ชุดคำสั่งหมวด “ S ” และ “ X ”

Command	Name	R/W	Notes
SI	1K samples/second	Write	
SV	5K samples/second	Write	
SX or S1	10K samples/second	Write	
S2	20K samples/second	Write	
SL	50K samples/second	Write	
SC	100K samples/second	Write	
S>	1024 buffer size	Write	1024 samples are collected before processing
S<	512 buffer size	Write	512 samples are collected before processing
S[256 buffer size	Write	256 samples are collected before processing
S(128 buffer size	Write	128 samples are collected before processing
Xn	Speed/Range Resolution Control	Write	Adjusts the speed or range resolution from the default value. n is value 1, 2, 4, or 8. Limits apply to usage with different buffer sizes, see Table 4 below. Default setting is X1/x1 with exception of OPS243-C which has x2 set.

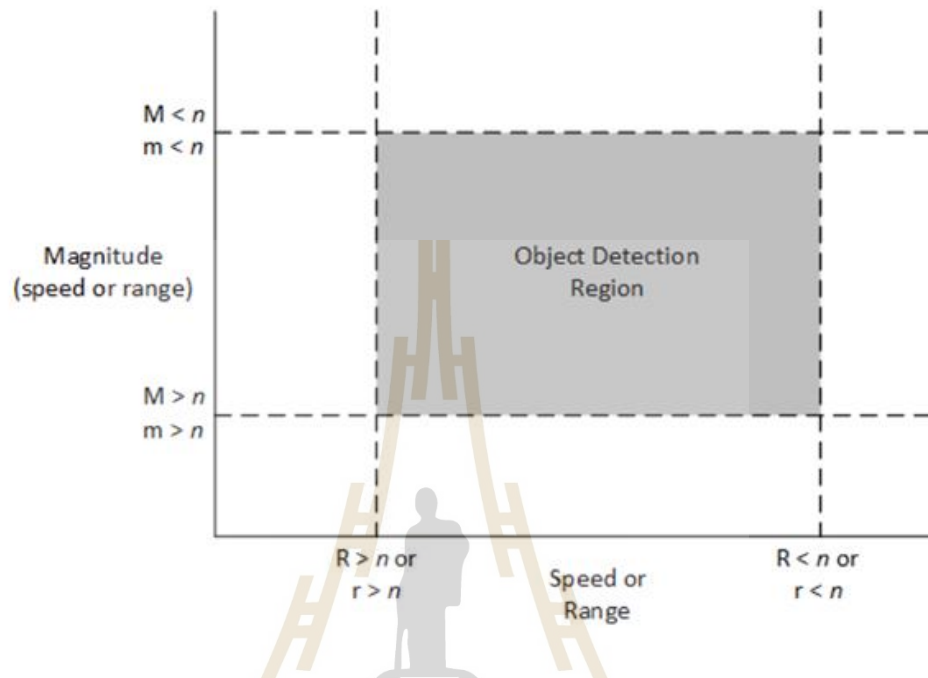
ตารางที่ 3.5 ค่าขนาดบัฟเฟอร์

Buffer Size	Buffer Size							
	128		256		512		1024	
API Setting	Speed*	Range	Speed*	Range	Speed*	Range	Speed*	Range
X1/x1	0.49 m/s	0.62 m	0.24 m/s	0.62 m	0.12 m/s	0.62 m	0.06 m/s	0.62 m
X2/x2	0.24 m/s	0.31 m	0.12 m/s	0.31 m	0.06 m/s	0.31 m	0.03 m/s	N/A
X4/x4	0.12 m/s	0.16 m	0.06 m/s	0.16 m	0.03 m/s	N/A	N/A	N/A
X8/x8	0.06 m/s	0.08 m	0.03 m/s	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

* Assumes 10k sample rate for Doppler, OPS243-C speed resolutions are 2x these values

เรียกใช้คำสั่ง “ SL ” เพื่อตั้งค่า 50K ใช้คำสั่ง “ S< ” เพื่อให้โมดูลมีค่าที่ 512 buffer size ข้อมูลจากคู่มือระบุกำหนดให้ขนาดบัฟเฟอร์ที่ 512 มีอัตราการรายงานอยู่ที่ความถี่ระหว่าง 5-30 Hz จากนั้นป้อนคำสั่ง “ X/1/x2 ” จากตารางที่ 3.4 กำหนดให้ใช้ OPS243-C ที่ x2 เพื่อตั้งค่าการควบคุมความละเอียดความเร็ว/ช่วง (ขนาดการประมวลผล FFT รวมบางชุดของ Xn และขนาดบัฟเฟอร์) จึงทำให้โมดูล OPS243-C มีขนาด FFT ที่ 1024 และ n=2 เป็นค่าของ FFT Scale

3.3.4 ชุดคำสั่ง “ M ” เพื่อใช้ในการควบคุมขนาด และควบคุมความไวเพื่อตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุ



รูปที่ 3.12 การตั้งค่าขอบเขตของการตรวจจับ

ตารางที่ 3.6 ชุดคำสั่งหมวด “ M ”

Command	Name	R/W	Value
M?	Current speed magnitude setting	Read	Doppler (-A, -C) radar only.
m?	Current range magnitude setting	Read	FMCW (-B, -C) radar only.
M>n	Low Speed Magnitude Filter	Write	n is any number upon which no detected magnitudes below that number will be reported. M>0 resets to no limit. Doppler (-A, -C) radar only.
M<n	High Speed Magnitude Filter	Write	n is any number upon which no detected magnitudes above that number will be reported. M<0 resets to no limit. Doppler (-A, -C) radar only.
m>n	Low Range Magnitude Filter	Write	n is any number upon which no detected magnitudes below that number will be reported. m>0 resets to no limit. FMCW (-B, -C) radar only.
m<n	High Range Magnitude Filter	Write	n is any number upon which no detected magnitudes above that number will be reported. m<0 resets to no limit. FMCW (-B, -C) radar only.

ใช้คำสั่ง “ m? ” เพื่อตรวจสอบค่าเริ่มต้น ใช้คำสั่ง “ m>0 ” ตรวจสอบมากกว่า 0 (โดย n คือตัวเลขใด ๆ ที่ไม่มีการรายงานขนาดที่ตรวจพบต่ำกว่าจำนวนนั้น) และเรียกใช้คำสั่ง “ m<50 ” ตรวจสอบที่น้อยกว่า 50 (โดย n คือ จำนวนใด ๆ ที่ไม่มีการรายงานขนาดที่ตรวจพบเหนือจำนวนนั้น)

3.3.5 ชุดคำสั่ง “ R ” เพื่อเป็นตัวกรองความเร็ว/ช่วง/ทิศทางที่รายงาน โดยใช้การตั้งค่าเหล่านี้เพื่อกำหนดช่วงของข้อมูลที่รายงาน

ตารางที่ 3.7 ชุดคำสั่งหมวด “ R ”

Command	Name	R/W	Notes
R>n	Reported Minimum Speed Filter	Write	n is any number upon which no detected speeds below that number will be reported. R>0 resets to no limit. Doppler (-A, -C) radar only.
R<n	Reported Maximum Speed Filter	Write	n is any number upon which no detected speeds above that number will be reported. R<0 resets to no limit. Doppler (-A, -C) radar only.
r>n	Reported Range Filter	Write	n is any number upon which no detected range below that number will be reported. r>0 resets to no limit. FMCW (-B, -C) radar only.
r<n	Reported Range Filter	Write	n is any number upon which no detected range above that number will be reported. r<0 resets to no limit. FMCW (-B, -C) radar only.
R?	Report Current Speed Filter	Read	Reports current settings of the speed filter (-A, -C)
r?	Report Current Range Filter	Read	Reports current settings of the range filter (-B, -C)

เรียกใช้คำสั่ง “ r? ” เพื่อตรวจสอบการรายงานตัวกรองช่วงเริ่มต้น จากนั้นใช้คำสั่ง “ r>0 ” ตั้งค่าตัวกรองช่วงที่รายงานที่มากกว่า 0 (n คือ ตัวเลขใด ๆ ที่ไม่มีช่วงที่ตรวจพบซึ่งต่ำกว่าจำนวนนั้นจะถูกรายงาน) จากนั้นเรียกใช้คำสั่ง “ r<5 ” ตั้งค่าตัวกรองช่วงที่รายงานที่น้อยกว่า 5 (n คือ ตัวเลขใด ๆ ที่ไม่มีช่วงที่ตรวจพบซึ่งสูงกว่าจำนวนนั้นจะถูกรายงาน)

3.3.6 ชุดคำสั่ง “ F ” เพื่อการกำหนดจำนวนทศนิยมที่จะแสดงค่า

ตารางที่ 3.8 ชุดคำสั่งหมวด “ F ”

Command	Name	R/W	Value
Fn	Decimal Places	Write	Set n to the number of decimal places to be reported. For example, setting to F2 will report 2 decimal places (ex. 10.35). F0 will provide the integer value only. Valid values of n are 0-5.
F?	Decimal Place Setting	Read	Query the number of decimal places set.

เรียกใช้คำสั่ง “ F? ” เพื่อตรวจสอบว่าค่าเริ่มต้นมีจำนวนทศนิยมกี่ตำแหน่ง จากนั้นใช้คำสั่ง “ F2 ” เพื่อกำหนดให้ค่าที่แสดงมีจำนวนทศนิยม 2 ตำแหน่ง (n คือ จำนวนทศนิยม)

3.3.7 ชุดคำสั่ง “ B ” เลือกตั้งค่าแสดงผลเมื่อไม่มีการตรวจจับ

ตารางที่ 3.9 ชุดคำสั่งหมวด “ B ”

BZ BL BS BC BT BV	Blank Data Reporting	Write	If measured data does not meet filtering criteria, sensor will report out a character with every sampling interval. BZ will report zero value. BL will report blank lines. BS will report a space. BC will report with a comma. BT will report a timestamp. Use BV to turn off. B? will report the current setting.
----------------------------------	----------------------	-------	---

เรียกใช้ชุดคำสั่ง “ BZ ” เพื่อแสดงค่า 0 เมื่อไม่มีการตรวจจับ

3.3.8 ชุดคำสั่ง “ A ” เพื่อบันทึกและรีเซ็ตค่า

ตารางที่ 3.10 ชุดคำสั่งหมวด “ A ”

Command	Name	R/W	Value
A!	Save Configuration	Write	Saves current configuration settings in flash memory. Upon power loss or recycling power, the saved configurations will be used as the default.
A?	Persistent Memory Settings	Write	Reports the current settings for persistent memory.
A.	Read Settings	Write	Read the current flash settings.
AX	Reset Flash Settings	Write	Will overwrite current saved settings and return to the factory default settings.

ใช้คำสั่ง “ A!” เพื่อบันทึกค่าให้โมดูลจากการตั้งค่าทั้งหมด และมีคำสั่ง AX เพื่อรีเซ็ตค่าทั้งหมด

```
{ "Product": "OPS243-C", "rev": "0", "flash": "768", "features": "UART RS232" }
{ "Version": "1.1.8" }
{ "Clock": 226 }
{ "PowerMode": "Continuously Active" }
{ "Power": "Max" }
{ "OperationMode": "Speed and Distance Mode" }
{ "FMCWSampleRateHz": 320000 }
{ "FMCWSampleSize": 512 }
{ "RangeFFTScale": 2, "RangeFFTSize": 1024 }
{ "RangeResolution": 0.3123, "RangeUnit": "m" }
{ "RangeMagnitudeMin": 0, "RangeMagnitudeMax": 50 }
{ "RequiredMinRange": 0.000, "RequiredMaxRange": 5.000, "RangeUnit": "m" }
{ "RangeUnit": "m" }
{ "DopplerSampleRateHz": 10000 }
{ "DopplerSampleSize": 512 }
{ "SpeedFFTScale": 1, "SpeedFFTSize": 512 }
{ "SpeedResolution": 0.1220, "SpeedUnit": "mps" }
{ "SpeedMagnitudeMin": 20, "SpeedMagnitudeMax": "No Maximum Speed Magnitude" }
{ "RequiredMinSpeed": 0.000, "RequiredMaxSpeed": 300.000, "RequiredDirection": "Either", "SpeedUnit": "mps" }
{ "SpeedUnit": "mps" }
```

รูปที่ 3.13 การตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดภายในตัวโมดูลเรดาร์

3.4 การสร้างเซอร์โวมอเตอร์

ใช้โปรแกรมใน Arduino ในการป้อนคำสั่งให้ Servo motor เพื่อใช้ในการควบคุมการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของวัตถุตามคำสั่งหรือสัญญาณที่รับเข้ามา

```

servomotor | Arduino 1.8.19
File Edit Sketch Tools Help

servomotor
#include <Servo.h>

Servo myservo; // create servo object to control a servo
// twelve servo objects can be created on most boards

int pos = 0; // variable to store the servo position

void setup() {
  myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
}

void loop() {
  for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) { // goes from 0 degrees to 180 degrees
    // in steps of 1 degree
    myservo.write(pos); // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(15); // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
  for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) { // goes from 180 degrees to 0 degrees
    myservo.write(pos); // tell servo to go to position in variable 'pos'
    delay(15); // waits 15ms for the servo to reach the position
  }
}

```

รูปที่ 3.14 การตั้งค่าคำสั่งการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์

ในส่วนของอุปกรณ์ที่ได้เลือกใช้จะติดตั้งเรดาร์โมดูลกับขาตั้งกล้องเพื่อให้เรดาร์เคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวกต่อการใช้งาน อีกทั้งสามารถปรับความสูงของเรดาร์ที่จะใช้ตรวจจับให้เหมาะสมกับพื้นที่และกลุ่มตัวอย่างที่จะทำการศึกษาวิจัย และเลือกใช้สาย USB Type B ที่มีความยาว 1 เมตรเพื่อให้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้อย่างเหมาะสมกับความสูงของระยะขาตั้งกล้อง



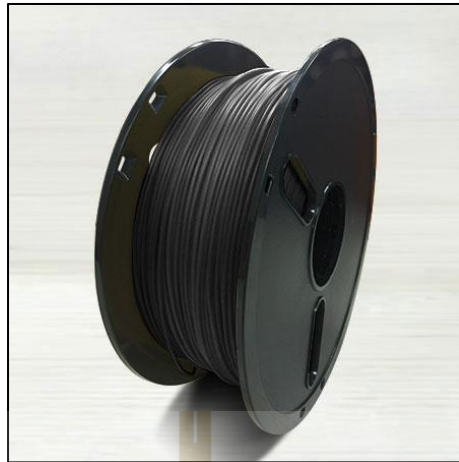
รูปที่ 3.15 เซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 3.16 ระบบเรดาร์

3.5 ขนาดของแบบจำลองค้ำคาวที่ใช้ในการทดลอง

ไดโอดีเล็กทรอนิกส์เป็นวัสดุหรือสารที่มีลักษณะเฉพาะด้วยความสามารถในการเก็บและส่งพลังงานไฟฟ้าในรูปของสนามไฟฟ้า ไดโอดีเล็กทรอนิกส์เป็นวัสดุฉนวนที่ไม่นำกระแสไฟฟ้าได้ง่าย ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น คาปาซิเตอร์ ฉนวนไฟฟ้า และเป็นสื่อในการเก็บพลังงานไฟฟ้าไดโอดีเล็กทรอนิกส์ทำงานโดยโพลาริซชันต่อหน้าสนามไฟฟ้า เมื่อใช้สนามไฟฟ้ากับวัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์ ประจุบวกและลบภายในวัสดุจะเคลื่อนตัว ทำให้เกิดโมเมนต์ไดโอดีเล็กทรอนิกส์เหนี่ยวนำ โพลาริซชันนี้ช่วยให้ไดโอดีเล็กทรอนิกส์สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ คุณสมบัติไดโอดีเล็กทรอนิกส์ของวัสดุถูกกำหนดโดยค่าคงที่ไดโอดีเล็กทรอนิกส์หรือการอนุญาตสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นการวัดว่าวัสดุสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ดีเพียงใดเมื่อเปรียบเทียบกับสุญญากาศ ค่าคงที่ไดโอดีเล็กทรอนิกส์เป็นปริมาณไร้มิติที่ระบุขอบเขตที่วัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์สามารถโพลาริซชันเพื่อตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่ใช้ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดโอดีเล็กทรอนิกส์สูงจะมีความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า วัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์อาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ และคุณสมบัติของวัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความถี่ของสนามไฟฟ้า และปริมาณความชื้น ตัวอย่างของวัสดุไดโอดีเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ได้แก่ เซรามิก พลาสติก แก้ว กระจก และของไหลบางประเภทโดยรวมแล้ว ไดโอดีเล็กทรอนิกส์มีบทบาทสำคัญในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์โดยให้ฉนวน การเก็บพลังงาน และความสามารถในการส่ง



