

ภาวะย้อนแย้งของวิศวกรรมมรดก: ความท้าทายในการเปลี่ยนผ่านสู่สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ กำหนดในระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกของประเทศสหรัฐอเมริกา

The Legacy Engineering Paradox: Software-Defined Architecture Transition Challenges in the U.S. Global Positioning System (GPS)

อริยพล ชีระชุติกุล¹
Ariyaphon Theerachutikun¹

Received: April 11, 2026

Revised: June 9, 2026

Accepted: June 11, 2026

บทคัดย่อ

บทความวิชาการเชิงวิเคราะห์ฉบับนี้ศึกษาพัฒนาการเชิงยุทธศาสตร์และวิศวกรรมระบบของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกของประเทศสหรัฐอเมริกา (Global Positioning System: GPS) โดยย้อนรอยตั้งแต่ยุคบุกเบิกภายใต้การค้นพบปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ในโครงการ NAVSAT (Transit) จนถึงความท้าทายเชิงโครงสร้างของระบบควบคุมภาคพื้นดินยุคใหม่ (Next-Generation Operational Control System: OCX) เน้นหาเน้นการสำรวจ “ภาวะย้อนแย้งของวิศวกรรมมรดก” (Legacy Engineering Paradox) ซึ่งสถาปัตยกรรมที่เคยเป็นรากฐานแห่งความสำเร็จในอดีต ได้แก่ ระบบแบบรวมศูนย์ (Monolithic Architecture) ภาษา Ada และโครงสร้างข้อมูลความเร็วต่ำ 50 bps กลับกลายเป็นข้อจำกัดเชิงโครงสร้างที่ขัดขวางการขยายตัวและการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในยุคดิจิทัล

ผลการศึกษาพบว่าโครงการ OCX เผชิญกับความท้าทายอย่างมีนัยสำคัญในการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Software-Defined Transition Challenges) ส่งผลให้โครงการเกิดความล่าช้ากว่าแผนเดิมสะสมกว่า 16 ปี และมีงบประมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเกินกรอบที่กำหนด ปัจจัยหลักเกิดจากภาวะโหลตเกินพิกัดของระบบประมวลผลแบบกระจายศูนย์อันเกิดจากสถาปัตยกรรมเชิงบริการ (Service-Oriented Architecture: SOA) วัฏจักรแห่งความล้าสมัยก่อนการติดตั้งของเทคโนโลยี (Obsolescence Cycle) การกีดกันการรักษาความปลอดภัยระดับสูงสุด (Cyber-hardened) และการะงันจากการเปลี่ยนผ่านระบบแบบไร้รอยต่อ (Zero Downtime) บทความสรุปด้วยข้อเสนอเชิงยุทธศาสตร์ในการปรับตัวผ่านแนวคิด Modular Open Systems Approach (MOSA) การพัฒนาแบบ DevSecOps ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการบูรณาการเทคโนโลยีอุบัติใหม่ เช่น Quantum PNT และสถาปัตยกรรมดาวเทียมวงโคจรต่ำ (LEO PNT) เพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพ ความยืดหยุ่น และความมั่นคงของโครงสร้างพื้นฐานการนำทางในระดับโลกอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก ระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ วิศวกรรมมรดก ระบบควบคุมภาคพื้นดิน สถาปัตยกรรมระบบเปิด ปัญญาประดิษฐ์ ควอนตัม พีเอ็นที

¹รองศาสตราจารย์ กองวิชาการเรือและเดินเรือ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Associate Professor, Department of Seamanship and Navigation, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy.

Email: ariyaphon@gmail.com

Abstract

This analytical study examines the strategic and system engineering evolution of the Global Positioning System (GPS) of the United States, tracing its origins from Cold War Doppler Effect discoveries in the NAVSAT (Transit) program to the contemporary structural challenges of the Next-Generation Operational Control System (OCX). The analysis focuses on the “Legacy Engineering Paradox,” whereby foundational design decisions—specifically monolithic architectures, the Ada programming language, and low-rate 50 bps data structures—once essential to early system robustness, have become major structural constraints in the digital era.

