**ชื่อโครงงาน แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่น**

**จัดทำโดย นายธฤตวัน เสาะสมบูรณ์**
**ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 โรงเรียนโพธิสารพิทยากร**
**ชื่อนักวิทยาศาสตร์พี่เลี้ยง นายอภิวัฒน์ จิรวัฒนผล**
**สถาบันนักวิทยาศาสตร์พี่เลี้ยง บริษัท เอ็นบีสเปซ จำกัด**

**โครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์สำหรับเด็กและเยาวชน**
**ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและปริญญาตรี รุ่นที่ 26 ประจำปี 2566**
**สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ**

# บทคัดย่อ

โครงงานพัฒนาแขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่น มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการทำงานและพัฒนาแขนกลสำหรับสถานีภาคพื้นดิน (Ground Station) ที่ใช้สายอากาศทิศทางในการรับสัญญาณดาวเทียม ให้สามารถทำงานได้ ทนต่อสภาพอากาศที่กำหนดได้ มีความเร็วในการเปลี่ยนทิศทางที่เพียงพอสำหรับดาวเทียมที่มีวงโคจรต่ำที่สุดในเชิงทฤษฎี สามารถรับน้ำหนักของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่บนแขนกลได้ และสามารถเคลื่อนที่ไปยังมุมที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยใช้วิธีวิจัยเชิงทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง ดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 1** ทดสอบการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งเริ่มต้นได้ถูกต้องแม่นยำ ได้ทำการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งเริ่มต้น เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ และหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด 50 รอบ

**การทดลองที่ 2** การทดสอบโดยเริ่มจากตำแหน่งสุ่ม ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยเริ่มจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้ เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ และหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด 20 รอบ

**การทดลองที่ 3** ทำการวัดแรงดึงที่แขนกลสามารถทำได้ โดยกำหนดให้ตำแหน่งวัด ห่างจากจุดหมุน ระยะ 1 เมตร จากนั้นจึงเพิ่มน้ำหนักขึ้นครั้งละ 0.5 กิโลกรัม และทำการบันทึกผล

**การทดลองที่ 4** การนำไปใช้งานจริงและอ่านค่าสัญญาณที่ได้รับจากดาวเทียม โดยนำแขนกลไปติดตั้งใช้งานจริง และวัดระดับสัญญาณจากดาวเทียม แล้วบันทึกค่าที่ได้รับ

ผลการวิจัยพบว่า แขนกลติดตามดาวเทียมนั้น ผ่านเกณฑ์ที่วางแผนไว้และบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยมีอัตราความผิดพลาดสำหรับการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นน้อยกว่า 1 องศา และมีอัตราความผิดพลาดจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการน้อยกว่า 2 องศา ซึ่งเพียงพอสำหรับการรับสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้แขนกลควบคู่กับสายอากาศทิศทาง และมีแรงบิดอยู่ที่ 5 นิวตัน-เมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานกับสายอากาศทิศทางขนาดเล็ก-กลาง ที่มีการถ่วงดุลน้ำหนัก และสามารถทำงานได้ในสภาพอากาศในประเทศไทย โดยในการทดสอบจะใช้ในช่วง อุณหภูมิ 20-55 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 45-80% และทดสอบการทำงานในที่เปียกชื้นขณะฝนตก

# กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่น สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจาก นายอภิวัฒน์ จิรวัฒนผล ประธานเจ้าหน้าที่บริหาร บริษัท เอ็นบีสเปซ จำกัด ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้องคิด ข้อแนะนำ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี
ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้สนับสนุนให้ทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนรวมถึงคนรอบตัวของข้าพเจ้าที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

# คำนำ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอโครงการพัฒนาอัจฉริยภาพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับเด็กและเยาวชน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในหัวข้อ “แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่น” มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแขนกลจำลองขนาดเล็กสำหรับใช้ในการติดตามดาวเทียมอัตโนมัติขึ้น สำหรับอำนวยความสะดวกในการทำงาน มีขนาดกระทัดรัด สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ศึกษาความสัมพันธ์ในตัวแปรและการรับค่าพิกัดในการการระบุทิศทางตำแหน่งของดาวเทียม ที่สามารถติดตามได้ถูกต้องแม่นยำทดแทนการใช้มนุษย์

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจที่จะศึกษา “แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่น” หากมีข้อแนะนำหรือข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| **บทคัดย่อ** | ก |
| **กิตติกรรมประกาศ** | ข |
| **คำนำ** | ค |
| **สารบัญ** | ง |
| **บทที่ 1 บทนำ** | 1 |
| ดาวเทียมคืออะไร | 1 |
| สถานีภาคพื้นดิน | 3 |
| ที่มาและความสำคัญของโครงงาน | 4 |
| วัตถุประสงค์ | 5 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 5 |
| **บทที่ 2 การศึกษาเอกสารอ้างอิง** | 6 |
| แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| โครงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 10 |
| **บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงงาน** | 11 |
| การคำนวณ | 12 |
| โครงสร้างของแขนกล | 15 |
| โปรแกรมควบคุม | 17 |
| การนำไปใช้งานจริง | 22 |
| เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ | 23 |
| การทดสอบ | 24 |
| คลิปวีดีโอแนบ | 24 |
| **บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน** | 25 |
| **บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ** | 27 |
| สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ | 27 |
| ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน | 27 |
| การทดลองเพิ่มเติม | 28 |
| บรรณานุกรม | 30 |

# บทที่ 1 บทนำ

การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นอีกหนึ่งช่องทางในการติดต่อสื่อสารที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในโลกปัจจุบัน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 เป็นต้นมา การติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมได้สร้างคุณประโยชน์ให้แก่มวลมนุษยชาติในหลายๆด้าน เช่น เครือข่ายโทรศัพท์ที่อาศัยดาวเทียมในการเชื่อมต่อซึ่งกันและกัน การกระจายสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม ส่งผลทำให้ผู้คนสามารถรับรู้ข่าวสารและเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกมากขึ้น แม้จะอยู่ในพื้นที่ห่างไกลก็ตาม [1]

## ดาวเทียมคืออะไร

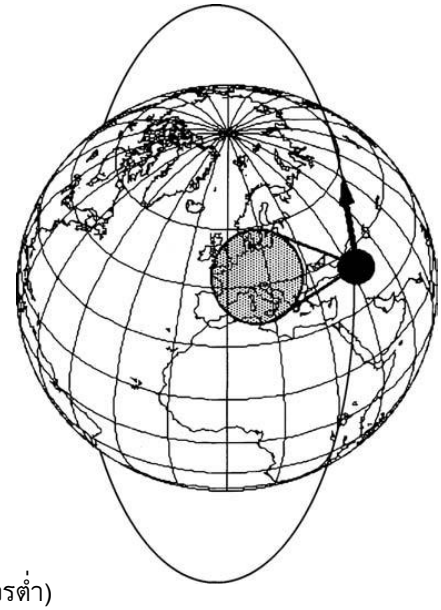
ดาวเทียม คือสิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์สร้างขึ้นมา สามารถโคจรรอบโลกโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก ส่งผลให้สามารถโคจรรอบโลกได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ดวงจันทร์โคจรรอบโลก และโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ ดาวเทียมนั้นถูกส่งขึ้นสู่อวกาศด้วยจรวดหลากหลายประเภท โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักของดาวเทียม ซึ่งจะทำหน้าที่ผลักดันดาวเทียมให้มีความเร็วสูงพอที่จะหลุดพ้นแรงดึงดูดของโลกและนำดาวเทียมไปยังวงโคจรที่ต้องการ

วงโคจรของดาวเทียม มีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานและประเภทของดาวเทียม โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ [2-3]

•**วงโคจรต่ำ (LEO)** อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 200-2,000 กิโลเมตร ข้อดีของวงโคจรประเภทนี้คือมีความหน่วงของสัญญาณ (Latency) ในการติดต่อระหว่างดาวเทียมกับพื้นโลกที่ต่ำที่สุดในบรรดาวงโคจรทั้ง 3 ประเภท จึงเหมาะสำหรับดาวเทียมที่ต้องการถ่ายภาพความละเอียดสูง หรือดาวเทียมสื่อสารโทรคมนาคม ข้อเสียของวงโคจรประเภทนี้คือมีพื้นที่ครอบคลุมของดาวเทียม (Coverage Area) ที่ต่ำกว่าวงโคจรประเภทอื่นเป็นอย่างมาก ส่งผลทำให้ต้องใช้ต้นทุนผลิตดาวเทียมและยิงขึ้นไปบนอวกาศเป็นจำนวนมากในการที่จะสามารถบริการลูกค้าได้ตลอดเวลา การรับสัญญาณมีความซับซ้อนมากกว่าดาวเทียมประเภท GEO ทำให้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณภาคพื้นดินมีราคาสูง

•**วงโคจรระดับกลาง (MEO)** อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 2,000-35,786 กิโลเมตร ข้อดีของวงโคจรประเภทนี้คือมีพื้นที่ครอบคลุมของดาวเทียมที่มากกว่าวงโคจรต่ำ มีความจำเป็นที่จะต้องยิงดาวเทียมขึ้นไปยังวงโคจรสำหรับการบริการที่น้อยกว่า และยังมีความหน่วงของสัญญาณที่สามารถใช้งานในกิจการส่วนใหญ่ได้ จึงเหมาะสำหรับดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา ดาวเทียมนำร่อง และบริการอินเทอร์เน็ตผ่านดาวเทียม (Satellite Internet) ข้อจำกัดของวงประเภทนี้คือมีความหน่วงของสัญญาณมากกว่าวงโคจรต่ำ และตำแหน่งของดาวเทียมที่เคลื่อนที่ตลอดเวลาเหมือนวงโคจรต่ำ ส่งผลทำให้เกิดขวามซับซ้อนในการรับสัญญาณ

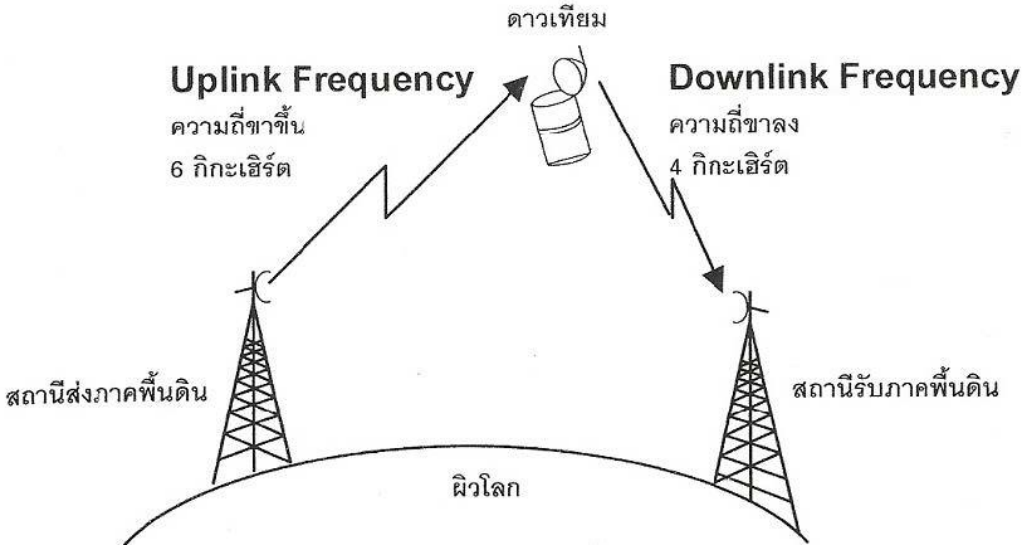
•**วงโคจรสูง (GEO)** อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 35,786 กิโลเมตร วงโคจรประเภทนี้เป็นวงโคจรค้างฟ้า ทำให้การติดตั้งและรับสัญญาณสามารถทำได้อย่างเรียบง่าย มีพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณดาวเทียมถึง 1 ส่วน 3 ของโลก เหมาะสำหรับดาวเทียมสื่อสาร หรือดาวเทียมติดตามสภาพอากาศที่อาศัยความคงที่ของตำแหน่งดาวเทียม ทำให้สามารถเก็บข้อมูลและนำไปประมวลผลได้อย่างสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากพื้นที่ที่สามารถรับรองดาวเทียมในวงโคจรมีจำกัด ทำให้บริษัทต่างๆต้องทำการแข่งขันและประมูลราคากันเอง รวมถึงต้องปฏิบัติตามระเบียบข้อบังคับที่มีความซับซ้อน วงโคจรประเภทนี้ยังมีความหน่วงของสัญญาณที่สูง จึงไม่เหมาะสำหรับบริการที่ให้ความสำคัญกับปัญหานี้อีกด้วย



