การพัฒนาระบบวิเคราะห์และประมวลผลวงโคจรดาวเทียม

The Development of Satellite Orbit Analysis and Determination Processing System: EMERALD

ประกาศิต อุดมธนะธีระ[1] พรเทพ นวกิจกนก[1] และ มานพ อ้อพิมาย[2]
[1]ฝ่ายวิเคราะห์วงโคจรและวัตถุอวกาศ (OSpA) สำนักปฏิบัติการดาวเทียม
สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) : GISTDA
88 หมู่ 9 ต. ทุ่งสุขลา อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี 20230
[2]ศูนย์วิจัยดาวเทียมไทพัฒ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพ 10530
อีเมล์ : prakasit@eoc.gistda.or.th, pornthep@eoc.gistda.or.th, manop@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบวิเคราะห์และประมวลผลวงโคจรดาวเทียม โดยได้พัฒนาอัลกอริทึมการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียม และนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลวงโคจรดาวเทียมไทยโชต หรือ ดาวเทียมธีออส (THEOS: Thailand Earth Observation Satellite) ในชื่อโปรแกรม EMERALD ได้พัฒนาเป็น 5 ส่วนการใช้งานจากการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียม ได้แก่ Event Prediction, Generate Files For Mission Planning, Transponder Activation Plan, Antenna Pointing และ NORAD Two-line Generation โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของโปรแกรม EMERALD และ QUARTZ++ ซึ่งใช้งานในปัจจุบัน มีค่าผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันและนำไปใช้งานได้

คำสำคัญ: ดาวเทียม, วงโคจรดาวเทียม, ระบบวิเคราะห์วงโคจร

Abstract

In this paper, we present the development of satellite orbit analysis and determination processing system. The algorithm for orbit computation was developed & programmed for Flight operation of Thaichote satellite or Thailand earth observation satellite (THEOS), under the codename “EMERALD”. The development is composed of 5 modules for different application, including: Event Prediction, Generate Files For Mission Planning, Transponder Activation Plan, Antenna Pointing and NORAD Two-line Generation. By comparing the results between EMERALD and the current use program Quartz++. Their results are consistent and applicable to thaichote flight operation.

Keywords: Orbit, Flight Dynamics System, Satellite Orbit Analysis

1. บทนำ

ดาวเทียมไทยโชต (Thaichote Satellite) หรือ ดาวเทียมธีออส (THEOS: Thailand Earth Observation Satellite) [1] เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติของประเทศไทย โดยความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทยและรัฐบาลฝรั่งเศส ดำเนินงานโดย สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (สทอภ. หรือ GISTDA) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีร่วมกับบริษัท อีเอดีเอส แอสเตรียม (EADS Astrium) ประเทศฝรั่งเศส ดาวเทียมไทยโชต ขึ้นสู่อวกาศ วันพุธที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2551 ณ ฐานส่งจรวดเมืองยาสนี ประเทศรัสเซีย

คุณสมบัติของดาวเทียมไทยโชต เป็นดาวเทียมที่วงโคจรแบบต่ำ LEO (Low Earth Orbit) ที่ระดับความสูงประมาณ 822 กิโลเมตร น้ำหนักประมาณ 750 กิโลกรัม มีกล้องสำหรับบันทึกภาพแบบขาว-ดำ (Panchromatic: PAN) และแบบสี (Multi-Spectral: MS) โดยมี 4 ช่วงคลื่นแสงคือ Red, Green, Blue และ NIR (Near-Infrared)

ระบบปฏิบัติการภาคพื้นดิน ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1.ระบบควบคุมภาคพื้นดิน (Control Ground Segment: CGS) และ ระบบรับสัญญาณและประมวลผลภาพภาคพื้นดิน (Image Ground Segment: IGS) โดย CGS ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1.ส่วนควบคุมดาวเทียม (Satellite Control Center: SCC) มีหน้าที่ติดต่อและส่งคำสั่งถ่ายภาพให้กับดาวเทียม 2.ส่วนวิเคราะห์วงโคจร (Flight Dynamics System: FDS) มีหน้าที่คำนวณวงโคจรและจัดทำข้อมูลตำแหน่งดาวเทียมเพื่อใช้สำหรับในการถ่ายภาพ 3.ส่วนวางแผนถ่ายภาพ (Mission Planning Center: MPC) มีหน้าที่ในการวางแผนถ่ายภาพดาวเทียมในแต่ละวัน

