



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การวัดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้สภาพ
แวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR

Project Title: Radar cross section of canonical target
under ground-based SAR environment

โดย พ.ท.นราเทพ พฤกษ์ธีรณ

2 มิถุนายน 2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การวัดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้สภาพ
แวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR

Project Title: Radar cross section of canonical target
under ground-based SAR environment

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. พ.ท.นราเทพ พฤกษ์ธีรณ

รร.จปร.

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG5780216

ชื่อโครงการ: การวัดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้สภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน: พ.ท.นราเทพ พฤกษ์ศิริบุญ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

อีเมล: narathepp@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 มิถุนายน 2557 ถึง 1 มิถุนายน 2559

การศึกษาเกี่ยวกับการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบเรดาร์ เป็นพื้นฐานสำคัญที่จะนำไปสู่ การวิจัย และการประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบการวัดการสะท้อน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเป้าหมายที่มีรูปร่างเฉพาะ ซึ่งจะจำลองสภาพภูมิประเทศโดยทั่วไป และเป็นลักษณะพื้นฐานของเป้าหมายชนิดต่างๆ โดยได้นำไปประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR (Synthetic Aperture Radar) ซึ่งเป็นระบบเรดาร์สำหรับการสร้างภาพโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะคล้ายกับภาพถ่ายทางอากาศ ลักษณะที่โดดเด่นของระบบเรดาร์ SAR คือการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เครื่องมือนำ-ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างเป้าหมายและชุดสายอากาศ ตลอดแนวระยะทางที่ทำการวัด วิธีการที่สามารถใช้เปรียบเทียบค่าที่วัดได้คือการจำลองผลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ โดยจากผลการทดลองพบว่า เป้าหมายแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้จะสามารถ นำไปประยุกต์ใช้ในการค้นหา หรือกู้ภัยภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ พื้นฐานที่ได้จากการทดลองวิจัยนี้จะนำไปสู่การออกแบบระบบเรดาร์สำหรับการค้นหาเป้าหมายเฉพาะ อีกทั้งการนำเอาค่าการสะท้อนกลับไปใช้กับระบบเรดาร์ SAR ในส่วนที่เกี่ยวกับการจำแนกประเภทพื้นผิวดต่อไป

Keyword: ระบบเรดาร์ SAR (Synthetic Aperture Radar), การวัดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, โพลาริเซชัน

Abstract

Project Code: TRG5780216

Project Title: Radar cross section of canonical target under ground-based SAR environment

Investigator: Lt.Col.Narathep Phruksahiran Chulachomklao Royal Military Academy

E-mail Address: narathepp@gmail.com

Project Period: 2 June 2557 - 1 June 2559

The studies on the reflection of electromagnetic waves in the radar system is a foundation of the research and application. In this research, the researcher has designed a system to measure the backscatter characteristics of electromagnetic waves from the canonical targets. The geometry of the canonical targets can be used to simulate the terrain and specific object. The principle of Synthetic Aperture Radar (SAR) was used to develop the measurement environment, in which the relative incident angle of the incident waves were continuously changed along the measurement direction. The measured backscatter power can be simulated using the mathematics approximation. The findings indicate that the canonical targets have different backscatter characteristics depend on the relative positions, the frequency and in particular the measurement geometry. The characteristics can be applied in searching or rescue under different environmental conditions. Based on the experimental results, this research will lead to the design of radar systems for finding specific targets and the application in SAR signal processing with a focus on surface classification.

Keyword: Synthetic aperture radar, radar cross section measurement, polarisation

สารบัญ

บทคัดย่อ	v
Abstract	vi
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.1.1 ความเป็นมา (กล่าวทั่วไป)	1
1.1.2 ปัญหาและสาเหตุ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
2 ระเบียบวิธีและการดำเนินการวิจัย	3
2.1 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
2.2 การศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง	3
2.3 การออกแบบระบบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	4
2.3.1 ระบบรางเลื่อน	4
2.3.2 ระบบมอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่	4
2.3.3 ระบบสายอากาศ	7
2.3.4 การประกอบชิ้นส่วนระบบรางและระบบควบคุมการเคลื่อนที่	10
2.3.5 การประกอบระบบควบคุมการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	11
2.3.6 ระบบเป้าหมายที่ใช้ในการทดลอง	13
2.4 การออกแบบการทดลอง	14
2.4.1 การวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด	14
2.4.2 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	15
3 ผลการวิจัยและทดลอง	17
3.1 ผลการวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด	17
3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	19
4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	23
4.1 สรุปผลการวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด	23
4.2 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	23
5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	25

6 Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	27
6.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ	27
6.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	27
6.3 อื่นๆ	27
6.3.1 National conference proceeding	27
6.3.2 International conference proceeding	27
เอกสารอ้างอิง	27

สารบัญตาราง

3.1	Parameter of the experiment, [14]	18
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง, [15]	21

สารบัญภาพ

1.1	รูปแบบการจัดและออกแบบการทดลองเพื่อวัดค่าการสะท้อนของเป้าหมายชนิดต่างๆ	2
1.2	เป้าหมายชนิดต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อวัดค่าการสะท้อน	2
2.1	การออกแบบอุปกรณ์ระบบรางเลื่อน (ชุดโครงสร้างสำหรับวางอุปกรณ์เครื่องมือวัด)	5
2.2	การออกแบบอุปกรณ์ระบบรางเลื่อน (ชุดระบบรางเลื่อนสำหรับการเคลื่อนที่)	5
2.3	การจัดสร้างชุดอุปกรณ์ระบบรางเลื่อนประกอบไปด้วยระบบรางรองรับจำนวน 5 ชั้น และชิ้นโครงสร้างสำหรับจัดวางเครื่องมือวัด	6
2.4	การเชื่อมต่อระบบการควบคุมการหมุนของมอเตอร์โดยผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการทดลอง (a) มอเตอร์, (b) ชุดควบคุมมอเตอร์ (Servo amplifier) และ (c) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	6
2.5	รูปแบบของ command pulse ที่ส่งเข้าไปยังอุปกรณ์ชุดควบคุมมอเตอร์ (Servo amplifier) เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ไป-กลับ	7
2.6	วงจรการต่อสัญญาณระหว่าง Host unit และ Servo amplifier	7
2.7	วงจรการต่อสัญญาณ command pulse input ไปยัง Servo amplifier เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์	8
2.8	การออกแบบอุปกรณ์ชุดสายอากาศแบบบังคับทิศในช่วงย่านความถี่ย่านแบนด์ที่ใช้ในการวิจัย	9
2.9	การจัดสร้างอุปกรณ์ชุดสายอากาศแบบบังคับทิศในช่วงย่านความถี่ย่านแบนด์ที่ใช้ในการวิจัย	9
2.10	วงจรการต่อสัญญาณ command pulse input ไปยัง Servo amplifier เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์	10
2.11	วงจรการต่อสัญญาณ command pulse input ไปยัง Servo amplifier เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์	11
2.12	ระบบการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน	11
2.13	รูปแบบระบบการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน	12
2.14	การประกอบระบบต่างๆ เข้าด้วยกัน เป็นชุดอุปกรณ์สมบูรณ์เพื่อใช้ในการงานวิจัย	13
2.15	รูปแบบและขนาดของเป้าหมายเฉพาะที่จะใช้ในการทดลอง (a) แผ่นเหล็กเรียบ, (b) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน และ (c) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน	14
2.16	ภาพแสดงพื้นที่ลานหน้ากองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จาก Google Map	14
3.1	Photograph of the GB-SAR system installed at the Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, Thailand, [14]	17