**ภาพที่ 1** วงโคจรแบบโพล่า (วงโคจรต่ำ)

**ที่มา** Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology (5th Edition) [4]

**หลักการสื่อสารของดาวเทียมสื่อสารในเบื่องต้น** อาศัยวงจรสื่อสารแบบสองทาง (duplex communication circuit) เมื่อสถานีภาคพื้นดินส่งคลื่นความถี่วิทยุขึ้นไปยังดาวเทียมซึ่งจะเรียกว่าความถี่เชื่อมโยงขาขึ้น (Up-Link Frequency) ดาวเทียมจะรับสัญญาณเข้ามาแล้ว ทวนสัญญาณให้แรงขึ้นพร้อมกำจัดสัญญาณรบกวนออกไป ก่อนส่งสัญญาณกลับมายังพื้นดิน ทั้งนี้ดาวเทียมจะทำการเปลี่ยนความถี่คลื่นไมโครเวฟให้แตกต่างไปจากความถี่ขาขึ้นแล้วจึงส่งความถี่กลับลงมาเรียกว่า ความถี่เชื่อมโยง ขาลง (Down-Link Frequency)

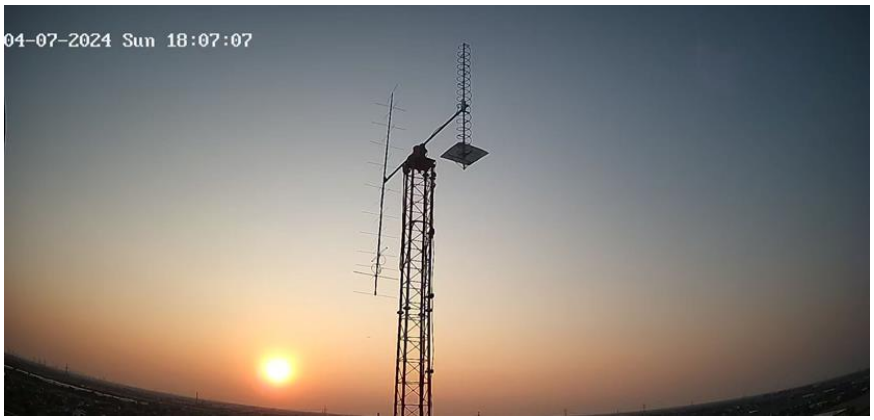



**ภาพที่ 2** การใช้ดาวเทียมสื่อสารในการทวนสัญญาณไมโครเวฟ

**ที่มา** นายหัสนัย ริยาพันธ์ การสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite Communication) [5]

## สถานีภาคพื้นดิน

สถานีภาคพื้นดินดาวเทียม (Satellite ground station) เป็นสถานที่ที่ใช้สื่อสารกับดาวเทียม โดยมีการรับและส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างดาวเทียมกับโลก สถานีภาคพื้นดินทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับผู้ใช้บนโลก โดยมักใช้ในการรับสัญญาณสำหรับการโทรทัศน์ดาวเทียม การสื่อสารดาวเทียม การเฝ้าระวังดาวเทียม และภารกิจอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม สถานีภาคพื้นดินมักจะมีอุปกรณ์สื่อสารสำหรับรับและส่งสัญญาณ เช่น จานรับสัญญาณดาวเทียม (dish antenna) และอุปกรณ์สื่อสารเสริมอื่น ๆ ที่จำเป็น เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับดาวเทียมได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ สถานีพื้นดาวเทียมยังมีความสำคัญอย่างมากในการรับส่งข้อมูลจากดาวเทียมมายังโลกและจากโลกสู่ดาวเทียมในกิจการต่าง ๆ เช่น การสื่อสารทางทหาร การรายงานข้อมูลภัยธรรมชาติ การกระจายสัญญาณโทรทัศน์ การสำรวจอวกาศ และบริการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม การเป็นสถานีพื้นดาวเทียมที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยให้การสื่อสารดาวเทียมเป็นไปอย่างเสถียรและมีประสิทธิภาพในการทำงานอย่างต่อเนื่องได้ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของโครงงานนี้จะเป็นการศึกษาและพัฒนาในส่วนของสถานีภาคพื้นดินนั่นเอง




**ภาพที่ 3** ตัวอย่างสถานีภาคพื้นดินที่มหาวิทยาลัยมหานคร กรุงเทพฯ

**ภาพที่ 4** ตัวอย่างสถานีภาคพื้นดินสำหรับติดตามดาวเทียมขนาดใหญ่
ที่มหาวิทยาลัยมหานคร กรุงเทพฯ

## ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังเร่งพัฒนาอุตสาหกรรมอวกาศ และได้เข้าสู่ยุค New Space คือ พื้นที่ในอวกาศเป็นคล้ายสนามเด็กเล่น ไม่เพียงเปิดกว้างแต่องค์กรใหญ่ๆ หรือเอกชนรายใหญ่เท่านั้นในปัจจุบัน สถานศึกษาต่างๆ บริษัทเอกชนรายย่อยและสตาร์ทอัพรายใหม่ๆ ก็สามารถก้าวไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆไปด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ดาวเทียมไทยโชต - ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติที่ดำเนินงานโดย สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISDA), JAISAT - ดาวเทียมวิทยุสมัครเล่น , KNACKSAT1, KNACKSAT2 - พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (KMUTNB) และได้ถูกส่งเข้าสู่วงโคจรเรียบร้อยแล้ว ในขณะที่ข้าพเจ้ากำลังเขียนรายงานฉบับนี้อยู่นั้น ทางมหาลัยดังกล่าวก็กำลังพัฒนาดาวเทียมขนาดเล็กดวงใหม่ที่มีชื่อว่า KNACKSAT3 อยู่เช่นกัน

จากตัวอย่างทั้งหมดนี้จำเป็นจะต้องมีหลายหลายฝ่ายที่จะต้องมีทีมงานดูแล หน่วยที่มีความจำเป็นและขาดไม่ได้เลยคือ หน่วยภาคพื้นดิน (Ground Station) ที่จะต้องคอยทำหน้าที่ติดดาวเทียมและรับ-ส่งสัญญาณ ส่งชุดคำสั่งให้ดาวเทียมทำภาระกิจใดๆ ตรวจสอบสถานะดาวเทียม และรับสัญญาณเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และใช้งานต่อไป ซึ่งข้าพเจ้ามีความสนใจพัฒนาแขนกลขนาดเล็กที่ใช้ในการติดตามดาวเทียมโดยอัตโนมัตินี้ขึ้น เพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกทำให้การทำงานง่ายขึ้น รวมถึงการระบุทิศทาง และตำแหน่งของดาวเทียมที่ติดตามได้ถูกต้องแม่นยำทดแทนการใช้คน ซึ่งการประดิษฐ์นี้ สามารถใช้ทั้งในกิจการวิทยุสมัครเล่น อุตสาหกรรมอวกาศและกิจกรรมอื่นๆต่อไป

เนื่องจากแขนกลสำหรับติดตามดาวเทียม ยังมีไม่แพร่หลายนัก รวมถึงยังมีราคาที่สูงเมื่อใช้งานแขนกลที่ออกแบบสำหรับใช้งานในเชิงพาณิชย์ การการติดต่อดาวเทียมผ่านการถือสายอากาศทิศทาง และชี้ไปยังดาวเทียมที่ต้องการติดต่อด้วยตนเอง ทำให้การติดต่อสื่อสารผ่านทางดาวเทียมวงโคจรต่ำ นั้นเป็นไปด้วยความยากลำบาก เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านน่านฟ้าของดาวเทียมมีอัตราที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับดาวเทียมวงโคจรสูง ทำให้ความแม่นยำในการติดตามดาวเทียมด้วยมือต่ำ ข้าพเจ้าจึงต้องการที่จะนำเอาโครงงานที่คล้ายกันมาพัฒนาต่อให้สามารถประกอบขึ้นเองได้ที่บ้านในราคาที่ถูกลง ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ พกพาได้สะดวก รวมถึงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นตามเกณฑ์ที่ข้าพเจ้าตั้งและสามารถนำไปใช้งานจริงได้อีกด้วย

การทดลองนี้ยังสามารถนำสิ่งประดิษฐ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในกิจการด้านอื่นๆได้อีก ที่ต้องการความแม่นยำในการติดตาม เช่น การติดตามเครื่องบิน ทั้งเครื่องบินพาณิชย์ เรือเดินสมุทร หรือ พัฒนาไปในระบบที่ใหญ่ขึ้นเช่น ทางด้านความปลอดภัยของประเทศ เช่น ติดตามเครื่องบินรบ เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการสร้างป็นต่อสู้อากาศยาน , การติดต่อสื่อสารทางไกล ที่แม่นยำและรวดเร็ว, ข้อมูลทางด้านภูมิศาสตร์และสภาพอากาศที่นำมาปรับใช้กับการเพาะปลูกและการเกษตรกรรม รวมไปถึงการติดตามอากาศยานไร้คนขับสำหรับฉีดปุ๋ย ยาฆ่าแมลง หรืองานสำรวจพืชผลทางการเกษตร หรืองานอื่นๆที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งสามารถประยุกต์แขนกล และระบบนี้ทดแทนแรงงานจากมนุษย์ได้เช่นกัน

## วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. พัฒนาแขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมให้สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวก น้ำหนักโดยรวมน้อยกว่า 5 กิโลกรัม ไม่รวมน้ำหนักของสายอากาศ และฐานเครื่อง
2. พัฒนาแขนกลให้สามารถรับน้ำหนักของสายอากาศที่ใช้ในงานจริง ซึ่งมีน้ำหนักโดนสายอากาศจะมีน้ำหนักโดยประมาณ 2-3 กก. ต่อข้าง และรวมการถ่วงน้ำหนัก ให้สามารถทำงานติดตามดาวเทียมได้อย่างสมบูรณ์ตามปกติ
3. พัฒนาแขนกลที่สามารถติดตามดาวเทียมโดยใช้กลุ่มตัวเลขเรียงกันสองบรรทัด (TLE Two line Element Set) ซึ่งเป็นชุดตัวเลขมาตรฐานในการป้อนค่าเข้าสู่ระบบ และนำไปใช้ในการคำนวณ และระบุค่าพิกัดของดาวเทียม และคำนวนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ในขั้นตอนถัดไป
4. พัฒนาแขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมให้มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่วางแผนไว้ ดังนี้
   4.1 สามารถทนสภาพอากาศทั่วไป และสภาวะวิกฤตของอากาศในประเทศไทย
   4.2 มีความเร็วในการเปลี่ยนทิศทางที่เพียงพอสำหรับดาวเทียมที่มีวงโคจรต่ำที่สุดในเชิงทฤษฎี
   4.3 สามารถรับน้ำหนักของสายอากาศที่ติดตั้งอยู่บนแขนกลได้ (น้ำหนักรวมสูงสุด 6 กิโลกรัม หรือ 3 กก. ต่อด้าน)
   4.4 แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังมุมที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ตรงตามที่ออกแบบ
5. แขนกลใช้ชิ้นส่วนที่หาได้ทั่วไปและมีราคาถูกกว่าแขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมแบบพาณิชย์

