การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

Research and Development of Radar Drone Detection system for Unauthorized Drone

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยทำการออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนแบบคลื่นต่อเนื่องที่มีการมอดูเลตทางความถี่ (Frequency modulated continuous wave: FMCW) ที่ความถี่ 10 GHz ย่าน X-band โดยออกแบบระบบประมวณผล ระบบแสดงผล ระบบสายอากาศ และระบบหมุนค้นหาเป้าหมาย ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่สร้างขึ้น พบว่าระบบเรดาร์สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้ในระยะสูงสุดประมาณ 152 เมตร ที่กำลังส่งไม่เกิน 10 W โดยที่สายอากาศที่ทำการศึกษาประกอบด้วย สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และ สายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) ซึ่งจะให้ระยะตรวจจับที่ต่างกัน เนื่องจากอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการทดสอบพบว่า สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) ค้นหาตรวจจับโดรนได้ช้ากว่าสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) เนื่องจากสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง แคบกว่าสายอากาศ แบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna)

Abstract

This research project presents the research and development of a radar drone detection system for Unauthorized Drone. The frequency modulated continuous wave (FMCW) drone detection radar system at 10 GHz in the X-band is employed. The proposed system consists signal processing unit, display unit, antenna system unit, and radar turntable unit in order to find the targets. It is found that the proposed radar system is able to detect the drone at a maximum distance of 152 meters at a power of less than 10 W. The antenna system consists of a parabolic reflector antenna and array horn antenna, which provides different detection distances because the antenna gains are different. However, it was found that the detection speed of a parabolic reflector antenna is slower than the array horn antenna due to the half-power beamwidth of the parabolic reflector antenna being narrow than the array horn antenna.

คำสำคัญ (Keywords) เรดาร์คลื่นต่อเนื่อง; ตรวจจับโดรน; แถบความถี่เอ็กซ์; ความมั่นคง;

1.บทนำ

โดรน (Drone) หรือ อากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle หรือ UAV) เป็นอากาศยานที่สามารถควบคุมการบินจากทางไกลโดยใช้การควบคุมผ่านสัญญาณวิทยุจากผู้ควบคุมภาคพื้นดิน ดังนั้นคนทั่วไปก็สามารถหาซื้อมาใช้เป็นของตนเองได้ง่าย ปัจจุบันจึงมีการใช้งานโดรนกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใคร ๆ ก็สามารถเป็นเจ้าของโดรนได้ ทำให้ในหลาย ๆ ครั้งเกิดเหตุการณ์ที่อาจเป็นอันตรายด้านความปลอดภัยของสถานที่สำคัญได้ ดังเช่นข่าวที่สำนักข่าว BBC รายงานว่า สนามบินแกตวิกของอังกฤษจำเป็นต้องปิดทำการเป็นเวลาถึง 2 วัน เนื่องจากพบโดรนลำหนึ่งบินอยู่เหนือสนามบิน ซึ่งตำรวจสามารถควบคุมตัวผู้ต้องสงสัย 2 คนที่คาดว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับการบินโดรนใกล้กับรันเวย์ได้แล้ว และกำลังดำเนินการสอบสวนบุคคลทั้งสองด้วยข้อหาการใช้โดรนก่ออาชญากรรม จากเหตุการณ์นี้ส่งผลกระทบต่อเที่ยวบินทั้งหมด 757 เที่ยวบินและผู้โดยสารอีกกว่า 1.2 แสนคนต้องออกเดินทางล่าช้าและยกเลิกในบางเที่ยวบิน ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีระบบหรือกระบวนการในการตรวจจับโดรนที่บินในบริเวณที่ไม่ได้รับอนุญาต

ระบบตรวจจับโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยการใช้เรดาร์ มีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีตรวจจับอื่น ๆ คือ สามารถตรวจจับโดรนและวัตถุแปลกปลอม รวมถึงสามารถระบุตำแหน่งของเป้าหมายได้ ได้ตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน รวมถึงในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดีด้วย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเดียวกับการตรวจจับเครื่องบินทางการทหาร (แต่ย่านความถี่ต่างกันเพื่อการตรวจจับขนาดของวัตถุต่างกัน)

ระบบเรดาร์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน ซึ่งเรียกระบบดังกล่าวว่า continuous wave radar เป็นระบบเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณหรือคลื่นแบบต่อเนื่อง เรียกว่าเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง [1-3] โดยระบบจะใช้ doppler effect เพื่อตรวจจับเป้าหมายที่ไม่อยู่นิ่ง frequency modulated continuous wave radar นั้นเป็นเรดาร์คลื่นความถี่ต่อเนื่องถ้า CW doppler radar ถูกปรับความถี่ไปตามเวลาแล้ว หรือเรียกได้ว่ามีการผสมสัญญาณ (modulated) แล้ว เรดาร์นั้นจะถูกเรียกว่า radar modulated continuous wave (FMCW) หรือ FMCW doppler radar เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว สายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมายและยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้