3.2	Image of measurement system, [14]	18
3.3	Radar cross section measurements of flat plate, dihedral and trihedral by $\theta = 70^\circ$, vv -Polarization, [14]	19
3.4	Radar cross section measurements of flat plate, dihedral and trihedral by $\theta = 75^\circ$, vv -Polarization, [14]	19
3.5	ภาพแสดงระบบการทำงานและอุปกรณ์ส่วนประกอบ, [15]	20
3.6	ภาพแสดงสถานที่ทำการทดลองและเป้าเฉพาะทั้งสามแบบ, [15]	20
3.7	ภาพแสดงค่าที่ได้จากการวัด RCS ของเป้าเฉพาะทั้งสามแบบ, (a) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ VV และ (b) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ HH โดยเส้น ... แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบ, เส้น - - แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสองด้าน และ เส้น - แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสามด้าน, [15]	21
3.8	ภาพแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณหาค่า RCS ของเป้าเฉพาะทั้งสามแบบโดยใช้หลักการ PO แบบพื้นฐาน, (a) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ VV และ (b) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ HH โดยเส้น ... แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบ, เส้น - - แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสองด้าน และ เส้น - แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสามด้าน, [15]	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

1.1.1 ความเป็นมา (กล่าวทั่วไป)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านภูมิสารสนเทศโดยการใช้เทคโนโลยีเรดาร์ SAR (Synthetic Aperture Radar) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยนักวิจัยทั่วโลกทั้งภาครัฐและเอกชน หลักการสำคัญของเทคโนโลยีเรดาร์ SAR ก็คือการเพิ่มความละเอียดในแนวทิศทางตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของแพลตฟอร์ม หลังจากผ่านกรรมวิธีประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัลแล้ว ผลที่ได้รับก็คือข้อมูลภาพ ที่มีลักษณะคล้ายกับ ภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้กล้องถ่ายรูปแบบออปติคัล

1.1.2 ปัญหาและสาเหตุ

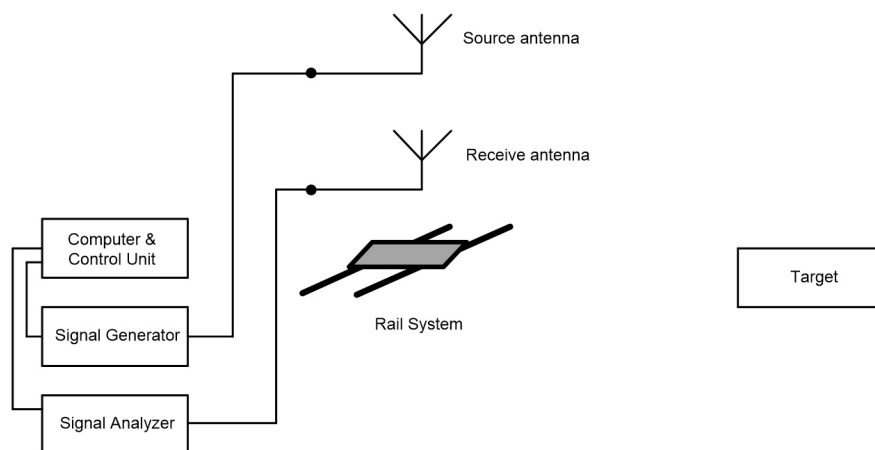
ปัจจัยสำคัญในการประมวลผลและการแสดงผลข้อมูลภาพก็คือความสามารถในการสะท้อนของวัตถุหรือพื้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโพลาริเซชันและทิศทางการตกกระทบและสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับพื้นผิวของเป้าหมายที่มีรูปร่างเฉพาะทางเรขาคณิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

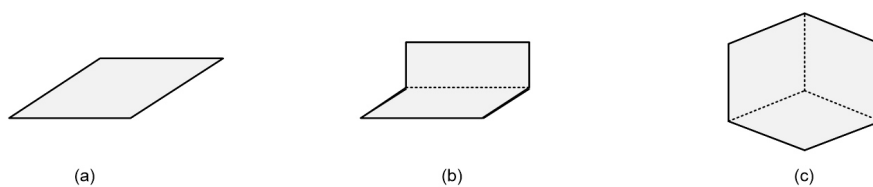
ทำการออกแบบสร้างระบบรางเลื่อนและอุปกรณ์ประกอบ เพื่อทำการทดลองและวัดค่าการสะท้อน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเป้าหมายชนิดต่างๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR แบบภาคพื้นในช่วงความถี่ย่านซีแบนด์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ในขั้นต้นจะทำการศึกษาค่าตัวแปรและคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการพัฒนาสร้างระบบรางและแพลตฟอร์มรองรับชุดสายอากาศและเครื่องมือวัดดังแสดงในภาพที่ 1.1 ในลำดับต่อไปจะต้องทำการปรับสมดุลของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ทำงานเข้ากันได้โดยมีค่าอัตรา การสูญเสียและค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด แล้วจึงทำการทดสอบค่าการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเป้าหมายชนิดต่างๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่ใช้ในการวิจัยและคุณลักษณะของเป้าหมาย แต่ละชนิดดังแสดงในภาพที่ 1.2 ด้วย



ภาพที่ 1.1: รูปแบบการจัดและออกแบบการทดลองเพื่อวัดค่าการสะท้อนของเป้าหมายชนิดต่างๆ



ภาพที่ 1.2: เป้าหมายชนิดต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อวัดค่าการสะท้อน

บทที่ 2

ระเบียบวิธีและการดำเนินการวิจัย

2.1 วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก ตามแผนการดำเนินงานคือ การศึกษาบทความทางวิชาการ การวางแผนและเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย เพื่อนำมาประกอบชิ้นส่วนและปรับการทำงานของระบบการวัดให้มีความสัมพันธ์กัน จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนของการออกแบบการทดลองและการดำเนินการทดลอง เพื่อนำผลที่ได้มาทำการสรุปและวิเคราะห์ต่อไป ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2 การศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง โดยเอกสารอ้างอิงหลักที่จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินโครงการวิจัยคือ

- R.B. Dybdal, "Radar cross section measurements," Proceedings of the IEEE, vol. 75, no. 4, pp. 498-516, April 1987. ในบทความนี้จะกล่าวถึง การพัฒนาเทคโนโลยีการวัดค่า radar cross section จะมีความเกี่ยวข้องควบคู่ไปกับการพัฒนาเทคโนโลยีเรดาร์ ทำให้เกิดความสนใจในเรื่องของการวัดค่า radar cross section เป็นอย่างมาก เดิมทีนั้นการวัดค่า radar cross section มีจุดประสงค์เพื่อค้นหาระยะห่างของวัตถุ ซึ่งยังเป็นพื้นฐานสำคัญที่ยังดำเนินการอยู่ในยุคต่อมา เทคนิคการวัดจะนำเอาเทคนิคการวิเคราะห์และการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเสริมความเข้าใจในเรื่องของคุณสมบัติการสะท้อนและการกระเจิงในระบบเรดาร์ได้มากขึ้น ในปัจจุบันนี้ด้วยความก้าวหน้าของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์, เทคโนโลยีการประมวลผลข้อมูล และเทคโนโลยีดิจิทัล ได้มีส่วนเข้ามาผลักดันให้มีการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับ รูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, การจำแนกชนิดและค้นหาเป้าหมาย รวมไปถึงการควบคุมการกระเจิงของสัญญาณเรดาร์ด้วย
- E.F. Knott, "A progression of high-frequency RCS prediction techniques," Proceedings of IEEE, vol. 73, no. 2, pp. 252-264, February 1985. ในบทความนี้ได้กล่าวไว้ว่า ตั้งแต่มีการใช้งานระบบเรดาร์อย่างแพร่หลายในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง บรรดาวิศวกรต่างก็เผชิญกับปัญหาในการคำนวณหาคุณลักษณะของสัญญาณเรดาร์ ที่สะท้อนกลับมาจากรูปทรงลักษณะต่างๆ และได้มีการพัฒนากรรมวิธีมาอย่างต่อเนื่อง ในบทความนี้ได้ยกตัวอย่างวิธีการในการคำนวณ ค่าการสะท้อนกลับในช่วงย่านคลื่นความถี่สูง อาทิเช่น กรรมวิธีที่เรียกว่า method of moment, geometric optics และ physical optics นอกจากนั้นกรรมวิธีการวัดค่าในรูปแบบต่างๆ ก็ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุง ค่าที่ได้จากการวัดให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยค่าความถูกต้องเหล่านี้ ก็จะต้องใช้ระยะเวลาการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ที่ยาวนานขึ้นด้วย
- D. Klement, J. Preisser und V. Stein, "Special problems in applying the physical optics method for backscatter computations of complicated objects," IEEE Trans.