รูปที่ 3.17 พลาสติก ABS สีดำที่ใช้ในการขึ้นรูป



รูปที่ 3.18 สร้างค้ำควจลองด้วย 3D Printing

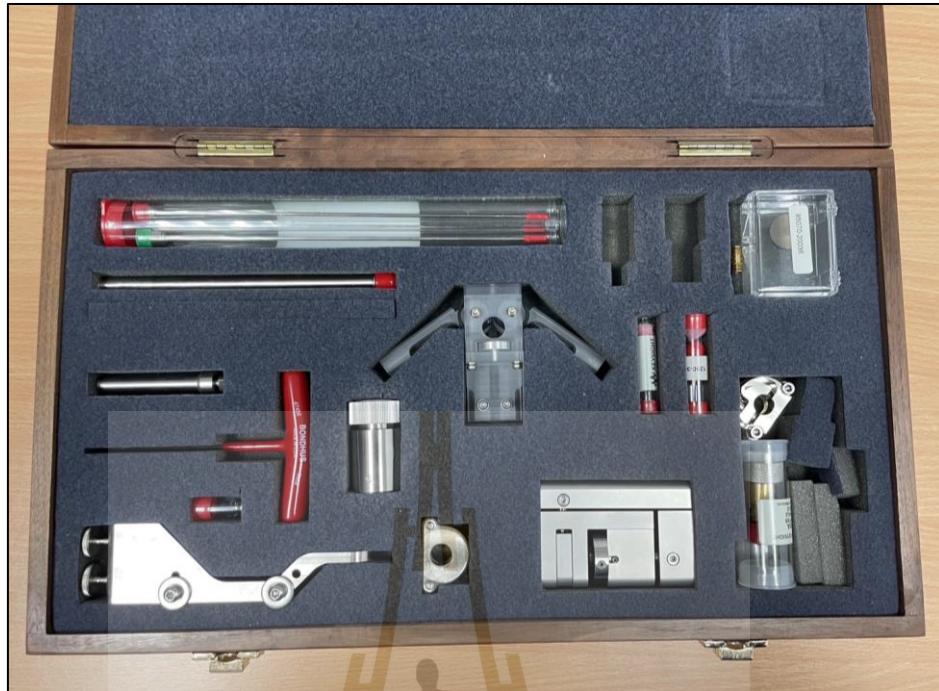


รูปที่ 3.19 ขนาดของแบบจำลองค้างคาว

จากโครงสร้างทางร่างกายของค้างคาวโดยทั่วไปที่มีขนาดตัวยาว 20 เซนติเมตร และสูง 8.5 เซนติเมตร จากการอ้างอิงสเกลช่วงลำตัวจริงของค้างคาวและค่าไดอิเล็กทริกของชากค้างคาวทำให้ผู้วิจัยสามารถออกแบบสร้างรูปแบบค้างคาวจำลองเพื่อใช้ในการทดลองได้อย่างแม่นยำ

3.6 การหาค่าไดอิเล็กทริกที่เท่ากันเพื่อสร้างแบบจำลอง

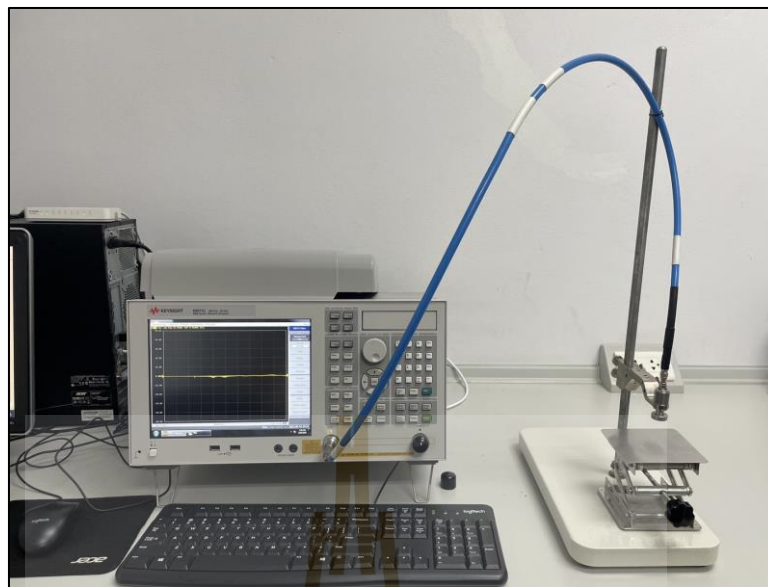
เมื่อวัสดุมีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากันสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นมีความสามารถในการดูดซับการส่งต่อพลังงาน และการกระจายสนามไฟฟ้าที่เท่าเทียมกัน อีกทั้งการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้าและวัสดุเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุมีความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเพียงใดในการทำงาน เมื่อค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำ ทำให้ทราบว่าวัสดุมีความต้านทานต่อการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้น้อยลง สามารถนำแบบจำลองที่มีรูปแบบที่คล้ายเคียงและค่าไดอิเล็กทริกที่มีค่าใกล้เคียงกับค้างคาวจริงมาใช้ในการวิจัยได้



รูปที่ 3.20 ชุดหัววัดไดอิเล็กทริก N1501A



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าไดอิเล็กทริก



รูปที่ 3.22 เครื่องมือวัด Network Analyzer (Keysight, E5071C ENA series 300 kHz –20 GHz)

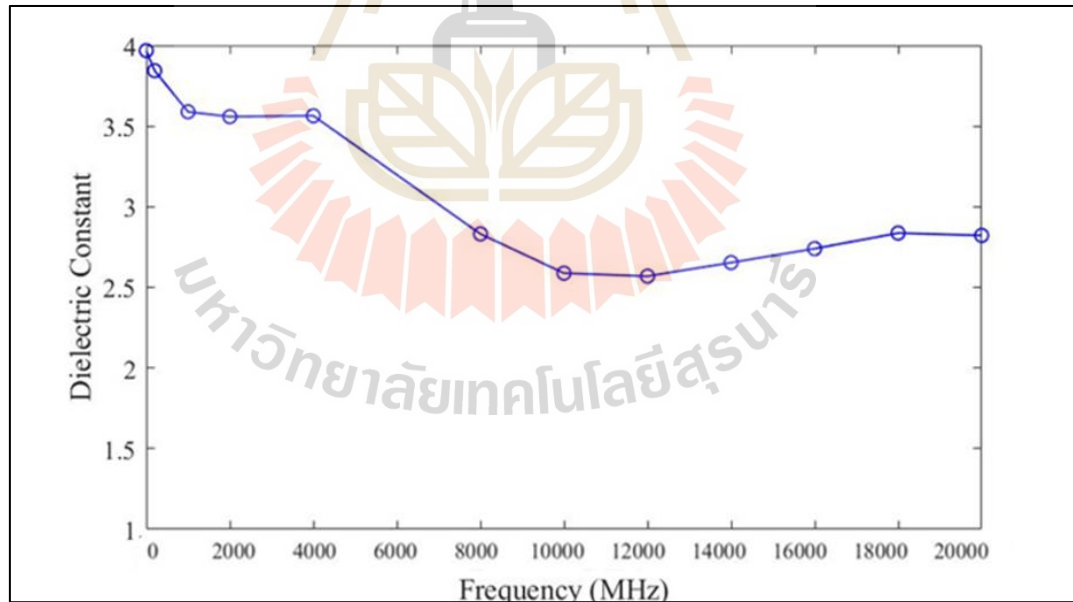
การวัดค่าไดโอดเล็กทริกด้วยเครื่องมือวัด Network Analyzer (Keysight, E5071C ENA series 300 kHz –20 GHz) ที่ให้ความสามารถที่ยอดเยี่ยมในการทดสอบและวิเคราะห์สัญญาณแบบเครือข่ายในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นไปถึง 20 GHz ด้วยความละเอียดและความแม่นยำสูง รวมถึงมีคุณสมบัติและฟังก์ชันที่หลากหลายเพื่อการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการวัดและวิเคราะห์ค่าความสูญเสียของสัญญาณ และค่าการสะท้อนของสัญญาณ



รูปที่ 3.23 วิธีการวัดค่าไดโอดเล็กทริก



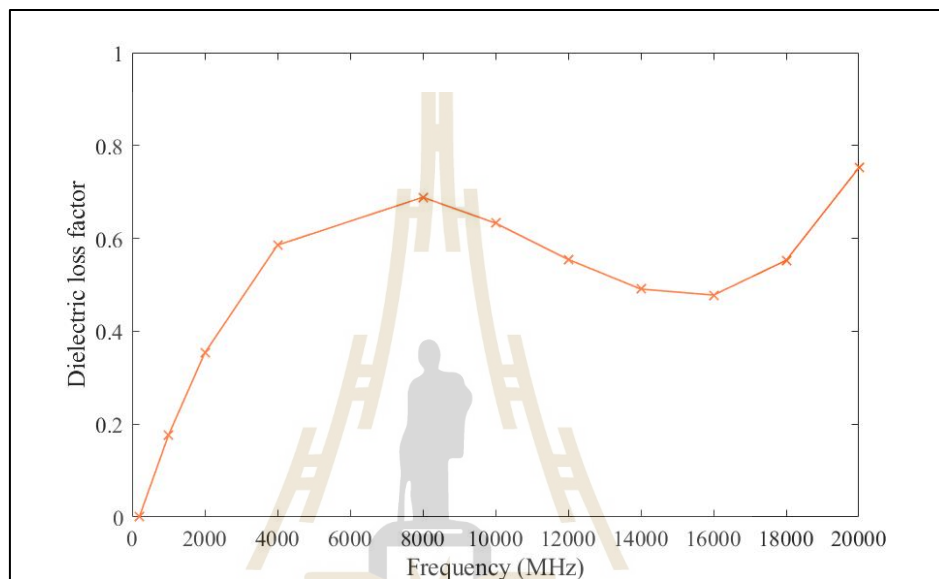
รูปที่ 3.24 การวัดค่าไดอิเล็กทริกของค้ำควาจำลอง



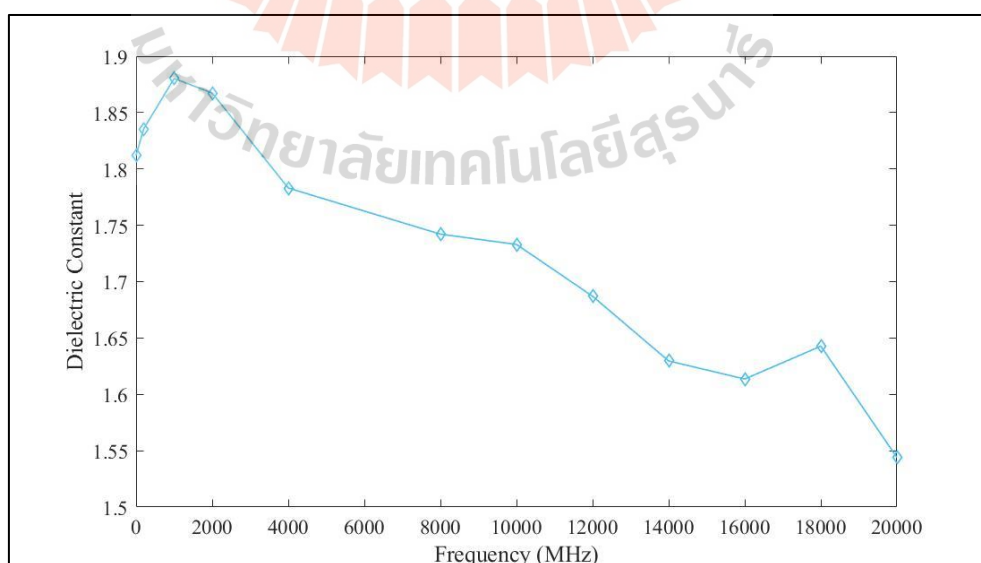
รูปที่ 3.25 กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกของค้ำคว

3.6.1 ค่าไดอิเล็กทริกค้ำคาว

จากผลการทดลองกราฟที่ได้พบว่าค่าไดอิเล็กทริกของซากค้ำคาวในช่วงความถี่ที่ 500 MHz – 5 GHz มีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 3.66-3.53 เตรียมชุดการทดลองและตั้งค่าโปรแกรมให้อุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กทริกโดยใช้หัววัดอุณหภูมิสูง อุณหภูมิน้ำที่ 26.0 องศา IFBW 30.000000 Hz และกำลังงาน -5.000000 dBm



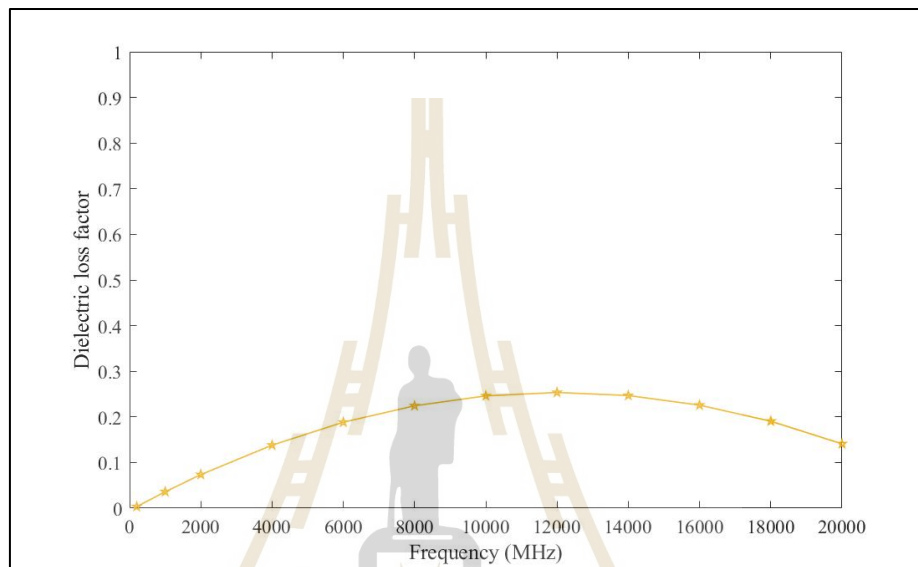
รูปที่ 3.26 กราฟแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของค้ำคาว



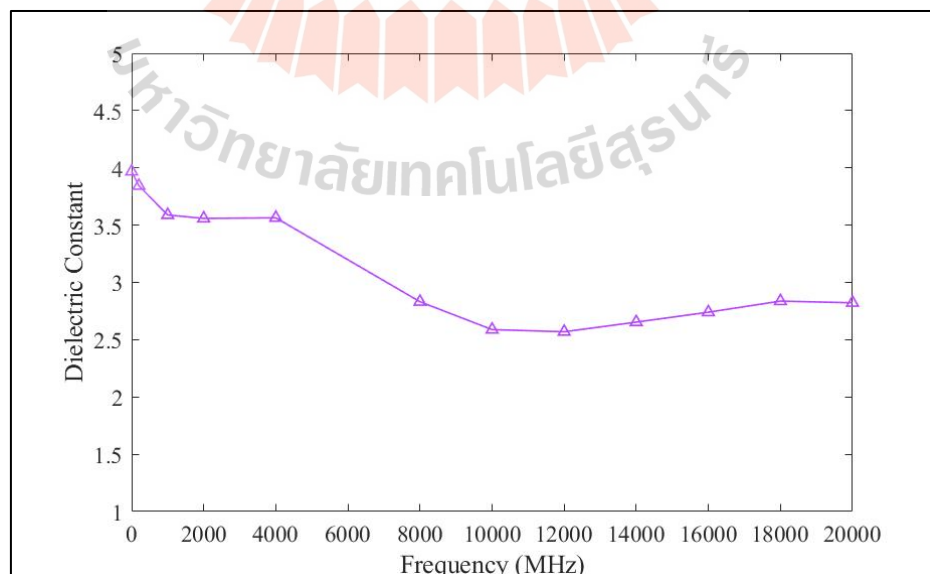
รูปที่ 3.27 กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS

3.6.2 ค่าไดอิเล็กทริกแบบจำลองพลาสติก ABS

จากผลการทดลองกราฟที่ได้พบว่าค่าไดอิเล็กทริกของแบบจำลองในช่วงความถี่ที่ 500 MHz – 5 GHz มีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 1.89-1.64 เตรียมชุดการทดลองและตั้งค่าโปรแกรมให้อุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กทริกโดยใช้หัววัดอุณหภูมิสูง อุณหภูมิน้ำที่ 25.0 องศา IFBW 30.000000 Hz และกำลังงาน -5.000000 dBm



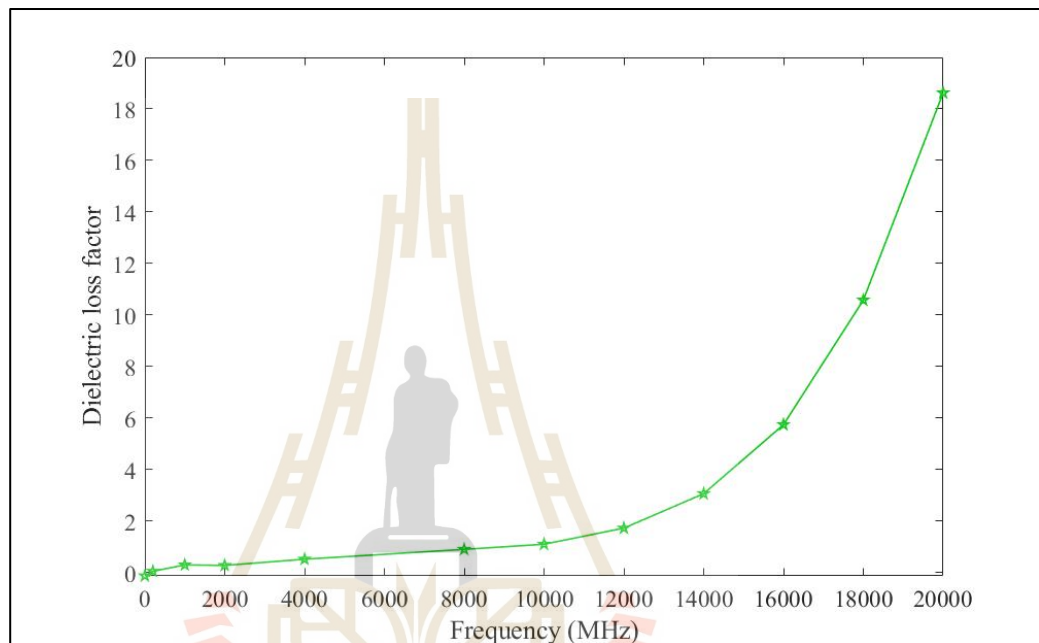
รูปที่ 3.28 กราฟแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS



รูปที่ 3.29 กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS ที่อัดกระดาษ

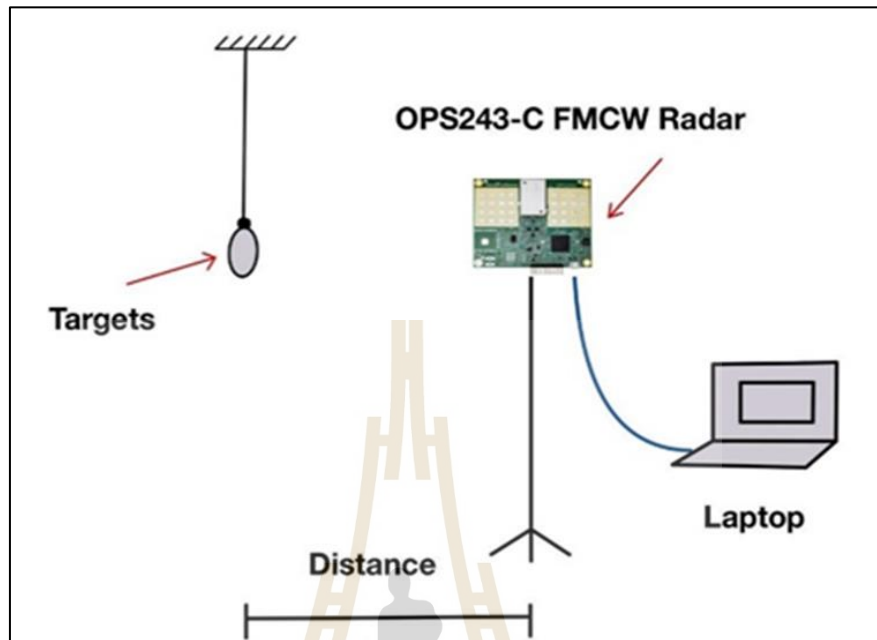
3.6.3 ค่าไดอิเล็กทริกแบบจำลองพลาสติก ABS ที่เพิ่มกระดาศ

จากผลการทดลองกราฟที่ได้พบว่าค่าไดอิเล็กทริกของแบบจำลองที่เพิ่มกระดาศเข้าไปภายในลำตัวในช่วงความถี่ที่ 500 MHz – 5 GHz มีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 3.65-3.51 เตรียมชุดการทดลองและตั้งค่าในโปรแกรมให้อุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กทริกโดยใช้หัววัดอุณหภูมิสูง อุณหภูมิน้ำที่ 26.0 องศา IFBW 30.000000 Hz และกำลังงาน -5.000000 dBm



รูปที่ 3.30 กราฟแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแบบจำลองของพลาสติก ABS ที่อัดกระดาศเข้าไปภายใน

3.6.4 การเก็บข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 3.31 การเตรียมการทดลอง

เริ่มทำการทดลองโดยการนำแบบจำลองค้ำความมาแกว่งผ่านเรดาร์ OPS243-C ที่ระยะต่าง ๆ โดยเพิ่มระยะทุก ๆ 30 เซนติเมตร จาก 30, 60, 90, 120 และ 150 เซนติเมตร

3.7 สรุปผล

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างเรดาร์โมดูลโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในตัวโมดูลด้วยคำสั่ง API Command และทดสอบความถี่ของเรดาร์โมดูลที่มีความถี่ 24 GHz ด้วยเครื่อง N9020A MXA Signal Analyzer ที่มีความสามารถวัดและวิเคราะห์คลื่นของสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 10 Hz ถึง 26.5 GHz รวมไปถึงการออกแบบสร้างวัตถุจำลองซึ่งใช้วัสดุ ABS ที่อัดด้วยกระดาษเป็นตัวทดลองโดยใช้หลักการความรู้ทางด้านไดอิเล็กทริกในการออกแบบสร้างและทดสอบ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

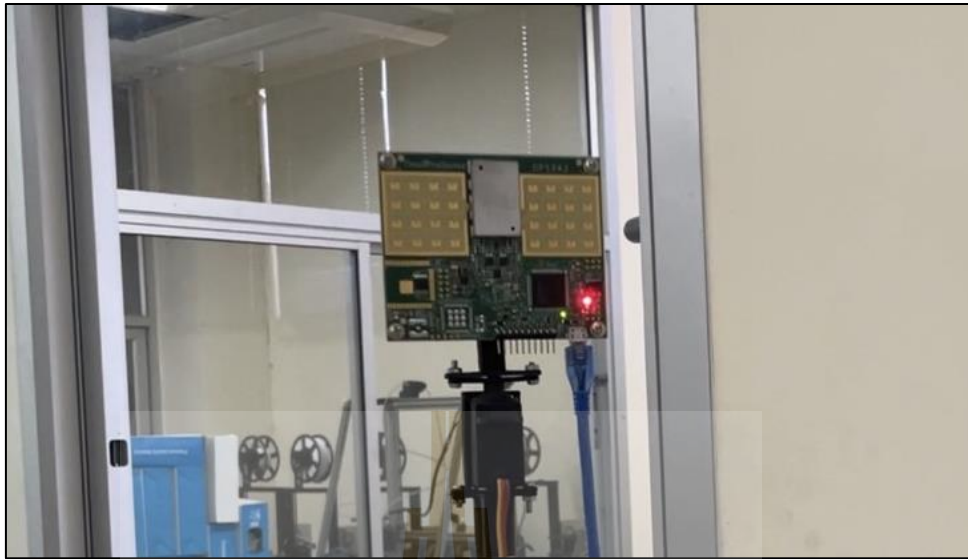
จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีและการออกแบบในบทที่ผ่านมาเมื่อวัตถุมีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากันสามารถบอกได้ว่าวัตถุเหล่านั้นมีความสามารถในการดูดซับ การส่งต่อพลังงาน และการกระจายสนามไฟฟ้าที่เท่าเทียมกัน อีกทั้งการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสนามไฟฟ้าและวัสดุเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุมีความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเพียงใดในการทำงาน เมื่อค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำ ทำให้ทราบว่าวัสดุมีความต้านทานต่อการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้น้อยลงสามารถนำแบบจำลองที่มีรูปแบบที่คล้ายเคียงและค่าไดอิเล็กทริกที่มีค่าใกล้เคียงกับค่างคาวจริงมาใช้ในการวิจัยได้

4.2 การรายงานผลการวิจัย

เมื่อมีการเคลื่อนไหวผ่านโมดูลเรดาร์จะมีสัญญาณไฟแสดงการแจ้งเตือนวิธีการเคลื่อนไหว โดยจะแสดงสีแดงเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่เข้าหาเรดาร์ และจะแสดงสีฟ้าเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.4 เพื่อให้ทราบข้อมูลทิศทางของวัตถุที่มีการเคลื่อนไหวผ่านเรดาร์



รูปที่ 4.1 ภาพการทดลองโดยการนำค่างคาวจำลองเคลื่อนไหวเข้าสู่เรดาร์



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงสัญญาณไฟสีแดงเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่เข้าสู่เรดาร์



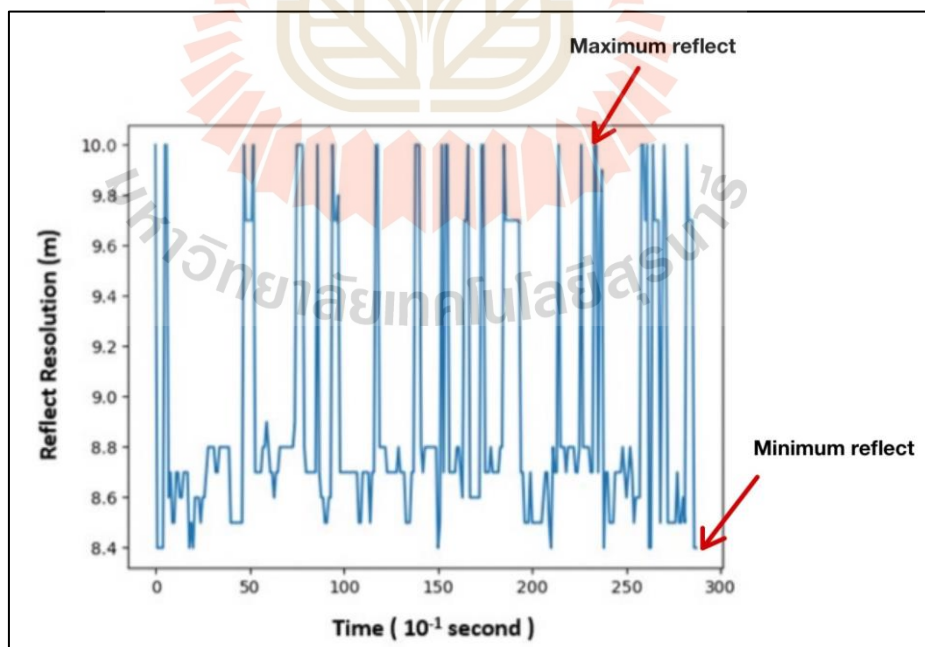
รูปที่ 4.3 ภาพการทดลองโดยการนำค้ำจวางจำลองเคลื่อนไหวนอกจากเรดาร์



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงสัญญาณไฟสีฟ้าเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์

4.2.1 ผลการทดลองการตรวจจับที่ระยะต่าง ๆ

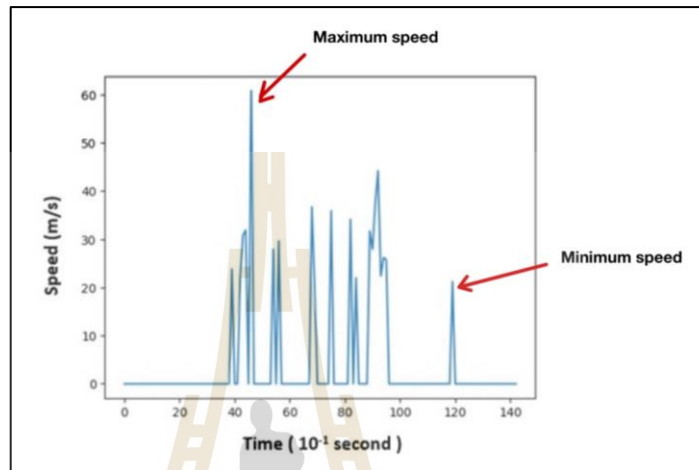
ผลการทดลองที่ระยะ 30 เซนติเมตรโดยกำหนดให้วัตถุอยู่นิ่ง



รูปที่ 4.5 การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุอยู่นิ่งที่ระยะ 30 เซนติเมตร

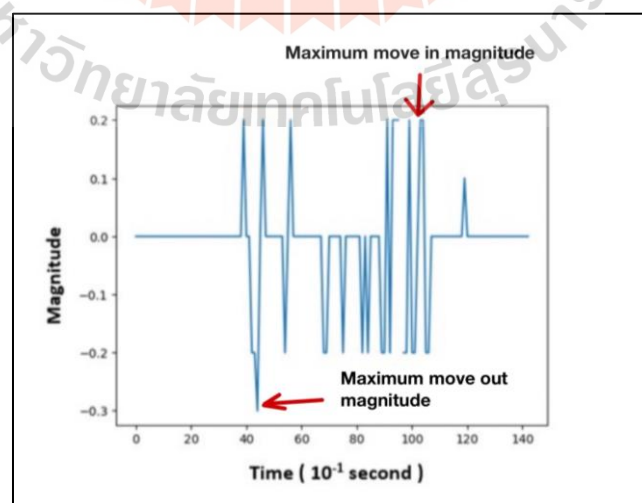
เมื่อสัญญาณเรดาร์ส่งออกไปและมีการกระทบกับวัตถุจำลองจึงมีการสะท้อนค่ากลับ จากรูปที่ 4.5 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุอยู่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 8.91 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.4 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 30 เซนติเมตร เมื่อวัตถุแกว่งด้วยความเร็วปกติ



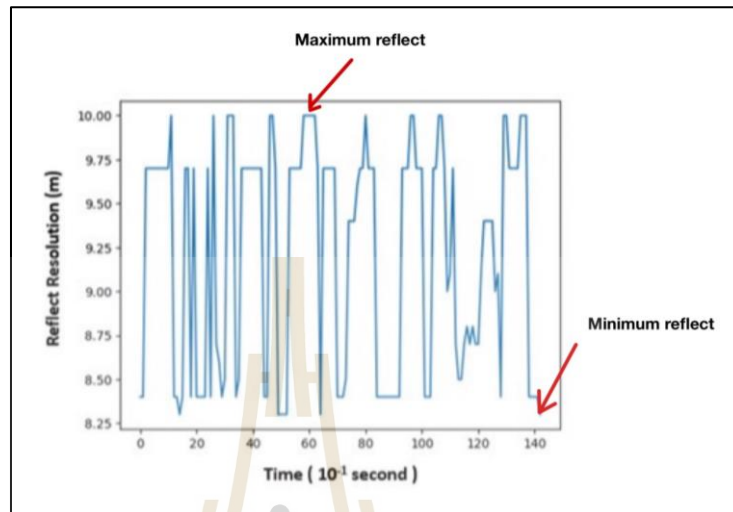
รูปที่ 4.6 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 30 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.6 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 30.77 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 60 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.7 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 30 เซนติเมตร