งานวิจัยนี้จะพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนและสิ่งแปลกปลอมบริเวณฐานปฏิบัติการในพื้นที่เสี่ยงภัยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในบริเวณโดยรอบของฐานปฏิบัติการ เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้งานโดรนกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งทำให้มีความเสี่ยงสูง อาจจะเกิดการใช้โดรนในการสอดแนมหรือโจมตีฐานปฏิบัติการ นำมาซึ่งความสูญเสียทั้งทรัพย์สินและอาจอันตรายถึงชีวิตต่อเจ้าหน้าทีและผู้เกี่ยวข้องได้ การวิจัยและพัฒนาเรดาร์ตรวจจับโดรน

จึงเป็นที่จำเป็นในการรักษาความมั่นคงของฐานปฏิบัติการในพื้นที่เสี่ยงภัยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยที่งานวิจัยจะสามารถแบ่งส่วนประกอบต่างๆ ที่จำเป็นต้องพัฒนาของระบบเรดาร์เป็น 3 ส่วนหลัก ๆดังแสดงด้านล่างคือ

1) **สายอากาศ** การออกแบบสายอากาศต้องออกแบบสายอากาศเป็นสายอากาศที่อัตราขยายสูง และมีลำคลื่นทางเดียว และทำงานในย่านความถี่กว้างครอบคลุมย่าน X-band ของระบบเรดาร์
2) **เครื่องรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** โดยเครื่องรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำหน้าที่กำหนดและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติแบบ FMCW กล่าวคือมีการมอดูเลตทางความถี่ที่ความถี่ย่าน X-band ความถี่มีการเปลี่ยนตามหลักการของ FMCW ตามที่ได้กล่าวข้างต้น และจะทำหน้าที่รับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวด้วย เมื่อสัญญาณที่ส่งไปสะท้อนกับเป้าหมายกลับมายังสถานีของเรดาร์
3) **ระบบประมวลผลเรดาร์** โดยระบบประมวลผลเรดาร์จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบเรดาร์ทั้งหมด รวมถึงควบคุมการการทำงานของเครื่องรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย และสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังสถานีเรดาร์จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและทำการประมวลผลสัญญาณ เช่น การกรองสัญญาณรบกวน การตรวจจับสิ่งแปลกปลอม การระบุเป้าหมายและระยะของสิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

2. วิธีการศึกษา

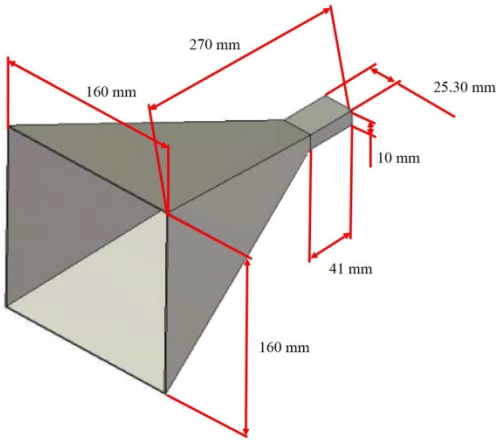
2.1 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศปากแตร (Horn antenna)

สายอากาศปากแตรแบบ (horn antenna) มีอัตราการขยายของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูง (high antenna gain) ถูกใช้ในสายอากาศของระบบเรดาร์ที่ใช้การค้นหาเป้าหมายแบบการหมุนรอบตัวทางกลไกล ซึ่งจะให้อัตราการขยายที่สูงและให้รูปแบบแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiation pattern) เป็นแบบ ทิศทางเดียว (unidirectional radiation pattern) ซึ่งการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำการหาขนาดของสายอากาศจากสมการ จากนั้นนำขนาดที่คำนวณได้ไปจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์และรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศและปรับหาค่าที่เหมาะสมต่อไป

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องต้องการอัตราขยายของสายอากาศที่สูงสำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก โดยในการออกแบบสายอากาศจะใช้โครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรที่มีขนาดดังรูปที่ 1 (ก) ในการส่งและรับสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศเป็นแผ่นทองแดงที่ตัดด้วยเลเซอร์ และเชื่อมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างสายอากาศแบบปากแตรดังรูปที่ 1 (ข) โดยการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศแบบปากแตรทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน เพื่อสร้างสายอากาศแบบอาร์เรย์

ทำการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยการส่งสัญญาณความถี่วิทยุที่ผ่านสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งพบว่าสายอากาศมีลำคลื่น (Beam) ที่มุม 13 องศา แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) $|S11| < -10dB$ โดยสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 8 ถึง 10 GHz ตรงตามย่านความถี่ X band

การแผ่รังสี (Radiation pattern) ของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งสายอากาศต้นแบบให้อัตราขยาย ที่ 20 dB และให้อัตราขยาย ที่ 23 dB ของการใช้งานสายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna)



(ก)