Antennas Propagat., vol. 36, no. 2, pp. 228-237, February 1988. ในบทความนี้ได้ใช้กรรมวิธี physical optics ในการคำนวณค่าการสะท้อนกลับของวัตถุหรือเป้าหมายที่มีลักษณะโครงสร้างซับซ้อน โดยใช้การอธิบายในรูปของแผ่นเรียบที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน และยังสามารถคำนึงถึงบริเวณที่โดนบดบังหรือบริเวณส่วนที่เป็นเงาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุด้วย ในบทความนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนกลับที่ได้จากการวัดกับค่าการสะท้อนกลับที่ได้จากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

- C. Uluisik, G. Cakir, M. Cakir und L. Sevgi, "Radar cross section (RCS) modeling and simulation, part 1: a tutorial review of definitions, strategies, and canonical examples," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, no. 1, pp. 115-126, February 2008. ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบโมเดลสำหรับการคำนวณค่า radar cross section โดยใช้การประมวลผลทั้งในแบบเชิงเวลาและเชิงความถี่ และได้ใช้ตัวอย่างของเป้าหมายเฉพาะมาทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากกรรมวิธี finite-difference time-domain method, method of moment และ physical optics
- N. Phruksahiran and M. Chandra, "Polarimetric radar cross section under SAR geometry", URSI Germany: Advances in Radio Science, Vol. 11, pp. 277 - 282, 2013. ในบทความนี้ได้นำเสนอผลการประมวลผลหาค่า radar cross section ภายใต้ระบบเรดาร์ SAR โดยได้คำนึงถึงลักษณะของโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบบนผิว

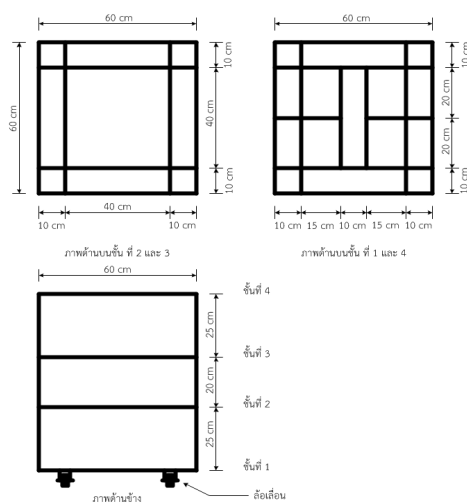
2.3 การออกแบบระบบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

2.3.1 ระบบรางเลื่อน

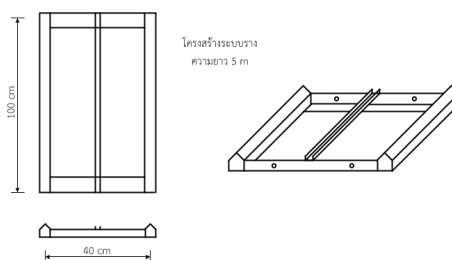
ทำการศึกษา, ออกแบบ และจัดสร้างอุปกรณ์รางเลื่อน เพื่อจำลองและสร้างระบบการทำงานของ ระบบเรดาร์ SAR แบบภาคพื้น ซึ่งจะต้องการเคลื่อนที่ของระบบเซ็นเซอร์ รับ-ส่ง สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนำมาประมวลผลออกมาเป็นรูปภาพต่อไป โดยจะใช้วัสดุเป็นโครงโลหะที่มีความแข็งแรงแบ่งออกเป็นสี่ชั้น สามารถรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและชุดสายอากาศได้ โดยได้คำนึงถึงขนาดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่อพ่วงประกอบอื่นๆ ด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เพื่อความสะดวกในการขนย้ายอุปกรณ์ไปทำการทดสอบในสถานที่ต่างๆ จึงได้ทำการออกแบบระบบรางให้สามารถแยกชิ้นและประกอบเข้าด้วยกันได้ โดยตัวรางรองรับด้านล่างจะมีความยาวรวม 5 เมตร โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ชั้น ความยาวชั้นละ 1 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เมื่อได้ทำการออกแบบตามที่ต้องการแล้ว ก็ได้ทำการจัดสร้างอุปกรณ์รางเลื่อนตามแบบที่ได้กำหนดขนาดไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ที่ชั้นล่างสุดจะทำการเจาะช่องเปิดไว้สำหรับประกอบโซ่เข้ากับฟันเฟืองของมอเตอร์ที่ควบคุมการหมุนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.3.2 ระบบมอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่

ทำการศึกษา, ออกแบบ และจัดสร้างอุปกรณ์และสายนำสัญญาณที่จะต้องใช้ในการเชื่อมต่อพ่วงระหว่างอุปกรณ์เครื่องมือวัดและเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมถึงอุปกรณ์เชื่อมต่อสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดโครง



ภาพที่ 2.1: การออกแบบอุปกรณ์ระบบรางเลื่อน (ชุดโครงสร้างสำหรับวางอุปกรณ์เครื่องมือวัด)



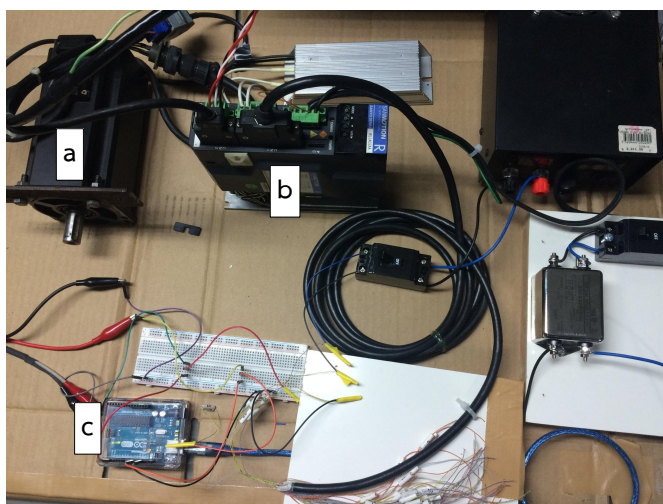
ภาพที่ 2.2: การออกแบบอุปกรณ์ระบบรางเลื่อน (ชุดระบบรางเลื่อนสำหรับการเคลื่อนที่)

โลหะและระบบรางเลื่อน โดยระบบรางเลื่อนจะประกอบไปด้วย ชุดโครงสร้างโลหะ และระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ในการออกแบบนั้น ได้วางแผนที่จะใช้งานระบบมอเตอร์ AC โดยจะทำการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้สัญญาณ Analog/Pulse ที่ส่งออกมาจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นสายสัญญาณที่จะใช้จะต้องมีรูปแบบที่สามารถเชื่อมต่อกับพอร์ตต่างๆ ของชุดควบคุมมอเตอร์ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4

การหมุนของมอเตอร์นั้นจะสามารถบังคับให้หมุนได้ทั้งสองทิศทาง ไป-กลับ เพื่อความสะดวกในการใช้งานร่วมกับชุดระบบรางเลื่อน โดยในภาพที่ 2.5 จะแสดงรูปแบบคำสั่ง pulse ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะแบบที่เรียกว่า positive move pulse + negative move pulse โดยจะใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณ pulse สองแหล่งในการสร้างสัญญาณป้อนเข้าสู่ชุดควบคุมมอเตอร์ สำหรับสัญญาณ F-PC (Forward rotation pulse) และสัญญาณ R-PC (Reverse rotation pulse) ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้บอร์ด Arduino เป็น