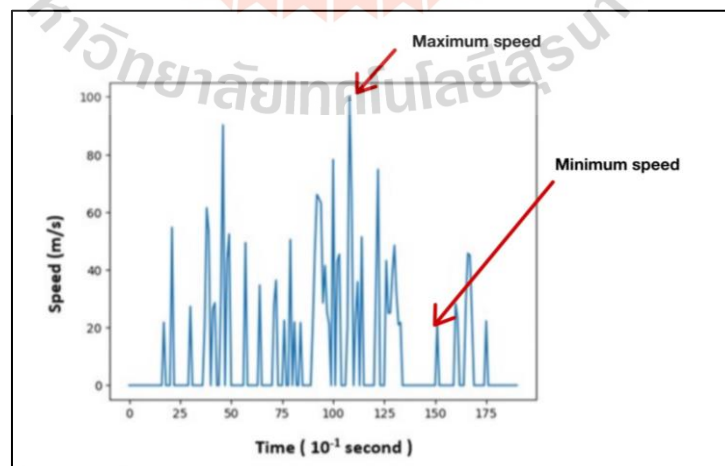
จากรูปที่ 4.7 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 0.1 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 0.3



รูปที่ 4.8 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 30 เซนติเมตร

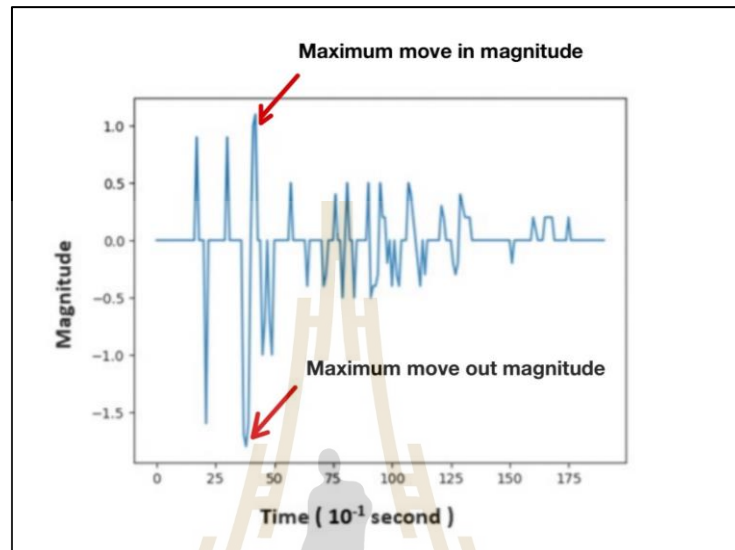
จากรูปที่ 4.8 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่แบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.21 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 30 เซนติเมตร เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของวัตถุ



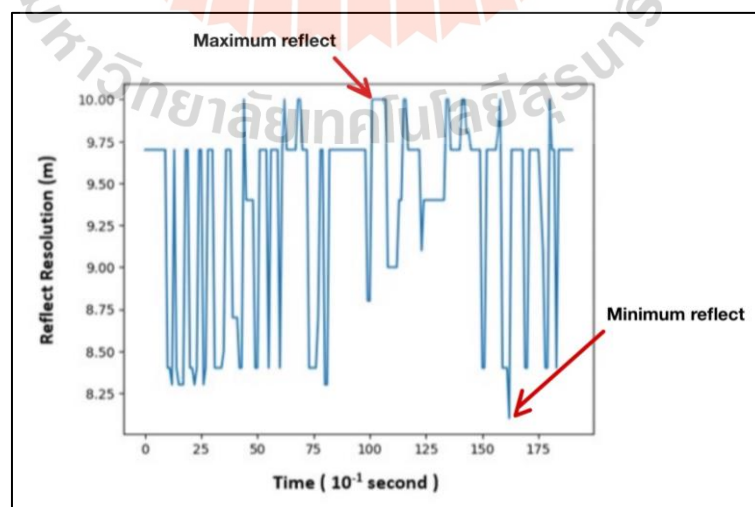
รูปที่ 4.9 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 30 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.9 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 40.70 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 100 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.4 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.10 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 30 เซนติเมตร

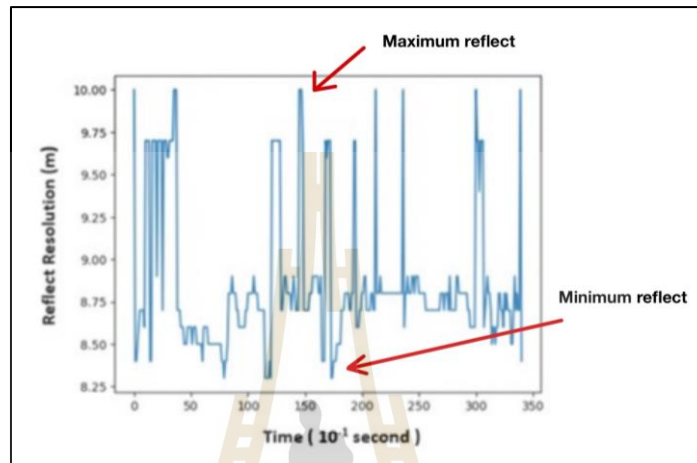
จากรูปที่ 4.10 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 1.1 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 1.8



รูปที่ 4.11 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 30 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.11 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.36 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.1 เมตร

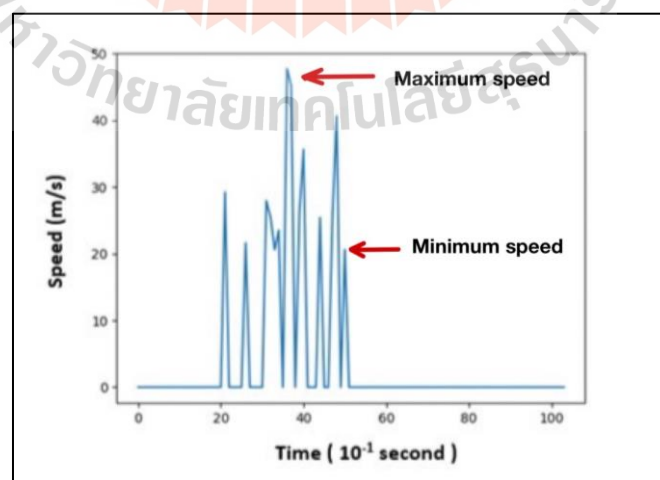
ผลการทดลองที่ระยะ 60 เซนติเมตรเมื่อวัตถุอยู่นิ่ง



รูปที่ 4.12 การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุอยู่นิ่งที่ระยะ 60 เซนติเมตร

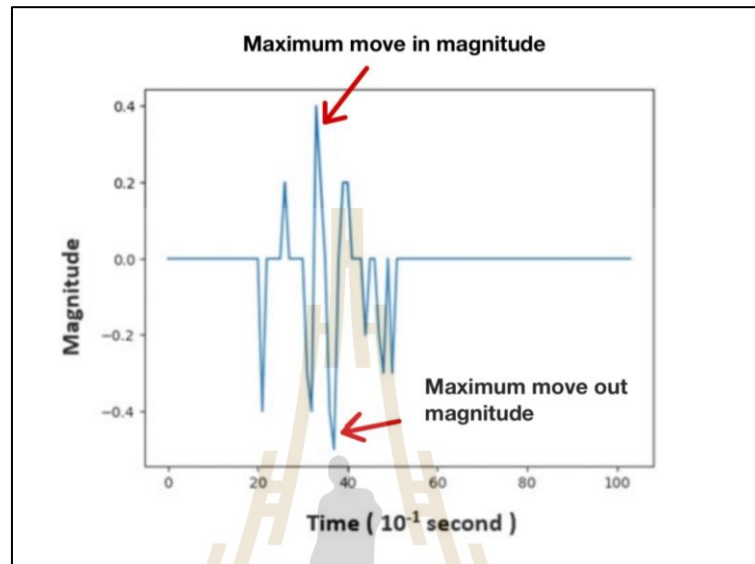
จากรูปที่ 4.12 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ 8.85 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 60 เซนติเมตรเมื่อมีการแกว่งความเร็วปกติ



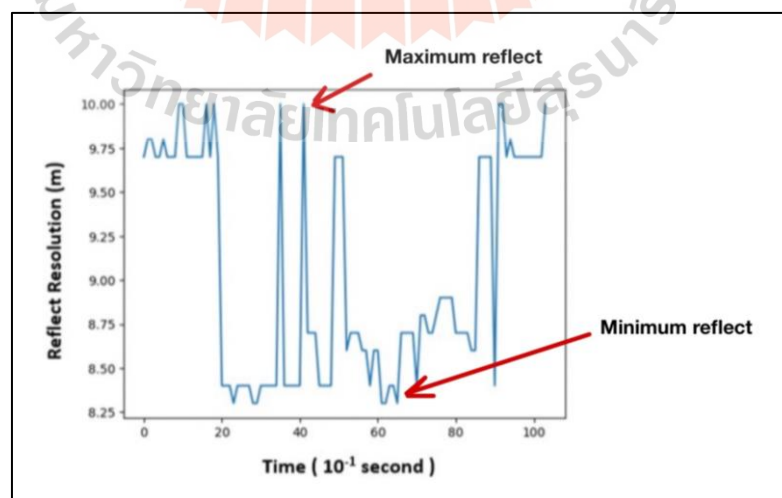
รูปที่ 4.13 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 60 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.13 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 30.75 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 47.7 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.6 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 60 เซนติเมตร

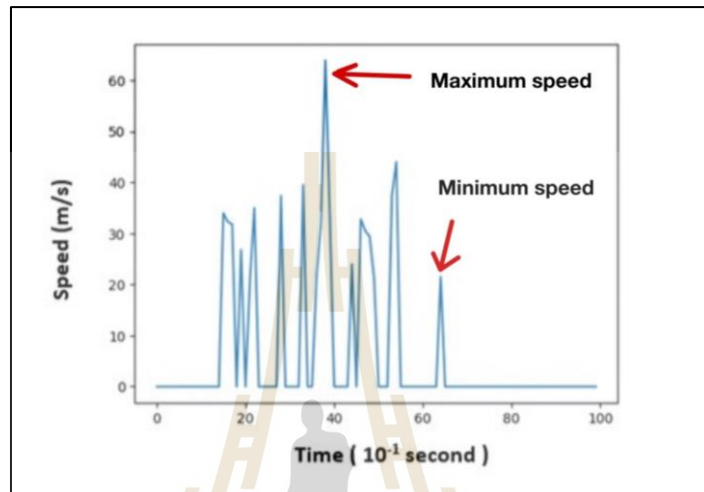
จากรูปที่ 4.14 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 0.4 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 0.5



รูปที่ 4.15 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 60 เซนติเมตร

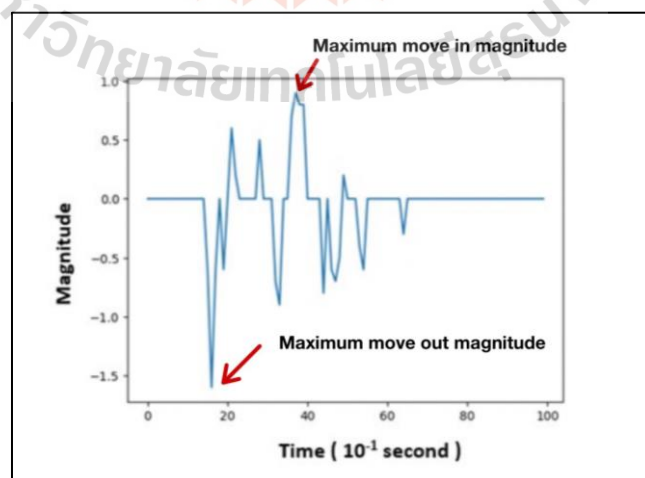
จากรูปที่ 4.15 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.03 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 60 เซนติเมตรเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของวัตถุ



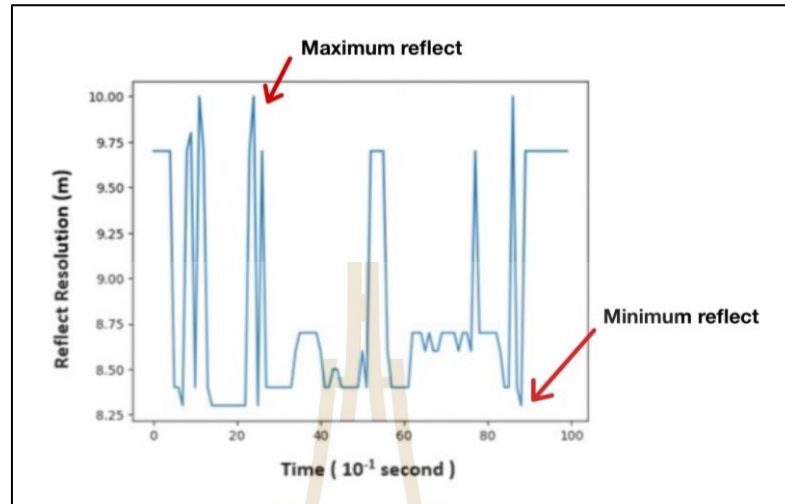
รูปที่ 4.16 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 60 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.16 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 32.22 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 44 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.9 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.17 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 60 เซนติเมตร

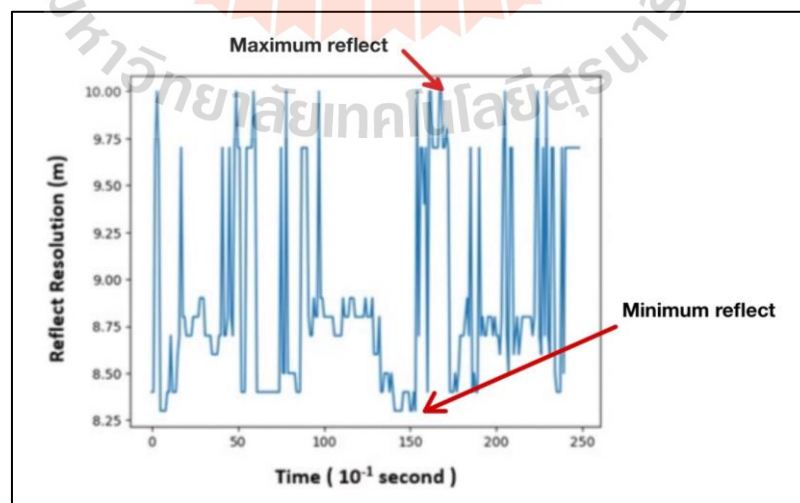
จากรูปที่ 4.17 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 0.9 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 0.9



รูปที่ 4.18 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 60 เซนติเมตร

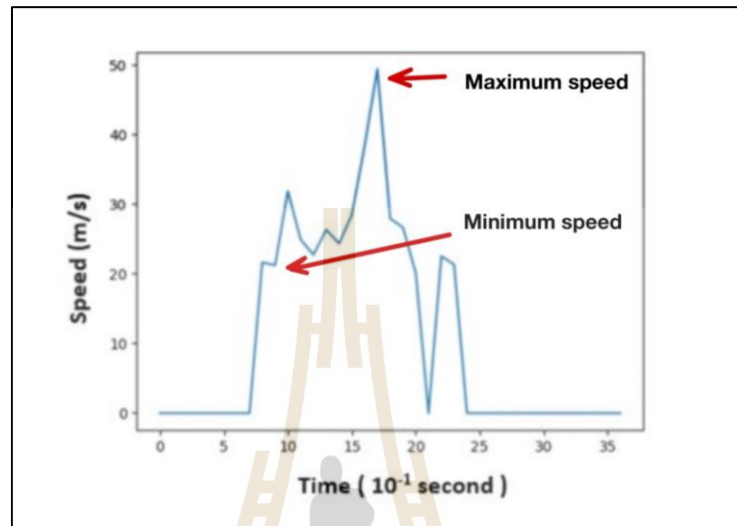
จากรูปที่ 4.18 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่แบบปกติมีค่าเท่ากับ 8.85 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 90 เซนติเมตรเมื่อวัตถุอยู่นิ่ง