ส่วนวิเคราะห์วงโคจร โปรแกรมที่ใช้ในปัจจุบัน คือ โปรแกรม Quartz++ ซึ่งพัฒนาโดยบริษัท อีเอดีเอส แอสเตรียม โดยเริ่มติดตั้งใช้งานตั้งแต่ส่งดาวเทียมเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ปัญหาที่พบในปัจจุบัน คือ โปรแกรม Quartz++ ติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ UNIX บนเครื่อง Sun Workstation ซึ่งเป็นรุ่นเก่าไม่สามารถหาอะไหล่เพื่อมาทดแทนรุ่นเก่าได้อีก และ ทำงานได้ช้าลงตามอายุการใช้งาน ซึ่งต้องใช้งบประมาณที่สูงในการให้บริษัทผู้ผลิตแก้ไขหรือเพิ่มเติมโมดูล

GN005

จึงได้มีแนวความคิดที่จะพัฒนาระบบดังกล่าวฯ ด้วยตนเอง ในโครงการพัฒนาระบบวิเคราะห์และประมวลผลวงโคจรดาวเทียม (The dEvelopMent of satEllite oRbit AnaLysis and Determination processing system: EMERALD) โดยร่วมวิจัยและพัฒนาร่วมกับ ม.เทคโนโลยีมหานคร เพื่อทดแทนระบบเก่า รองรับการใช้งานกับดาวเทียมสำรวจโลกดวงที่ 2 หรือดาวเทียมดวงต่อๆ ไปได้ในอนาคตและพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศภายในประเทศอีกด้วย

2. หลักการและวิธีการที่เกี่ยวข้องในการพัฒนา

ส่วนของหลักการและวิธีการที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมประกอบไปด้วย การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรง (Force Model) และการสร้างอัลกอริทึมเพื่อคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมเชิงตัวเลข (Numerical Integrator) ส่วนที่สองเป็นการนำข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียมไปสร้างเป็นชุดข้อมูลเพื่อนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ

2.1 แบบจำลองของแรงที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของดาวเทียม

เนื่องจากดาวเทียมที่โคจรอยู่รอบโลกนั้นจะได้รับผลกระทบจากแรงที่กระทำจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยจะมีขนาดที่ขึ้นอยู่กับระดับความสูงและลักษณะทางเรขาคณิตของวงโคจร สำหรับดาวเทียมไทยโชต ซึ่งมีลักษณะวงโคจรใกล้เคียงวงกลม ที่ระดับความสูงประมาณ 822 กิโลเมตร นั้นแรงที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่มากที่สุดคือแรงดึงดูดจากโลกและแรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ และจากการที่โลกของเราไม่ได้เป็นทรงกลมที่สมบูรณ์ ศักย์แรงดึงดูด (Geo-Potential, U) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในอวกาศที่อยู่รอบโลกจึงไม่สม่ำเสมอ สามารถอธิบายการกระจายของศักย์แรงดึงดูดดังกล่าวได้ด้วย Spherical Harmonics [2] ดังสมการที่ 1

$$U = \frac{\mu}{r}\left[1+\sum_{l=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{l}\left(\frac{R_E}{r}\right)^{l} P_{lm}\left[\sin\phi_{sat}\right]\left\{C_{lm}\cos\left(m\lambda_{sat}\right)+S_{lm}\sin\left(m\lambda_{sat}\right)\right\}\right] \quad (1)$$