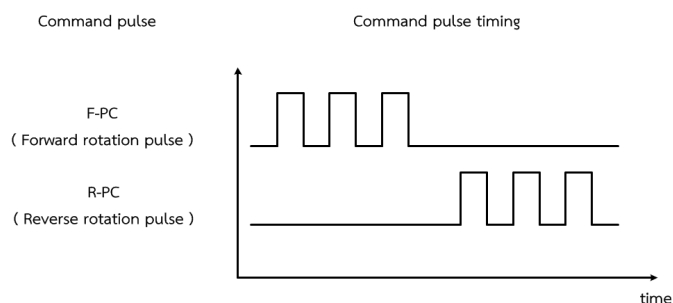
ภาพที่ 2.3: การจัดสร้างชุดอุปกรณ์ระบบรางเลื่อนประกอบไปด้วยระบบรางรองรับจำนวน 5 ชั้นและชั้นโครงสร้างสำหรับจัดวางเครื่องมือวัด



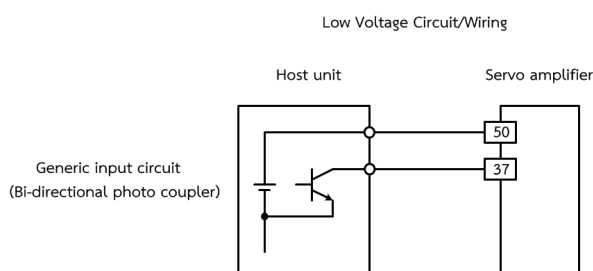
ภาพที่ 2.4: การเชื่อมต่อระบบการควบคุมการหมุนของมอเตอร์โดยผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทดลอง (a) มอเตอร์, (b) ชุดควบคุมมอเตอร์ (Servo amplifier) และ (c) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

แหล่งกำเนิดสัญญาณ pulse ดังแสดงในภาพที่ 2.4(c)

ในการควบคุมชุดมอเตอร์จะต้องเชื่อมต่อสัญญาณและกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปทางพอร์ต CN1 ของอุปกรณ์ชุดควบคุมมอเตอร์ (Servo amplifier) ในภาพที่ 2.6 เป็นการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด DC5V เข้าไปยังสายสัญญาณหมายเลข 50 และหมายเลข 37 ของอุปกรณ์ชุดควบคุมมอเตอร์ โดยการเชื่อมต่อแบบนี้จะมีชื่อเรียกว่า Bi-directional photo coupler เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปแล้ว จะทำให้มอเตอร์พร้อมใช้งานและเตรียมรับสัญญาณ pulse สำหรับทิศทางการหมุนต่อไป สัญญาณ pulse สำหรับควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์แบบ ไป-กลับ จะถูกป้อนเข้าทางสายสัญญาณหมายเลข 26, 47, 28 และ 48 เพื่อป้อนสัญญาณ F-PC และ R-PC ไปยังมอเตอร์ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2.7



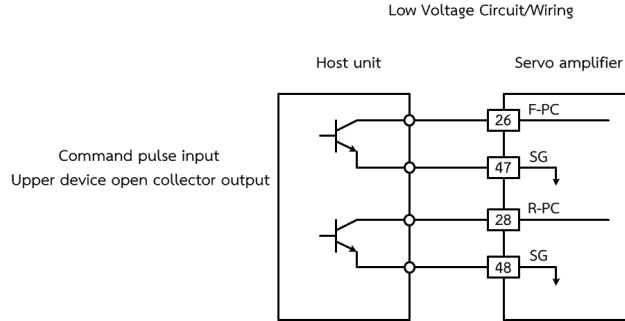
ภาพที่ 2.5: รูปแบบของ command pulse ที่ส่งเข้าไปยังอุปกรณ์ชุดควบคุมมอเตอร์ (Servo amplifier) เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ไป-กลับ



ภาพที่ 2.6: วงจรการต่อสัญญาณระหว่าง Host unit และ Servo amplifier

2.3.3 ระบบสายอากาศ

ทำการศึกษา, ออกแบบ และจัดสร้างอุปกรณ์ชุดสายอากาศแบบบังคับทิศในช่วงย่านความถี่ย่านแบนด์ที่ใช้ในการวิจัย เพื่อนำมาประกอบเข้ากับอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณและอุปกรณ์ภาครับ โดยอุปกรณ์เครื่องกำเนิดสัญญาณและรับสัญญาณที่ใช้ในการทดลองจะครอบคลุมช่วงย่านความถี่ 250 kHz - 3.0 GHz จึงได้เลือกใช้ความถี่ 1.3 GHz มาใช้ในการทดลองนี้ การออกแบบสายอากาศจะเริ่มตั้งแต่การกำหนดขนาดของ waveguide โดยขนาดที่เหมาะสมกับความถี่นี้ก็คือแบบ WR-650 (Rectangular Waveguide) รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะมีขนาดด้านแต่ละด้านยาว $a = 0.1651$ m และ $b = 0.0826$ m จากขนาดของ waveguide



ภาพที่ 2.7: วงจรการต่อสัญญาณ command pulse input ไปยัง Servo amplifier เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์

สามารถนำไปคำนวณหาขนาดของสายอากาศแบบ pyramidal horn ได้ดังต่อไปนี้, [1]

$$G_l = 10^{G_{dBi}/10} \quad (2.1)$$

$$A = 0.096aG_l^{0.232} + 0.42\lambda G_l^{0.503} - 0.193b \quad (2.2)$$

$$R_H = A \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{A}{3\lambda}\right)^2} \quad (2.3)$$

$$L_H = (A - a) \sqrt{\left(\frac{R_H}{A}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (2.4)$$

$$D_H = \sqrt{R_H^2 - \left(\frac{A}{2}\right)^2} \quad (2.5)$$

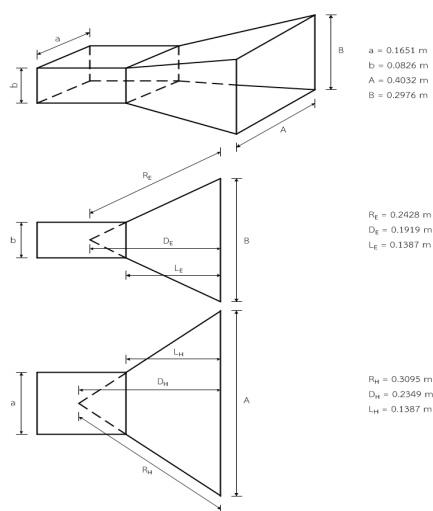
$$B = \frac{1}{2} \left(b + \sqrt{b^2 + 8L_H\lambda} \right) \quad (2.6)$$

$$R_E = \frac{B}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{B}{\lambda}\right)^2} \quad (2.7)$$

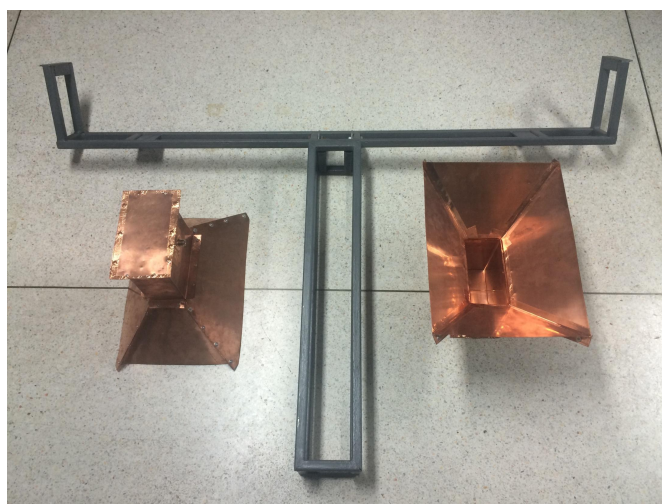
$$L_E = (B - b) \sqrt{\left(\frac{R_E}{B}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (2.8)$$

$$D_E = \sqrt{R_E^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (2.9)$$

เมื่อกำหนดให้อัตราการขยาย $G_{dBi} = 12$ จะได้ขนาดของสายอากาศแบบ pyramidal horn ที่ใช้ในการทดลองนี้ดังแสดงในภาพที่ 2.8 เมื่อได้ทำการออกแบบแล้ว ก็ได้จัดสร้างสายอากาศโดยใช้วัสดุแผ่นทองแดงที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีมาสร้างเป็นตัว waveguide และส่วนของ pyramidal horn และจัด