The study identifies that the OCX program is experiencing significant Software-Defined Transition Challenges, resulting in more than a 16-year cumulative schedule delay and considerable cost overruns. Key contributing factors include distributed system overload induced by Service-Oriented Architecture (SOA), the persistent obsolescence cycle of hardware and software before deployment, intensive cyber-hardened security requirements, and the immense burden of zero-downtime mission migration. The article concludes by presenting remediation strategies grounded in the Modular Open Systems Approach (MOSA), DevSecOps, Artificial Intelligence (AI), and the integration of future-proof technologies such as Quantum PNT and Low Earth Orbit (LEO PNT) satellite architectures, to enhance the long-term resilience, precision, and strategic reliability of global navigation infrastructure.

Keywords: Global Positioning System (GPS), Software-Defined Systems, Legacy Engineering, OCX Ground Segment, MOSA, Artificial Intelligence, Quantum PNT

1. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.1 เพื่อวิเคราะห์พัฒนาการเชิงประวัติศาสตร์และวิศวกรรมของระบบ GPS ตั้งแต่ยุคก่อนดาวเทียมอ้างอิงจนถึงยุคสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์กำหนด (Software-defined Architecture)

1.2 เพื่อสังเคราะห์ปัจจัยเชิงโครงสร้างที่ทำให้เกิดความล่าช้าและงบประมาณเกินกรอบของโครงการ OCX พร้อมเสนอแนวทางเชิงยุทธศาสตร์สำหรับการเปลี่ยนผ่านระบบโครงสร้างพื้นฐานมรดกสู่สถาปัตยกรรมแบบเปิดในบริบทของเทคโนโลยีอุบัติใหม่

2. ทฤษฎีและหลักวิชาการ

2.1 บริบททางประวัติศาสตร์: ยุคก่อนดาวเทียมอ้างอิงสู่การพัฒนาบรรทัดฐานการนำทางระดับโลก

การอุบัติขึ้นของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกไม่ได้เป็นเพียงผลลัพธ์จากการพัฒนาเทคโนโลยีแบบเอกเทศ ทว่าเกิดจากพลวัตทางภูมิรัฐศาสตร์และความก้าวหน้าทางฟิสิกส์อวกาศในยุคสงครามเย็น ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนผ่านกระบวนทัศน์ทางยุทธศาสตร์ จากการพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานภาคพื้นดินไปสู่การใช้ห้วงอวกาศเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการนำทาง

2.1.1 ข้อจำกัดของเทคโนโลยีภาคพื้นดินและการค้นพบปรากฏการณ์ดอปเพลอร์

ความตระหนักถึงความจำเป็นด้านการระบุพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูง มีรากฐานมาจากยุทธศาสตร์ทางการทหารในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองและจุดเริ่มต้นของยุคสงครามเย็น ระบบนำทางในยุคแรกเริ่ม อาทิ ระบบ LORAN (Long Range Navigation) และระบบ Omega ดำเนินการโดยอาศัยการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุจากสถานีภาคพื้นดิน ซึ่งมีข้อจำกัดทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญในด้านรัศมีการครอบคลุมและความแม่นยำที่มีความ

คลาดเคลื่อนในระดับกิโลเมตร [1] โครงสร้างพื้นฐานดังกล่าวยังมีความเปราะบางสูงต่อการถูกรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electronic Jamming) หรือการถูกทำลายทางกายภาพในสภาวะสงคราม

จุดเปลี่ยนสำคัญทางเทคโนโลยีเกิดขึ้นเมื่อสหภาพโซเวียตประสบความสำเร็จในการส่งดาวเทียมสปุตนิก-1 (Sputnik-1) เข้าสู่โคจรในปี 1957 นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยจอห์นส์ ฮอปกินส์ (APL) ค้นพบว่าการสังเกตความถี่ของสัญญาณวิทยุที่แปรผันตามปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) สามารถนำมาใช้คำนวณตำแหน่งและวิถีโคจรของดาวเทียมได้อย่างแม่นยำยิ่งยวด ข้อค้นพบนี้ได้นำไปสู่สมมติฐานผกผันที่ว่า หากระบบรับทราบพิกัดอ้างอิงของดาวเทียมที่แน่นอน ย่อมสามารถใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เดียวกันเพื่อคำนวณตำแหน่งของผู้รับสัญญาณบนพื้นโลกได้ [2]