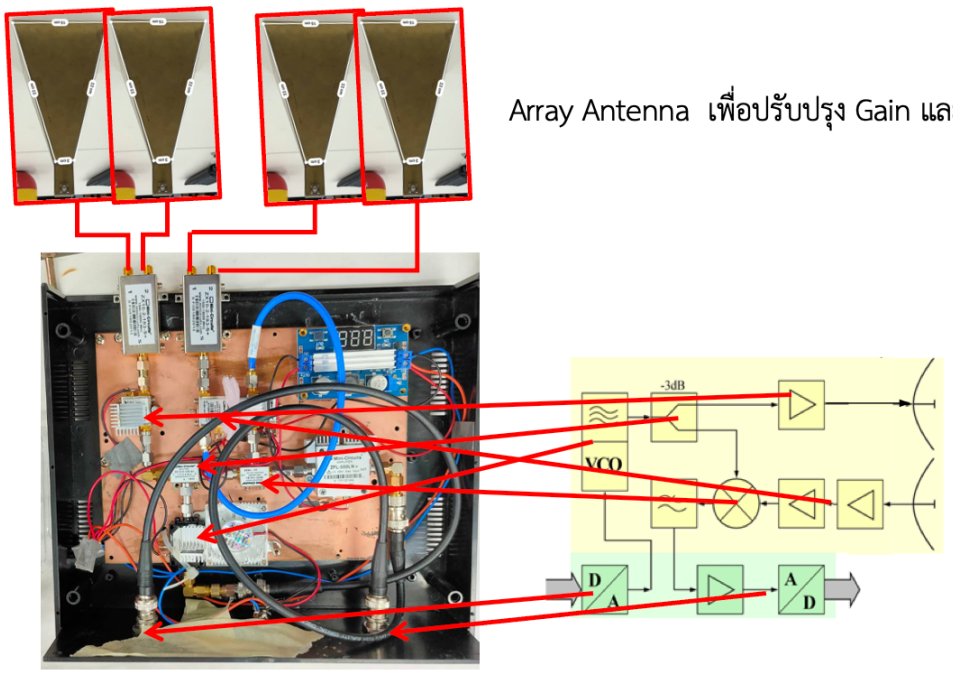
(ข)

รูปที่ 1 การออกแบบสายอากาศ (ก) ขนาดของสายอากาศ (ข) สายอากาศแบบปากแตร

2.2 การพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน

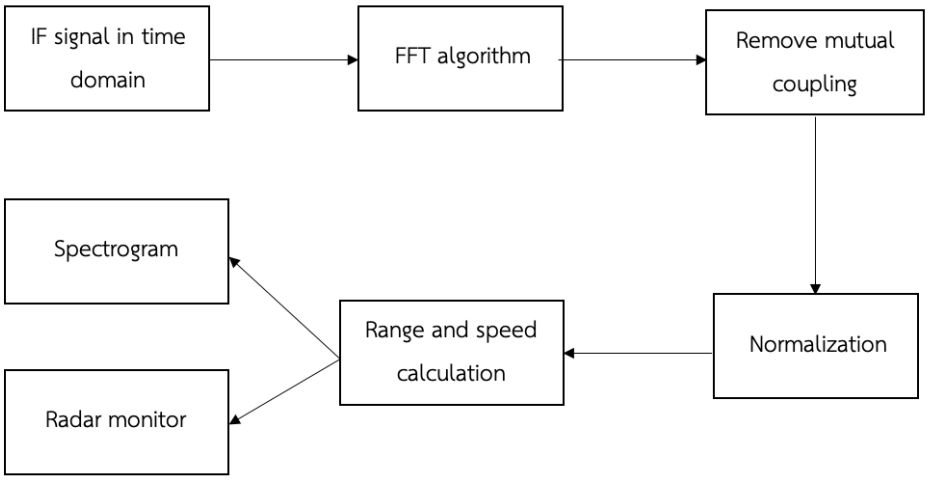
ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ คลื่นความถี่ของสัญญาณถูกปรับความถี่ ไปตามเวลาหรือเรียกได้ว่ามีการผสมสัญญาณ (modulated) เพื่อปรับความถี่ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมายและยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ ในรูปที่ 2 แสดงระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย

1. วงจรผสมสัญญาณ RF mixer
2. วงจรขยายสัญญาณการรบกวนต่ำ (low noise amplifier)
3. วงจรแบ่งกำลังงาน (power divider)
4. วงจรขยายสัญญาณความถี่กลาง (IF amplifier)
5. สายอากาศรับ-ส่ง (Tx, Rx antennas)
6. วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิตอล (analog to digital converter)



รูปที่ 2 ระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้น

2.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์



รูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนที่เป็นประเภทคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนหลัก ๆ ตามรูปที่ 3 โดยจะเริ่มจากรับค่าสัญญาณบีทในโดเมนเวลาที่เกิดจากการมิกซ์กันของสัญญาณภาครับและภาคส่ง จากนั้นแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่ด้วย FFT อัลกอริทึม [4]

ข้อมูลของสัญญาณที่ได้รับมาจะอยู่ในรูปของโดเมนเวลา การที่จะระบุระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์และความเร็วของโดรนจำเป็นต้องวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ดังนั้นซอฟต์แวร์จะนำข้อมูลในโดเมนเวลาแปลงเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูรีเย แต่เนื่องจากข้อมูลเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง จึงต้องแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) ตามสมการที่ 4 โดยที่ a_n คือ สัญญาณไม่ต่อเนื่องของ IF signal ในโดเมนเวลา