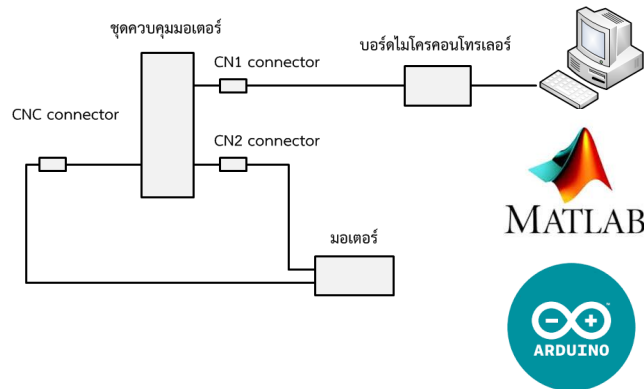


ภาพที่ 2.8: การออกแบบอุปกรณ์ชุดสายอากาศแบบบังคับทิศในช่วงย่านความถี่ย่านแบนด์ที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ 2.9: การจัดสร้างอุปกรณ์ชุดสายอากาศแบบบังคับทิศในช่วงย่านความถี่ย่านแบนด์ที่ใช้ในการวิจัย

สร้างชุดโครงโลหะสำหรับยึดประกอบชุดสายอากาศเข้ากับระบบรางเลื่อน เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2.9



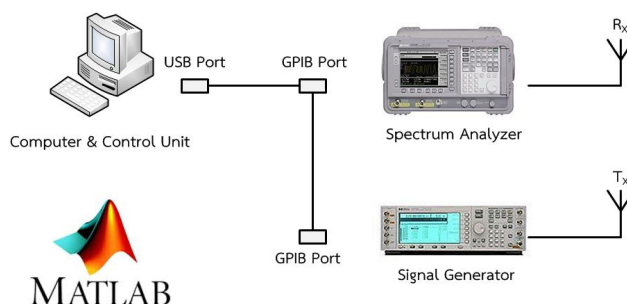
ภาพที่ 2.10: วงจรการต่อสัญญาณ command pulse input ไปยัง Servo amplifier เพื่อบังคับทิศทางการหมุนของมอเตอร์

2.3.4 การประกอบชิ้นส่วนระบบรางและระบบควบคุมการเคลื่อนที่

การประกอบชิ้นส่วนและปรับปรุงกรณีให้ทำงานอย่างสัมพันธ์กัน โดยใช้การควบคุมแบบศูนย์รวมผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน จากวิธีการทำงานของระบบเรดาร์ SAR จะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของสายอากาศภาครับและภาคส่ง ในแนวตั้งฉากกับตำแหน่งของเป้าหมายหรือพื้นที่ที่ต้องการสำรวจ ปัจจัยที่สำคัญในการเคลื่อนที่ของระบบมอเตอร์ขับเคลื่อน คือ ความเร็ว, PRF และตำแหน่งที่แน่นอนในการเก็บบันทึกสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมา เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป ในการวิจัยนี้จะกำหนดระยะการเคลื่อนที่ให้มีระยะห่างเท่าๆ กันเพื่อความต่อเนื่องของสัญญาณและความถูกต้องในการแสดงผลค่าที่สะท้อนกลับมา โดยจะทำการควบคุมผ่านทางโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่สามารถกำหนดค่าตำแหน่งเป็นระยะทาง แล้วนำไปแปลงเป็นจำนวน pulse ที่จะส่งออกไปยังระบบมอเตอร์เพื่อควบคุมการหมุนให้ได้ระยะที่ต้องการเก็บบันทึกข้อมูลสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไป โดยมีรูปแบบผังการทำงานดังแสดงในภาพที่ 2.10 เมื่อนำเอาอุปกรณ์ต่างๆ มาต่อประกอบเข้าด้วยกันแล้ว จะต้องคำนึงถึงการจัดวางให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงและพื้นที่บนชุดระบบรางเลื่อนด้วย โดยในภาพที่ 2.11 จะแสดงรูปแบบการประกอบชุดอุปกรณ์ดังกล่าว โดยจะเก็บสายสัญญาณต่างๆ ไว้ด้านล่างเพื่อความเรียบร้อยและสะดวกในการเคลื่อนย้าย รวมไปถึงการทำการทดลองต่อไปด้วย



ภาพที่ 2.11: วงจรการต่อสัญญาณ command pulse input ไปยัง Servo amplifier เพื่อบังคับทิศทาง การหมุนของมอเตอร์



ภาพที่ 2.12: ระบบการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน

2.3.5 การประกอบระบบควบคุมการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน ในภาพที่ 2.12 เป็นแผนผังแสดงลักษณะการทำงานและการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่สั่งให้ signal generator สร้างสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบที่ต้องการ ส่งผ่านสายนำสัญญาณไปยังสายอากาศภาคส่ง T_x แล้วรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุทางสายอากาศภาครับ R_x เพื่อทำการวัดด้วยเครื่อง spectrum analyzer แล้วจึงบันทึกผลไว้เป็นสถิติ และฐานข้อมูลต่อไป ในภาพที่ 2.13 ได้แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่ออุปกรณ์ชุดสายอากาศกับเครื่องมืออุปกรณ์ สำหรับการทำวัดค่าจริง โดยการทำงานทั้งหมดจะควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อนำระบบต่างๆ ที่ออกแบบไว้มาประกอบเข้าด้วยกันก็จะได้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการวิจัยห้วงต่อไปดังแสดง ในภาพ



ภาพที่ 2.13: รูปแบบระบบการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน

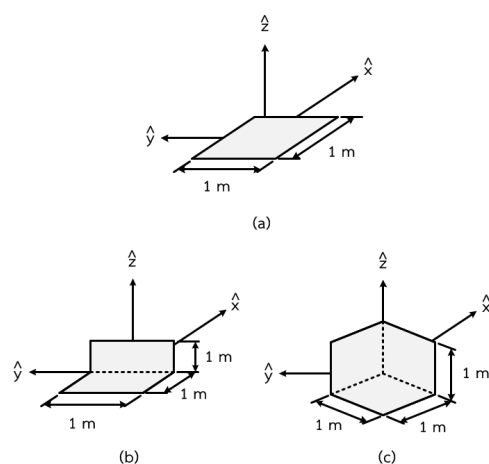
ที่ 2.14 ตามที่ได้อธิบายถึงส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์เครื่องมือวัดและระบบควบคุม โดยการเคลื่อนที่ไปบนระบบรางเลื่อนที่มีการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ที่แม่นยำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา สำหรับงานวิจัยนี้ จะเป็นตัวสร้างระบบหรือสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเหมือนกับระบบเรดาร์ SAR ตัวของชุดอุปกรณ์ได้ถูกติดตั้งไว้บนชุดรางเลื่อนด้วย เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม รวมไปถึงระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งไว้ด้านล่างด้วย ชุดสายอากาศสำหรับการส่งและการรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น สามารถปรับแนวรูปทรงของการประกอบเข้ากับโครงสำหรับยึด เพื่อการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปคลื่นและโพลาไรเซชันของคลื่นในรูปแบบอื่นได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.14: การประกอบระบบต่างๆ เข้าด้วยกัน เป็นชุดอุปกรณ์สมบูรณ์เพื่อใช้ในการวิจัย