2.1.2 สัมฤทธิ์ผลของโครงการ NAVSAT และยุทธศาสตร์การเปลี่ยนผ่านสู่ NAVSTAR GPS

จากสมมติฐานเชิงทฤษฎีดังกล่าว กองทัพเรือสหรัฐอเมริกาได้บูรณาการองค์ความรู้เพื่อริเริ่มโครงการ NAVSAT (Navy Navigation Satellite System) หรือโครงการ Transit ซึ่งนับเป็นระบบนำทางด้วยดาวเทียมเชิงปฏิบัติการระบบแรกของโลกในปี 1964 เพื่อสนับสนุนภารกิจของเรือดำน้ำบรรทุกขีปนาวุธทางยุทธศาสตร์ Polaris แม้จะถือเป็นนวัตกรรมขั้นสูงในขณะนั้น แต่ระบบ Transit กลับมีข้อจำกัดเชิงยุทธศาสตร์ที่ส่งผลกระทบขั้นวิกฤต ผู้ใช้งานจำเป็นต้องรอรอบการโคจรของดาวเทียมผ่านจุดอ้างอิงเหนือศีรษะนานหลายชั่วโมง อีกทั้งระบบยังถูกจำกัดขีดความสามารถในการประมวลผลพิกัดเพียงสองมิติ (ละติจูดและลองจิจูด) เท่านั้น ความสำเร็จและข้อจำกัดของ NAVSAT กลายเป็นรากฐานสำคัญที่นำไปสู่การรวมโครงการนำร่องในเวลาต่อมา

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเชิงโครงสร้างเหล่านี้ กระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ (DoD) ร่วมกับสำนักงานโครงการวิจัยขั้นสูงด้านกลาโหม (DARPA) จึงได้สถาปนาโครงการ NAVSTAR GPS ขึ้นในปี 1973 โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เชิงยุทธศาสตร์เพื่อรวมระบบนำทางทางการทหารที่กระจัดกระจายเข้าเป็นระบบเดียว [3] การเปลี่ยนผ่านจาก Transit สู่ GPS ตั้งอยู่บนเหตุผลความจำเป็นหลัก 3 ประการ:

(1) จาก 2 มิติ สู่ 3 มิติ (2D vs 3D): ระบบ Transit บอกพิกัดได้เพียงระนาบราบ ซึ่งเพียงพอสำหรับเรือเดินสมุทร แต่ไม่เพียงพอสำหรับเครื่องบินรบและขีปนาวุธที่ต้องการข้อมูลความสูง (Altitude) เพื่อความแม่นยำในการโจมตี [4]

(2) ความต่อเนื่องของสัญญาณ (Real-time Availability): ผู้ใช้งาน Transit ต้องรอจังหวะดาวเทียมโคจรผ่าน (Intermittent) ซึ่งไม่ตอบโจทย์ภารกิจที่ต้องการความเร็วสูง ในขณะที่ GPS ถูกออกแบบมาให้รับสัญญาณได้แบบทันทีและต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง (24/7 Real-time) [5]

(3) ความแม่นยำและพลวัต (Dynamic Accuracy): ระบบ Transit ใช้วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Doppler Shift) ซึ่งจะคลาดเคลื่อนสูงเมื่อผู้ใช้งานเคลื่อนที่เร็ว DARPA จึงเปลี่ยนมาใช้วิธีวัดความแตกต่างของเวลา (Time of Arrival) โดยอาศัยนาฬิกาอะตอมที่แม่นยำสูง ซึ่งเสถียรมากกว่าสำหรับการใช้งานบนเครื่องบินหรือขีปนาวุธความเร็วสูง [6]

DARPA ได้นำบทเรียนเชิงวิศวกรรมจาก Transit มาขยายขีดความสามารถ ผลลัพธ์คือดาวเทียมทดลองดวงแรกถูกยิงขึ้นในปี 1978 และระบบได้รับการประกาศว่ามีความสามารถในการปฏิบัติการเต็มรูปแบบ (Full Operational Capability) ในปี 1995 ด้วยดาวเทียม 24 ดวง