ความถูกต้องของแบบจำลองนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวน Order และ Degree ของฮาร์มอนิกส์สูงสุดที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งในปัจจุบันมีค่ามาตรฐานให้เลือกใช้ เช่น GEM, JGM1, WGS72, WGS84, EGM เป็นต้น สำหรับในระบบที่พัฒนาเลือกใช้แบบจำลอง WGS84 และ GEM10B เนื่องจากเป็นที่นิยมและให้ผลคำนวณถูกต้องเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป [3]

แรงดึงดูดจากวัตถุที่สาม (3rd- Body Attraction) ซึ่งสำหรับดาวเทียมที่โคจรรอบโลกก็คือแรงจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเอียง (Inclination) และมุมที่ดาวเทียมโคจรตัดกับระนาบเส้นศูนย์สูตร (Ascending Node) ในระยะยาว การสร้างแบบจำลองแรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ดังสมการที่ 2

$$r_{\otimes sat} = -\frac{Gm_{\otimes} r_{\otimes sat}}{r_{\otimes sat}} + Gm_3\left(\frac{r_{sat3}}{r_{sat3}^3} - \frac{r_{\otimes 3}}{r_{\otimes 3}^3}\right) \quad (2)$$

การคำนวณหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ที่เวลาต่างๆ อย่างถูกต้องเป็นหัวใจสำคัญของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในส่วนนี้ แรงรบกวนอื่นๆในธรรมชาติ เช่น Atmospheric Drag, Solar Radiation, Tide จะส่งผลน้อยมากต่อดาวเทียมในระดับความสูงดังกล่าว

2.2 อัลกอริทึมเพื่อคำนวณเชิงตัวเลข

การหาตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมที่เวลาต่างๆ สามารถทำได้โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion) ดังสมการที่ 3

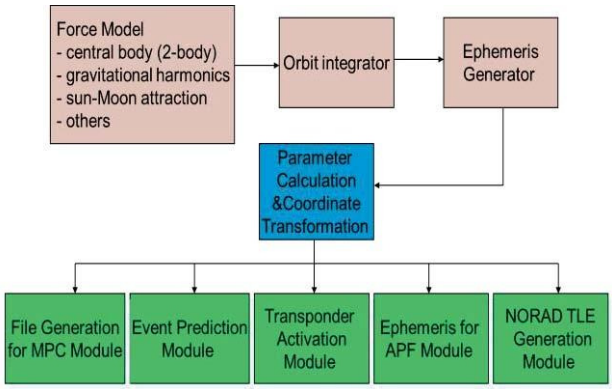
$$r = -\frac{\mu}{r^3}r + a_{perturbed} = -\frac{\mu}{r^3}r + a_{nonspherical} + a_{3-body} + a_{other} \quad (3)$$

จะเห็นว่านอกจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงต่างๆให้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงในวงโคจรแล้ว อัลกอริทึมสำหรับการอินทริเกรตสมการการเคลื่อนที่ (Numerical Integrator) จะมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อความถูกต้องของผลลัพธ์จากการคำนวณ นอกจากนี้แล้วความรวดเร็วในการประมวลผลก็เป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากในการปฏิบัติงานจริงเรามักจะทำการคำนวณเพื่อทำนายวงโคจร (Orbit Prediction) ล่วงหน้าเป็นเวลานานหลายวัน หรือกระทั่งหลายเดือนสำหรับวางแผนการปฏิบัติงาน ดังนั้นการออกแบบตัวอินทริเกรเตอร์จึงต้องคำนึงถึงความถูกต้องและเวลาที่ใช้คำนวณเป็นหลัก

อัลกอริทึมการอินทริเกรตสมการการเคลื่อนที่ของดาวเทียมมีทั้งแบบ Single-Step หรือแบบ Multi-Step สำหรับในระบบที่พัฒนาเลือกใช้อัลกอริทึมของ Bulirsch-Stoer [4] ซึ่งมีจุดที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือการรวมอัลกอริทึม Richardson Extrapolation เข้าไปในกระบวนการ ซึ่งส่งผลให้การอินทริเกรตมีประสิทธิภาพสูงสุดได้คำตอบที่ถูกต้องแม่นยำโดยเฉพาะสำหรับวงโคจรที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับวงกลม (Eccentricity << 1) และยังใช้เวลาในการประมวลผลสั้นที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ

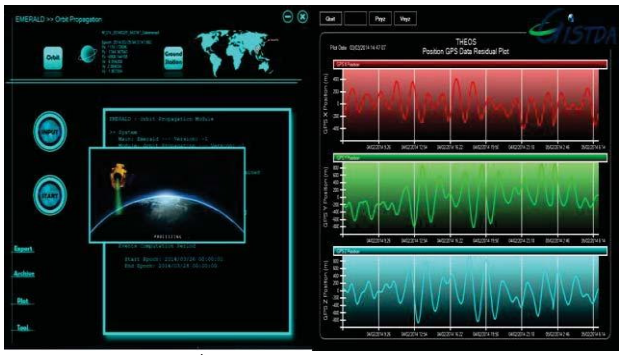
2.3 โครงสร้างของระบบ

การพัฒนาโครงสร้างของระบบเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของแรงต่างๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของดาวเทียม เมื่อได้แบบจำลองของแรงก็นำมารวมกับสมการการเคลื่อนที่ของดาวเทียม ในการหาตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมที่เวลาต่างๆ แล้วสร้างเป็นชุดข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียม จากนั้นจะเป็นนำข้อมูลมาคำนวณเพิ่มเติมหรือเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลของตำแหน่งดาวเทียมให้อยู่ในรูปแบบการใช้ในส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 1 และจะได้กล่าวถึงรายละเอียดส่วนต่างๆในหัวข้อถัดไป

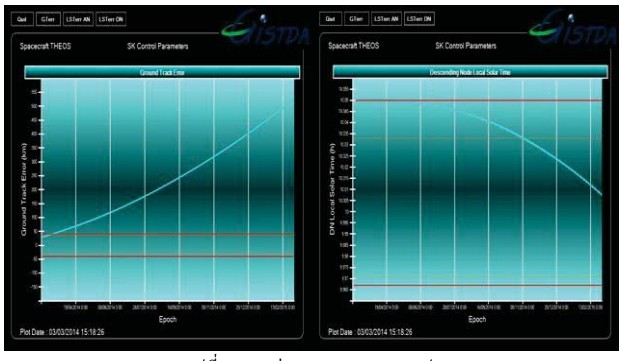


รูปที่ 1 ภาพรวมโครงสร้างของระบบ

การพัฒนาระบบโปรแกรม และส่วนของการติดต่อผู้ใช้งาน (Graphical User Interfaces: GUI) ของโปรแกรม EMERALD พัฒนาโดยภาษา C++ ใน Visual Studio 2008 บนระบบปฏิบัติการWindow ซึ่งพัฒนาในรูปแบบของ Windows Forms Application ด้วย .NET Framework 3.5 ดังรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 GUI ของโปรแกรม EMERALD



รูปที่ 3 GUI ส่วนการแสดงผลกราฟ

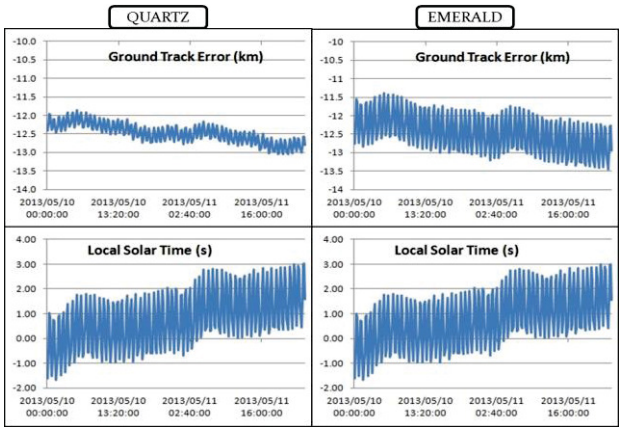
3. ผลการพัฒนาและการทดสอบ

จากหลักการและวิธีการที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2 ได้นำมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อใช้งานในแต่ละรูปแบบ การทดสอบผลจากการพัฒนาระบบในแต่ละโมดูลทั้ง 5 โมดูล โดยใช้การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แตกต่างกันจากการคำนวณของโปรแกรม EMERALD กับ QUARTZ++ ที่ใช้ในปัจจุบัน