2.3.6 ระบบเป้าหมายที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เป้าหมายที่มีลักษณะเฉพาะสามชนิดด้วยกันคือ แผ่นโลหะเรียบ, แผ่นโลหะเข้ามุมฉากสองด้าน และแผ่นโลหะเข้ามุมฉากสามด้าน ซึ่งเป็นรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่พบได้ในอาคารสิ่งปลูกสร้างทั่วไป และเป็นเป้าหมายหลักที่ใช้ในการปรับเทียบค่าของระบบเรดาร์ SAR ด้วย ชุดฐานรองรับจะออกแบบให้มีระดับความสูงจากพื้นประมาณ 1 เมตร เพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างพื้นและเป้าหมาย รวมไปถึงรูปทรงของบีมของสายอากาศที่ใช้ในการทดลองด้วย เพื่อนำไปวางในพื้นที่ที่มีระยะห่างกันแล้วนำค่ามาเปรียบเทียบเพิ่มเติมด้วยดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15: รูปแบบและขนาดของเป้าหมายเฉพาะที่จะใช้ในการทดลอง (a) แผ่นเหล็กเรียบ, (b) แผ่นเหล็กเข้ามุมจากสองด้าน และ (c) แผ่นเหล็กเข้ามุมจากสามด้าน



ภาพที่ 2.16: ภาพแสดงพื้นที่ลานหน้ากองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จาก Google Map

2.4 การออกแบบการทดลอง

2.4.1 การวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด

การทดสอบในพื้นที่บริเวณโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เนื่องจากโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีพื้นที่บริเวณลานด้านหน้ากองบัญชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าที่มีลักษณะเป็นลานกว้างและเรียบทำให้มีลักษณะของพื้นฉากหลังที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 2.16 อีกทั้งยังสามารถใช้ทำการจัดวางตำแหน่งของเป้าหมายเฉพาะ ซึ่งจะทำให้แยกแยะสัญญาณที่เกิดจากฉากหลังและสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายที่ต้องการวัดได้สะดวกและมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

2.4.2 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

การตรวจสอบค่าความถูกต้องที่ได้จากการวัดและการทดลอง สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาประยุกต์ใช้ ซึ่งกรรมวิธีหนึ่งที่มีความนิยมแพร่หลายก็คือกรรมวิธี Physical Optic (PO) แบบพื้นฐาน ซึ่งจะใช้หลักการว่า เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบบนพื้นผิวของโลหะ สนามแม่เหล็กที่ตกกระทบบน $\vec{H}$ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $\vec{J}$ ขึ้นบนพื้นผิวของโลหะ ตามสมการ

$$\vec{J} = 2\hat{n} \times \vec{H} \quad (2.10)$$

โดยที่ $\hat{n}$ คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับแนวระนาบของพื้นผิวที่ตกกระทบบ และเมื่อนำมาประยุกต์กับหลักการของเวกเตอร์โพเทนเชียล $\vec{A}$ ก็จะสามารถคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า $\vec{E}_s$ ณ จุดที่ทำการวัดค่าได้ จากสมการ

$$\vec{E}_s = -j\omega\vec{A} \quad (2.11)$$

โดยที่ ω คือความถี่เชิงมุม เมื่อทราบค่าของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบบ $\vec{E}_i$ จะสามารถคำนวณหาการสะท้อน (radar cross section, σ) ได้จากสมการ

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ r คือระยะห่างระหว่างวัตถุกับสายอากาศของระบบเครื่องมือวัด โดยในการวัดค่าการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุใดๆ สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ สมการเรดาร์ (radar equation) ซึ่งจะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังของเครื่องส่ง P_t , ค่าของกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมายังระบบสายอากาศของเครื่องรับ P_r , อัตราการขยายของสายอากาศภาคส่ง G_t และภาครับ G_r , ความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งาน λ ดังสมการต่อไปนี้

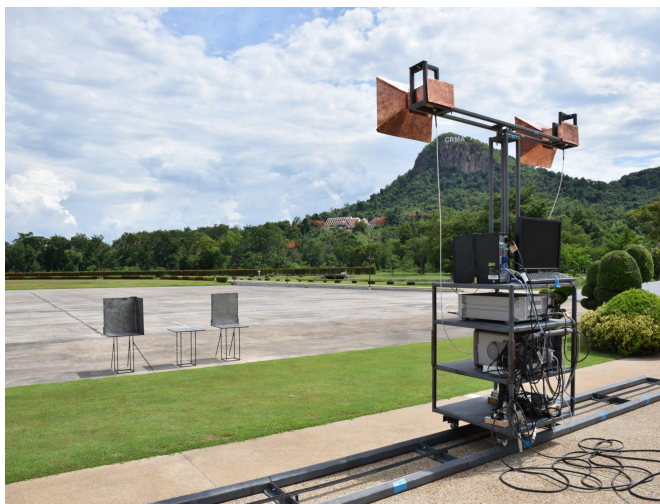
$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2.13)$$

บทที่ 3

ผลการวิจัยและทดลอง

3.1 ผลการวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด

การทดลองวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด เพื่อลดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากสภาพแวดล้อมหรือวัตถุอื่น ที่อยู่ในบริเวณข้างเคียงกับเป้าหมายที่ต้องการวัด โดยสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบนี้คือ ลานบริเวณด้านหน้ากองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นภูมิประเทศที่มีลักษณะเปิดโล่ง โดยชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด และชุดสายอากาศจะติดตั้งอยู่บนบริเวณบันได ซึ่งมีระดับสูงชันมาจากบริเวณลาน ทำให้เกิดสภาพแวดล้อมภายใต้ระบบเรดาร์ SAR แบบภาคพื้น

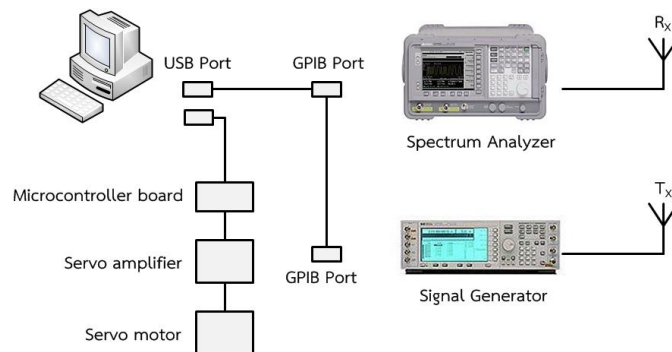


ภาพที่ 3.1: Photograph of the GB-SAR system installed at the Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, Thailand, [14]

ระบบควบคุมการทำงานและการรับส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแสดงในภาพที่ 3.2 โดยจะใช้ เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ โดยการส่งสัญญาณผ่านทางบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า ในแนวทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวของระบบรางที่วางไว้ การส่งและการรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระทำผ่านทางอุปกรณ์ Signal generator และ Spectrum analyzer โดยใช้สายอากาศแบบ pyramidal horn antenna เพื่อให้สามารถปรับใช้ polarisation ของรูปคลื่นได้ตามที่ต้องการ

ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวัดจะแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นขนาดความถี่ที่ใช้กันโดยทั่วไปในระบบเรดาร์ SAR ในการทดสอบนี้ได้ออกแบบให้มีมุมตกกระทบ สองขนาดด้วยกันคือ 70 องศา และ 75 องศา เพื่อดูความแตกต่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของมุมตกกระทบวัตถุที่เปลี่ยนไป โดยระยะห่างระหว่างเป้าหมายกับชุดสายอากาศจะมีขนาด 7.30 เมตร และ 9.70 เมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองและค่าที่ได้จากการวัดในภาพที่ 3.3 เป็นค่าที่ได้จากการใช้มุมตกกระทบขนาด 70 องศา