2.2 สถาปัตยกรรมเชิงลึก: โครงสร้างไตรภาคีและการบูรณาการข้อมูลนำทาง

ประสิทธิภาพของระบบ GPS ในการคำนวณพิกัดทางภูมิศาสตร์อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ จำเป็นต้องอาศัยสถาปัตยกรรมเชิงโครงสร้างแบบไตรภาคี (Tri-segment Architecture) ที่บูรณาการการทำงานระหว่างดาวเทียม ส่วนควบคุมภาคพื้นดิน และอุปกรณ์รับสัญญาณอย่างเป็นระบบ ผ่านการรับส่งชุดข้อมูลนำทาง (Navigation Message) ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยที่สำคัญที่สุด 2 ส่วน คือ Ephemeris และ Almanac

2.2.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment) และพลวัตของข้อมูลนำทาง

ดาวเทียมแต่ละดวงปฏิบัติหน้าที่เป็นสถานีถ่ายทอดสัญญาณวิทยุที่กระจายชุดข้อมูลดิจิทัลขนาด 1,500 บิตออกมาในทุกคาบเวลา 30 วินาที องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของชุดข้อมูลนี้คือ Ephemeris Data (ข้อมูลตำแหน่งวิถีโคจรละเอียด) ซึ่งเป็นข้อมูลระบุตำแหน่งที่แม่นยำยิ่งยวดของดาวเทียมเฉพาะดวงนั้น ๆ มีความจำเป็นสูงมากในการคำนวณพิกัด ทว่ามิ่วงจรชีวิตด้านความแม่นยำสั้น (ประมาณ 2-4 ชั่วโมง) เนื่องจากวงโคจรดาวเทียมมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดเวลาจากแรงดึงดูดของดวงจันทร์และแรงดันจากรังสีดวงอาทิตย์ (Orbital Perturbation) หากเครื่องรับไม่มีข้อมูล Ephemeris ที่เป็นปัจจุบัน จะไม่สามารถคำนวณพิกัดที่แม่นยำได้เลย

นอกจากนี้ ชุดข้อมูลดังกล่าวยังบรรจุ Almanac Data (ข้อมูลตำแหน่งดาวเทียมภาพรวม) ซึ่งบรรจุข้อมูลวิถีโคจรแบบหยาบของดาวเทียมทุกดวงในระบบ ช่วยให้เครื่องรับรู้ว่า ณ เวลานั้น มีดาวเทียมดวงไหนบ้างที่ควรอยู่บนท้องฟ้าเหนือศีรษะผู้ใช้งาน เพื่อให้เครื่องรับเลือกล็อกสัญญาณได้เร็วขึ้น (ช่วยลดเวลา Time to First Fix) โดยข้อมูล Almanac มีความละเอียดต่ำกว่าแต่มีอายุการใช้งานนานกว่าสูงสุดถึงหลายเดือน

2.2.2 ส่วนควบคุมภาคพื้นดิน (Control Segment): ศูนย์กลางการประมวลผลและการพยากรณ์

ส่วนควบคุมภาคพื้นดินทำหน้าที่เสมือนศูนย์กลางการประมวลผลเชิงวิเคราะห์ของระบบ ประกอบด้วยเครือข่ายสถานีตรวจสอบ (Monitor Stations) ที่เฝ้าติดตามและรวบรวมข้อมูลสถานะจากดาวเทียม ข้อมูลปฐมภูมิเหล่านี้จะถูกถ่ายโอนไปยังสถานีควบคุมหลัก (Master Control Station: MCS) เพื่อทำการประมวลผลผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง ระบบจะดำเนินการพยากรณ์ล่วงหน้าเกี่ยวกับพลวัตของวิถีโคจรล่วงหน้าในอีกไม่กี่ชั่วโมงข้างหน้า ว่าดาวเทียมจะอยู่ที่พิกัดทางเรขาคณิตใดในอวกาศ รวมถึงประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาอะตอม ภายหลังการคำนวณ ส่วนควบคุมจะดำเนินการอัปเดตชุดข้อมูล Ephemeris และ Almanac ที่ได้รับการปรับแก้ความถูกต้องแล้วขึ้นไปยังกลุ่มดาวเทียมผ่านเสาอากาศภาคพื้นดินเป็นระยะ เพื่อให้ดาวเทียมนำไปกระจายสัญญาณต่อให้กับผู้ใช้งาน