3.1 Event Prediction Module

เป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูลการตรวจสอบสถานะของวงโคจรดาวเทียมโดยตรวจสอบค่าความสูงของวงโคจรดาวเทียม (Semi-major Axis) ผ่านทางค่า Ground Track Error ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสูงของวงโคจรดาวเทียม และค่าความเอียงของระนาบวงโคจรดาวเทียม (Inclination) ผ่านทางค่า Local Solar Time ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเอียงของระนาบวงโคจรดาวเทียม และค่าสถานะอื่นๆ ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าข้อมูลสถานะของวงโคจรดาวเทียม ที่ใช้ตรวจสอบค่าความสูง ความเอียง และค่าสถานะอื่นๆ ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม QUARTZ++ กับ EMERALD มีความใกล้เคียงกันมาก

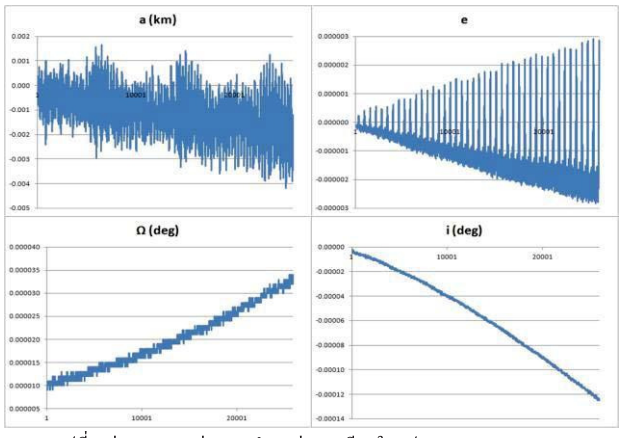


รูปที่ 4 ค่าความแตกต่างของค่าสถานะวงโคจรดาวเทียม

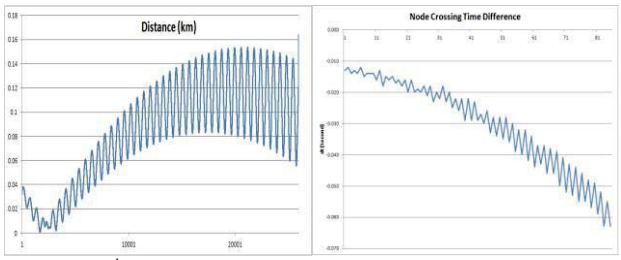
3.2 Generate file for MPC Module

เป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูล วงโคจรดาวเทียม (Ephemeris) และเวลาโคจรตัดเส้นศูนย์สูตร (Node Crossing Time) โดยค่าของตำแหน่งดาวเทียมจะอยู่ในรูปแบบ Kepler element เพื่อใช้ในการวางแผนถ่ายภาพของดาวเทียม ซึ่งในการวางแผนถ่ายภาพ จำเป็นจะต้องรู้ตำแหน่งของดาวเทียมในแต่ละเวลา เพื่อทำแผนคำสั่งถ่ายภาพให้ดาวเทียม ถ่ายภาพตามเวลาที่ดาวเทียมผ่านพื้นที่ที่ต้องการถ่ายภาพ

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 5 และ 6 จะเห็นว่าข้อมูลตำแหน่งในแต่ละเวลาและเวลาโคจรตัดเส้นศูนย์สูตร ที่ใช้ในการวางแผนถ่ายภาพของดาวเทียม เปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม QUARTZ++ กับ EMERALD มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งค่าความแตกต่างประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5 ค่าความแตกต่างของตำแหน่งดาวเทียมในรูปแบบ Kepler element