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาและเรียนรู้หลักการทำงานของแขนกลอัตโนมัติ
2. ได้ศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานร่วมกันระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์ภายในแขนกล สำหรับควบคุมทิศทางการเคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งที่ต้องการ
3. ฝึกฝนการคิดวิเคราะห์และวางแผนในเชิงวิศวกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ
4. เรียนรู้วิธีการคำนวณอัตราทดเกียร์ และออกแบบฟันเฟืองที่มีความแข็งแรง

# บทที่ 2 การศึกษาเอกสารอ้างอิง

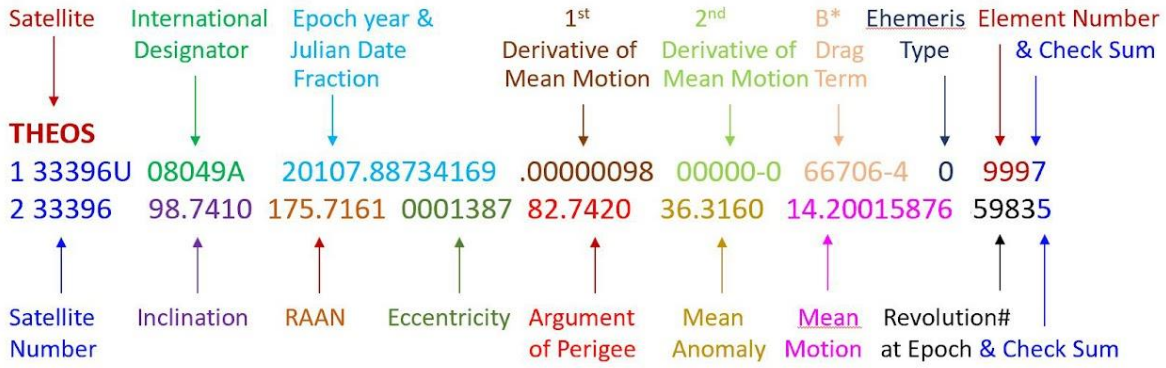
ในการวิจัยเรื่อง “แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่น” ในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี เอกสาร รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อนำแนวคิดและทฤษฎีมาปรับใช้ในการศึกษาให้เกิดประโยชน์ โดยจำเสนอตามลำดับดังต่อไปนี้

1. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. โครงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

**กลุ่มตัวเลขเรียงกันสองบรรทัด (TLE Two line Element Set)**

เป็นชุดตัวเลขมาตรฐานสำหรับการแสดงตำแหน่งและความเร็วของวัตถุที่โคจรรอบโลก ซึ่งใช้โดยศูนย์ควบคุมอวกาศ NORAD และองค์กรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการติดตามวัตถุในอวกาศ โดยในแต่ละตำแหน่งของกลุ่มตัวเลขเรียงกันสองบรรทัดจะมีข้อมูลของดาวเทียมดาวนั้นๆ ที่แตกต่างกันกันตามรูปด้านล่าง [6-9]



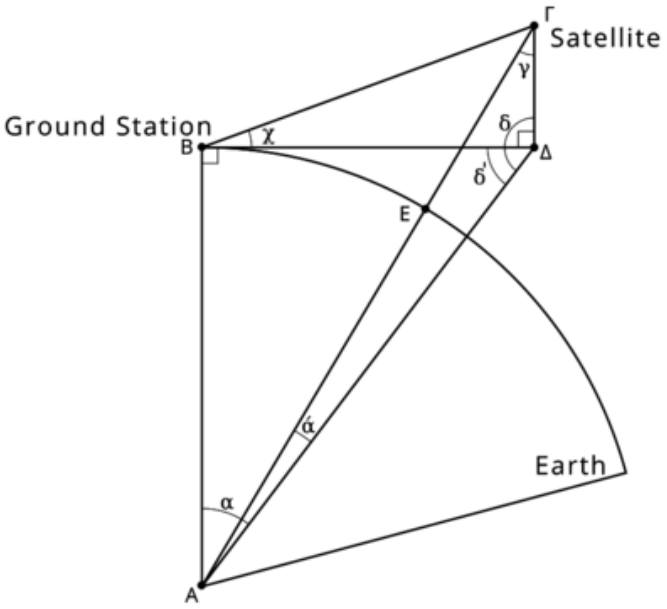

**ภาพที่ 5** การยกตัวอย่างการถอดรหัส TLE ของดาวเทียม THEOS

**ที่มา** ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์ [7]

ด้วยตัวอย่างของข้อมูลจากไฟล์ TLE นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เราสามารถดาวโหลดไฟล์เหล่านี้ ได้จากเว็บไซต์ celestrak.org ซึ่งเป็นตัวเลขมาตรฐาน และเราจะนำตัวเลขและข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการประมวลผลในลำดับถัดไป [8]

**ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)**

คือปริมาณที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมในหน่วยเวลาที่กำหนด วัดเป็นเรเดียนต่อวินาที (radians per second) มักใช้สัญลักษณ์ **ω** (โอเมก้า) ความเร็วเชิงมุมเป็นเวกเตอร์ที่มีทิศทางซึ่งกำหนดตามกฎมือขวา โดยหากหมุนตามเข็มนาฬิกาทิศทางของเวกเตอร์จะชี้เข้าหาตัวเรา และถ้าหมุนทวนเข็มนาฬิกาทิศทางของเวกเตอร์จะชี้ออกจากตัวเรา ความเร็วเชิงมุมมีความสำคัญในการศึกษาการเคลื่อนที่แบบหมุนของวัตถุต่าง ๆ ทั้งในฟิสิกส์และวิศวกรรม




**ภาพที่ 6** อธิบายความเร็วเชิงมุมของสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียม

**โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)**

โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) คือปริมาณที่บ่งบอกถึงความต้านทานของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงการหมุนของมันรอบแกนใดแกนหนึ่ง วัดในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg·m²) ปริมาณนี้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของมวลของวัตถุและระยะห่างจากแกนการหมุน วัตถุที่มีมวลมากและอยู่ห่างจากแกนหมุนมากจะมีโมเมนต์ความเฉื่อยมาก ซึ่งทำให้ต้องใช้แรงบิด (Torque) มากขึ้นในการเปลี่ยนแปลงการหมุนของวัตถุนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยมีความสำคัญในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบหมุนในหลายสาขา เช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมการบิน และฟิสิกส์

แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมที่ดีควรมีความสามารถในการต้านทางแรงบิดจากสายอากาศได้

**อัตราทดเฟือง (Gear Ratio)**

อัตราทดเฟือง (Gear ratio) คือ อัตราส่วนของจำนวนฟันเฟืองที่มีการสัมผัสกันระหว่างเฟืองสองตัวหรือมากกว่า เพื่อถ่ายทอดพลังงานและแรงบิดจากเฟืองตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่ง อัตราทดเฟืองจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการหมุนของเฟืองขับ (drive gear) กับเฟืองตาม (driven gear) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการหารจำนวนฟันเฟืองของเฟืองขับด้วยจำนวนฟันเฟืองของเฟืองตาม

**สูตรคำนวณอัตราทดเฟือง**

ในการคำนวณอัตราทดเฟือง (Gear Ratio) มีสูตรที่สามารถใช้ได้ง่าย ๆ ดังนี้:

อัตราทดเฟืองสำหรับเฟืองสองตัว:

$$\text{อัตราทดเฟือง} = \frac{\text{จำนวนฟันของเฟืองตาม}}{\text{จำนวนฟันของเฟืองขับ}}$$

อัตราทดเฟืองสำหรับความเร็วการหมุน:

$$\text{อัตราทดเฟือง} = \frac{\text{ความเร็วการหมุนของเฟืองตาม}}{\text{ความเร็วการหมุนของเฟืองขับ}}$$

**<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>**

1. **กรณีคำนวณจากจำนวนฟันเฟือง:**

   ถ้าเฟืองขับมี 10 ฟัน และเฟืองตามมี 20 ฟัน

   $$\text{อัตราทดเฟือง} = \frac{20}{10} = 2$$

   หมายความว่าเฟืองขับหมุน 2 รอบ เฟืองตามจะหมุน 1 รอบ

2. **กรณีคำนวณจากความเร็วการหมุน:**

   ถ้าเฟืองขับหมุนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที และเฟืองตามหมุนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที

   $$\text{อัตราทดเฟือง} = \frac{100}{50} = 2$$

   หมายความว่าเฟืองขับหมุน 2 รอบ เฟืองตามจะหมุน 1 รอบ

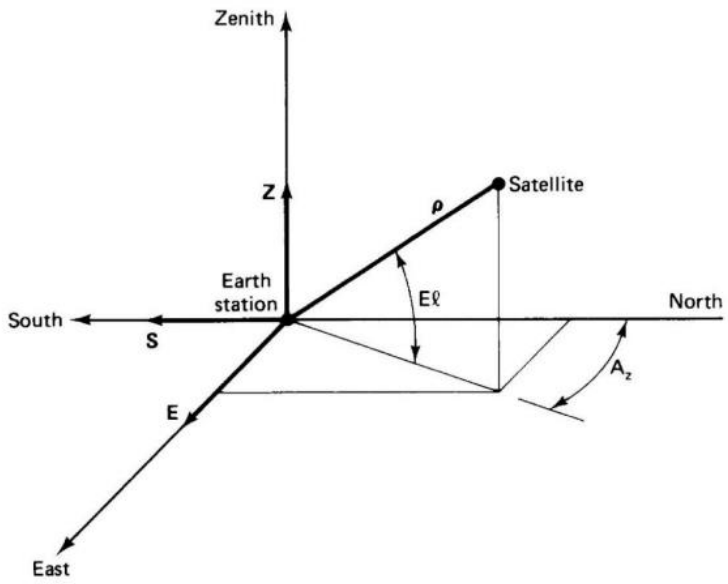
**การอ้างอิงตำแหน่งในระบบจานสายอากาศ (Azimuth & Elevation)**

**มุมแอซิมัท (Azimuth Angle):**

มุมแอซิมัทเป็นมุมในแกนตั้ง ซึ่งครอบคลุม 360 องศารอบตัวเรา โดยทั่วไปทิศเหนือจะอยู่ที่ 0 องศา ทิศตะวันออก 90 องศา ทิศใต้ 180 องศา และทิศตะวันตก 270 องศา และเมื่อทิศเหนือถือเป็น 360 องศา มุมนี้จะวนลูปจาก 0 ถึง 360 องศา

**มุมยก (Elevation Angle):**

มุมยกเป็นมุมระหว่างเส้นตรงและระนาบแนวนอนของเสาอากาศ โดยมุมยกที่ 0 องศาเมื่อแสงของเสาอากาศอยู่ในแนวขอบฟ้า และมุมยกที่ 90 องศาเมื่อแสงชี้ตรงขึ้นไป และเมื่อตรงกันข้ามกับขอบฟ้าจะเป็น 180 องศา ดังนั้นมุมยกจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 180 องศา




**ภาพที่ 7** อธิบายความเร็วเชิงมุมของสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียม

**ที่มา** [10]

## โครงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย "Autonomous Satellite Tracker" โดย Elwood Downey ได้อธิบายถึงการพัฒนาตัวติดตามดาวเทียมของโลกแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ โดยใช้เซ็นเซอร์ 9-DOF (degrees of freedom) ที่ติดตั้งบนสายอากาศควบคู่กับเครื่องรับสัญญาณ GPS เพื่อให้สามารถติดตามดาวเทียมได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องมีการจัดตำแหน่งล่วงหน้า

แขนกลในงานวิจัยนี้ทำงานโดยใช้กิมบอล 2 แกน และมีความผิดพลาดในการติดตามน้อยกว่า 2 องศา โดยอาศัยเซ็นเซอร์เชิงพื้นที่ที่ติดตั้งในตัวทั้งหมด คุณสมบัติของแขนกลดังกล่าวมีดังนี้