2.2.3 ส่วนผู้ใช้งาน (User Segment): การถอดรหัสและการประยุกต์ใช้สมการเรขาคณิต

ในมิติของผู้ใช้งาน เครื่องรับสัญญาณ GPS ดำเนินการรับและพยายามถอดรหัส (Decode) ชุดข้อมูลนำทางที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศ หากเครื่องรับไม่มีข้อมูล Almanac เลย ระบบจะเกิดปัญหาการเริ่มต้นระบบขณะเครื่องเย็น (Cold Start Problem) ซึ่งต้องสแกนหาดาวเทียมทุกดวงและใช้เวลาในการคำนวณพิกัด เครื่องรับจะนำข้อมูล Ephemeris มาผนวกกับระยะเวลาที่สัญญาณวิทยุเดินทางจากอวกาศมายังสายอากาศเพื่อประเมินระยะห่างเสมือน (Pseudorange)

กระบวนการแปลงข้อมูลสัญญาณให้เป็นพิกัดภูมิศาสตร์นี้อาศัยระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Trilateration ในทางปฏิบัติ เครื่องรับสัญญาณจำเป็นต้องซิงโครไนซ์กับดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง เพื่อคำนวณจุดตัดของทรงกลมเรขาคณิต โดยดาวเทียม 3 ดวงแรกถูกใช้เพื่อระบุค่าตัวแปรสามมิติ (ละติจูด ลองจิจูด และระดับความสูง) ในขณะที่ดาวเทียมดวงที่ 4 ทำหน้าที่เป็นตัวแปรควบคุมในการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเวลาระหว่างนาฬิกาควอตซ์ในเครื่องรับและนาฬิกาอะตอมในดาวเทียม ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงโครงสร้างสถาปัตยกรรมไตรภาคีและการสอดประสานข้อมูลนำทางแบบเรียลไทม์เพื่อสร้างเสถียรภาพการนำทางระดับโลก

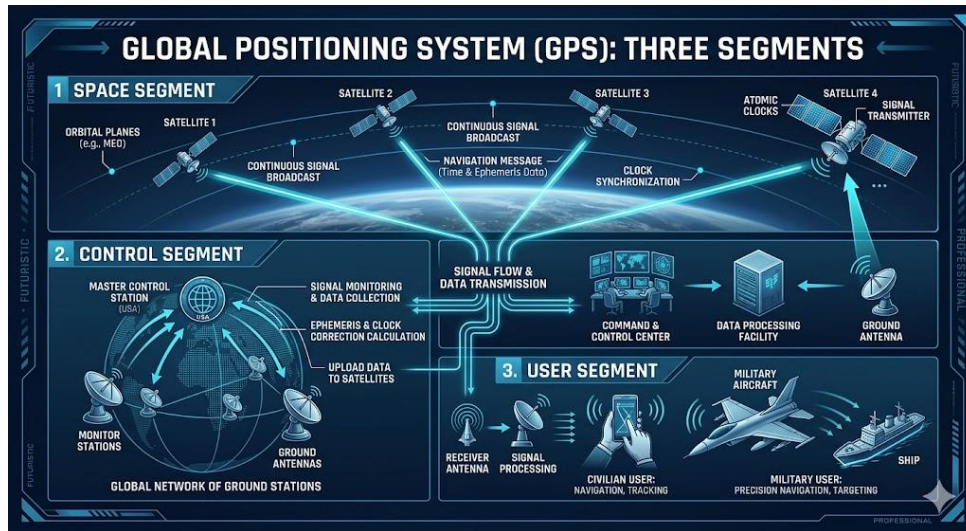
2.3 นวัตกรรมเชิงวิศวกรรมในยุคบุกเบิก: การทลายข้อจำกัดทางฟิสิกส์และกลศาสตร์อวกาศ

เพื่อให้โครงสร้างการออกแบบข้างต้นใช้งานได้จริงในยุคที่คอมพิวเตอร์ยังมีพลังประมวลผลจำกัด กองทัพสหรัฐฯ และหน่วยงานวิจัยต้องสร้างนวัตกรรมที่ทลายขีดจำกัดทางฟิสิกส์และวิศวกรรมซอฟต์แวร์

2.3.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพและพลวัตของนาฬิกาอะตอม

ความสำเร็จทางวิศวกรรมที่มีนัยสำคัญสูงสุดประการหนึ่งคือการบูรณาการทฤษฎีสัมพัทธภาพของอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ เข้าสู่สถาปัตยกรรมเชิงปฏิบัติการ อ้างอิงจากทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (Special Relativity) ความเร็วเชิง