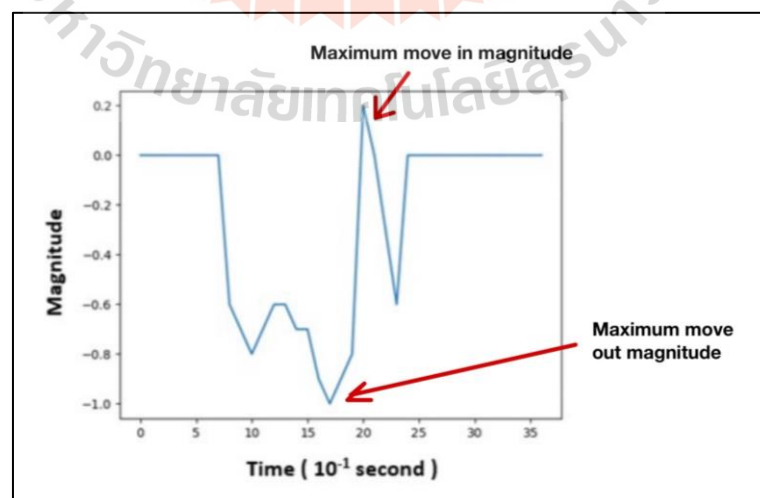
รูปที่ 4.19 การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุอยู่นิ่งที่ระยะ 90 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.19 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุอยู่หนึ่งมีค่าเท่ากับ 8.89 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร ผลการทดลองที่ระยะ 90 เซนติเมตรเมื่อมีการแกว่งความเร็วปกติ



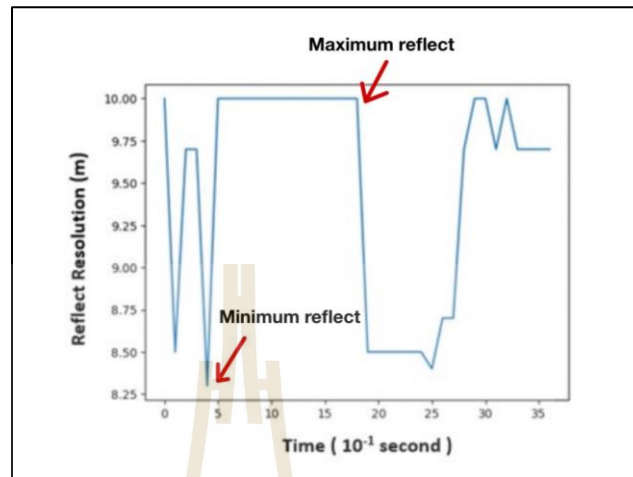
รูปที่ 4.20 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 90 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.20 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 27.14 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 49.3 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.21 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 90 เซนติเมตร

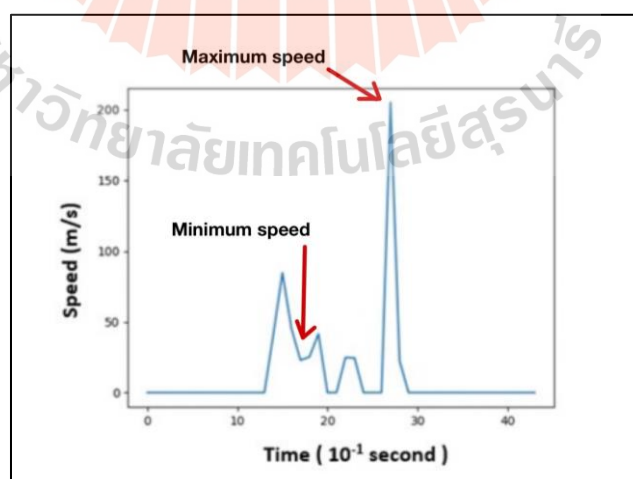
จากรูปที่ 4.21 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 0.2 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 0.9



รูปที่ 4.22 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 90 เซนติเมตร

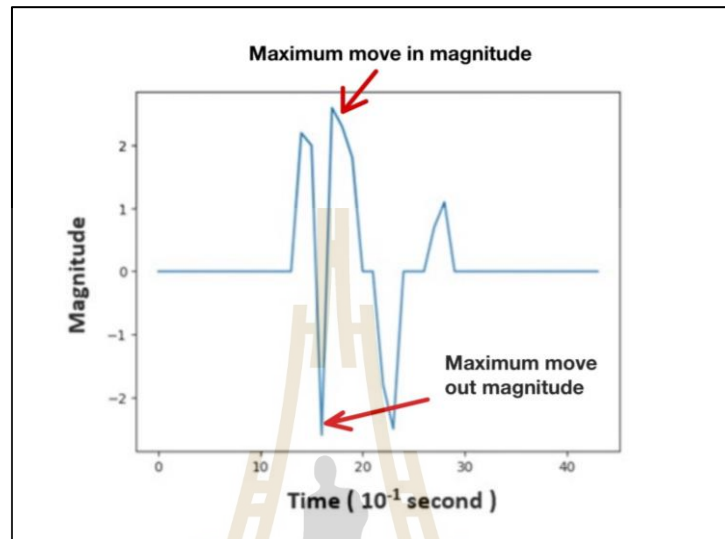
จากรูปที่ 4.22 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.49 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 90 เซนติเมตรเมื่อมีการเพิ่มความเร็ของวัตถุ



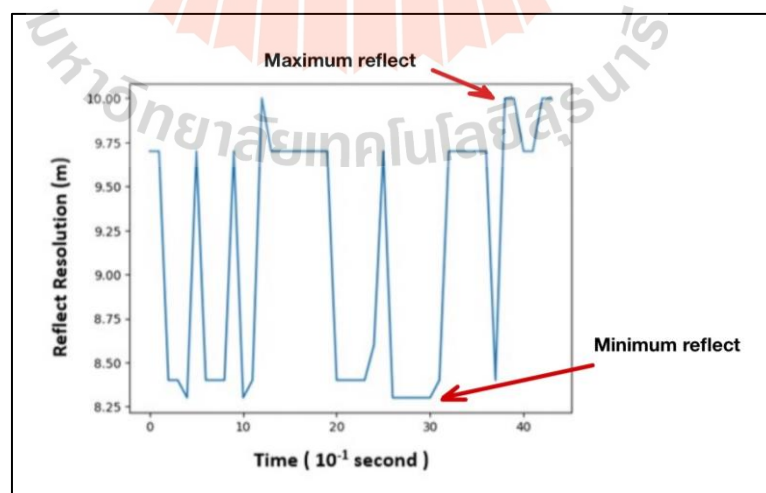
รูปที่ 4.23 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็ที่ระยะ 90 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.23 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 53.73 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 205 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 22.4 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.24 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 90 เซนติเมตร

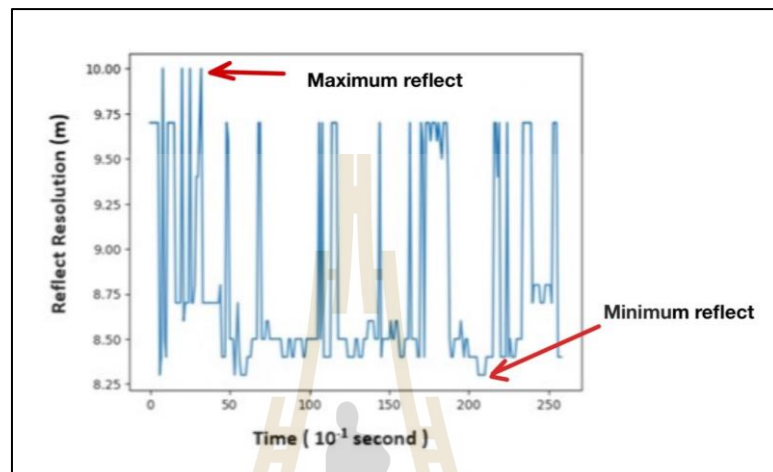
จากรูปที่ 4.24 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 2.3 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 2.6



รูปที่ 4.25 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 90 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.25 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.13 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

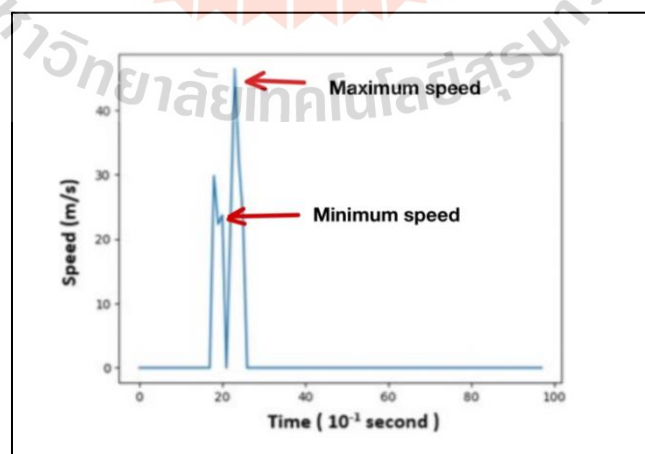
ผลการทดลองที่ระยะ 120 เซนติเมตรเมื่อวัตถุอยู่นิ่ง



รูปที่ 4.26 การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุอยู่นิ่งที่ระยะ 120 เซนติเมตร

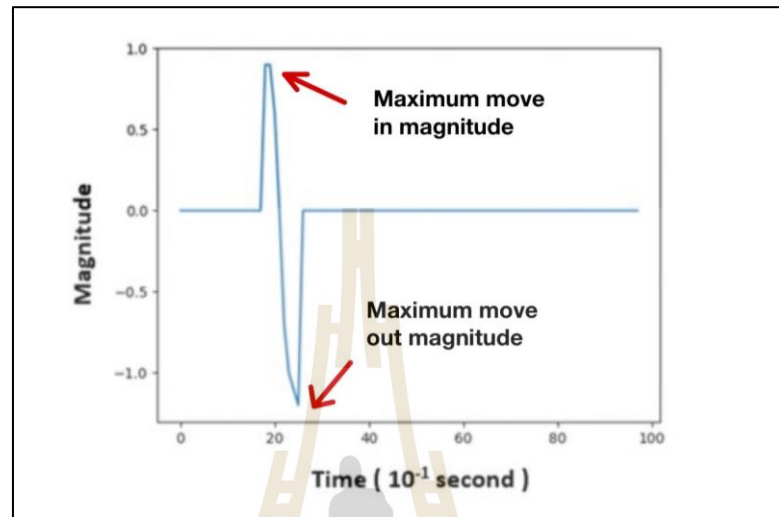
จากรูปที่ 4.26 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ 8.78 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 120 เซนติเมตรเมื่อมีการแกว่งความเร็วปกติ



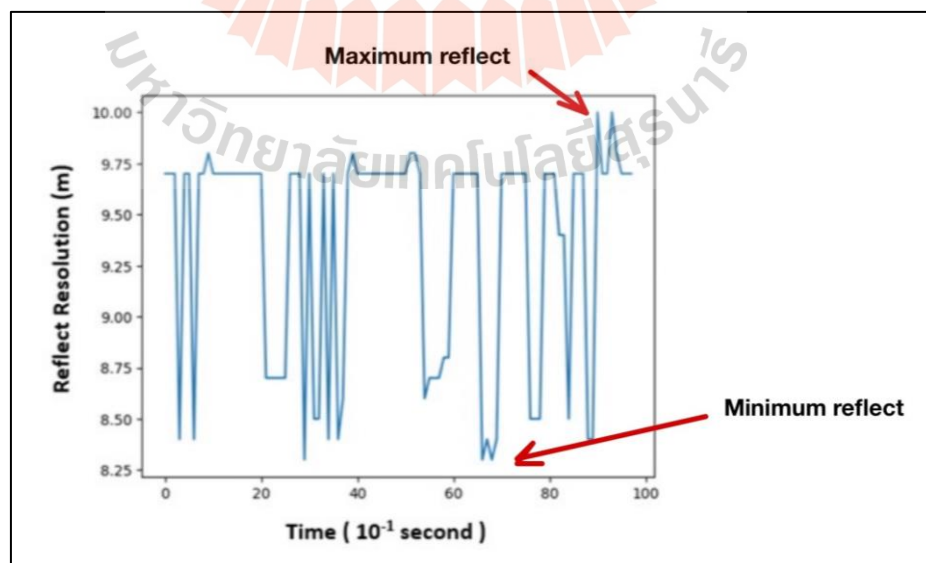
รูปที่ 4.27 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 120 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.27 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 28.6 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 46.4 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 22.3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.28 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 120 เซนติเมตร

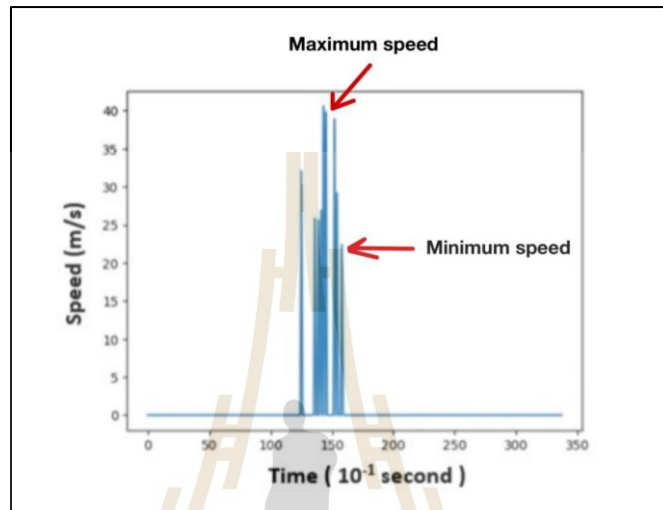
จากรูปที่ 4.28 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 0.9 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 1.2



รูปที่ 4.29 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 120 เซนติเมตร

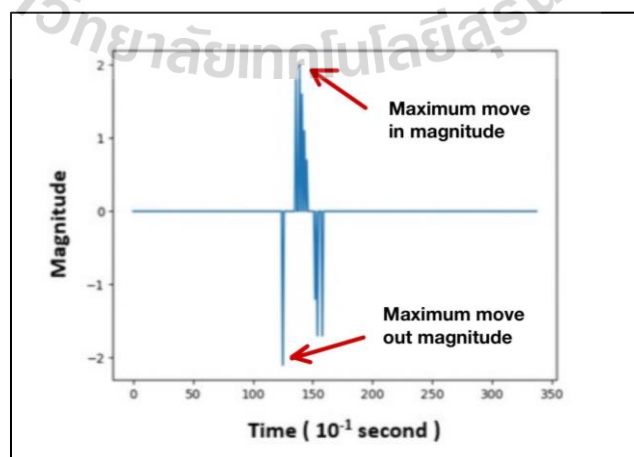
จากรูปที่ 4.29 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.36 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 1.2 เมตรเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของวัตถุ



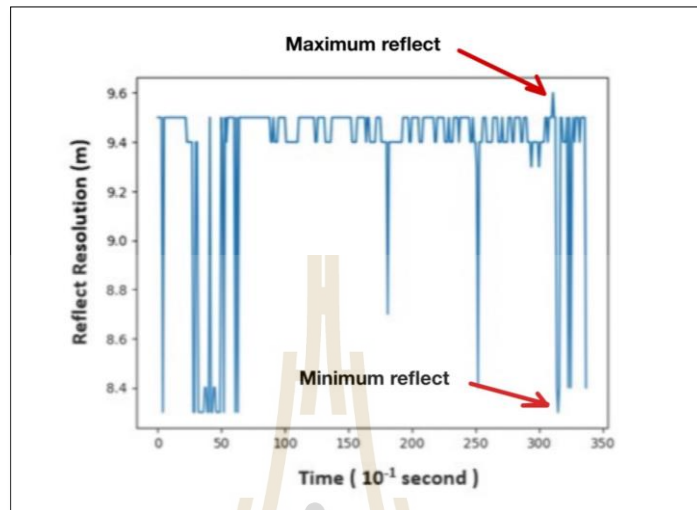
รูปที่ 4.30 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 120 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.30 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 31.25 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 40.6 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 25.6 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.31 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 120 เซนติเมตร

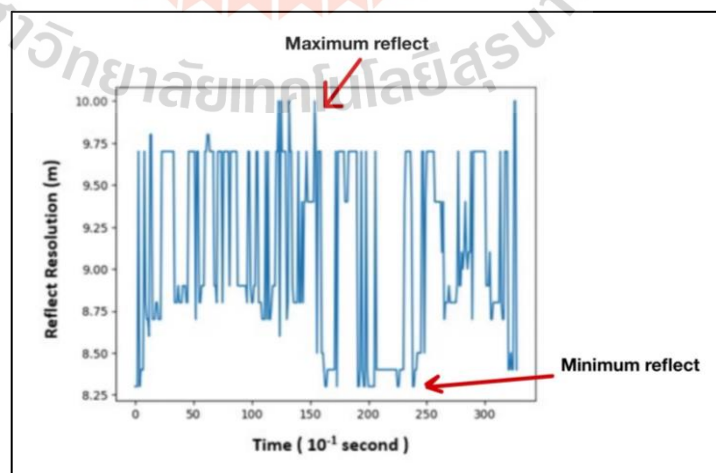
จากรูปที่ 4.31 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 2.0 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 2.1