1. **ไม่ต้องจัดตำแหน่งล่วงหน้า**: ระบบนี้กำจัดความจำเป็นในการจัดตำแหน่งหรือการสอบเทียบล่วงหน้า ทำให้การตั้งค่าและการใช้งานง่ายขึ้น
2. **การติดตามแบบเรียลไทม์**: ใช้การผสมผสานของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก, แอคเซลเลอโรมิเตอร์ และไจโรสโคป เพื่อกำหนดทิศทางเชิงพื้นที่และติดตามดาวเทียมแบบเรียลไทม์
3. **การควบคุมผ่านเว็บ**: มีเว็บเซิร์ฟเวอร์ในตัวและจุดเชื่อมต่อ Wi-Fi ที่อนุญาตให้ตรวจสอบและควบคุมผ่านเว็บเบราว์เซอร์ต่างๆ รวมถึงสมาร์ทโฟน
4. **คุ้มค่า**: ใช้ส่วนประกอบที่หาซื้อได้ทั่วไป โดยมีค่าใช้จ่ายรวมประมาณ 13,000 บาท ไม่รวมสายอากาศ

งานวิจัยนี้เน้นย้ำถึงแนวทางใหม่ในการติดตามดาวเทียมโดยใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์สมัยใหม่เพื่อทำให้กระบวนการติดตามง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น [11]

งานวิจัยเรื่อง " Design and Development of Low Cost Ground Receiving Station for LEO Satellite Operations " โดย A. Saravanakumar, A. Kaviyarasu และ U. Manikandan มุ่งเน้นการสร้างสถานีภาคพื้นดินที่มีต้นทุนต่ำสำหรับการติดตามดาวเทียมวงโคจรต่ำ (LEO) โดยใช้เทคโนโลยี Software-Defined Radio (SDR) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการสนับสนุนภารกิจดาวเทียมของมหาวิทยาลัยด้วยระบบที่ยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพด้านทรัพยากร

ต้นแบบสถานีภาคพื้นดินที่ใช้เทคโนโลยี SDR นี้สามารถอำนวยความสะดวกในการสื่อสารกับดาวเทียมและการรับข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เป็นทรัพยากรที่มีค่าสำหรับสถาบันการศึกษา และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยี SDR ที่มีต้นทุนต่ำและยืดหยุ่นในการพัฒนาความสามารถในการติดตามและการสื่อสารกับดาวเทียม [12]

วิทยานิพนธ์โดย Alam, Islam, Mansoor, และ Ahmad นำเสนอระบบติดตามดาวเทียมแบบอัตโนมัติสำหรับเสาอากาศทิศทาง ระบบนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารกับดาวเทียมขนาดเล็กที่โคจรอยู่บริเวณวงโคจรต่ำโดยการรักษาการติดต่อที่แม่นยำระหว่างเสาอากาศสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียม ใช้มอเตอร์กระแสตรงสำหรับการหมุนในแนวราบและแนวตั้ง ควบคุมโดยหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ที่ประมวลผลข้อมูลตำแหน่งดาวเทียม เพื่อความแม่นยำในการตั้งตำแหน่งเสาอากาศ ระบบนี้ยังรองรับทั้งการทำงานแบบแมนนวลและอัตโนมัติ [13]

# บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงงาน

**ภาพที่ 8** แขนกลติดตามดาวเทียม พร้อม
ระบบโซล่าเซลล์

รูปด้านซ้าย คือ แขนกลติดตามดาวเทียมที่ผู้ข้าพเจ้าได้จัดทำขึ้น รวมไปถึงการพัฒนาติดตั้งแผงโซล่าเซลล์เพื่อให้สามารถใช้พลังงานจากตัวเอง และนำไปทดลองติดตามสถานีอากาศนานาชาติ ISS เพื่อทดสอบการทำงานทั่วไปของระบบ และนำไปติดตามดาวเทียม Meteor-M N2-3 ดาวเทียมรายงานสภาพอากาศ

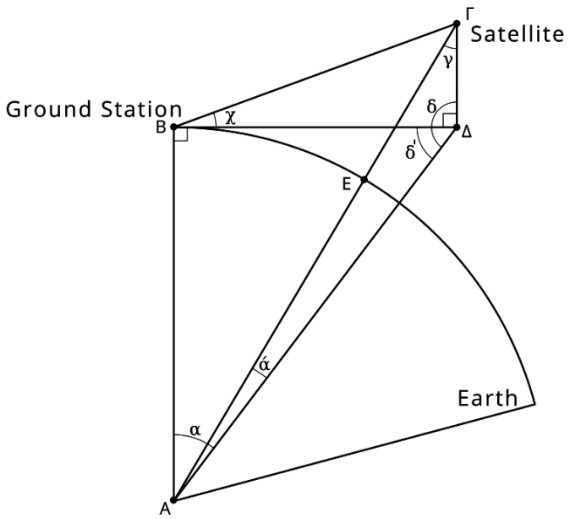
ผลปรากฏว่า แขนกลติดตามดาวเทียม สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ โดยจะกล่าวถึงวิธีการดำเนินโครงการในลำดับถัดไป ถึงวิธีทำโดยคร่าว การประกอบ การติดตั้งโปรแกรม และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ในลำดับถัดไป และสามารถดูคลิปวีดีโอได้ตามลิงค์เว็บไซต์ด้านล่างที่แนบมานี้

https://www.youtube.com/shorts/D1ZdOJ6ivsM

วิธีการดำเนินงาน สามารถแยกออกได้เป็น 3 ส่วน คือส่วนของการคำนวน โครงสร้างของแขนกล และส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมแขนกล โดยจะกล่าวครั้งละหัวข้อเป็นลำดับถัดไป

## การคำนวณ

ในการติดตามดาวเทียมที่วงโคจรต่ำของโลก (LEO) ด้วยแขนกล นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของการหมุนในมุมแอซิมัท (AZ angular velocity) และความสูงสูงสุดที่สามารถติดตามได้ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้:




### สัญลักษณ์และค่าคงที่ที่ใช้

- ω : ความเร็วเชิงมุมของมุมอะซิมุทในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s)
- H = AE + EΓ : ความสูงต่ำสุดของ LEO, 160 กิโลเมตร
- R = AE : รัศมีของโลก, 6500 กิโลเมตร
- u : ความเร็วเชิงเส้นของดาวเทียมที่ความสูง 160 กิโลเมตร, 7.8 กิโลเมตรต่อวินาที
- BΔ = u / ω : ระยะทางในหน่วยกิโลเมตร

### การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

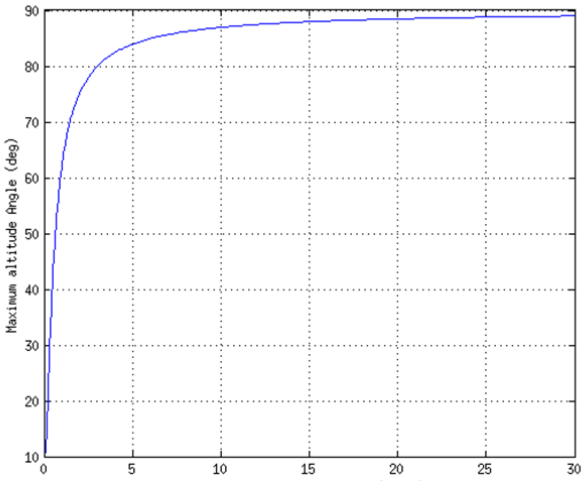
1. α = atan(BΔ / R)
    - หามุม α ซึ่งเป็นมุมที่ระยะทาง BΔ ทำมุมกับรัศมีของโลก R

2. $\delta = \pi - \alpha$
    - หามุม $\delta$ ซึ่งเป็นมุมที่เกิดขึ้นจากการลบมุม $\alpha$ จาก $\pi$
3. $\gamma = \text{asin}( \text{sqrt}(R^2+B\Delta^2) * \sin(\delta) / (H+R) )$
    - หามุม $\gamma$ โดยใช้กฎของไซน์ (law of sines) ในสามเหลี่ยมที่สร้างจาก R, $B\Delta$ และ H+R
4. $\acute{\alpha} = \pi - \delta - \gamma$
    - หามุม $\acute{\alpha}$ ซึ่งเป็นมุมที่เกิดจากการลบมุม $\delta$ และ $\gamma$ จาก $\pi$
5. $\Gamma\Delta = (H+R) * \sin(\acute{\alpha}) / \sin(\delta)$
    - หาระยะทาง $\Gamma\Delta$ ในสามเหลี่ยมที่สร้างจาก H+R, $\acute{\alpha}$ และ $\delta$
6. $\chi = \text{atan}(\Gamma\Delta / B\Delta)$
    - หามุม $\chi$ ซึ่งเป็นมุมที่ระยะทาง $\Gamma\Delta$ ทำมุมกับระยะทาง $B\Delta$

เมื่อนำสมการดังกล่าวมาวาดเป็นกราฟ ตัวกราฟจะแสดงผลดังนี้:

แกนนอน แสดงถึงความเร็วเชิงมุม ($\omega$) ในหน่วยองศาต่อวินาที (deg/s)

แกนตั้ง แสดงถึงความสูงสูงสุดที่สามารถติดตามได้ ($\chi$) สำหรับความสูงต่ำสุดของ LEO




**ภาพที่ 9** กราฟขวามเร็วของแขนกลในแกน AZ (องศาต่อวินาที)

หลังจากศึกษา ข้าพเจ้าได้ข้อสรุปว่าความเร็วเชิงมุม 5 องศาต่อวินาทีนั้นเพียงพอสำหรับการสร้างแขนกลที่มีความแม่นยำได้ จำได้ดำเนินการประกอบแขนกลที่มีความเร็วเช่นนี้

**ระบบสายพาน และมู่เล่ของแขนกล**

ในระบบสายพานและมู่เลย์ที่มีการใช้งาน GT2, pitch 2 มิลลิเมตร มีข้อมูลและข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้:

- ระยะห่างแนวนอนระหว่างมู่เลย์ (P1 และ P2) เท่ากับ 58 มิลลิเมตร
- ระยะห่างแนวตั้งระหว่างมู่เลย์ (P1 และ P2) เท่ากับ 9.5 มิลลิเมตร
- สายพานและมู่เลย์ที่ใช้นั้นเป็นแบบ GT2 ซึ่งมี pitch 2 มิลลิเมตร ความกว้างของสายพาน 6 มิลลิเมตร และความหนาของสายพาน 1.38 มิลลิเมตร (0.76 ฟัน)
- มู่เลย์จะต้องมีมุมพันรอบที่มากกว่า 60 องศา และมีฟันที่สัมผัสกับมู่เลย์อย่างน้อย 6 ฟัน ซึ่งหมายความว่าในทางปฏิบัติจะต้องใช้มู่เลย์ที่มีฟันอย่างน้อย 12 ฟัน และมักจะใช้ที่มีฟันอย่างน้อย 18 ฟัน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมู่เลย์ที่มีให้เลือกมีดังนี้:

- มู่เลย์ 16 ฟัน | เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10.2 มิลลิเมตร
- มู่เลย์ 20 ฟัน | เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.7 มิลลิเมตร
- มู่เลย์ 36 ฟัน | เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 22.9 มิลลิเมตร
- มู่เลย์ 40 ฟัน | เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25.5 มิลลิเมตร

จากการคำนวณด้วยสายพานเครื่องคิดเลขพบว่า:

