



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การคำนวณหาวงโคจรดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ โดยใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมภาพ ภูริวิกรัยพงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รองศาสตราจารย์ ดร. สุวัฒน์ กุลธนปรีดา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

๓๐ มิถุนายน ๒๕๕๙

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การคำนวณหาวงโคจรดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ โดยใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมภพ ภูริวิทย์พงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รองศาสตราจารย์ ดร. สุวัฒน์ กุลธนปรีดา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการคำนวณหาวงโคจรดาวเทียมโลกต่ำแบบใกล้เคียงวงกลม โดยใช้ข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอสเป็นข้อมูลดิบสำหรับการประมวลผล เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของดาวเทียมในวงโคจรโลกต่ำ แรงรบกวนวงโคจรที่เกิดจากศักย์โน้มถ่วงโลกและฝุ่นอวกาศได้ถูกศึกษาและพิจารณาในเชิงลึก โดยฟังก์ชันศักย์โน้มถ่วงโลกได้ถูกอธิบายในรูปแบบสมการเชิงวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทรงกลม นอกจากนี้ผลของการหมุนของโลกได้ถูกพิจารณาร่วมอยู่ในแบบจำลองของแรงรบกวนที่เกิดจากฝุ่นอวกาศ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองชั้นบรรยากาศของ Harris-Priester ในส่วนการประมวลผล ตัวกรองประมาณค่าคาลมานได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียม โดยที่ศักย์โน้มถ่วงโลกในรูปแบบของโซนอน เซกทรอเรียล และเทลซีรอล ฮาร์มอนิก พร้อมกับแรงรบกวนที่เกิดจากฝุ่นอวกาศ ได้ถูกพิจารณาอยู่ในแบบจำลองระบบของตัวกรองประมาณค่า โดยค่าเริ่มต้นของตัวกรองประมาณค่าถูกคำนวณโดยวิธีกำลังสองแบบน้อยที่สุด นอกจากนี้จำนวนเต็มของเฟสแตกต่างคลื่นพาห်จีพีเอสได้ถูกคำนวณเพื่อที่นำค่าระยะแตกต่างของคลื่นพาห်จีพีเอสมาใช้ในการคำนวณด้านวงโคจร ผลลัพธ์ของเคปเลอร์ เอลลิเมนต์ที่ประมาณค่าได้ถูกประเมินและเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากตัวแปรวงโคจรมาตรฐาน

Abstract

This research presents the study of the orbit determination of near-circular, low-Earth orbit (LEO) spacecraft using information of global position system (GPS) signals. The perturbed forces caused by Geo-potential and atmospheric drag was studied and investigated. An analytical formulation of Geo-potential was described in the form of the extensive spherical harmonics. The Earth's rotation was taken into account in the specific force model of atmospheric drag. The Harris-Priester model was used as the atmosphere model. The filtering estimator based on Kalman filter was implemented to estimate the position and velocity of the spacecraft. The orbit perturbations caused by geo-potential and atmospheric drag were included in the system model of the filtering estimator. The zonal, sectorial and tesseral harmonics were used to describe the geo-potential. The method in least squares sense was exploited to provide the initial guess of the filtering estimator. The integer ambiguity in carrier phase difference was resolved to provide recovered path difference. The estimated results in form of Keplerian elements were evaluated by the orbit-elements generated from the conventional orbit propagator.

หน้าสรุปโครงการ

การวิจัยที่ได้นำเสนอตามข้อเสนอโครงการ

- การวิจัยสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ของวงโคจรดาวเทียมโลกต่ำ
- การวิจัยการคำนวณหาจำนวนลูกคลื่นสัญญาณพาห์ของสัญญาณจีพีเอส
- การวิจัยการประมาณค่า และการหาค่าเริ่มต้นสำหรับตัวกรองประมาณค่า

◇ การวิจัยสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ของวงโคจรดาวเทียมโลกต่ำ

โครงการวิจัยได้มีการดำเนินการศึกษาและสร้างแบบจำลองศักย์โน้มถ่วงโลกที่รวมผลของ โชนอล/เซกทรอเรียล/เทสเซอร์อล ฮาร์มอนิก และ ฟูนอวาทศ พร้อมกับนำแบบจำลองดังกล่าวไป พัฒนาเป็นแบบจำลองระบบของตัวกรองประมาณค่าที่ได้พัฒนาขึ้น และได้ทำการทดสอบกับข้อมูล ระยะเสมือน ระหว่างดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ที่ได้จำลองขึ้น เป็นเวลา 200 ชั่วโมง หรือ 72,000 ข้อมูล (ช่วงเวลา 10 วินาทีต่อข้อมูล 1 ชุด) โดยได้ผลเชิงสถิติวิเคราะห์ดังนี้