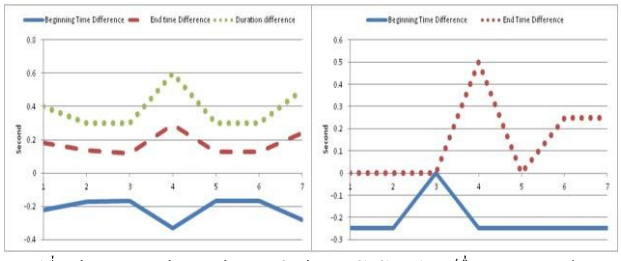


รูปที่ 6 ค่าความแตกต่างของระยะและเวลาโคจรตัดเส้นศูนย์สูตร

3.3 Transponder Activation Plan Module

เป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูลช่วงเวลาที่สถานีภาคพื้นดินสามารถติดต่อกับดาวเทียม และคำนวณช่วงเวลาในการ เปิด – ปิด อุปกรณ์สื่อสารบนดาวเทียม ให้เปิดเมื่อดาวเทียมโคจรผ่านรัศมีการรับสัญญาณ และปิดเมื่อดาวเทียมโคจรพ้นรัศมีการรับสัญญาณของสถานีภาคพื้นดิน สร้างเป็นแผนให้กับดาวเทียม

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าข้อมูลช่วงเวลา ที่ใช้บอกว่าสถานีภาคพื้นดินสามารถติดต่อกับดาวเทียม และการเปิด-ปิด อุปกรณ์สื่อสารบนดาวเทียม ตามเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม QUARTZ++ กับ EMERALD มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งค่าความแตกต่างประมาณ 0.12 เปอร์เซ็นต์

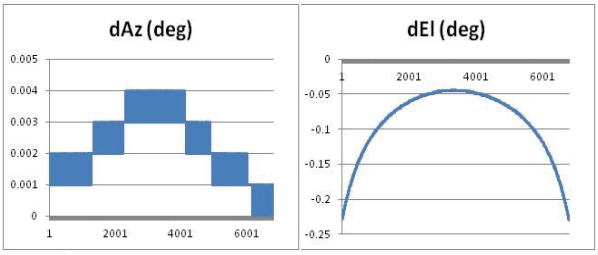


รูปที่ 7 ค่าความแตกต่างของช่วงเวลาติดต่อและเปิดปิดอุปกรณ์สื่อสารบนดาวเทียม

3.4 Antenna Pointing Module

เป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูลเวลาและมุมของจานรับสัญญาณภาคพื้นดิน S-Band ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารส่งคำสั่ง หรือ แผนต่างๆให้กับดาวเทียม

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 8 จะเห็นว่าข้อมูลเวลาและมุม ที่ใช้สั่งให้หมุนมุมกวาดและมุมเงยของจานรับสัญญาณเพื่อติดตามดาวเทียม ตามเวลาที่กำหนด ในช่วงที่ดาวเทียมผ่านเข้ามาในรัศมีรับสัญญาณของสถานีภาคพื้นดิน เปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม QUARTZ++ กับ EMERALD มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งค่าความแตกต่างประมาณ 4.4 เปอร์เซ็นต์

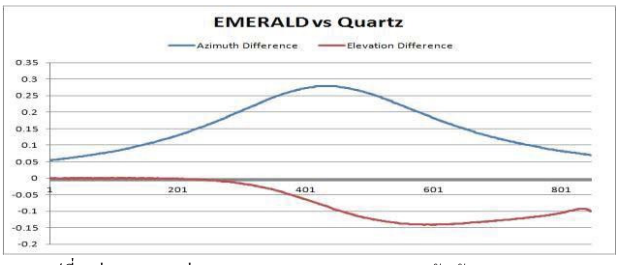


รูปที่ 8 ค่าความแตกต่างของมุมกวาดและมุมเงยของจานรับสัญญาณ S-Band

3.5 NORAD Two-line Generation Module

เป็นการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูล ที่ใช้ในการติดต่อระหว่างจานรับสัญญาณ X-Band และดาวเทียมเพื่อใช้ในการรับสัญญาณภาพถ่ายดาวเทียม ในรูปแบบของ NORAD TLE