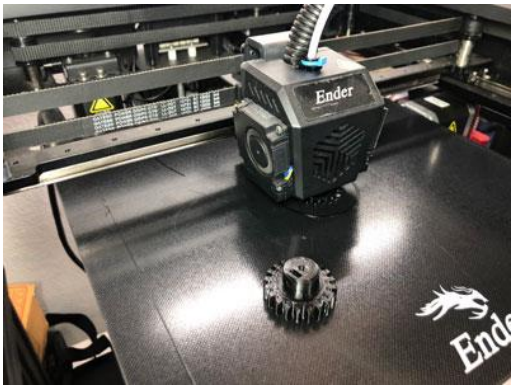
- อัตราทด 2.25 | P1 มี 16 ฟัน | P2 มี 36 ฟัน | สายพานมี 85/86 ฟัน | ความยาวสายพาน 58.65/59.66 มิลลิเมตร
- อัตราทด 1.8 | P1 มี 20 ฟัน | P2 มี 36 ฟัน | สายพานมี 86/87/88 ฟัน | ความยาวสายพาน 57.78/58.78/59.78 มิลลิเมตร
- อัตราทด 2.5 | P1 มี 16 ฟัน | P2 มี 40 ฟัน | สายพานมี 87/88 ฟัน | ความยาวสายพาน 58.5/59.5 มิลลิเมตร
- อัตราทด 2 | P1 มี 20 ฟัน | P2 มี 40 ฟัน | สายพานมี 89/90 ฟัน | ความยาวสายพาน 58.65/59.66 มิลลิเมตร

มอเตอร์ที่ใช้มีความเร็วสูงสุดที่ไม่มีโหลดเท่ากับ 200 รอบต่อนาที (1200 องศาต่อวินาที) และมีแรงบิดสูงสุดเมื่อหยุดที่ 1.2 นิวตันเมตร

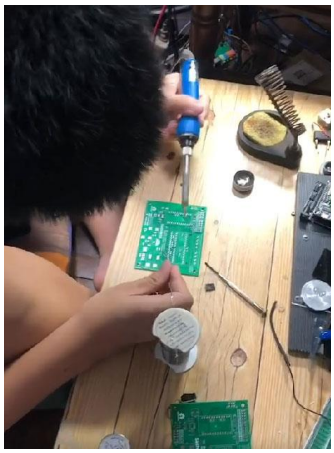
**โครงสร้างของแขนกล**

1. ทางโครงงานได้ใช้โครงอลูมิเนียมเพื่อความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา เป็นโครงสร้าง และนำไปประกอบกับฐานจักรยานแบบสำเร็จ ซึ่งมีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดและมีราคาถูกสามารถนำมาดัดแปลงเพียงเล็กน้อยและนำมาใช้เป็นฐานของแขนกลได้ทันที (**ภาพที่ 8**)
2. พิมพ์ชิ้นส่วน 3 มิติ ที่ออกแบบไว้ เพื่อเป็นเกลียวตัวหนอน ฐานจับ และอื่นๆ โดยใช้อัตราทดเกลียวตัวหนอน 50:1 ซึ่งหมายความว่า เมื่อมอเตอร์หมุน 50 รอบ เฟืองตัวหนอนฝั่งที่ขับเสาและสายอากาศจะหมุนเพียง 1 รอบ ทั้งนี้เพื่อสามารถรับน้ำหนักและแรงบิดได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยการคำนวณจะอยู่ในขั้นตอนการดำเนินงานฉบับเต็ม (**ภาพที่ 9**)
3. ประกอบ CNC Shield และบัดกรีแผงวงจร และประกอบเข้ากับในกล่องควบคุมในขั้นตอนถัดไป (**ภาพที่ 10**)
4. ประกอบชิ้นส่วนและโครงอลูมิเนียมเข้าด้วยกันตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ (**ภาพที่ 11**)
5. ประกอบชุดควบคุมเครื่องเข้ากับแขนกล รวมไปถึงต่อเชื่อมเข้ากับคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุม
6. ทดสอบและปรับแต่งเครื่อง (**ภาพที่ 12**)

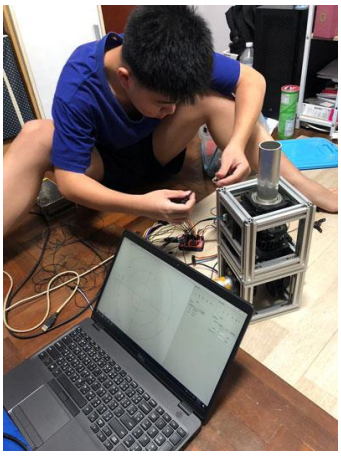
**ภาพที่ 10** ฐานแขนกล ประยุกต์จากชุดประกอบซ่อมจักรยาน




**ภาพที่ 11** พิมพ์ชิ้นส่วน 3D



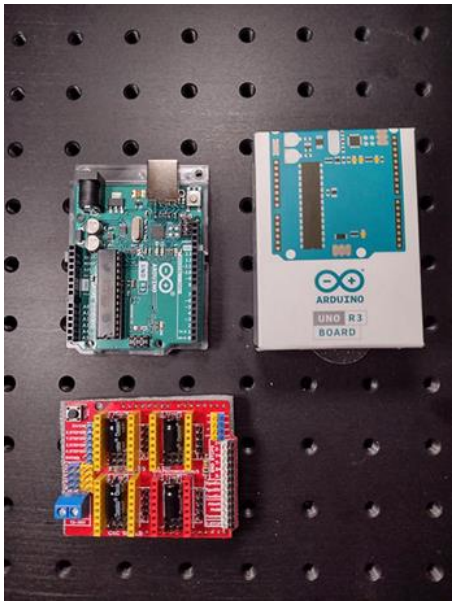
**ภาพที่ 12** บัดกรีแผงวงจร



**ภาพที่ 13** ประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

**ภาพที่ 14** ทดสอบและการปรับแต่งเครื่อง

**ภาพที่ 15** การนำไปใช้งานจริง

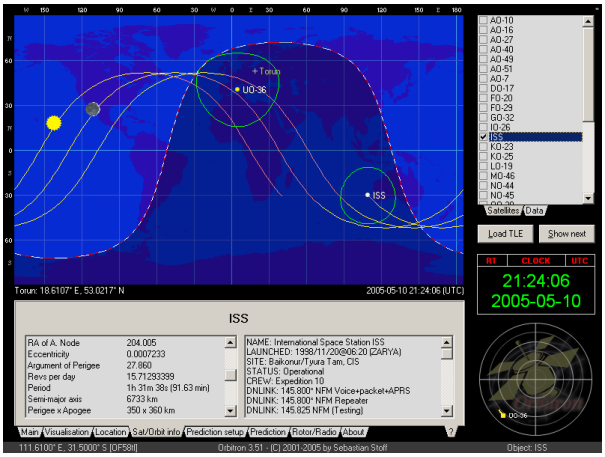


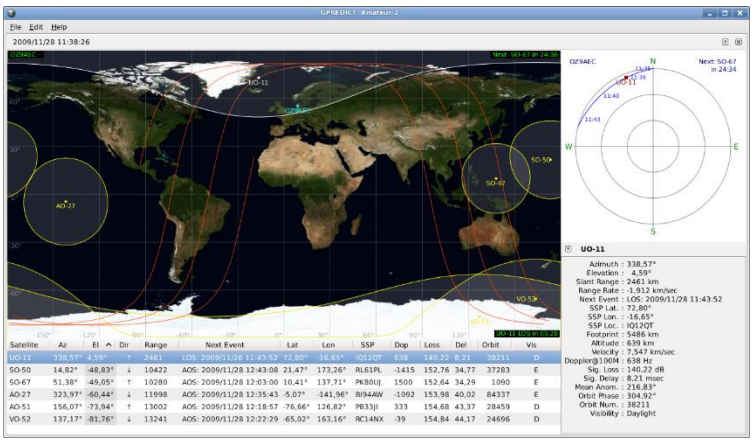

**ภาพที่ 16** รูปบอร์ด Arduino และ CNC Shield V3 ที่สามารถหาได้ในประเทศไทย มีราคาที่ถูก และใช้งานได้ดี ส่วนบอร์ด Arduino แนะนำให้ใช้เป็นบอร์ดจริง จึงจะสามารถเชื่อมต่อ และทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

**ภาพที่ 13** การนำไปใช้งานจริง

## โปรแกรมควบคุม

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมแขนกล เพื่อให้แขนกลสามารถทราบถึงพิกัดและตำแหน่งของตัวเอง ในการคำนวนทิศทาง และพิกัดที่ต้องชี้ปลายสายอากาศไปยังดาวเทียม มีให้เลือกใช้หลายตัวเลือกเช่นกัน เช่น Orbitron [14], Gpredict [15] เป็นต้น โปรแกรมที่ข้าพเจ้าเลือกใช้คือ Gpredict สาเหตุคือ ฟรี และ UI สวยงาม เสถียร ควบคุมง่ายและหลากหลายการปรับเปลี่ยนได้หลากหลายตามต้องการ



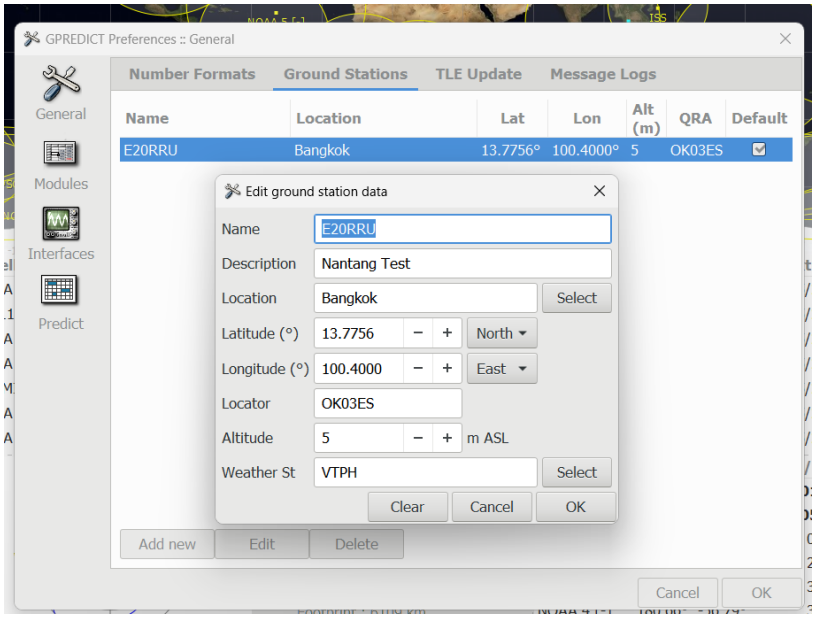



**ภาพที่ 17-18** โปรแกรมติดตามดาวเทียม Orbitron (ซ้าย) โปรแกรมติดตามดาวเทียม Gpredict (ขวา)

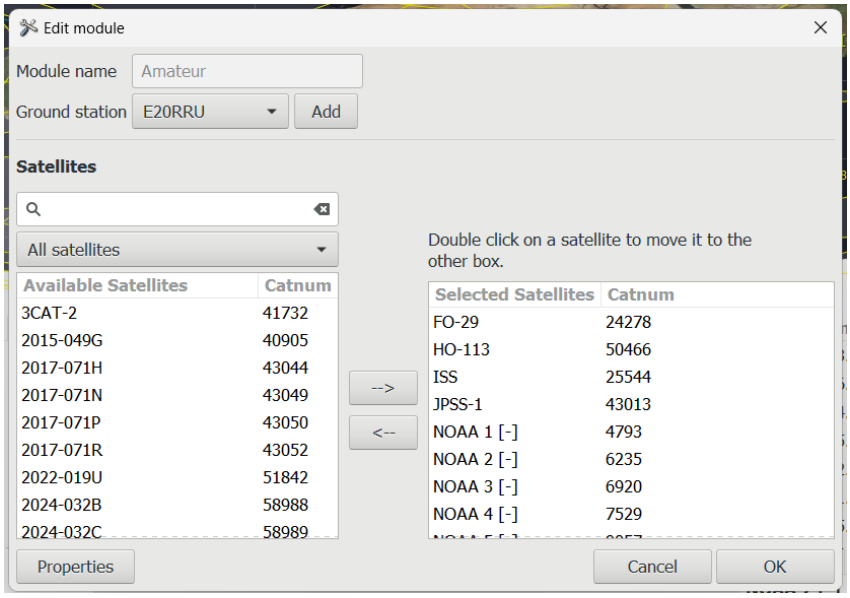
1. **การติดตั้งโปรแกรม Gpredict ในเครื่องคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Windows**