รูปที่ 4.32 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 120 เซนติเมตร

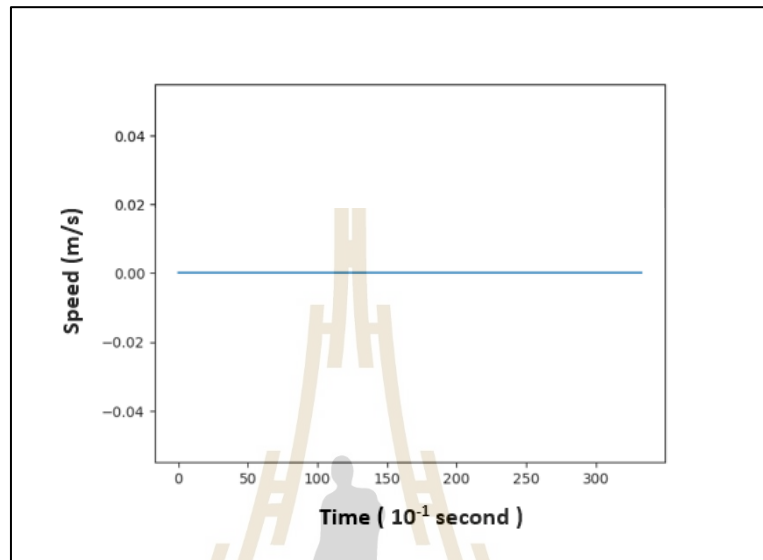
จากรูปที่ 4.32 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่โหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.35 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 9.5 เมตร และมีการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 150 เซนติเมตรเมื่อวัตถุอยู่นิ่ง



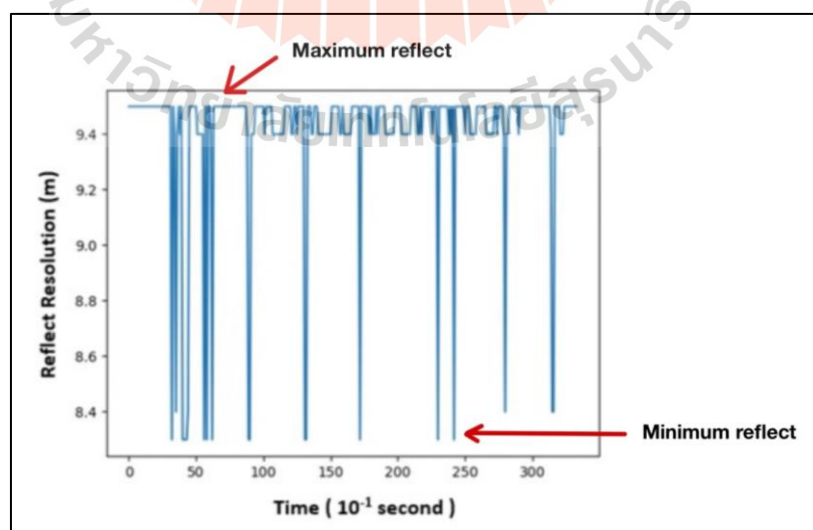
รูปที่ 4.33 การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุอยู่นิ่งที่ระยะ 150 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.33 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ 9.09 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร ผลการทดลองที่ระยะ 150 เซนติเมตรเมื่อมีการแกว่งความเร็วปกติ



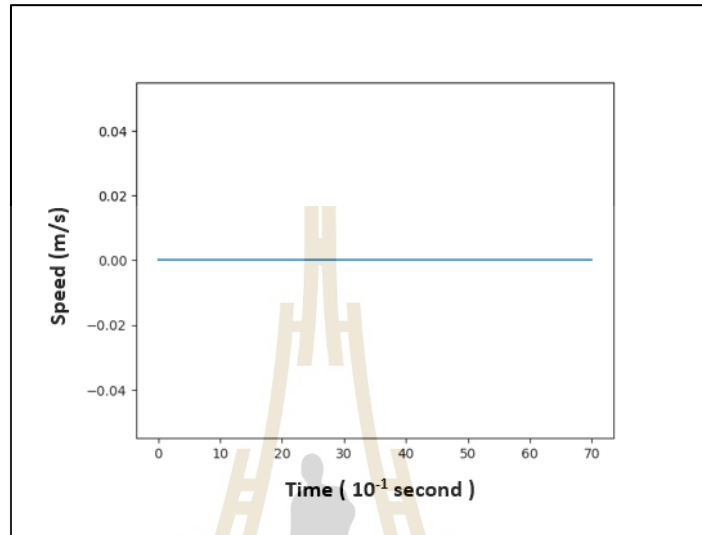
รูปที่ 4.34 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 150 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.34 กราฟแสดงให้เห็นความเร็วที่สามารถตรวจจับตลอดการเคลื่อนไหวมี่ค่าเท่ากับ 0



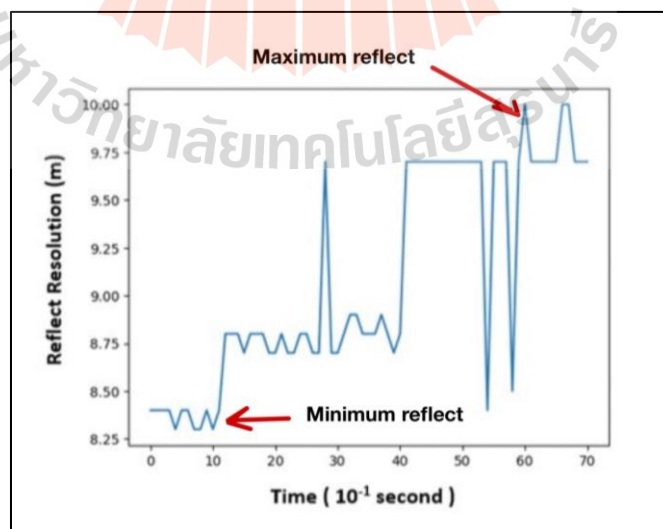
รูปที่ 4.35 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่ความเร็วปกติที่ระยะ 150 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.35 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ 9.40 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 9.5 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร ผลการทดลองที่ระยะ 150 เซนติเมตรเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของวัตถุ



รูปที่ 4.36 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 150 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.36 กราฟแสดงให้เห็นความเร็วที่สามารถตรวจจับตลอดการเคลื่อนไหวมี่ค่าเท่ากับ 0



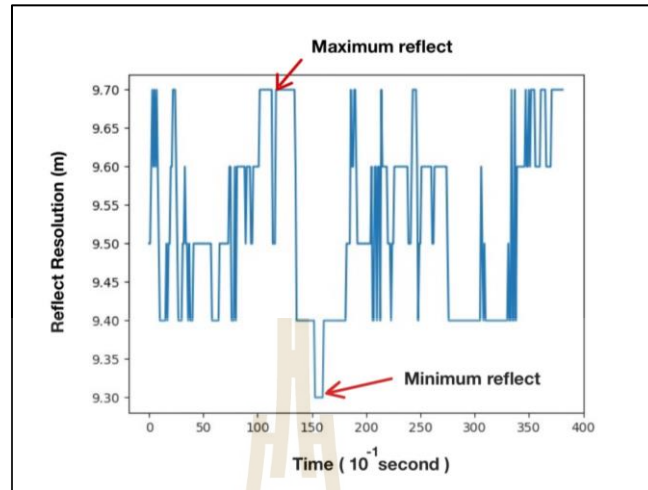
รูปที่ 4.37 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่มีการเพิ่มความเร็วที่ระยะ 150 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.37 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ 9.08 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 10 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 8.3 เมตร

ตารางที่ 4.1 สรุปผลในการทดลองที่ระยะต่าง ๆ

ระยะที่ใช้ในการทดสอบ (เซนติเมตร)		ความเร็วการตรวจจับโดย เฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)	ค่าการสะท้อนกลับ (เมตร)
30	นิ่ง	-	8.91
	ปกติ	30.77	9.21
	เพิ่มความเร็ว	40.70	9.36
60	นิ่ง	-	8.85
	ปกติ	30.75	9.03
	เพิ่มความเร็ว	32.22	8.85
90	นิ่ง	-	8.89
	ปกติ	27.14	9.49
	เพิ่มความเร็ว	53.73	9.13
120	นิ่ง	-	8.78
	ปกติ	28.60	9.36
	เพิ่มความเร็ว	31.25	9.35
150	นิ่ง	-	9.09
	ปกติ	-	9.40
	เพิ่มความเร็ว	-	9.08

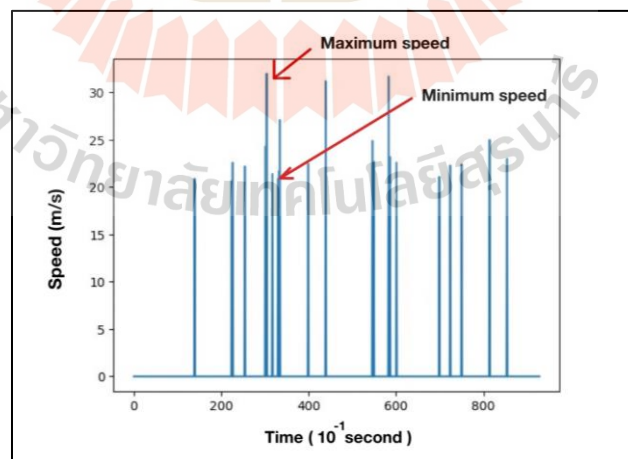
ผลการทดลองที่ระยะ 240 เซนติเมตรเมื่อวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์อยู่นิ่ง



รูปที่ 4.38 การสะท้อนของสัญญาณเมื่อวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์อยู่นิ่งที่ระยะ 240 เซนติเมตร

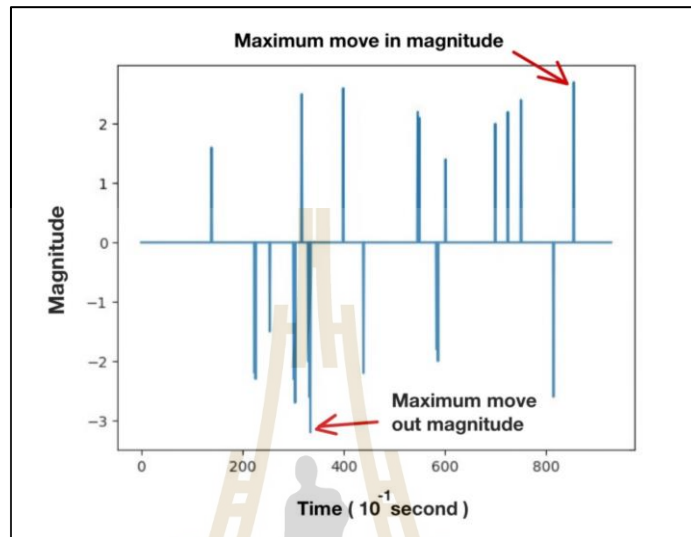
จากรูปที่ 4.38 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุอยู่นิ่งมีค่าเท่ากับ 9.52 เมตร มีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 9.7 เมตร และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 9.3 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 240 เซนติเมตรเมื่อวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์มีการแกว่งความเร็วปกติ



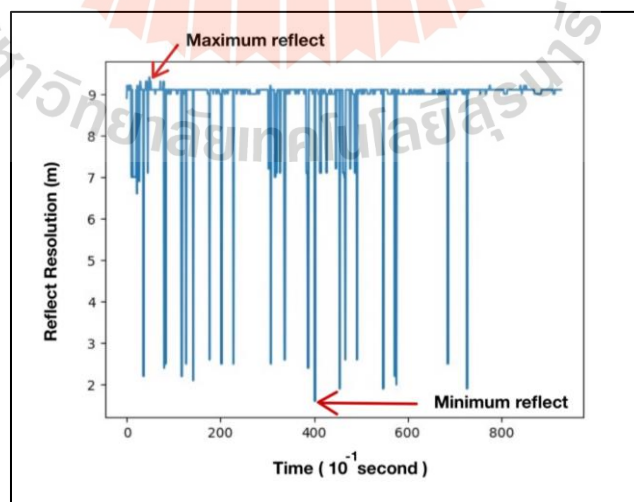
รูปที่ 4.39 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.39 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 24.14 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 32 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.7 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.40 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

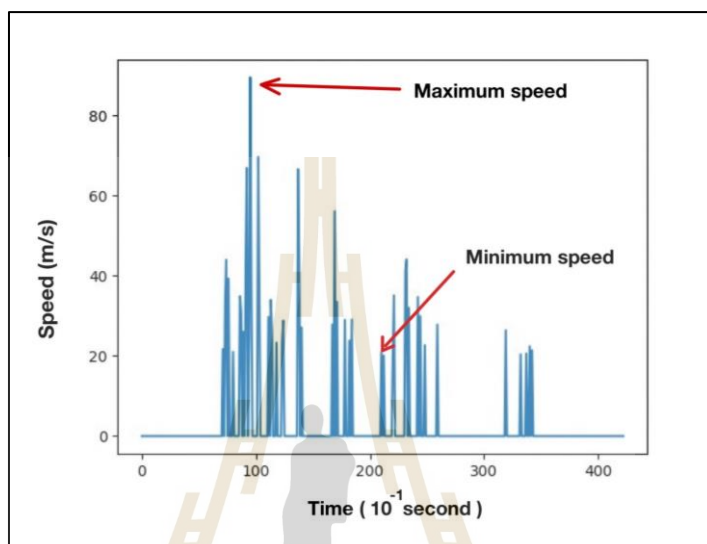
จากรูปที่ 4.40 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 2.7 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 2.6



รูปที่ 4.41 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

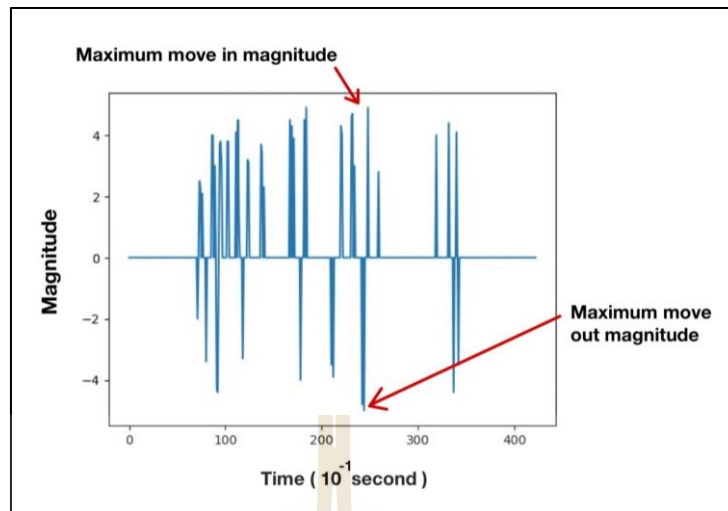
จากรูปที่ 4.41 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 8.80 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 9.4 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 1.9 เมตร

ผลการทดลองที่ระยะ 240 เซนติเมตรเมื่อวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์มีการเพิ่มความเร็วของวัตถุ