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} a_n \tag{2.1}$$

N

1000

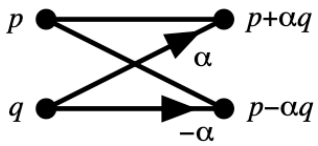
1000x1388 double

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658
2	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.0824	0.1658
3	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658
4	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658
5	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658
6	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
7	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
8	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491
9	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
10	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
11	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
12	0.1658	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
13	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.2491
14	0.2491	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
15	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491
16	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658
17	0.2491	0.1658	0.2491	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491
18	0.2491	0.1658	0.2491	0.3324	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491
19	0.3324	0.1658	0.3324	0.3324	0.3324	0.1658	0.1658	0.2491
20	0.2491	0.3324	0.3324	0.3324	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491

รูปที่ 4 แสดงเมทริกซ์ข้อมูลสัญญาณ IF signal ที่ได้รับจากตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล

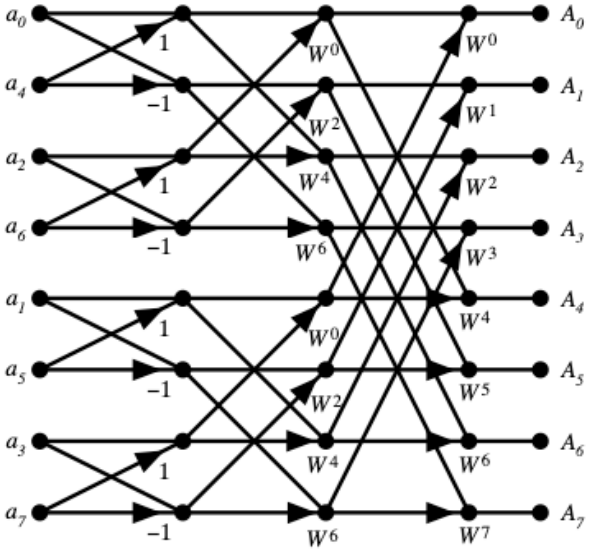
ในกรณีที่จำนวนจุดของข้อมูลเยอะ จะทำให้การคำนวณใช้เวลานานจึงมีการใช้ The Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผล fft อัลกอริทึมมีอยู่หลายรูปแบบ ในงานครั้งนี้ใช้ decimation in-time FFT algorithm หลักการ fft อัลกอริทึมนี้คือ การแยกการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องให้กลายเป็น $\log_2 N$ สถานะ และแต่ละสถานะจะประกอบด้วยการคำนวณ N/2 butterfly ซึ่ง butterfly เป็นชื่อที่

ใช้เรียกแทนขั้นตอนย่อยในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องตามรูปที่ 5 โดย butterfly จะประกอบไปด้วยการคำนวณจำนวนเชิงซ้อน 2 ตัวนั้นคือ p และ q



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนย่อยในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องหรือเรียกว่า butterfly

ยกตัวอย่างแผนภาพในการคำนวณของอัลกอริทึม fft ตามรูปที่ 6 (ก) เป็นการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด สังเกตเห็นว่าลำดับของ a_n และ A_k จะไม่ตรงกันเพราะอัลกอริทึมจะนำแต่ละ butterfly มาต่อกันและสลับ bit ของลำดับระหว่าง a_n กับ A_k ตามรูปที่ 6 (ข)



(ก)

j	0	1	2	3	4	5	6	7
n_j	0	4	2	6	1	5	3	7
j base 2	000	001	010	011	100	101	110	111
n_j base 2	000	100	010	110	001	101	011	111

(ข)

รูปที่ 6 แสดงแผนภาพการคำนวณของอัลกอริทึม fft (ก) แผนภาพการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด (ข) การสลับ bit ลำดับของ a_n และ A_k

เมื่อได้สัญญาณในโดเมนความถี่มาแล้วจะทำการลบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่งเพื่อให้เรดาร์ตรวจจับโดรนในระยะใกล้ได้ [5] อีกทั้งยังทำให้ความถี่บีทที่ใช้คำนวณหาระยะห่างระหว่างโด