◎ ความผิดพลาดด้านตำแหน่ง:

ค่าเฉลี่ย 0.043 เมตร และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (1σ) 9.017 เมตร

◎ ความผิดพลาดด้านความเร็ว:

ค่าเฉลี่ย 0.007 เมตรต่อวินาที และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (1σ) 0.784 เมตรต่อวินาที

จากค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและความเร็วที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความสูงของวงโคจรดาวเทียมที่มีค่าประมาณ 650 กิโลเมตรจากผิวโลก (หรือ ประมาณ 7,028 กิโลเมตรจากจุดศูนย์กลางโลก) และความเร็วในการเคลื่อนที่ของดาวเทียมซึ่งมีค่าประมาณ 7.53 กิโลเมตรต่อวินาที

◇ การวิจัยการคำนวณหาจำนวนลูกคลื่นสัญญาณพาห้ของสัญญาณจีพีเอส

ในการที่จะนำข้อมูลการวัดแบบผลต่างเฟสระหว่างสัญญาณพาห้ที่รับโดยสายอากาศ 2 ชุด (เบสไลน์สายอากาศ) มาใช้ในการคำนวณค่าตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ จำเป็นที่จะต้องหาค่าจำนวนเต็มของผลต่างเฟสเสียก่อน เนื่องจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสวัดได้เพียงค่าเศษของผลต่างเฟส แต่ค่าจำนวนเต็มไม่สามารถวัดได้ ซึ่งผลจากการหาค่าจำนวนเต็มดังกล่าว จะให้ผลลัพธ์เป็นการวางตัวของเบสไลน์สายอากาศ หรือ มีความหมายอีกนัยหนึ่ง คือการวางตัวของดาวเทียม

โครงการวิจัยได้นำเสนอการคำนวณหาจำนวนเต็มของผลต่างเฟส โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ Gram-Schmidt Orthonormalisation (GSO) เพื่อทำการลดปริภูมิการคำนวณ อีกทั้งสมการที่สร้างขึ้นการคำนวณที่อยู่ในรูปแบบเชิงวิเคราะห์ พร้อมกันนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค double phase difference เพื่อขจัดความผิดพลาดรวมที่เกิดขึ้นในข้อมูลที่วัดจากเบสไลน์สายอากาศชุดเดียวกัน แต่รับสัญญาณจากดาวเทียมดวงที่ต่างกัน

การดำเนินงานวิจัยได้ผลลัพธ์เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาค่าเริ่มต้นการวางตัวของดาวเทียมโดยใช้ข้อมูลจีพีเอสแต่เพียงอย่างเดียว จำนวน 8 ข้อมูลจาก 2 เบสไลน์สายอากาศ (4 ข้อ

มูลต่อ 1 เบลไลน์) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นให้กับตัวกรองประมาณค่าที่จะทำการคำนวณค่าการวางตัวอย่างละเอียด

การทดสอบได้ใช้ทั้งข้อมูลจำลองการวัด และ ข้อมูลจริงจากดาวเทียม UoSat12 โดยได้ทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที (ช่วงเวลา 10 วินาทีต่อข้อมูล 1 ชุด) โดยได้ผลเชิงสถิติวิเคราะห์ดังนี้

- ◎ ความผิดพลาดของการวางตัว เมื่อใช้ข้อมูลผลต่างเฟสจำลอง

ค่าเฉลี่ย 0.50 องศา และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (1σ) 1.17 องศา

- ◎ ความผิดพลาดของการวางตัว เมื่อใช้ข้อมูลผลต่างเฟสจริงจากดาวเทียม UoSat12

ค่าเฉลี่ย 1.78 องศา และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (1σ) 1.39 องศา

จากผลการทดสอบทั้งกรณีของการใช้ข้อมูลจำลองและข้อมูลจริง ค่าความผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าการวางตัวที่คำนวณได้มีความผิดพลาดภายใน ± 5 องศา ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นให้กับตัวกรองประมาณค่าสำหรับการคำนวณหาค่าการวางตัวของดาวเทียม



- ◆ การวิจัยการประมาณค่า และ การหาค่าเริ่มต้นสำหรับตัวกรองประมาณค่า

โครงการวิจัยได้มีการพัฒนาตัวกรองคาลมานขึ้น สำหรับประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ โดยแบบจำลองของระบบเป็นสมการการเคลื่อนที่ ที่ได้รวมผลความเร่งรบกวนที่เกิดจากคักย์โน้มถ่วงโลก และฝุ่นอวกาศ สำหรับแบบจำลองข้อมูลการวัด ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับระยะเสมือนระหว่างดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ