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 9 จะเห็นว่าข้อมูล TLE ที่ใช้เป็นอินพุตให้กับระบบจานรับสัญญาณ X-Band เพื่อใช้ในการปรับมุมกวาดและมุมเงยของจานรับสัญญาณเพื่อติดตามดาวเทียม ในช่วงที่ดาวเทียมผ่านเข้ามาในรัศมีรับสัญญาณของสถานีภาคพื้นดิน เปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม QUARTZ++ กับ EMERALD มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งค่าความแตกต่างประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 9 ค่าความแตกต่างของมุมกวาดและมุมเงยของจานรับสัญญาณ X-Band

4. บทสรุปและแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบวิเคราะห์และประมวลผลวงโคจรดาวเทียม (EMERALD) ซึ่งประกอบไปด้วย 5 โมดูลการใช้งานสามารถคำนวณและสร้างชุดข้อมูลที่จำเป็นต่อการปฏิบัติงานของฝ่ายวิเคราะห์วงโคจรและวัตถุอวกาศ และฝ่ายต่างๆ ซึ่งใช้ในการติดต่อสื่อสารและควบคุมดาวเทียม รวมทั้งใช้ในการวางแผนการถ่ายภาพและรับข้อมูลภาพได้ โดยที่ชุดข้อมูลที่ทำการคำนวณโดยโปรแกรม EMERALD มีค่าที่ใกล้เคียงกับชุดข้อมูลที่ทำการคำนวณโดยโปรแกรม QUARTZ++ ที่ใช้ปฏิบัติงานในปัจจุบัน แต่สิ่งที่แตกต่างคือโปรแกรม EMERALD เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง ทำให้สามารถปรับปรุงแก้ไขพัฒนาต่อยอดตามความต้องการใช้งานได้ และช่วยสร้างองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีอวกาศภายในประเทศลดการพึ่งพาจากต่างชาติ

แนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต จะเป็นการนำโปรแกรม EMERALD ไปทดสอบใช้งานเชื่อมต่อกับระบบเดิมอื่นๆของดาวเทียมไทยโชต (Thaichote Satellite) ควบคู่กับระบบเดิมเพื่อทดสอบการเข้ากันได้ของระบบในระยะยาวเพื่อเข้ามาแทนที่โปรแกรม QUARTZ++ และได้วางแนวทางในการพัฒนาโมดูลอื่นๆต่อ ซึ่งปัจจุบันกำลังเริ่มพัฒนาโมดูลทางด้าน การปรับวงโคจรของดาวเทียม (Orbit Control Manoeuvre) และ ระบบประเมินความเสี่ยงของการเข้าใกล้ของวัตถุอวกาศ ได้แก่ Orbit Control Computation and Optimization, Manouvre Plan Generation and Calibration, Transfer Orbit, Propellant Accounting และ Collision Avoidance Assessment

เอกสารอ้างอิง

[1] Pornthep Navakitkanok, “THEOS Orbit Maintenance: Assessment of 2 Years Operations”, The 22nd International Symposium on Space Flight Dynamics, Sao Jose dos Campos, Brazil, 28th February – 4th March, 2011.

[2] http://mathworld.wolfram.com/SphericalHarmonic.html.

[3] Lerch, F.J., Wagner, C.A., Smith, D.E., Sandson, M.L., Brownd, J.E., Richardson, J.A., “Gravitational Field Models for the Earth”, Report X55372146, Goddard Space Flight Center, Greenbelt/Maryland, 1972.

[4] P. Palmer, P. Aarseth, S. Mikkola and Y. Hashida, “High Precision Integration Methods for Orbit Modeling”, Journal of Astronautical Science, Vol. 46, No. 4, 1998, pp. 329-342.