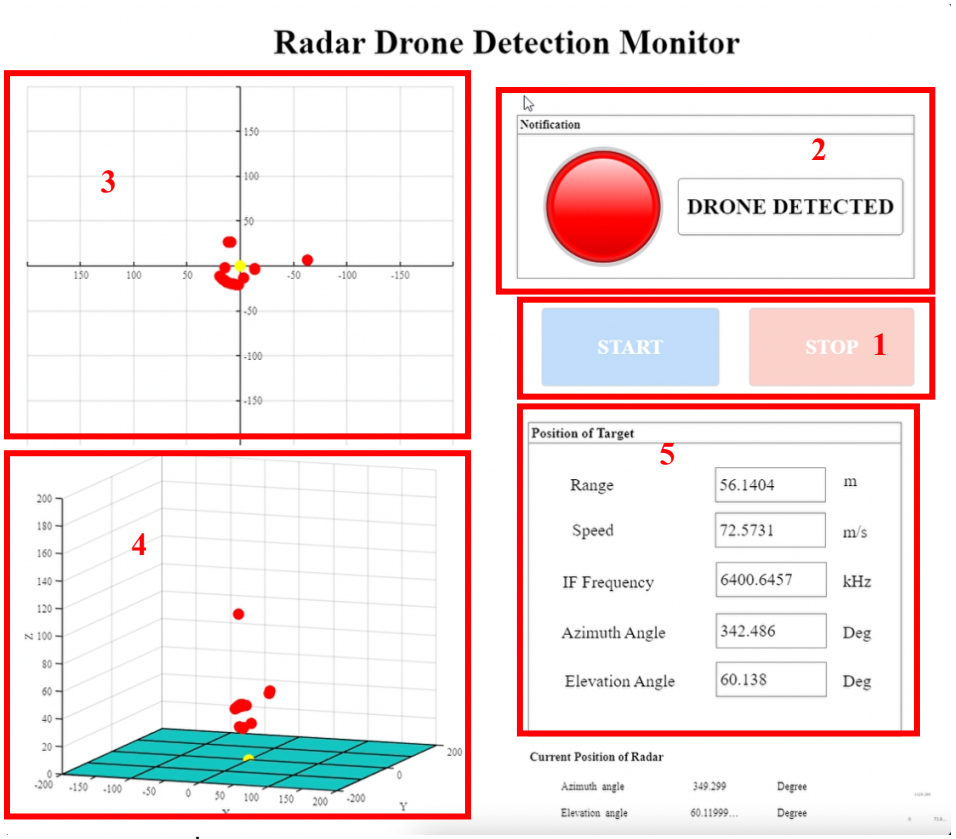
รนกับเรดาร์เด่นชัดขึ้น แต่ยังมีสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้กับความถี่บีทจึงต้องทำการนอร์มัลไลเซชั่น เพื่อให้ความถี่บีทชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อทราบความถี่บีทที่แม่นยำแล้วจะนำความถี่บีทนั้นไปคำนวณหาระยะทางและความเร็วของโดรน [6] ตามสมการด้านล่าง

$$R = \frac{T_m c}{2Bw} f_b \tag{2.2}$$

เมื่อ T_m คือ คาบเวลาของความถี่สามเหลี่ยม

Bw คือ แบนด์วิธของสัญญาณที่ถูกกล้ำความถี่

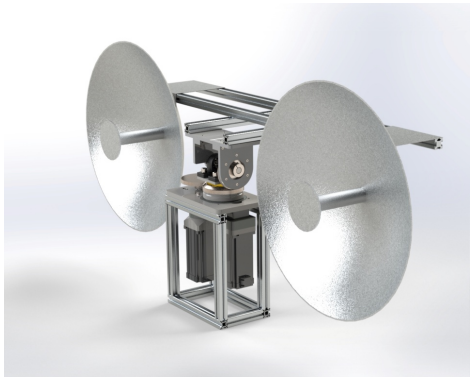
ค่าที่คำนวณได้จะส่งไปยังหน้าจอประมวลผลตามรูปที่ 7 โดยส่วนที่ 1จะเป็นปุ่มเริ่ม/หยุดทำงานโปรแกรม ส่วนที่ 2 การแจ้งเตือนสถานะเมื่อเจอโดรน ข้อมูลระยะห่างของโดรนที่ตรวจจับได้และข้อมูลมุมของชุดหมุนมาพล็อตตำแหน่งทั้งแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy : ส่วนที่ 3) และแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz : ส่วนที่ 4) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทราบถึงตำแหน่งของโดรนได้ง่ายขึ้น รายละเอียดตำแหน่งของโดรนทั้งระยะห่างของเป้าหมายกับเรดาร์ ความเร็วเฉลี่ยของโดรน ตำแหน่งมุม azimuth ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์และตำแหน่งมุม elevation ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์จะแสดงอยู่ในส่วนที่ 5 และตำแหน่งล่างขวาของตัวโปรแกรมจะแสดงตำแหน่งมุมปัจจุบันของเรดาร์เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบตำแหน่งของเรดาร์



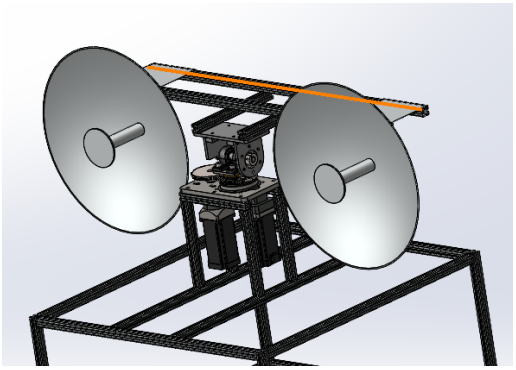
รูปที่ 7 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรน

2.4 การพัฒนาระบบหมุนค้นหาเป้าหมาย

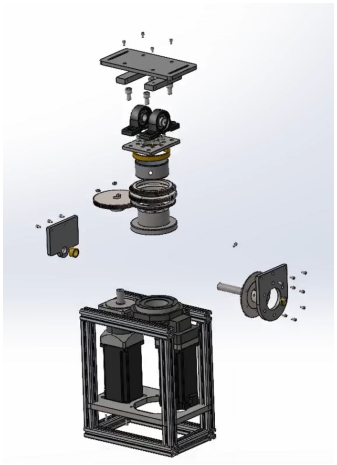
ในส่วนของผลการพัฒนาระบบหมุนค้นหาเป้าหมายในรูปแบบหมุนสองแกน โดยระบบเรดาร์ที่ทำการออกแบบจถูกติดตั้งเข้ากับระบบหมุนแบบสองแกนที่สามารถหมุนในแนวมุมกวาดและแนวมุมยกแบบอิสระต่อกัน ดังสแดงในรูปที่ 8 โดยที่ชุดหมุนสองแกนที่ทำการออกแบบนี้ประกอบไปด้วย ชุดโครงสร้างทางกลที่ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential Drive ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์ต้นกำลังของทั้งสองแกนถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างและส่งกำลังขึ้นไปยังชุดหมุนสองแกน โดยใช้เฟืองที่ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential เพื่อให้น้ำหนักที่บริเวณของชุดหมุนที่มีการเคลื่อนที่นั้นมีน้ำหนักเบา และ สามารถออกแบบให้ติดตั้งชุด Slip-Ring เพื่อใช้ในการรับ–ส่ง สัญญานเรดาร์จากสายอากาศที่ตั้งตั้งอยู่บนชุดหมุนสอง โดยโครงสร้างส่วนใหญ่จะใช้วัสดุอลูมิเนียมเพื่อลดน้ำหนัก โดยออกแบบให้รองรับน้ำหนักของชุดสายอากาศในระบบเรดาร์สูงสุดที่ 14 กิโลกรัม โดยมีความเร็วในการหมุนที่สามารถกำหนดได้ อยู่ในช่วงระหว่าง 1 รอบต่อ 10 วินาที และความเร็วสูงสุดที่ 1 รอบต่อ 4 วินาที โดยมีค่าความผิดพลาดที่รับได้ที่ 5% ออกแบบโดยใช้วัสดุที่แข็งแรงและเบา สามารถขนย้ายได้ง่าย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8 (ก) การติดตั้งระบบเรดาร์บนระบบชุดหมุนสองแกน (ข) ระบบชุดหมุนสองแกนที่ติดตั้งบนฐานรับน้ำหนัก (ค) องค์ประกอบต่างๆแบบสามมิติของระบบชุดหมุนสองแกน

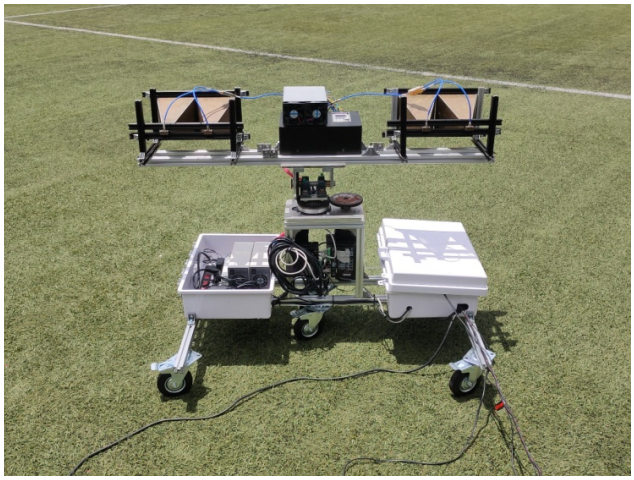
3. ผลการศึกษา

ทดสอบระบบเรดาร์ที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับโดรน

การทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ตรวจจับโดรน ทีมวิจัยได้เลือกสถานที่ทดสอบเป็นที่สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเพราะมีสภาพแวดล้อมที่เป็นที่โล่งและกว้างเพียงพอที่จะทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์โดยสนามมีเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวทแยง 128.5 เมตร ตามรูปที่ 9 (ก,ข) และจะติดตั้งเรดาร์ไว้บบริเวณกลางสนามกีฬาตามรูปที่ 9 (ค)

(ก)

(ข)

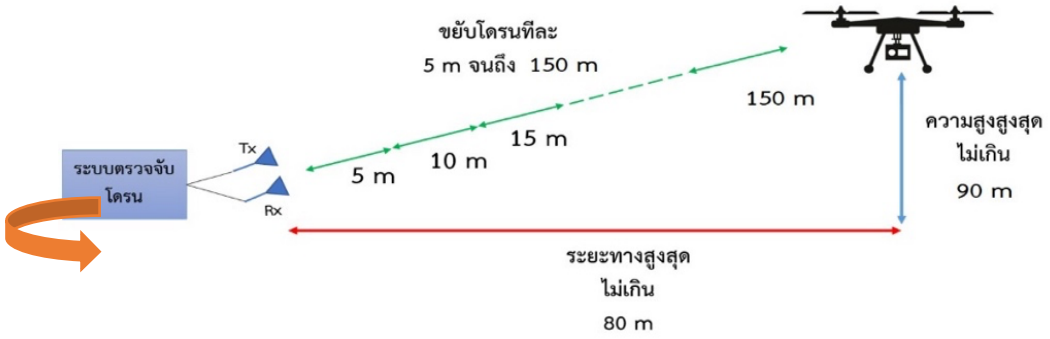


(ค)