นอกจากนี้โครงการวิจัยได้พัฒนาวิธีที่การคำนวณหาค่าเริ่มต้นของตัวกรองประมาณค่า เนื่องจากการทำงานของตัวกรองประมาณค่าต้องการค่าเริ่มต้นที่เป็นค่าที่มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง เพื่อให้การประมาณค่ามีลักษณะลู่เข้าสู่ค่าตอบเมื่อเวลาผ่านไป แต่ถ้าค่าเริ่มต้นเป็นค่าที่ไม่มีความแม่นยำหรือมีความผิดพลาดสูงจะส่งผลให้การทำงานของตัวกรองเป็นไปในลักษณะลู่ออกอย่างรวดเร็วหรืออาจจะไม่เกิดการลู่เข้าเลย ซึ่งวิธีที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้เป็นวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยมีเหตุผลหลักที่เลือกใช้วิธีนี้คือความไม่ซับซ้อนในการสร้างสมการการคำนวณ และเป็นวิธีการคำนวณที่ให้ค่าที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง

◇ อื่นๆ

โครงการวิจัยได้พัฒนาชุดจำลองสร้างข้อมูลการวัดจีพีเอสขึ้น โดยสามารถจำลองข้อมูลระยะเสมือนและผลต่างเฟสได้ ซึ่งจะช่วยให้การทดสอบอัลกอริทึมต่างๆที่ได้พัฒนาขึ้นมีความคล่องตัวสูง นอกจากนี้ทางโครงการวิจัยยังได้พัฒนาส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยด้านวงโคจรและการวางตัวของดาวเทียมขึ้นไว้ ซึ่งจะเป็นโยบายและเป็นฐานรองรับงานวิจัยในปัจจุบันและอนาคตในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับวงโคจรและการวางตัวของดาวเทียม

◇ สรุป

การดำเนินงานวิจัยของโครงการเป็นไปตามแผนงานที่ได้เสนอไว้ในข้อเสนอโครงการทุกประการ อันประกอบด้วย

๑. ศึกษา วิจัย และ พัฒนาสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่เชิงวิเคราะห์สำหรับวงโคจรดาวเทียมโลกต่ำ ที่รวมผลของคักย์โน้มถ่วงโลกไม่ว่าจะเป็นเทอมของ โซนอล/เซกทรอเรียล/เทสเซอร์ล ฮาร์มอนิก นอกจากนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้น ได้รวมผลของการรบกวนที่เกิดจากฝุ่นอวกาศ
๒. ศึกษา วิจัย และ พัฒนาสร้างตัวกรองประมาณค่า เพื่อประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของวงโคจรดาวเทียมโลกต่ำ
๓. ศึกษา วิจัย และ พัฒนาสร้างวิธีการคำนวณเพื่อคำนวณหาค่าเริ่มต้นให้กับตัวกรองประมาณค่า
๔. ศึกษา วิจัย และ พัฒนาสร้างวิธีการคำนวณจำนวนลูกคลื่นของผลต่างเฟส เพื่อรองรับการนำผลต่างเฟสมาใช้ในการคำนวณหาค่าตำแหน่งวงโคจรและการวางตัวของดาวเทียม
๕. ศึกษา วิจัย และ พัฒนาสร้างชุดจำลองสร้างข้อมูลการวัดจีพีเอส

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
หน้าสรุปโครงการ	IV

บทที่ ๑ บทนำ

๑.๑ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาด้านงานวิจัยวงโคจรดาวเทียมโลกต่ำ	๒
๑.๑.๑ ความสำคัญของงานวิจัยด้านวงโคจร	๖
๑.๑.๒ ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา	๗
๑.๒ เป้าหมายของงานวิจัย	๘
๑.๓ องค์กรความรู้ใหม่และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการวิจัย	๙
๑.๔ แนวทางการวิจัย	๑๐
๑.๔.๑ แนวทางการวิจัยสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์	๑๐

- ๑.๔.๒ แนวทางการวิจัยการคำนวณหาจำนวนลูกคลื่นสัญญาณพาห်จีพีเอส ๑๑
- ๑.๔.๓ แนวทางการวิจัยการประมาณค่า และการหาค่าเริ่มต้น..... ๑๑