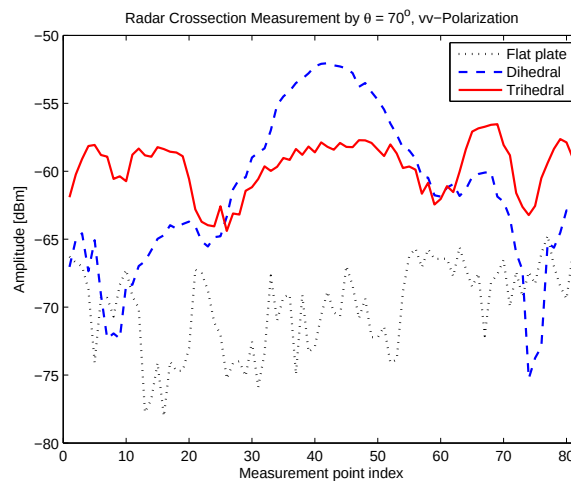


ภาพที่ 3.2: Image of measurement system, [14]

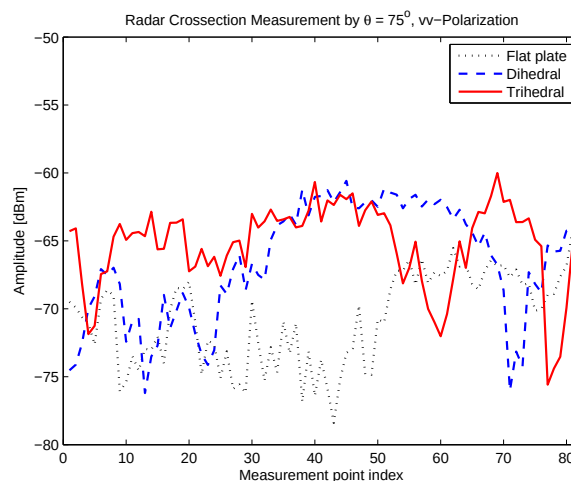
ตารางที่ 3.1: Parameter of the experiment, [14]

Parameter	Value
Frequency	1.3 GHz
Aperture length	4 m
Distance of measuring points	5 cm
Off-Nadir angle	70°, 75°
Polarization	vv
Antenna gain	12 dBi
Azimuth point number	81
Transmitted power	10 dBm

จากลักษณะเส้นกราฟที่แสดงในภาพจะเห็นได้ชัดเจนว่า สภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR ซึ่งขนาดของมุมตกกระทบจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ทำกรวัดค่า ตลอดตามแนวทางยาวของระบบราง เช่นเดียวกับภาพที่ 3.4 เป็นค่าที่ได้จากการใช้มุมตกกระทบขนาด 75 องศา เมื่อนำทั้งสองภาพมาเปรียบเทียบกัน ก็จะสามารถเห็นความแตกต่างของเส้นกราฟ และขนาดของกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมายังชุดสายอากาศได้ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับการสะท้อนของสัญญาณและการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการค้นหเป้าหมายเฉพาะต่อไป



ภาพที่ 3.3: Radar cross section measurements of flat plate, dihedral and trihedral by $\theta = 70^\circ$, vv -Polarization, [14]



ภาพที่ 3.4: Radar cross section measurements of flat plate, dihedral and trihedral by $\theta = 75^\circ$, vv -Polarization, [14]

3.2 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

การออกแบบระบบรางเลื่อนและระบบควบคุมการเคลื่อนที่เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่เป็นลักษณะของระบบ GB-SAR ที่จำเป็นจะต้องมีการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เครื่องมือวัดในขณะที่เป้าหมายหรือวัตถุที่ต้องการวัดค่าจะอยู่กับที่บนภูมิประเทศที่มีลักษณะต่ำกว่าตำแหน่งของชุดสายอากาศภาครับและภาคส่ง โดยระบบรางเลื่อนได้ถูกออกแบบให้สามารถรองรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (signal generator), อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาคือ spectrum analyzer และอุปกรณ์โครงสร้างสำหรับการจัดยึดสายอากาศ โดยสายอากาศที่ใช้จะเป็นลักษณะแบบ horn ซึ่งได้รับการออกแบบตามที่แสดงไว้ใน C.A. Balanis. (2008) ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยระบบรางเลื่อนจะ

มีความยาวรวม 5 เมตร สามารถถอดประกอบแยกเป็นชิ้นส่วนได้เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่คือมอเตอร์ไฟฟ้า (servo motor) ซึ่งสามารถปรับระยะทางการเคลื่อนที่ในแต่ละช่วงการวัด และความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านทางบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ได้ดังแสดงในภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกควบคุมผ่านทางเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้มีความสอดคล้องกันในการทำงานและสามารถบันทึกค่าการวัดได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 3.5: ภาพแสดงระบบการทำงานและอุปกรณ์ส่วนประกอบ, [15]

ในการทดลองนี้ได้กำหนดขนาดของตัวแปรต่างๆ ให้มีความสอดคล้องกับคุณสมบัติของเครื่องมือวัดและเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีอยู่ รวมถึงลักษณะทางกายภาพของสภาพแวดล้อมที่ได้ทำการทดลองด้วย โดยในการทดลองนี้ได้ใช้สถานที่บริเวณกองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่มีลักษณะเปิดโล่งไม่มีสิ่งกีดขวางในแนวการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศ ประกอบกับสามารถติดตั้งระบบรางให้มีการเคลื่อนไหวในแนวทิศทางขวางเพื่อสร้างสภาพแวดล้อมในการวัดให้เป็นแบบระบบ SAR แบบภาคพื้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3.6 โดยขนาดของตัวแปรต่างๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

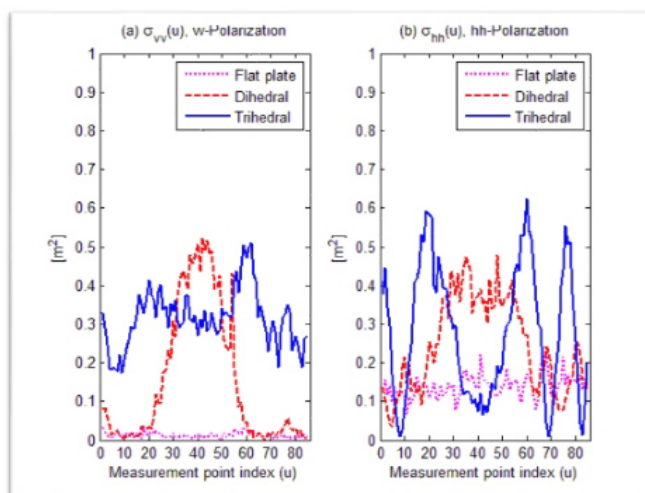


ภาพที่ 3.6: ภาพแสดงสถานที่ทำการทดลองและเป้าหมายทั้งสามแบบ, [15]

ตารางที่ 3.2: ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง, [15]

ตัวแปร	ขนาด
ความถี่	1.3 GHz
ความยาวของระบบรางในการวัด	4.20 m
ระยะห่างของจุดวัด	5 cm
อัตราการขยายของสายอากาศ	12 dBi
จำนวนจุดที่ทำการวัด	85
กำลังภาคส่ง	10 dBm
ความสูงของสายอากาศ	7 m
มุมตกกระทบ ณ จุดกึ่งกลาง	50 องศา
โพลาไรเซชัน	HH, VV

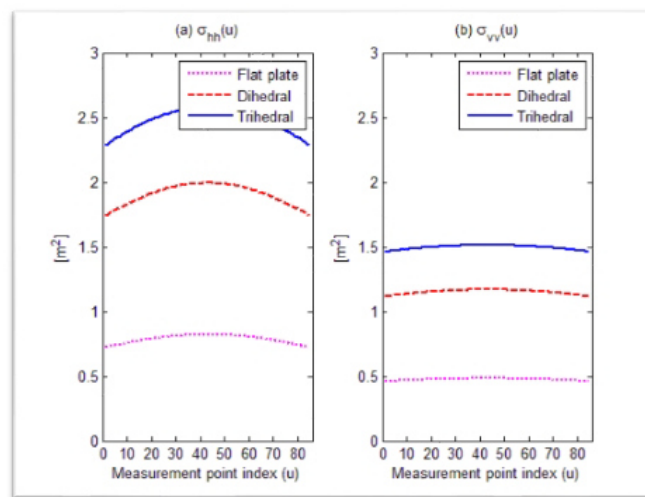
ภาพที่ 3.7 จะแสดงค่าที่ได้จากการวัด RCS ของเป้าหมายทั้งสามแบบ โดยใช้ตัวแปรต่างๆ ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และพื้นที่ทำการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.6 โดยในภาพที่ 3.7(a) จะแสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ VV และ ในภาพ 3.7(b) จะแสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ HH โดยจะแสดงผลด้วยรูปแบบเส้นที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะคือ เส้น ... จะแสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบ, เส้น - - จะแสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสองด้าน และ เส้น – จะแสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสามด้าน