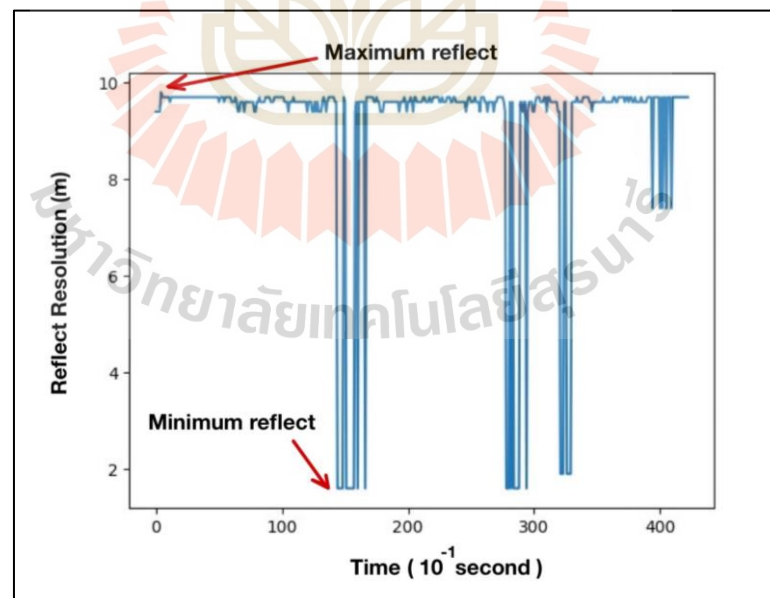
รูปที่ 4.42 ความเร็วในการเคลื่อนที่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วการแกว่งวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.42 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความเร็วของวัตถุจำลองเมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 34.04 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 89.5 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วต่ำสุดที่ 20.1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.43 ทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วกว้างวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.43 เมื่อนำมาวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจำลองมีการเคลื่อนที่ที่มีการเข้าหาเรดาร์สูงสุดที่ 4.9 และมีการเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ 5.0



รูปที่ 4.44 การสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการเพิ่มความเร็วกว้างวัตถุที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.4 เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยการสะท้อนของวัตถุจำลอง เมื่อวัตถุจำลองมีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าเท่ากับ 9.01 เมตร โดยมีค่าการสะท้อนสูงสุดที่ 9.8 เมตร และมีค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ 1.6 เมตร

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองเมื่อหุ้มวัตถุด้วยอะลูมิเนียมพอยล์ที่ระยะ 240 เซนติเมตร

ระยะที่ใช้ในการทดสอบ (เซนติเมตร)		ความเร็วการตรวจจับโดย เฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)	ค่าการสะท้อนกลับ (เมตร)
240	นิ่ง	-	9.52
	ปกติ	24.14	8.80
	เพิ่มความเร็ว	34.04	9.01

4.3 การอภิปรายผล

เนื่องจากแบบจำลองค้ำคาวที่สร้างจากวัสดุ ABS ที่เพิ่มด้วยกระดาษมีค่าไดอิเล็กทริกที่ใกล้เคียงกันและสามารถนำมาใช้แทนค้ำคาวตัวจริงเพื่อทดสอบความสามารถของการตรวจจับเรดาร์แบบมอดูเลตต่อเนื่องที่มีความถี่ 24 GHz ที่มีการตั้งค่าภายในตัวโมดูล เมื่อนำแบบจำลองค้ำคาวที่มีขนาดลำตัวยาว 20 เซนติเมตร และสูง 8.5 เซนติเมตร เคลื่อนไหวผ่านเรดาร์และตรวจจับตามระยะต่างๆโดยใช้เรดาร์ OPS243-C ที่มีระยะ 30, 60, 90, 120 และ 150 เซนติเมตร พบว่าเรดาร์มีความสามารถตรวจจับและแสดงผลได้สูงสุดในระยะที่ 120 เซนติเมตร ในขณะที่ความสูงของโมดูลเรดาร์วัดจากพื้นเท่ากับ 120 เซนติเมตร และเมื่อนำวัตถุจำลองหุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์เพื่อดูความสามารถของระยะในการตรวจจับที่เพิ่มขึ้น พบว่าเรดาร์สามารถแสดงผลการตรวจจับความเร็ว ทิศ และการสะท้อนกลับของวัตถุจำลองที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์แต่ค่าในการสะท้อนกลับเมื่อมีการเคลื่อนไหวที่มีค่าไม่คงที่โดยความสามารถตรวจจับมีระยะที่สูงที่สุดคือ 240 เซนติเมตร ซึ่งมีระยะทางเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับระยะทางที่สามารถตรวจจับได้สูงที่สุดของวัสดุเมื่อไม่ได้หุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการตรวจจับค้ำคาวโดยใช้เทคนิคทางเรดาร์ FMCW ที่ความถี่ 24 GHz โดยการออกแบบระบบเรดาร์โดยใช้คำสั่ง API เพื่อการปรับค่าพารามิเตอร์ในระบบ การปรับปรุงตัวโมดูลภายนอกโดยการวัดสนามไกลของโมดูลเรดาร์ OPS243-C เพื่อหาช่วงของการตรวจจับที่มีความกว้างของลำแสงแคบที่ 20° (-3 dB) ในระดับแนวราบ และ 24° (-3 dB) ในระดับแนวตั้ง จากนั้นเพิ่มความสามารถของเรดาร์โดยใช้ Arduino เชื่อมต่อและสั่งการไปยังเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อให้เรดาร์มีระยะการตรวจจับที่กว้างขวางขึ้น 360 องศา รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุจำลองจากวัสดุ ABS ที่เพิ่มด้วยกระดาษ ที่สามารถนำมาใช้ในการทดลองที่มีความสามารถเทียบเท่ากับวัสดุต้นแบบโดยใช้ความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าของวัสดุเพื่อใช้ในการออกแบบสร้างแบบจำลองเมื่อค่าไดอิเล็กทริกของค้ำคาวจำลองนั้นมีค่าอยู่ในช่วงความถี่ที่ 500 MHz – 5 GHz และมีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 3.65-3.51 ดังนั้นเมื่อมีค่าไดอิเล็กทริกที่เท่าหรือใกล้เคียงกับค้ำคาวตัวจริง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงความถี่ที่ 500 MHz – 5 GHz และมีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ที่ 3.66-3.53 ทำให้สามารถนำค้ำคาวจำลองมาใช้ในการวิจัยได้เนื่องจากวัสดุเหล่านั้นสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ในปริมาณที่เทียบเท่ากัน จากการทดสอบความสามารถของการตรวจจับระบบเรดาร์ของโมดูล OPS243-C พบว่าความสามารถในการตรวจจับมีระยะสูงที่สุดคือ 1.2 เมตร โดยแบ่งระยะทดสอบเพิ่มขึ้นทุก ๆ 30 เซนติเมตร โดยได้ใช้ค้ำคาวจำลองที่มีขนาดความยาวตัว 20 เซนติเมตร และมีความสูงขนาด 8.5 เซนติเมตร จากผลการทดลองทำให้ได้ข้อมูลของการสะท้อนกลับของค้ำคาวที่มีผลต่อเรดาร์ OPS243-C อยู่ในช่วงระหว่าง 8.78-9.49 เมตร และมีค่าเฉลี่ยความเร็วในการเคลื่อนที่ของค้ำคาวจำลองที่มีการเคลื่อนไหวแบบปกติมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 27.14-30.77 เมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยความเร็วในการเคลื่อนที่ของค้ำคาวจำลองที่มีการเคลื่อนไหวที่เพิ่มความเร็วมียค่าอยู่ที่ระหว่าง 31.25-53.73 เมตรต่อวินาที การออกแบบสร้างระบบเรดาร์ที่ใช้การตรวจจับคลื่นที่มีความถี่ในช่วงจิกะเฮิรตซ์ซึ่งใช้ในการโทรคมนาคมทางไกลเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อนโลหะได้ดีโดยเฉพาะสัญญาณเรดาร์ โดยทั่วไประบบเรดาร์ 24 GHz ได้รับการออกแบบมาสำหรับการใช้งานระยะสั้นถึงระยะกลาง เมื่อนำวัสดุจำลองหุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์เพื่อดูความสามารถที่เพิ่มขึ้นของระยะในการตรวจจับของเรดาร์ พบว่าเรดาร์สามารถใช้ในการตรวจจับวัสดุจำลองที่ห่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์ เนื่องจากอะลูมิเนียมพอยล์มีความสามารถในการสะท้อนแสงและมีค่าสัญญาณไฟฟ้าสูง การใช้เรดาร์ในกรณีนี้

ช่วยให้สามารถตรวจจับและระบุวัตถุที่ซ่อนอยู่ได้ในระยะที่ไกลมากขึ้น โดยระยะที่สามารถตรวจจับได้สูงสุดคือ 240 เซนติเมตร ซึ่งมีความสามารถในการตรวจจับที่สูงที่สุดของวัสดุเมื่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมพอยล์ อีกทั้งช่วงที่มีประสิทธิภาพของเรดาร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ รวมถึงกำลังส่งของตัวโมดูลเรดาร์ การออกแบบเสาอากาศ และลักษณะของเป้าหมาย แต่อย่างไรก็ตามความเร็วและทิศทางในการตรวจจับของค้ำคาวตัวจริงสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะเมื่อต้องการหลบหนีหรือตามหาอาหารในระยะทางที่ไกล รวมถึงสามารถเปลี่ยนทิศทางอย่างรวดเร็วได้ด้วยความปลอดภัยของตัวค้ำคาว และความเร็วของค้ำคาวอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาพสิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่ในขณะนั้น

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

สำหรับปัญหาที่พบในการดำเนินการวิจัยคือระยะการตรวจจับที่สั้นเนื่องจากรูปแบบของโมดูลเรดาร์ OPS243-C ที่มีขนาดกระทัดรัดจึงทำให้กำลังส่งมีขนาดเหมาะสมกับรูปแบบของโมดูลทำให้กำลังส่งที่ใช้ตรวจจับจึงมีค่า -15 dBm ซึ่งมีไม่เพียงพอต่อการส่งสัญญาณตรวจจับ ทำให้ระยะที่ได้จากการตรวจจับนั้นมีระยะที่สั้น อีกทั้งจากการทดลองหาความสามารถในการตรวจจับค้ำคาวของระบบเรดาร์ที่ความถี่ 24 GHz นั้น ความสามารถของระยะการตรวจจับจะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุด้วยเช่นกัน เมื่อวัตถุมีขนาดเล็กทำให้ระยะของกำลังส่งเรดาร์นั้นสั้นลง เพื่อที่จะให้ระยะการตรวจจับนั้นกว้างขวางจึงต้องเพิ่มกำลังส่งของเรดาร์เพื่อให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับสูงขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

ในงานวิจัยนี้สามารถปรับเปลี่ยนการเก็บข้อมูลของระบบเรดาร์ให้อยู่ในรูปแบบของการทำงานแบบไร้สายโดยใช้การสื่อสารแบบไวไฟหรือบลูทูธ เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลของการตรวจจับผ่านอินเทอร์เน็ตและเก็บข้อมูลไว้ในรูปแบบคลาวด์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลไปประมวลผลได้อย่างสะดวก อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการตรวจจับวัตถุที่หลากหลายมาเพื่อพัฒนาการออกแบบที่สามารถจำแนกชนิดของวัตถุเพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุอื่นๆ โดยนำกราฟการทดลองการตรวจจับวัตถุหลายๆกราฟมาวิเคราะห์โดยใช้แมชชีนเลิร์นนิงเข้ามาเพื่อช่วยในการจำแนก และคัดแยกข้อมูลเพื่อให้เรดาร์สามารถบ่งบอกได้ว่าวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ผ่านเป็นวัตถุชนิดไหน เพื่อขยายข้อจำกัดของเรดาร์แบบมอดูเลตความถี่ต่อเนื่องให้สามารถตรวจจับวัตถุได้หลายขนาดและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- ชรัตน์ มงคลสวัสดิ์ (2540) การสำรวจระยะไกล (Remote sensing). หจก.ขอนแก่นการพิมพ์
ขอนแก่น 113 หน้า.
- สัญญาณี ศรีคชา (2555) แมลงวันผลไม้ที่สำคัญในประเทศไทย กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพมหานคร
43 หน้า.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ (2565) สรุปผลการสำรวจ ภาวะการดำเนินงานของประชากร เดือนกุมภาพันธ์
2565 ISSN 1685-7437 กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม กรุงเทพมหานคร 24 หน้า.
- แสงมณี เกิดพงษ์ แก้วกาญจน์ ราชการกลาง เสกสรร หอมแพงไว้ (2550) คู่มือการเรียนรู้รายวิชา
แมลงศัตรูพืชเศรษฐกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 93 หน้า.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร (2566) สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศปี 2565 สำนักงาน
เศรษฐกิจการเกษตร กรุงเทพมหานคร 161 หน้า.
- Charlotte, W., Phillip, S., Don, R., and Andy, R., "Investigating vertical motion of small
insects in atmospheric boundary layer using millimetre-wavelength radar and
Doppler LIDAR." J.Eng., vol.2019, Iss. 20, pp.6906-6909, 2019.
- Dielectrics (physics), Britannica. 2009. p. 1. Retrieved 2009-08-12.
- Gunasekaran, S. and Charles, J. (2008). "Dielectric Studies on Some Industrially
Important Rubber and Polymeric Materials at Microwave Frequencies."
Material Science Research India 5(1): 161-166 DOI:10.13005/msri/050124.
European Space Agency, Satellite Frequency Bands, 2022.
- Handley, C. O., Gardner, A. L., Wilson, D. E. Movement (1991) [In: Demography and
nature history of the common fruit bat, *Artibeus jamaicensis*, on Barrn
Colorado Island, Panama. C. O. Handley Jr, D. E. 5.Wilson and A. L. Gandner,
eds]. Smithsonian Institution Press. Washington, D. C.
- Hegazy, A. and Mossad, M., "FMCW Software Defined Radar for Range and Speed
Estimation," IUGRC., vol. 1, pp. 29-29, 2016.
- Jason, C., Drake, V. and Reynolds, D. (2020), "Recent Insights from Radar Studies of
Insect Flight." Annu. Rev. Entomol, (56): 337-356, 2011.

- Ju, Y., Jin, Y. and Lee J.(2014). "Design and Implementation of a 24 GHz FMCW Radar System for Automotive Applications," 2014 International Radar Conference, pp. 1-4, 2014.
- Longhi, M. and Marrocco, G. (2017). Flying Sensors: Merging Nano-UAV with Radio Frequency Identification, Proc. 2017 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA), 2017.
- Mériem, A., Achour, S., and Chafik, G. (2010) Diagnostics and Experiments on Dielectric Properties Using Time Domain Reflectometry (TDR). The International Conference on Solid Dielectrics, July 4-9, 2010. Potsdam, Germany.
- Noskov, A., Bendix, J., and Friess, N., (2021) "A Review of Insect Monitoring Approaches with Special Reference to Radar Techniques." Sensors, 21, 1474.
- OmniPreSense, OPS243 Datasheet, United States, 2022.
- Park, S. and Kim, Y., (2011) "Design of A Low Resolution FMCW Radar For Small Target Detection Under Ground Clutter," The 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp. 1-1, 2011, 26-30 September 2011, Seoul, South Korea.
- Radartutorial.eu, Radar Basics, Christian Wolff, 1997.
- Yilmaz, T. and Alkan, F. A. (2020). "In Vivo Dielectric Properties of Healthy and Benign Rat Mammary Tissues from 500 MHz to 18 GHz." Sensors. 20(8), 2214. <https://doi.org/10.3390/s20082214>.
- Zulkifli, S. and Balleri, A., (2020). "FMCW Radar Prototype Development for Detection and Classification of Nano-Targets," 2020 IEEE International Radar Conf. (RADAR), pp. 738-743, 2020.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Mananchaya Thawonsawat, Chanchai Thongsopa, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat “Detecting Targets by 24GHz FMCW Radar Technique” **The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023**, 23-24 February 2023.



Detecting Targets by 24GHz FMCW Radar Technique

*Mananchaya Thawonsawat ⁽¹⁾, Chanchai Thongsopa ⁽¹⁾, Samran Santalunai ⁽¹⁾,
Thanaset Thosdeekoraphat ⁽¹⁾

⁽¹⁾ School of Electronics Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology

*Corresponding author: mananchaya.tha@gmail.com

Abstract: Radar technique has an important role in industrial and agricultural sectors. However, in the past, radar technique was used to detect target, which was approximately 5 cm or greater. Detecting small targets by radar is very useful for agricultural industry. This research aims to apply radar techniques and equipment to enhance detection capabilities. The OPS243 module is conveniently used to adjust internal parameters to perform experiments and analyze the data by Python program. The target sizes in this study were 5, 4, 3, 2, 1, and 0.5 cm. The study revealed that target of a sizes indicated above might be detected by a radar fitted with an OPS243 module. However, it was unable to detect 0.5 cm target. In conclusion, the radar system can be applied to detect target with sizes of 1 cm or more.