สามารถดาวน์โหลดได้ที่เว็บไซต์ https://oz9aec.dk/gpredict/ แล้วติดตั้งโปรแกรม

ตั้งค่าโปรแกรมให้ระบุพิกัด Latitude Longitude ของสถานี ในเมนู Preference **ภาพที่ 16**

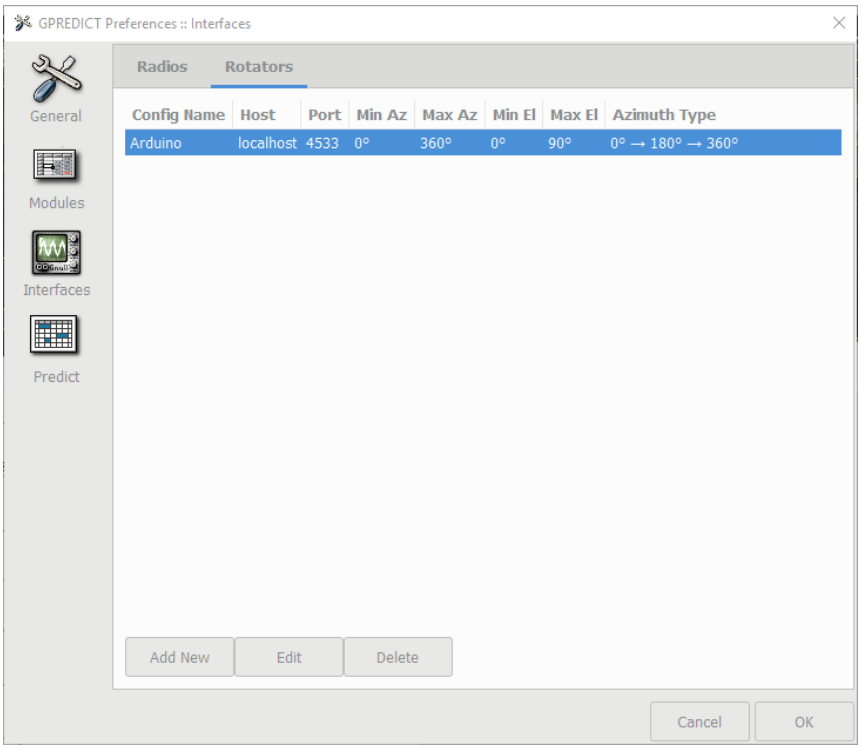



เลือกดาวเทียมที่ต้องการติดตาม โดยกดเลือกที่ Configuration ที่สามเหลี่ยมเล็กๆมุมขวามือ **ภาพที่ 19**

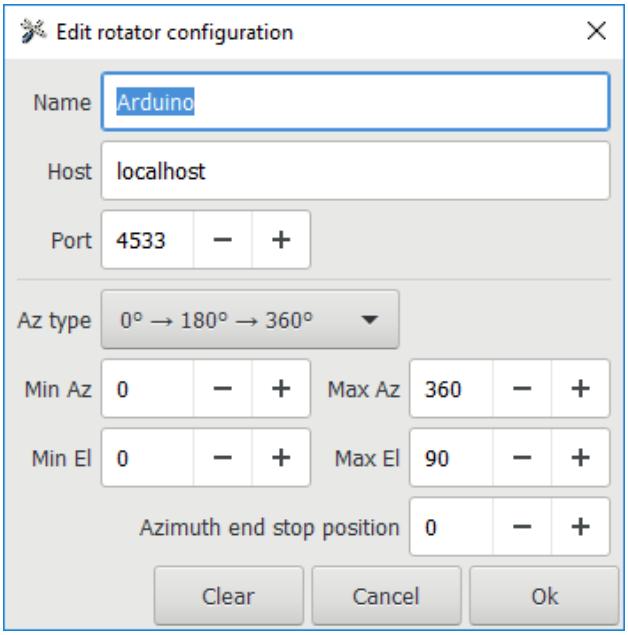



ดาวเทียมจะอยู่ในหมวดหมู่ต่างๆที่ต้องการติดตาม เลือกดาวเทียมที่ต้องการ จากช่องซ้าย ให้อยู่ในช่องขวามือ

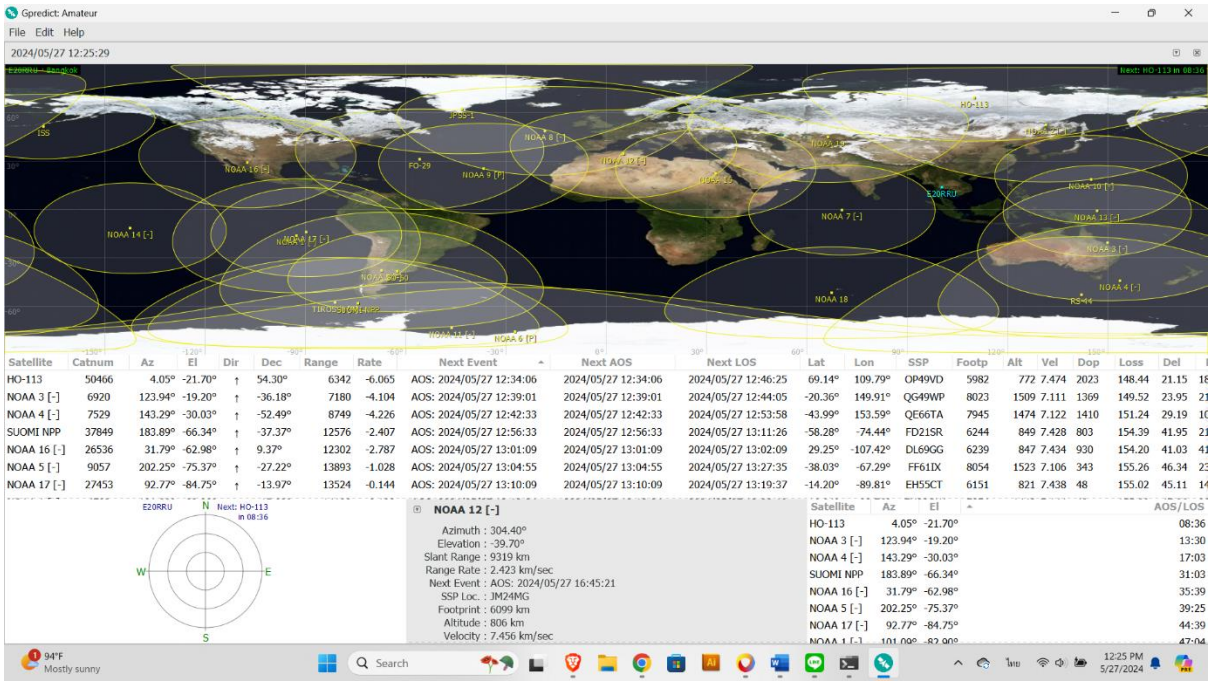
ตั้งค่าเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อ เข้ากับ Arduino เข้ากับโปรแกรม Gpredict เพื่อทำการควบคุมมอเตอร์




**ภาพที่ 20** การปรับตั้งค่า Interface ในส่วนของ Rotors Controller ให้สามารถควบคุม CNC Shield ได้




**ภาพที่ 21** การติดตั้ง Port ในการควบคุมโรเตอร์ ให้กำหนดตัวเลขตามรูปนี้




**ภาพที่ 22** ดาวเทียมต่างๆ ที่ต้องการเชื่อมต่อ เข้ามาอยู่ในระบบเรียบร้อยแล้ว จะปรากฏ รัศมี และตำแหน่งของผู้ดำเนินโครงการ อยู่ในแผนที่ และเมื่อดาวเทียมเคลื่อนที่เข้าใกล้ๆกับตำแหน่งของเรา แขนกลจะทำงานแทรกดาวเทียมโดยอัตโนมัติ ตามที่ตั้งค่าไว้

## 2. ติดตั้งโปรแกรม hamlib

โปรแกรมนี้จะทำหน้าที่เป็นการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ต USB communication ของคอมพิวเตอร์และ CNC Shieled V3 Module เพื่อส่งสัญญาณ Pulse , Dir เพื่อทำหน้าที่ไปควบคุม Step motor ให้หมุนไปยังทิศทางและตำแหน่งที่ต้องการ การติดตั้ง ทำได้โดยไปที่ https://sourceforge.net/projects/hamlib/ และทำการติดตั้งโปรแกรมตามลำดับ [16]

## 3. เขียนชุดคำสั่ง rotctld.bat

เพื่อให้บอร์ด CNC Shield v3 สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ และตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อควบคุมเมอเตอร์แขนกลต่อไป โดยใช้โปรแกรมแก้ไขข้อความ เช่น Notepad หรือ Notepad++ ในการสร้างไฟล์ข้างต้น

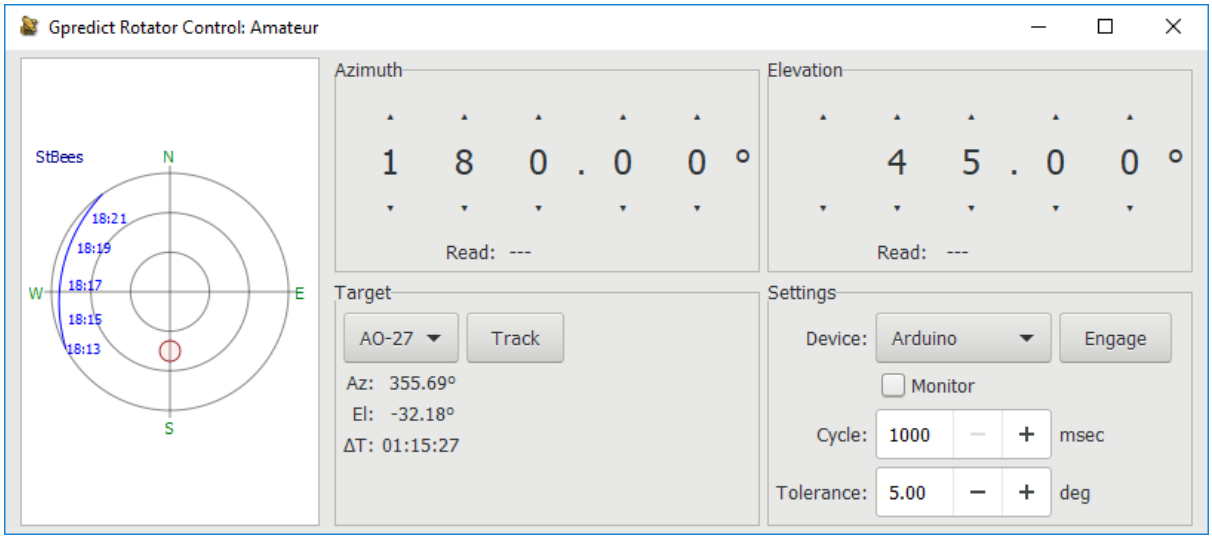
```
rotctld -m 202 -r COM7 -s 9600 -T 127.0.0.1 -t 4533 -C timeout=500 -C
retry=0 -vvvvvvvv > pause
```

หมายเหตุ: ให้เปลี่ยนเลขพอร์ตตามตัวเลขที่ใช้ในการเชื่อมต่อ เช่น หากพบว่า CNC Shield V3 ใช้พอร์ต COM7 เป็นพอร์ทที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ให้ทำการเปลี่ยนในชุดคำสั่ง เป็น COM7 ด้วยเช่นกันดังชุดคำสั่งด้านบนนี้ และบันทึกให้อยู่ในนามสกุล .BAT ไปยังที่อยู่ของโปรแกรม roctld (ปกติแล้วโปรแกรม rotctld ของ hamlib เมื่อติดตั้งแล้วจะบันทึกอยู่ที่ C:\Program Files (x86)\hamlib-w64-3.2\bin

## 4. การทดสอบการเชื่อมต่อเข้ากับระบบ

เมื่อเปิดเมนู Antenna Rotor ในโปรแกรมแล้ว จะปรากฏหน้าจอดังภาพ จากนั้นจึงกดปุ่ม Engage เพื่อทำให้แขนกลหมุดไปยังมุม 180 องศา และ 45 องศา ตามลำดับ แสดงว่าสามารถเชื่อมการติดต่อกับบอร์ดได้ โดยให้ทำตามลำดับขั้นตอนดังนี้

- รันชุดคำสั่ง rotctld.bat
- เปิดหน้าต่าง Antenna ในโปรแกรม แล้วจึงกดปุ่ม Engage
- ข้อมูลที่ส่งไปยัง Arduino จะเริ่มปรากฏในหน้าต่าง rotctrl.bat
- ตรวจสอบว่าแขนกลเคลื่องที่ไปยังมุมที่กำหนดจริงหรือไม่




**ภาพที่ 23** หน้าต่างควบคุมแขนกลในโปรแกรม Gpredict

**ภาพที่ 24** แขนกลติดตามดาวเทียมอัตโนมัติ ที่ผู้ดำเนินโครงการสร้างขึ้น

**ภาพที่ 25** รับคำแนะนำโครงการที่บริษัท เอ็นบีสเปซ จำกัด สตาร์ทอัพด้านเทคโนโลยีอวกาศ ที่ได้รับการสนับสนุนอย่างเป็นทางการทางเทคโนโลยีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.)