รูปที่ 9 สถานที่ทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน (ก) ตำแหน่งจีพีเอสบนพื้นที่ใช้ในการทดสอบ (ข) สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ค) เรดาร์ตรวจจับโดรนโดยใช้สายอากาศ Horn antenna

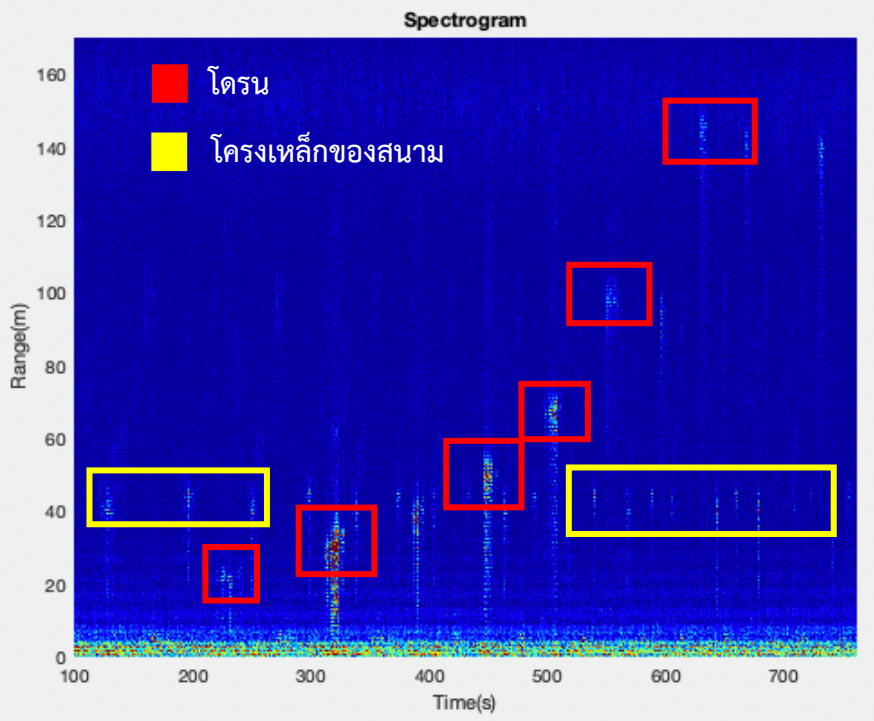
3.1 ทดสอบเรดาร์โดยเพิ่มระดับความสูงของโดรน

จากรูปที่ 9 (ข) จะเห็นว่าสนามกีฬามีโครงเหล็กล้อมรอบสนามอยู่ ดังนั้นการทดสอบเรดาร์ในแบบหมุนจะตั้งค่าให้มุม elevation อยู่ที่ 60 องศาเพื่อให้เรดาร์ไม่เจอโครงเหล็ก รูปแบบในการทดสอบจะเป็นไปตามรูปที่ 10 โดรนจะค่อย ๆ ขยับเพดานบินสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบที่เรดาร์หมุน



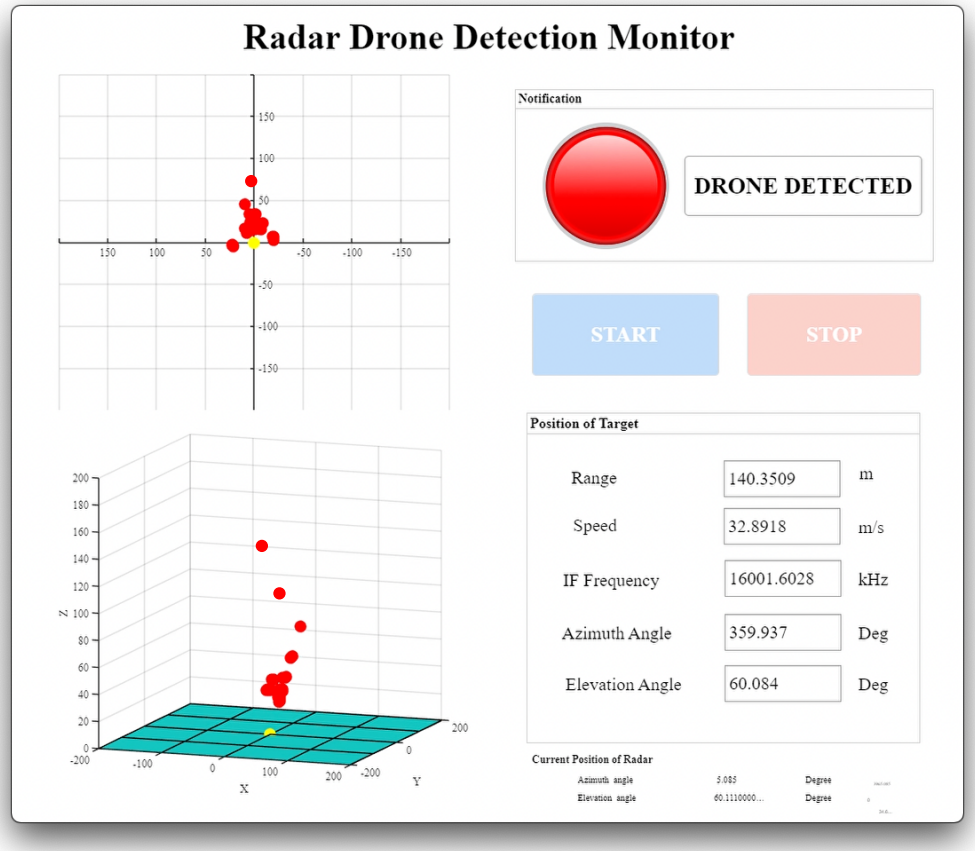
รูปที่ 10 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์โดรนที่กำลังหมุนโดยให้โดรนเพิ่มระดับความสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ

นำข้อมูลสัญญาณที่ได้จากเรดาร์มาพล็อตในรูปของแผนภาพ spectrogram จะเห็นภาพรวมของข้อมูลและแนวทางการบินของโดรนที่ค่อย ๆ บินห่างจากเรดาร์ รวมถึงโครงเหล็กของสนามกีฬาที่เรดาร์ตรวจเจอในทุก ๆ รอบที่ระยะห่างจากเรดาร์ 40 เมตร ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรูปของแผนภาพ spectrogram

หากแสดงข้อมูลต่าง ๆ ในรูปแบบของส่วนติดต่อผู้ใช้งานจะเป็นไปตามรูปที่ 12 ทำการเปรียบระยะที่เรดาร์วัดได้กับกล้องตรวจวัดระยะเป็นไปตามตารางที่ 3.1 จะพบว่าค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดจะอยู่ที่ -2.28 % ซึ่งอาจเกิดจากขณะวัดระยะด้วยกล้องวัดระยะ โดรนมีการเคลื่อนที่ออกทำให้ระยะที่บันทึกกับระยะที่เรดาร์ตรวจจับได้คลาดเคลื่อนกัน



รูปที่ 12 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรน

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบระยะของโดรนระหว่างเรดาร์กับกล้องตรวจวัดระยะ

ตำแหน่งที่	ระยะที่เรดาร์วัดได้	ระยะที่กล้องวัดระยะวัดได้	Error (%)
1	21.714 m	21.5 m	-0.99 %
2	36.190 m	36.0 m	-0.52 %
3	65.174 m	65.5 m	+0.49 %
4	65.800 m	65.5 m	-0.45 %
5	103.306 m	101.0 m	-2.28 %
6	140.351 m	140.0 m	-0.25 %

4. สรุป

ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนได้ถูกพัฒนาขึ้นทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์ที่ใช้สายอากาศปากแตรแบบ (horn antenna) รูปแบบแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบทิศทางเดียว โดยสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 8 ถึง 10 GHz ตรงตามย่านความถี่ X band ซึ่งสายอากาศต้นแบบให้อัตราขยาย ที่ 23 dB ใช้งานในระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ คลื่นความถี่ของสัญญาณถูกปรับความถี่ ไปตามเวลาหรือเรียกได้ว่ามีการผสมสัญญาณ (modulated) เพื่อปรับความถี่ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมายและยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ และส่วนซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณใช้วิธีการแปลง FFT เพื่อหาความถี่บีทนำไปคำนวณระยะของวัตถุ จากนั้นมีค่าระยะที่คำนวณได้มาพล็อตกับส่วนติดต่อผู้ใช้งานทั้งในแบบ 2 มิติและ 3 มิติ รวมถึงระบบเรดาร์ที่พัฒนาขึ้นถูกติดตั้งไว้กับระบบหมุนเพื่อค้นหาเป้าหมายทำให้การค้นหาโดรนทำได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้มีการทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ ผลลัพธ์ที่ได้คือเรดาร์สามารถตรวจพบโดรนได้ถึงระยะ 140 m ที่กำลังส่ง 10W อีกทั้งสามารถพล็อตเส้นทางการบินของโดรนได้

5. อ้างอิง

[1] http://www.radartutorial.eu/01.basics/!rb02.en.html

[2] “FMCW radar sensors application notes,” www.siversima.com

[3] Kurt Peek, “An Analysis of the Effects of Digital Phase Errors on the Performance of a FMCW-Doppler Radar,” A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE in APPLIED PHYSICS, The University of Twente, September 2011.

[4] Heckbert, P.S. (1998). Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm.

[5] T. Hauschild and R. Knochel, "Calibration of short range FMCW-radars with network analyzer calibration techniques," 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.98CH36192), 1998, pp. 969-972 vol.2, doi: 10.1109/MWSYM.1998.705153.

[6] Johan Svensson, “High Resolution Frequency Estimation in an FMCW Radar Application,” Master of Science Thesis in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2018.