บทที่ ๒ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ๒.๑ งานวิจัยด้านผลของการรบกวนวงโคจรโลกต่ำเนื่องจากความไม่กลมของโลก ๑๓
- ๒.๑.๑ ฟังก์ชันการรบกวนเนื่องจากความไม่กลมของโลก..... ๑๓
- ๒.๑.๒ แบบจำลองความไม่กลมของโลก ๑๕
- ๒.๒ งานวิจัยด้านผลของการรบกวนวงโคจรโลกต่ำเนื่องจากฝุ่นอวกาศ ๑๖
- ๒.๓ งานวิจัยด้านการนำข้อมูลการวัดจีพีเอสมาใช้งานด้านวงโคจร.....๑๗
- ๒.๓.๑ การคำนวณหาจำนวนลูกคลื่นพาห်ของข้อมูลการวัดเฟสความแตกต่าง ... ๑๘

บทที่ ๓ ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่จำเป็นต่องานวิจัย

- ๓.๑ กลศาสตร์วัตถุท้องฟ้า.....๒๑
- ๓.๑.๑ สมการการเคลื่อนที่ของดาวเทียมโคจรรอบโลก..... ๒๑
- ๓.๑.๒ ศักย์โน้มถ่วงโลก ๒๓
- ๓.๑.๒.๑ แบบจำลองศักย์โน้มถ่วงของโลก ในรูปแบบฮาร์มอนิกทรงกลม ๒๕
- ๓.๑.๒.๒ นิยามเพิ่มเติมสำหรับแนวทางฮาร์มอนิกทรงกลม ๒๗
- ๓.๒ ระบบพิกัด และ ระบบเวลา ๒๘
- ๓.๒.๑ ระบบพิกัด..... ๒๘
- ๓.๒.๑.๑ ระบบพิกัดที่พิจารณาโลกเป็นฐานอ้างอิง ๒๙
- ๓.๒.๑.๒ ระบบพิกัดที่พิจารณาตัวดาวเทียมเป็นฐานอ้างอิง..... ๓๑
- ๓.๒.๒ ระบบเวลา (time system) ๓๔

๓.๒.๒.๑ เวลาไซดีเรียล (sidereal time).....	๓๕
๓.๒.๒.๒ เวลาสุริยะ (solar time)	๓๕
๓.๒.๒.๓ เวลาอะตอมมิก (atomic time)	๓๖
๓.๒.๒.๔ เวลาพลวัต (dynamical time).....	๓๗
๓.๓ การแปลงระบบพิกัด	๓๗
๓.๓.๑ การแปลงระบบพิกัด ระหว่าง J2000 และ ECEF.....	๓๘
๓.๓.๑.๑ การส่าย (Precession)	๓๘
๓.๓.๑.๒ การกวัด (Nutation)	๓๙
๓.๓.๑.๓ การหมุน (Rotation)	๔๐
๓.๓.๑.๔ สรุป การแปลงระหว่างระบบพิกัด J2000 กับ ระบบพิกัด ECEF.....	๔๒
๓.๓.๒ การแปลงระบบพิกัดอื่นๆ	๔๒
๓.๓.๒.๑ การแปลงระหว่างระบบพิกัด PQW กับ ระบบพิกัด ECI.....	๔๒
๓.๓.๒.๒ การแปลงระหว่างระบบพิกัด PQW กับ ระบบพิกัดของดาวเทียม....	๔๒
๓.๓.๒.๓ การแปลงระหว่าง ECI กับ PQW/Nodal/ดาวเทียม โดยใช้คาร์ทีเซียน	๔๓
๓.๔ ข้อมูลการวัดจากสัญญาณจีพีเอส	๔๔
๓.๔.๑ ระยะเวลาเสมือน (pseudorange)	๔๔
๓.๔.๒ เฟสแตกต่างของสัญญาณคลื่นพาห์.....	๔๕

บทที่ ๔ แบบจำลองและวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในงาน

๔.๑ แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ของผลการรบกวนที่เกิดจากความไม่กลมของโลก	๕๐
๔.๑.๑ โซนอลฮาร์โมนิก	๕๑