ภาพที่ 3.7: ภาพแสดงค่าที่ได้จากการวัด RCS ของเป้าหมายทั้งสามแบบ, (a) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ VV และ (b) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ HH โดยเส้น ... แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบ, เส้น - - แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสองด้าน และ เส้น – แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสามด้าน, [15]

ภาพที่ 3.8 จะแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณหาค่า RCS ของเป้าหมายทั้งสามแบบโดยใช้หลักการ PO

แบบพื้นฐาน ซึ่งจะไม่คำนึงถึงการสะท้อนและผลกระทบที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบกับส่วนบริเวณขอบของเป้าหมายแบบต่างๆ โดยในภาพที่ 3.8(a) จะแสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ VV และในภาพที่ 3.8(b) จะแสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ HH เช่นเดียวกับผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 3.7 เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบจะมีการแสดงผลการประมวลผลด้วยเส้น 3 แบบด้วยกันคือเส้น ... จะแสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบ, เส้น - - จะแสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสองด้าน และ เส้น – จะแสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสามด้าน



ภาพที่ 3.8: ภาพแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณหาค่า RCS ของเป้าหมายทั้งสามแบบโดยใช้หลักการ PO แบบพื้นฐาน, (a) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ VV และ (b) แสดงค่าที่ได้จากการใช้โพลาไรเซชันแบบ HH โดยเส้น ... แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบ, เส้น - - แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสองด้าน และ เส้น – แสดงผลของแผ่นเหล็กเรียบเข้ามุมฉากสามด้าน, [15]

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สรุปผลการวัดค่าการสะท้อนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด

จากผลการทดลองพบว่า เป้าหมายเฉพาะแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบที่แตกต่างกัน เป็นรูปแบบเฉพาะของตัวเอง และค่าที่วัดได้ก็จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของชุดระบบเครื่องมือวัดที่เคลื่อนที่ไปตามแนวรางเลื่อนด้วย และจากการวิเคราะห์ลักษณะเส้นกราฟ ก็จะสามารถนำไปประยุกต์แนวความคิดการวิจัยเพื่อใช้จำแนกชนิดและลักษณะทางรูปทรงเรขาคณิตของเป้าหมายเฉพาะต่างๆ ได้ต่อไป, [14]

4.2 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองจะทำให้เห็นว่าเป้าหมายรูปแบบต่างๆ จะมีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบด้วยมุมที่แตกต่างกันเนื่องจากอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมของระบบ GB-SAR ที่ชุดอุปกรณ์และสายอากาศภาครับและภาคส่งจะมีการเคลื่อนที่ไปตามแนวขวางกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยผลการทดลองที่ได้จากการวัดจะมีลักษณะเฉพาะตัวของเป้าหมายแต่ละรูปแบบ โดยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของชุดอุปกรณ์เครื่องมือและลักษณะโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบและสะท้อนกลับมายังสายอากาศภาครับ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้หลักการ PO จะมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะเป็นเพราะในการประมวลผลนั้น ยังไม่ได้คำนึงถึงความเป็นไปได้ทั้งหมดของการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะแต่ละแผ่นที่ประกอบขึ้นเป็นรูปทรงเฉพาะนั้นๆ อีกทั้งระยะความยาวของระบบรางจะมีลักษณะค่อนข้างสั้น ทำให้ความแตกต่างของมุมตกกระทบมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับมุมตกกระทบที่จุดกึ่งกลางของระบบราง โดยสรุปแล้ว ผลการทดลองเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ และสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลหนึ่งในการวิจัยต่อไปในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับ การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ GB-SAR ต่อไป, [15]

บทที่ 5

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในการทดลองวัดค่าในสภาพสถานที่เปิดนั้น จะมีผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากวัตถุอื่นๆโดยรอบ เพื่อให้การวัดสามารถทำได้แม่นยำมากขึ้น อาจจะสามารถทำได้โดยเข้าไปทำการวัดในห้องที่มีวัสดุดูดซับสัญญาณ หรือปรับใช้เครื่องมือวัดที่มีค่าความแม่นยำและละเอียดสูงมากขึ้น, [15]

บทที่ 6
Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

6.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

รอตีพิมพ์

6.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

มีการนำงานวิจัยไปใช้ในการพัฒนาการเรียนการสอนของ นักเรียนนายร้อย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร

6.3 อื่นๆ

6.3.1 National conference proceeding

1. N. Phruksahiran "The Measurements of Backscattered Electromagnetic Waves from Canonical Targets under GB-SAR Environment" in Geoinfotech 2016, 3-5 February 2016.

6.3.2 International conference proceeding

1. N. Phruksahiran, S. Petchatree and M. Chandra, "Radar Cross Section Measurements under ground-based Synthetic Aperture Radar Environment", 2015 IEEE International Conference on Antenna Measurements & Application (CAMA), Doi:10.1109/CAMA.2015.7428127.

บรรณานุกรม

- [1] C. A. Balanis, "Aperture antennas: waveguides and horns," in *Modern antenna handbook*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 97-156.
- [2] J. C. Curlander and R. N. McDonough, "Introduction to SAR," in *Synthetic aperture radar : systems and signal processing*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991, pp. 1-66.
- [3] M. I. Skolnik, "Synthetic aperture radar," in *Radar handbook*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, Inc., 1990, pp. 21.1-21.21.
- [4] H. Klausing and W. Holpp, "Anwendungen und Systembeispiele," in *Radar mit realer und synthetischer Apertur : Konzeption und Realisierung*, Wien: Oldenbourg, 2000, pp. 361-384.
- [5] I. G. Cumming and F. H. Wong, "SAR processing algorithms," in *Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation*, Norwood, MA: Artech House, 2005, pp. 223-480.
- [6] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, Mar. 1996.
- [7] J. S. Lee and E. Pottier, "Introduction to the polarimetric target decomposition concept," in *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2009, pp. 179-225.
- [8] H. Mott, "Classification of targets," in *Remote sensing with polarimetric radar*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 225-256.
- [9] R. B. Dybdal, "Radar cross section measurements," *Proc. IEEE*, vol. 75, no. 4, pp. 498-516, Apr. 1987.
- [10] V. Alberga, E. Krogager, M. Chandra and G. Wanielik, "Potential of coherent decompositions in SAR polarimetry and interferometry," in *Proc. IGRASS'04*, 2004, pp. 1972-1975.
- [11] C. Elachi, T. Bicknell, R. L. Jordan and C. Wu, "Spaceborne synthetic aperture imaging radar: applications, techniques and technology," *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 10, pp. 1174-1209, Oct. 1982.

- [12] C. Wu, K. Y. Liu and M. Jin, "Modeling and correlation algorithm for spaceborne SAR signals," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. aes-18, no. 5, pp. 563-575, Sep. 1982.
- [13] R. Horn, "The DLR airborne SAR project E-SAR," in *Proc. IGRASS'96*, 1996, pp. 1624-1628.
- [14] N. Phruksahiran, S. Petchatree and M. Chandra, "Radar Cross Section Measurements under ground-based Synthetic Aperture Radar Environment", in *2015 IEEE International Conference on Antenna Measurements & Application (CAMA)*, Doi:10.1109/CAMA.2015.7428127.
- [15] N. Phruksahiran, "The Measurements of Backscattered Electromagnetic Waves from Canonical Targets under GB-SAR Environment" in *Geoinfotech 2016*, 3-5 February 2016