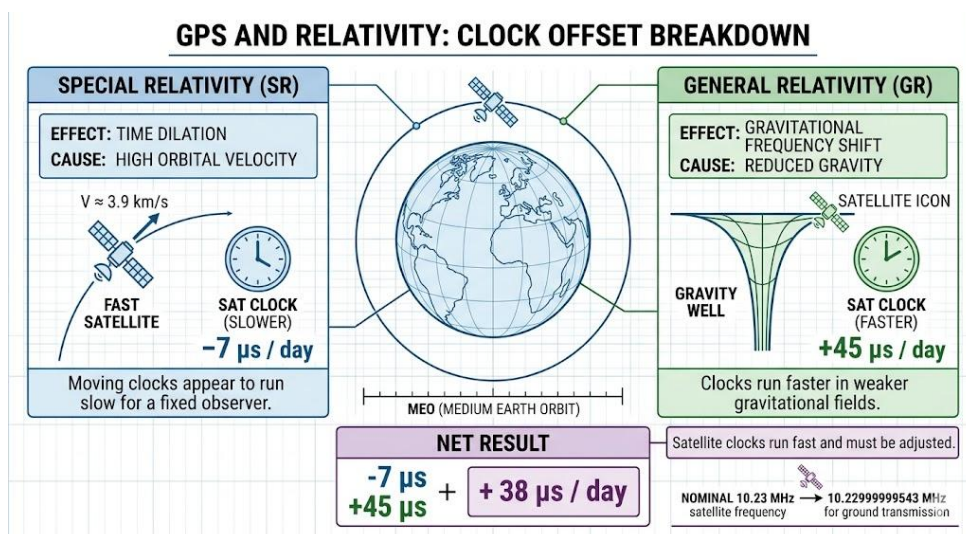
เส้นที่สูงของดาวเทียมในวงโคจรส่งผลให้เวลาบนดาวเทียมเดินช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับผู้สังเกตบนโลก (Time Dilation) ประมาณ 7 ไมโครวินาทีต่อวัน ในทางกลับกัน ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (General Relativity) กำหนดว่าความเข้มข้นของสนามโน้มถ่วงที่ลดลงในระดับความสูงของวงโคจรห่างจากพื้นโลก ส่งผลให้เวลาบนดาวเทียมเดินเร็วขึ้นประมาณ 45 ไมโครวินาทีต่อวัน



รูปที่ 1 โครงสร้างไตรภาคีของระบบ GPS (Tri-segment Architecture)

แหล่งที่มา: ผู้วิจัยดัดแปลงและเรียบเรียงจาก [1]

เมื่อทำการคำนวณผลสุทธิเชิงปริมาณรวม พบว่านาฬิกาบนดาวเทียมจะเดินเร็วขึ้นกว่าโลกประมาณ 38 ไมโครวินาทีต่อวัน (คิดจากสมการ $45 - 7 = 38$ ไมโครวินาที) หากปราศจากการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนนี้ ระบบจะสร้างข้อผิดพลาดเชิงตำแหน่งทางเรขาคณิตสูงถึง 11 กิโลเมตรต่อวัน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิศวกรจึงต้องปรับลดความถี่ฐานของนาฬิกาอะตอม (ทั้งชนิด Rubidium และ Cesium ที่มีความเสถียรของเวลาคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10^{-13} วินาทีต่อวัน และทนทานต่อรังสีคอสมิกในอวกาศ) จาก 10.23 MHz ให้เป็น 10.2299999543 MHz ก่อนการนำส่งเข้าสู่วงโคจร เพื่อให้เมื่ออยู่บนวงโคจรแล้ว เวลาจะซิงก์กับโลกได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจำลองกลไกการปรับแก้นาฬิกาอะตอมตามข้อกำหนดของสนามโน้มถ่วงและการเคลื่อนที่บนชั้นบรรยากาศอวกาศ [7]



รูปที่ 2 ทฤษฎีสัมพัทธภาพเชิงกาลของ GPS และการชดเชยค่าความต่างของเวลา (Relativistic Time Dilation)

แหล่งที่มา: ผู้วิจัยจัดทำ

2.3.2 เทคโนโลยีการมอดูเลตสัญญาณและสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์เชิงกำหนด