**การนำไปใช้งานจริง**

เมื่อติดตั้งทุกอย่างเข้าเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบ เครื่อง โดยคลิปการติดตามเครื่อง สามารถดูได้จากลิ้งเหล่านี้ เพื่อเข้าชมการทำงานของเครื่อง

- รับคำปรึกษาจากนักวิทยาศาสตร์พี่เลี้ยง https://www.youtube.com/shorts/4uRLOjzT1VQ
- การติดตามสถานีอวกาศนานาชาติ ISS https://www.youtube.com/shorts/D1ZdOJ6ivsM
- รวมงานทั้งหมด https://www.youtube.com/shorts/e4Sju83W8UQ

## เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

### วัสดุสำหรับประกอบแขนกล

1. อลูมิเนียมโปรไฟล์ (T-Slot 20 x 20)
2. ท่ออลูมิเนียม (6063 OD40 TH1.5)
3. ตลับลูกปืน (625ZZ และ 6008ZZ)
4. สายพานไทม์มิ่ง (GT2, 79T)
5. พูลเล่ย์ไทม์มิ่ง (GT2, 20T + 36T)
6. สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (NEMA17, L47mm)
7. ลิมิตสวิตช์ (SS0505)
8. สกรูตัวหนอนสแตนเลส (M3)
9. น็อตหัวจมสแตนเลส (DIN912, M3, M4)
10. แหวนอีแปะ (M3, M4)
11. เหล็กสตัดเกลียวตลอด (M5)
12. ชิ้นส่วนพิมพ์ 3 มิติ

### เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ

1. Raspberry Pi 4 Model B
2. Arduino Uno
3. CNC Shield V3
4. A4988 Stepper Motor Driver
5. สายอากาศยากิ (HS-DXA)
6. Software-defined Radio (RTL-SDR)
7. ชุดระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

### รายละเอียดในการทำทดลอง

การทดลองจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของแขนกลสำหรับติดตามดาวเทียม โดยมี 3 การทดลองย่อย ดังนี้

1.ทดสอบการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งเริ่มต้น

2. การทดสอบความแม่นยำของแขนกลในการไปยังตำแหน่งที่ต้องการจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้

3. การทดสอบแรงบิดของแขนกล

**การทดสอบ**

## ขั้นตอนวิธีการทดสอบ

**1.ทดสอบการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งเริ่มต้น**

1. ปิดการทำงานของแขนกล และหมุนเครื่องไปในตำแหน่งใดๆ เพื่อเป็นการสุ่มจุดเริ่มต้น
2. เริ่มการทำงานของแขนกล แขนกลจะทำการเข้าตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อหาจุดอ้างอิงโดยอัตโนมัติ
3. อ่านค่าและทำการบันทึกผล
4. ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยจำนวน 50 ครั้ง

**2. การทดสอบความแม่นยำของแขนกลในการไปยังตำแหน่งที่ต้องการจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้**

1. ปิดการทำงานของแขนกล และหมุนเครื่องไปในตำแหน่งใดๆ เพื่อเป็นการสุ่มจุดเริ่มต้น
2. เริ่มการทำงานของแขนกล แขนกลจะทำการเข้าตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อหาจุดอ้างอิงโดยอัตโนมัติ
3. สั่งการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ได้สุ่มเอาไว้
4. อ่านค่าความคลาดเคลื่อนและทำการบันทึกผล
5. ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ยจำนวน 20 ครั้ง

**3. การทดสอบแรงบิดของแขนกล**

1. ปิดการทำงานของแขนกล
2. ผูกเชือกระหว่างแขนกลกับเครื่องชั่งน้ำหนักกระเป๋าเดินทาง
3. เริ่มการทำงานของแขนกลให้หมุนจนกระทั่งไม่สามารถหมุนต่อไปได้
4. ปิดการทำงานของแขนกล
5. ทำการตราวจสอบ อ่านค่า และทำการบันทึกผล

## คลิปวีดีโอแนบ

- แนะนำแขนกล: https://youtu.be/NNtLvRwBU8A
- การควบคุมแขนกลมุม EL: https://youtu.be/4Wigyr9ZIMs
- การควบคุมแขนกลมุม AZ: https://youtu.be/ECzMzBs-YxQ
- การทดสอบเคลื่อนที่จากจุดใดๆไปยังตำแหน่งเริ่มต้น: https://youtu.be/AWzMFxUn6Ek
- การทดสอบแรงบิดของแขนกล: https://youtu.be/wXKZXVMNWiA

# บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

**ผลการทดสอบการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังตำแหน่งเริ่มต้น**

แกน-AZ

| ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.3 | 11 | 0.9 | 21 | -0.3 | 31 | 0.2 | 41 | -0.5 |
| 2 | -0.7 | 12 | -0.4 | 22 | 0.8 | 32 | -0.4 | 42 | 0.1 |
| 3 | -0.2 | 13 | 0.7 | 23 | -0.9 | 33 | -0.1 | 43 | 0.3 |
| 4 | 1.2 | 14 | -0.1 | 24 | -0.1 | 34 | 0.7 | 44 | -0.7 |
| 5 | 0.6 | 15 | -0.6 | 25 | 0.4 | 35 | -0.8 | 45 | -1.0 |
| 6 | 0.4 | 16 | 0.5 | 26 | 0.5 | 36 | -0.6 | 46 | 0.6 |
| 7 | -0.8 | 17 | 1.1 | 27 | -0.2 | 37 | 0.5 | 47 | -0.2 |
| 8 | 0.1 | 18 | 0.2 | 28 | 0.6 | 38 | -0.3 | 48 | -0.4 |
| 9 | -0.5 | 19 | -1.3 | 29 | -1.1 | 39 | 0.9 | 49 | 0.8 |
| 10 | -0.3 | 20 | 0.0 | 30 | 0.3 | 40 | 0.2 | 50 | -1.0 |

แกน-EL

| ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ | ครั้งที่ | วัดได้ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.6 | 11 | 0.5 | 21 | -0.2 | 31 | 0.1 | 41 | -0.4 |
| 2 | -0.2 | 12 | -0.1 | 22 | 0.6 | 32 | -0.2 | 42 | 0.1 |
| 3 | -0.3 | 13 | 0.2 | 23 | -0.5 | 33 | 0.0 | 43 | 0.0 |
| 4 | 0.8 | 14 | -0.2 | 24 | 0.0 | 34 | 0.4 | 44 | -0.3 |
| 5 | 0.1 | 15 | -0.3 | 25 | 0.3 | 35 | -0.5 | 45 | 0.7 |
| 6 | 0.4 | 16 | 0.4 | 26 | 0.4 | 36 | -0.3 | 46 | 0.4 |
| 7 | -0.5 | 17 | 0.7 | 27 | -0.1 | 37 | 0.3 | 47 | -0.1 |
| 8 | 0.3 | 18 | 0.0 | 28 | 0.4 | 38 | -0.2 | 48 | -0.3 |
| 9 | -0.4 | 19 | -0.8 | 29 | -0.7 | 39 | 0.7 | 49 | 0.6 |
| 10 | -0.1 | 20 | -0.1 | 30 | 0.2 | 40 | 0.1 | 50 | 0.7 |

**การทดสอบความแม่นยำของแขนกลในการไปยังตำแหน่งที่ต้องการจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้**

แกน-AZ

| ครั้งที่ | มุมเริ่มต้น | มุมที่วัดได้ | ครั้งที่ | มุมเริ่มต้น | มุมที่วัดได้ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 52 | 50.99 | 11 | 39 | 38.04 |
| 2 | 70 | 69.38 | 12 | 12 | 12.55 |
| 3 | 15 | 14.41 | 13 | 67 | 68.02 |
| 4 | 83 | 84.03 | 14 | 59 | 60.10 |
| 5 | 34 | 33.43 | 15 | 21 | 20.18 |
| 6 | 68 | 69.04 | 16 | 90 | 88.97 |
| 7 | 27 | 26.35 | 17 | 33 | 34.06 |
| 8 | 44 | 43.12 | 18 | 29 | 27.95 |
| 9 | 18 | 19.09 | 19 | 74 | 74.90 |
| 10 | 75 | 73.99 | 20 | 5 | 5.63 |

แกน-EL

| ครั้งที่ | มุมเริ่มต้น | มุมที่วัดได้ | ครั้งที่ | มุมเริ่มต้น | มุมที่วัดได้ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 52 | 53.07 | 11 | 39 | 40.18 |
| 2 | 70 | 69.35 | 12 | 12 | 11.24 |
| 3 | 15 | 15.92 | 13 | 67 | 68.45 |
| 4 | 83 | 81.80 | 14 | 59 | 58.37 |
| 5 | 34 | 34.78 | 15 | 21 | 21.81 |
| 6 | 68 | 66.57 | 16 | 90 | 88.93 |
| 7 | 27 | 28.31 | 17 | 33 | 34.34 |
| 8 | 44 | 42.95 | 18 | 29 | 27.68 |
| 9 | 18 | 15.59 | 19 | 74 | 74.97 |
| 10 | 75 | 74.12 | 20 | 5 | 4.28 |

ผลการทดสอบพบว่า ความแม่นยำของแขนกลในการเข้าตำแหน่งเริ่มต้นทั้งหมด 50 ครั้ง มีอัตราความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ +/- 0.8 องศา สำหรับการทดสอบความแม่นยำของแขนกลในการไปยังตำแหน่งที่ต้องการจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้ มีอัตราความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ +/- 1.1 องศา ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้(+/- 1 องศา สำหรับการเข้าตำแหน่งเริ่มต้น +/- 2 องศา สำหรับการไปยังตำแหน่งที่ต้องการจากตำแหน่งที่สุ่มเอาไว้) และเพียงพอสำหรับการรับสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อใช้แขนกลควบคู่กับสายอากาศทิศทาง

แรงบิดสูงสุดของแขนกลที่สามารถดึงแขนที่มีระยะห่างจากจุดหมุน 1 เมตร มีค่าอยู่ที่ 6 กิโลกรัม ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานกับสายอากาศทิศทางที่มีการถ่วงดุลน้ำหนัก และสามารถทนสภาพอากาศที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 20-55 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 45-80%

# บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

## สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมกิจการวิทยุสมัครเล่นนี้ ผ่านเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ดังตามเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ในวัตถุประสงค์ข้างต้นดังที่กล่าวมาทุกข้อ นอกจากทำการทดลองแล้ว แขนกลสำหรับติดตามดาวเทียมนี้ยังสามารถทำงานและสามารถทำไปใช้งานได้จริง หลังจากการทดลองที่ผ่านมา ข้าพเจ้ามีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมหากต้องการนำไปใช้งานและพัฒนาระบบต่อ โดยมีข้อเสนอดังนี้