๔.๑.๒	เทสเชลลอสฮาร์โมนิก (กรณี $n \neq m$).....	๕๒
๔.๑.๓	เซกทอเรียลฮาร์โมนิก (กรณี $n = m$).....	๕๓
๔.๑.๔	สมการความเร่งที่รบกวนวงโคจรของดาวเทียม	๕๓
๔.๒	แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ของผลการรบกวนที่เกิดจากฝุ่นอวกาศ	๕๕
๔.๓	วิธีการการประมาณค่าตำแหน่งวงโคจรดาวเทียม.....	๖๑
๔.๓.๑	การประมาณค่า โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น	๖๑
๔.๓.๒	การประมาณค่า โดยตัวกรองประมาณค่า	๖๔
๔.๓.๒.๑	เวกเตอร์สเตท.....	๖๔
๔.๓.๒.๒	แบบจำลองระบบ.....	๖๕
๔.๓.๒.๓	แบบจำลองข้อมูลการวัด.....	๖๖
๔.๔	การคำนวณหาจำนวนลูกคลื่นพาร์ทของข้อมูลการวัดเฟสแตกต่างกัน	๖๗
๔.๔.๑	ขั้นตอนที่ ๑ การหาการวางตัวที่เป็นไปได้ของแต่ละเบสไลน์	๖๗
๔.๔.๒	ขั้นตอนที่ ๒ การหาคู่ที่เป็นไปได้ของเบสไลน์ประมาณ.....	๗๑
๔.๔.๓	ขั้นตอนที่ ๓ การคำนวณหาเมทริกซ์การวางตัว.....	๗๒
๔.๔.๔	ขั้นตอนที่ ๔ การทดสอบเชิงต่อเนื่อง.....	๗๓

บทที่ ๕ การจำลองสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

๕.๑	ข้อมูลอินพุท	๗๖
๕.๑.๑	ข้อมูลสองบรรทัด (two line elements)	๗๖
๕.๑.๒	ข้อมูลกำหนดรูปแบบการวางตัวของดาวเทียม	๗๖
๕.๑.๓	ข้อมูลกำหนดตำแหน่งสายอากาศบนดาวเทียม	๗๗
๕.๑.๔	ข้อมูลกำหนดเวลาสำหรับการสร้างข้อมูล.....	๗๙
๕.๒	ส่วนการคำนวณ	๗๙

๕.๒.๑ การจำลองวงโคจร.....	๗๙
๕.๒.๒ การเลือกกลุ่มดาวเทียมจีพีเอส	๘๐
๕.๒.๓ ข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส.....	๘๐
๕.๒.๔ ค่าความผิดพลาดข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส.....	๘๑
๕.๓ ข้อมูลเอาร์ทัพท	๘๓
๕.๒.๓ ข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส.....	๘๐
๕.๒.๔ ค่าความผิดพลาดข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส.....	๘๑
๕.๓ ข้อมูลเอาร์ทัพท	๘๓

บทที่ ๖ ผลการทดสอบ

๖.๑ วงโคจรอ้างอิง.....	๘๕
๖.๒ ค่าเริ่มต้นสำหรับตัวกรองคาลมาน	๘๗
๖.๓ การประมาณค่าตำแหน่ง	๘๗
ผลการทดสอบเชิงสถิติ (โซนอนฮาร์โมนิก เทสเซลอลฮาร์โมนิก และ เซกทอเรียลฮาร์โมนิก).....	๘๙
๖.๔ การประมาณค่าความเร็ว.....	๙๔
๖.๕ ค่าเวลาออฟเซท	๙๘
๖.๖ ค่า DOP และ จำนวนดาวเทียม.....	๙๘
๖.๗ ผลการทดสอบ เมื่อรวมผลการรบกวนเนื่องจากผู้ใช้อวกาศ	๙๙
๖.๘ ผลการทดสอบอธิบายในรูปแบบของเคปเลอร์ เอลลิเมนต์	๑๐๖
๖.๘.๑ semi-major axis (a).....	๑๐๖
๖.๘.๒ eccentricity (e).....	๑๐๘

๖.๘.๓ inclination (i)	๑๑๐
๖.๘.๔ argument of perigee (ω)	๑๑๒
๖.๘.๕ mean anomaly (M)	๑๑๔
๖.๘.๖ ผลการทดสอบเชิงสถิติของค่าเคปเลอร์ เอลลิเมนต์	๑๑๖
๖.๙ ผลการทดสอบการคำนวณหาจำนวนเต็มของเฟสแตกต่างกัน	๑๑๗
๖.๙.๑ ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจำลองการวัด	๑๑๗
๖.๙.๒ ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจริง	๑๒๐
๖.๑๐ สรุปผลการทดสอบ	๑๒๓
๖.๑๐.๑ การประมาณค่าตำแหน่งและความเร็ว	๑๒๓
๖.๑๐.๒ การประมาณค่าเคปเลอร์ เอลลิเมนต์	๑๒๔
๖.๑๐.๓ การประมาณค่าการวางตัวของดาวเทียม	๑๒๔

บทที่ ๗ สรุป

๗.๑ อุปสรรค และ ปัญหา	๑๒๗
๗.๒ แนวทางการวิจัยในอนาคต	๑๒๙
๗.๓ ส่วนปิดท้าย	๑๒๙

เอกสารอ้างอิง

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ

ภาคผนวก ก.

ภาคผนวก ข.