Keywords: FMCW radar, radar, 24 GHz.

1. Introduction

FMCW radar systems are commonly used for military and automotive applications. Small targets are, therefore, one of the challenges of radar technology. This system is now becoming accepted and is still an important topic that receives more and more attention nowadays.

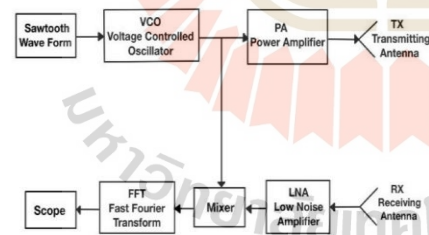


Fig. 1. FMCW Radar Block Diagram

Fig 1 shows FMCW Radar Block Diagram. A Chirp Signal, often referred to as FMCW Radar Signal, is created by modulating a continuous wave signal with a linear periodic signal. This enhances the capability of determining the detected target's range and speed. By sending a linear periodic waveform to a Voltage Controlled Oscillator (VCO), amplifying the chirp signal it produces, and transmitting it with a suitably directional antenna, it is possible to create an FMCW radar system. The echo signal is received and amplified by Low Noise Amplifier (LNA) and mixed with the

original signal to get a signal which obtains Beat frequency. For the last convert, the resultant signal to frequency domain (Fast Fourier Transform) FFT to obtain range data [1]. According to survey results in the past years, FMCW Radar has been receiving more and more attention continuously. Based on data from Google Scholar, recent radar research has found that compact radar devices are accessible.

Table 1. Number of publications on FMCW radar according to Google Scholar.

Years (2015-2021)	Amount
2015-2016	3,330
2016-2017	3,890
2017-2018	4,360
2018-2019	5,220
2019-2020	5,810
2020-2021	6,730

Google Scholar also points out the ability to detect small targets with a size of less than 5 cm [2]. Such as detecting nano drones or pests. Frequency-modulated continuous wave radar (FMCW radar) is deployed to solve such problems because radar can detect at close range. It is also one of the essential elements of technology since it is no longer affected by harsh environments. This radar is also very flexible, with no blind range and high resolution. Although many publications on FMCW radar have been carried out as shown in Table 1. The FMCW Radar has seldom been used to detect very small targets. From literature review, the smallest target captured by FMCW radar was 5 cm nano drone [3]. Speed of nano drone can be 0.05m/s (slow), 0.13m/s (medium), 0.5m/s (fast) [4]. Detection of small targets are extremely useful for application to detect insects in farms which is very important in agricultural industry. The objective of this research is to conduct experiment and analyze detection capability of FMCW radar.

2. Technique

2.1 FMCW radar

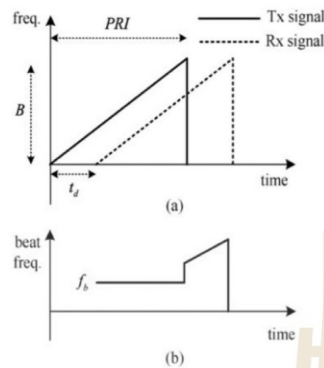


Fig. 2. (a) the transmitted signal and the received signal (b) beat signal [5].

The FMCW radar is a continuous frequency-modulated microwave transmission. Figure 2 shows the transmitted signal frequency with sawtooth modulation. The received signal is reflected from the target. The two signals are combined in the frequency domain. This signal is called a pulsation signal, as shown in Figure 2(a) where t_d is the delay time between the transmitted and received signals. A standard method for FMCW radar is a spectral analysis of the beat signal, i.e., the beat frequency can obtain via FFT (Fast Fourier Transform) processing as follows.

$$R = (C \cdot PRI \cdot f_b) / (2 \cdot B) \quad (1)$$

Where

R = The range of the target

C = Speed of light

B = Modulation bandwidth

f_b = Beat frequency

PRI = Pulse repetition interval, which is the chirp period

The range step ΔR is computed as follows.

$$\begin{aligned} \Delta R &= (C \cdot PRI \cdot f_b) / (2 \cdot B) \\ &= (C \cdot PRI) (f_s / N_{fft}) / (2 \cdot B) \end{aligned} \quad (2)$$

N_{fft} = The FFT point

f_s = ADC (analog-to-digital converter) sampling rate

Maximum PRI is determined by

$$PRI = 1 / (2 \cdot f_{maxD}) \quad (3)$$

$$N = C(2 \cdot f_c \cdot PRI \cdot \Delta v) \quad (4)$$

N = The number of ramps

f_c = Rising beat frequency

Δv = Velocity resolution

f_{maxD} = Maximum doppler frequency to be detected

2.2 Radar equation

The power received by the radar is computed using the following equation.

$$P_R = P_T (\sigma^0 A) \left[\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^4} \right] \quad (5)$$

P_R = Total power received

P_T = Power transmitted (Power transmitted)

σ^0 = Radar dispersion per unit area or the scatter coefficient (Radar scatter coefficient)

A = Cross-sectional area (RADAR cross section)

G = Antenna gain

R = Distance in range (Range)

λ = Wavelength

2.3 24 GHz

Each frequency range of electromagnetic waves shown in Table 2 is well known and used for many benefits. The wave with a frequency of Giga Hertz is a type of microwave wave with a frequency in the range of 10^8 - 10^{12} Hz or a wavelength of 1 mm - 10 cm [6]. It is used for long-distance telecommunication, especially used as a radar signal, since microwaves can reflect metal well.

2.4 Far field method

Antenna radiation pattern measurement of the relative magnitude and phase of an electromagnetic signal received were used to create a pattern measuring antenna. The far field was calculated for the design using the followed equation.

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6)$$

λ = Wavelength

D = The largest size of the antenna

R = The distance from the antenna to the remote field area

3. Analysis

3.1 Antenna Pattern

Based on Far Field Theory, the detection range of the OPS243 depends on the object to be detected and the RCS (cross-sectional radar) [7]. As the object moves more to the right or left of the module center, it will reduce the detection range.

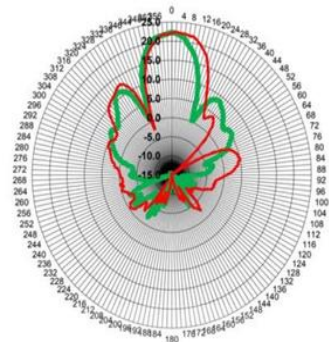


Fig. 3. Module FMCW 24 GHz Antenna Pattern [8].

The OPS243 is a simple, short-range radar sensor that provides motion detection, speed, direction, and range information [9]. The onboard ARM processor handles all radar signal processing. The basic principle of the sensor utilizes the Doppler frequency shift to detect speed and direction and FMCW time of flight (TOF) to detect range. The detection range of the OPS243 covers a narrow 20° azimuth (horizontal) and 24° altitude (vertical) beam width (measured at -3dB point). The detection range is 10-20 m (82 ft) for a person and 50-100 m (328 ft) for large metal objects such as vehicles [8].

3.2 Experiment

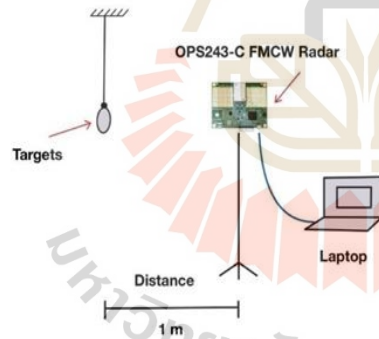


Fig. 4. Experiment setup

Before starting an experiment, radar module parameters were set up using API commands to suit the experimental needs. To simulate insects, this study used ellipse-shaped aluminum foil as detection target. Five sizes of aluminum foil were 5, 4, 3, 2, 1, and 0.5 cm., respectively. The example of target is shown in Figure 5.

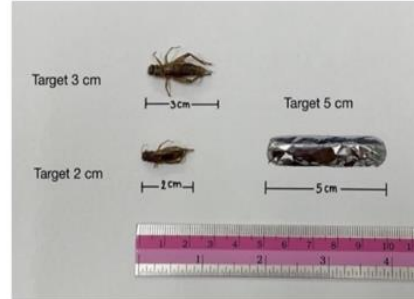


Fig. 5. Example of target.

To simulate movement of target, each aluminum foil was swung in front of the radar until stopped. The experiment of each target size was run one at a time. The distance from the target to the radar was 1 m. for the target sizes of 5,4,3, and 2 cm., whereas that for the target sizes of 1 and 0.5 cm. was 0.6 m. Then, Tera Term program was used to collect the experimental results. All data were then analyzed by Python program to determine the ability of detecting the smallest targets that the 24 GHz FMCW radar could detect. This research used 24 GHz frequency in K Band [10]. This study focused on detecting movement of object only, whereas speed testing was irrelevant.

3.2 API Method

The FMCW OPS243-C radar module can conveniently detect the movement, speed, direction, and range of objects in the field of vision. Moreover, it can adjust various parameters to suit the application. [8]. Therefore, this module can reduce development costs and time. The radar board was set up through the Tera Term program using the API command to adjust the settings when available.

4. Result and discussion

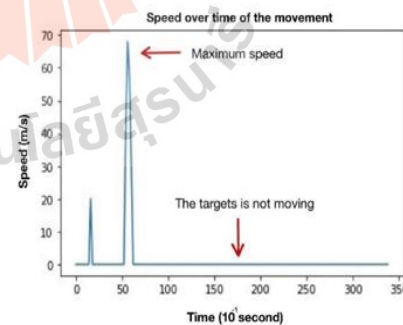


Fig. 6. Result of 5 cm target detection

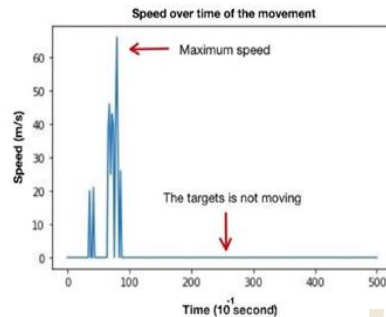


Fig. 7. Result of 4 cm target detection

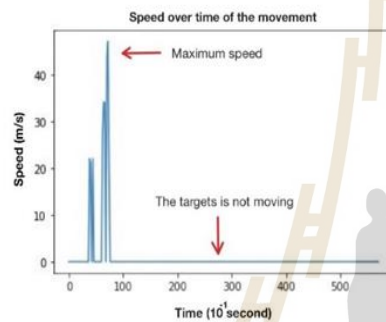


Fig. 8. Result of 3 cm target detection

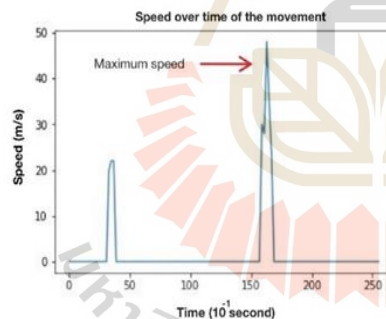


Fig. 9. Result of 2 cm target detection

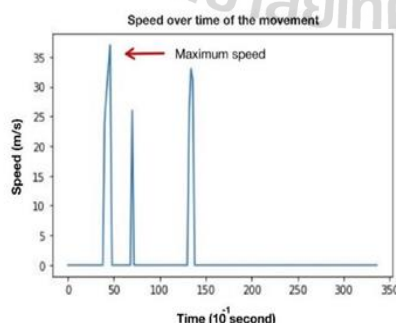


Fig. 10. Result of 1 cm target detection

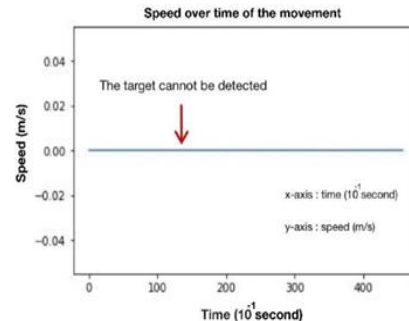


Fig. 11. Result of 0.5 cm target detection

Figure 6-11. shows results of the experiment. The analyzed data are displayed in the form of graphs which show the speed over time of the movement of various objects. Obviously, the radar was unable to detect 0.5 cm target since the graph shows horizontal line. The horizontal line means that there is no movement data received. However, the radar detected movement of rest target sizes.

For 5 cm target movement, the maximum speed was approximately 69 m/s which occurred at the fifth second. After that, the target stopped moving. For 4 cm target movement, the maximum speed occurred at the ninth second. Then, the target stopped moving. For 3 cm, 2 cm, and 1 cm, movement of target was detected. However, movement of 0.5 cm target was undetected. Therefore, based on above results, using radar with module OPS243 equipped with API command can detect target sizes of 2-5 cm at the distance of 1 m. and also target size of 1 cm at the distance of 0.6 m.

5. Conclusions

From the experiment, the conclusions drawn are as follows.

1. The radar with module OPS243 equipped with API command used in the experiment helps detecting small target well.
2. The FMCW radar can detect small target with a size of 1-5 cm, but it is unable to detect target with a size of 0.5 cm.

Acknowledgment

This research was funded by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and National Science Research and Innovation Fund (NSRF) (NRIIS no. 160360). Special thanks is given to Suranaree University of Technology for OROG scholarship.

References

- [1] A. Hegazy and M. Mossad, "FMCW Software Defined Radar for Range and Speed Estimation," *IUGRC.*, vol. 1, pp. 29-29, 2016.
- [2] A. Noskov, J. Bendix, and N. Friess, "A Review of Insect Monitoring Approaches with Special Reference to Radar Techniques." *Sensors*, 21, 1474 2021.

The 17th South East Asian Technical University Consortium: SEATUC 2023
23 – 24 February 2023 Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

- [3] S. Zulkifli and A. Balleri, "FMCW Radar Prototype Development for Detection and Classification of Nano-Targets," *2020 IEEE International Radar Conf. (RADAR)*, pp. 738-743, 2020.
- [4] M. Longhi, and G. Marrocco, Flying sensors: Merging Nano-UAV with radio frequency identification, *Proc. 2017 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA)*, 2017.
- [5] Y. Ju, Y. Jin, and J. Lee, "Design and Implementation of a 24 GHz FMCW Radar System for Automotive Applications," *2014 International Radar Conference*, pp. 1-4, 2014.
- [6] European Space Agency, *Satellite Frequency Bands*, 2022.
- [7] S. Park and Y. Kim, "Design of a low resolution FMCW radar for small target detection under ground clutter," *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, pp. 1-1, 2011.
- [8] OmniPreSense, *OPS243 Datasheet*, United States, 2022.
- [9] C. Jason, V. Drake and D. Reynolds, "Recent Insights from Radar Studies of Insect Flight." *Annu. Rev. Entomol*, pp.56:337-56, 2011.
- [10] W. Charlotte, S. Phillip, R. Don, and R. Andy, "Investigating vertical motion of small insects in atmospheric boundary layer using millimetre-wavelength radar and Doppler LIDAR." *J.Eng.*, vol.2019, Iss. 20, pp.6906-6909, 2019.



Samran Santalunai

received the B.E. (2007), M.E. (2009), and D.E. (2014) degrees in Telecommunications Engineering from Suranaree University of Technology. At present lecturer, School of Electronics Engineering, Suranaree University of Technology. His research interests include heating applications, heavy metals wireless power transfer, RF and microwave circuit design.



Thanaset Thosdeekoraphat

received the B.E. (2006), M.E. (2009), and D.E. (2013) degrees in Telecommunications Engineering from Suranaree University of Technology. At present Lecturer, School of Telecommunications Engineering, Suranaree University of Technology. Research interests include hyperthermia inductive heating, magnetic shielding system, RF and microwave circuit design, microwave heating, antenna, active antenna, and UWB transmitter-receiver design and analysis of impulse signal for UWB communication system.

Authors Information



Mananchaya Thawonsawat

received the B.E. (2020) degree in Electrical Engineering from Kasetsart University. Currently, she studies for M.E. in Electrical Engineering at Suranaree University of Technology. Her current research is detecting targets by 24GHz. FMCW radar technique.



Chanchai Thongsopa

received B.E. (1991) degree in Electronics Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, M.E. (1996) degree in Electrical and Communications Engineering from Kasetsart University, and D.E. (2002) degree in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Experiences & expert are RF circuit design, active antenna, microwave heating application.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวมนัญญา ถาวรสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2541 อำเภอเมือง นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้านครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2564 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร บัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