- เปลี่ยนฟันเฟืองให้ใช้โลหะ หรือทองเหลืองเพื่อให้แขนกลมีความคงทนมากยิ่งขึ้น
- เพิ่มระบบไฟฟ้าโซล่าร์เซลล์ เพื่อให้สามารถใช้งานนอกสถานที่ และสามารถทำงานในสภาพแวดล้อมต่างๆได้
- สามารถเพิ่มเติมระบบ Pocket WIFI สำหรับการเข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ที่จะทำให้แขนกลสามารถทำงานนอกสถานที่ได้อย่างสะดวก
- เมื่อผู้ใช้เข้าใจถึงระบบการควบคุม และการเชื่อมต่อระบบแล้ว สามารถประยุกต์และนำไปใช้สร้างเครื่องเชิงพาณิชย์ได้ โดยเลือกอุปกรณ์และชุดควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งจะนำไปสู่ระบบการควบคุมที่ใหญ่มากขึ้นและมีความเที่ยงตรงมากขึ้น ตามอุปกรณ์ที่เลือกใช้ตามลำดับ
- สามารถเลือกใช้กล่องเฟืองทด ที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม เพื่อลดเวลาในการดำเนินงานได้ และมีมาตฐานในการใช้งาน และการบำรุงรักษาในอนาคตที่ง่าย
- กล่องควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนจากการใช้คอมพิวเตอร์ มาใช้ Raspberry Pi มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมลงได้อย่างมาก และข้าพเจ้าก็ได้ปรับเปลี่ยนแล้วเช่นกัน

## ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. ศึกษาและพัฒนาแขนกลจำลองขนาดเล็กสำหรับใช้ในการติดตามดาวเทียมอัตโนมัติขึ้น สำหรับอำนวยความสะดวกในการทำงาน มีขนาดกระทัดรัด สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก
2. ศึกษาความสัมพันธ์ในตัวแปรและการรับค่าพิกัดในการการระบุทิศทางตำแหน่งของดาวเทียม ที่สามารถติดตามได้ถูกต้องแม่นยำทดแทนการใช้มนุษย์
3. ระบบการควบคุมแขนกล มอเตอร์ สามารถประยุกต์การใช้งานได้อย่างหลากหลาย
4. ลดการนำเข้าชิ้นส่วน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบชิ้นส่วนจากต่างประเทศ
5. สามารถประยุกต์ใช้กับงานอื่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน
6. รองรับการก้าวเข้าสู่ยุคของการพัฒนาดาวเทียมที่กำลังพัฒนาเพื่อส่งขึ้นสู่วงโคจรในระยะเวลาอันใกล้นี้ ตัวอย่างเช่น Knacksat3 พัฒนาโดย มพจ และอีกหลายโครงการที่กำลังพัฒนาอยู่

## การทดลองเพิ่มเติม

**การทดลองแบบไม่ใช้แขนกล** โดยใช้มือถือสายอากาศ ชี้ไปยังทิศทางของดาวเทียมด้วยระบบมือ

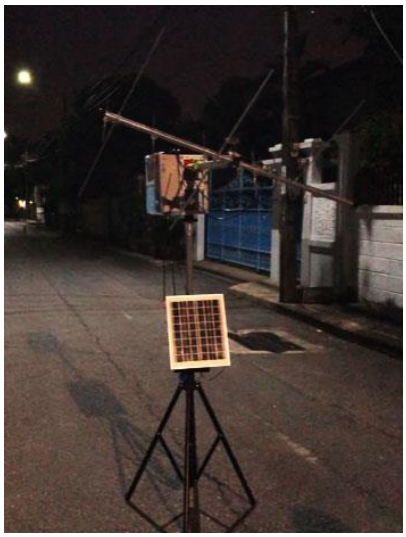
การทดลองโดยใช้มือถือสายอากาศ

การทดลองโดยใช้มือถือสายอากาศ หรือใช้มือจับช่วยในการชี้ตำแหน่งดาวเทียม ผลคือ ไม่สามารถชี้ไปยังดาวเทียมที่ถูกต้องได้ ติดต่อและรับสัญญาณไม่ได้

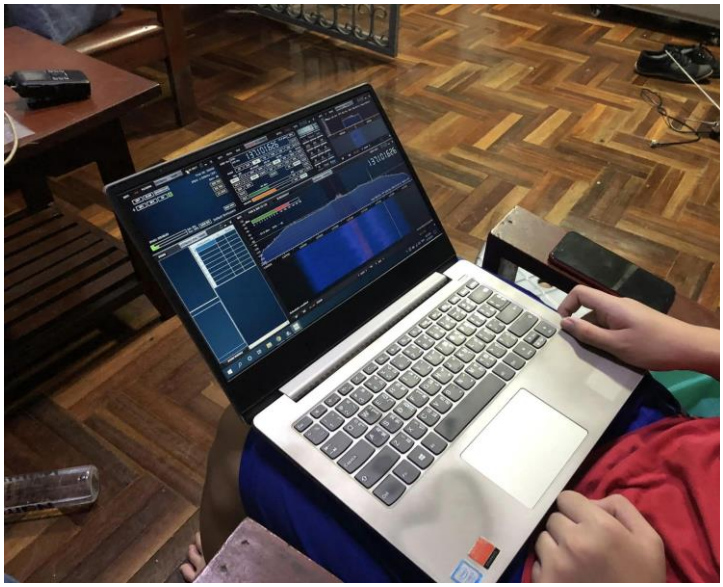
**ผลการทดลอง** คือ

- ไม่สามารถรู้ทิศทาง ตำแหน่งของดาวเทียมได้อย่างชัดเจน ต้องเดา สุ่มจากการฟังเสียงของคลื่นวิทยุที่ได้รับ
- มีความยุ่งยากในการปรับ โดยใช้สองส่วนปรับเข้าหากันคือ ด้านหนึ่งใช้มือถือ และอีกมือหนึ่งคือเล็งสายอากาศให้ตรงกับทิศทางของดาวเทียมสามารถดูคลิปการทดลองนี้ได้จาก

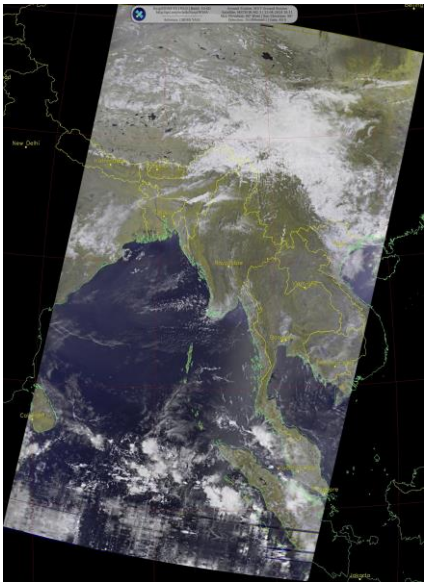
https://www.youtube.com/watch?v=uK5m8LH2QCg



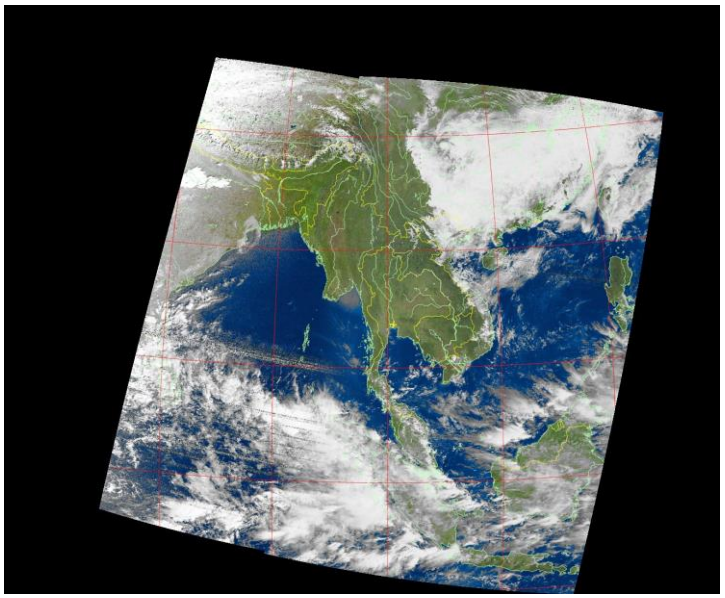
ขณะกำลังรับสัญญาณจาก Mecteor 2-3 Downlink



ตัวอย่างการ Decode สัญญาณจาก ดาวเทียม Mecteor 2-3



Decode สัญญาณจาก ดาวเทียม Mecteor 2-3



ตัวอย่าง Decode สัญญาณจาก ดาวเทียม NOAA-18 และ NOAA- 19

การทดลอง โดยใช้แขนกลอัตโนมัติ โดยแทรกและรับข้อมูลจากดาวเทียมตรวจสอบสถาพอากาศ ผลคือ รับข้อมูลเพื่อนำมาแปล Decode ได้ภาพที่ชัดเจน สามารถดูการทำงารของแขนกลได้ที่

https://www.youtube.com/shorts/D1ZdOJ6ivsM

## บรรณานุกรม


1. International Telecommunication Union. (2002). *Handbook on satellite communications (HSC)*. https://www.itu.int/en/publications/Documents/tsb/HANDBOOK/HSC.pdf

2. Verhage, J. (2021, August 24). The new space race is all about satellites: Pros and cons of each orbit. *The Next Web*. https://thenextweb.com/news/the-new-space-race-is-all-about-satellites-pros-and-cons-of-each-orbit

3. Geo-Informatics and Space Technology Development Agency. (2018). https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=2406&lang=TH

4. Maral, G., & Bousquet, M. (2009). Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology (5th ed.). Wiley.

5. Sukhothai Thammathirat Open University. (2019). https://www.stou.ac.th/offices/oce/publication/pr3/pr19956.pdf

6. Wikipedia contributors. (2024, May 26). Two-line element set. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Two-line_element_set

7. Learning center for Earth Science and Astronomy (n.d.). Two-Line Element (TLE). Retrieved from https://www.lesa.biz/%E0%B8%AD%E0%B8%A7%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8/%E0%B8%94%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%A2%E0%B8%A1/two-line-element-tle

8. Kelso, T. S. (n.d.). CelesTrak. Retrieved from https://celestrak.org/

9. Altshuler, E. E., & Linden, D. S. (1997, January). Design of a loaded monopole having hemispheric coverage using a genetic algorithm. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 45(1).

10. Harries, G., & Heaviside, J. W. (1973). Naval satellite communication terminals. In IEEE Conference Proceedings on Satellite Systems for Mobile Communications and Surveillance (pp. 48-51).

11. Downey, E. (2015). Autonomous satellite tracker. *Journal of Autonomous Systems*, 9(4), 123-130.

12. Saravanakumar, A., Kavviyarasu, A., & Manikandan, U. (2018). Design and development of low cost ground receiving station for LEO satellite operations. *International Journal of Pure and Applied Mathematics, 119*(12), 2921-2932.

13. Alam, M. M., Islam, M. M., Mansoor, & Ahmad, T. (2018). Fully automated satellite tracking system for directional antenna [Master's thesis, BRAC University]. BRAC University Institutional Repository. https://dspace.bracu.ac.bd/xmlui/handle/10361/10932

14. Stoff, S. (n.d.). *Orbitron - Satellite Tracking System*. http://www.stoff.pl/

15. Csete, A. (2023, December 25). Gpredict. Retrieved from https://oz9aec.dk/gpredict/

16. Hamlib Project. (n.d.). Hamlib. Retrieved from https://sourceforge.net/projects/hamlib/

17. MakerStore. (n.d.). CNC Shield Guide (Version 1.0) [PDF]. Retrieved from https://www.makerstore.com.au/wp-content/uploads/filebase/publications/CNC-Shield-Guide-v1.0.pdf

18. Ingingnow. (n.d.). *Orbit*. https://orbit.ing-now.com/