สำหรับการรักษาความมั่นคงของคลื่นสัญญาณจากมาตรการแทรกแซงทางอิเล็กทรอนิกส์ในยุคสงครามเย็น วิศวกรได้พัฒนาเทคนิค Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) บูรณาการร่วมกับการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส (CDMA) โดยการนำข้อมูลนำทางไปคูณกับรหัสสุ่มเทียม (Pseudo-Random Noise: PRN) ที่เรียกว่า Gold Codes รหัสเฉพาะนี้ช่วยให้ดาวเทียมทุกดวงส่งสัญญาณที่ความถี่เดียวกันได้ (L-Band) โดยเครื่องรับจะใช้รหัสเฉพาะของดาวเทียมแต่ละดวงในการแยกแยะและถอดรหัสออกมา [8]

การกระจายสัญญาณให้มีความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) สูงกว่าข้อมูลจริงมหาศาล ทำให้เกิดคุณประโยชน์จากกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing Gain) ส่งผลให้ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (Power Spectral Density) ของสัญญาณ GPS ต่ำกว่าระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลังทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Below the Noise Floor) คลื่นสัญญาณจึงยากต่อการตรวจจับในยามสงคราม แต่เครื่องรับที่มีรหัสถอดรหัสที่ถูกต้องจะสามารถกู้คืนข้อมูลได้อย่างแม่นยำ

2.3.3 วิศวกรรมซอฟต์แวร์ด้วยภาษา Ada และสถาปัตยกรรมแบบปิด

ความท้าทายของส่วนควบคุม (Control Segment) คือการจัดการกับโค้ดมหาศาลด้วยความเสถียร 100% กระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ ได้มีคำสั่งให้พัฒนาภาษาโปรแกรมประยุกต์ Ada ขึ้นเพื่อเป็นภาษามาตรฐานสำหรับระบบฝังตัวทางทหาร (MIL-STD-1815) [9] ภาษา Ada ถูกออกแบบให้เป็นภาษาที่มีความปลอดภัยสูง (Strongly Typed) มีระบบจัดการข้อผิดพลาด (Exception Handling) ที่ยอดเยี่ยม และรองรับหลักการการทำงานแบบขนาน (Concurrency)

ระบบควบคุมเดิมหรือสถาปัตยกรรมแผนวิวัฒนาการ (Architecture Evolution Plan: AEP) ของ Lockheed Martin ถูกออกแบบให้เป็นระบบที่คาดการณ์เวลาได้แน่นอน (Hard Real-time Determinism) โครงสร้างซอฟต์แวร์จึงเป็นแบบปิดและรวมศูนย์ (Monolithic Architecture) เพื่อลดความซับซ้อนในการติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูล (Inter-process Communication) ทำให้ระบบ AEP สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงต่อเนื่องได้ยาวนานหลายปีโดยปราศจากการรีสตาร์ทระบบ

2.4 ภาวะย้อนแย้งของวิศวกรรมมรดก: วิกฤตการณ์เชิงโครงสร้างของระบบดั้งเดิม

นวัตกรรมเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติในทศวรรษ 1970 ตั้งอยู่บนสมมติฐานทางวิศวกรรมที่มุ่งเน้นความแน่นอนเชิงเวลา ความเสถียร และความอยู่รอดในสภาวะสงคราม มากกว่าความสามารถในการปรับตัวเชิงวิวัฒนาการ เมื่อกาลเวลาผ่านไปและเทคโนโลยีสารสนเทศก้าวเข้าสู่ยุคดิจิทัล สถาปัตยกรรมที่เคยเป็นรากฐานอันมั่นคงได้แปรสภาพเป็นข้อจำกัดเชิงโครงสร้าง นำพาระบบเข้าสู่ "ภาวะย้อนแย้งของวิศวกรรมมรดก" (Legacy Engineering Paradox)

2.4.1 ความเปราะบางในสถาปัตยกรรมแบบ Monolithic และความซับซ้อนเชิงระบบ

สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์แบบ Monolithic ซึ่งรวบรวมฟังก์ชันการทำงานทุกส่วนประกอบเข้าเป็นระบบหน่วยเดียว เพื่อตอบสนองต่อข้อจำกัดด้านทรัพยากรฮาร์ดแวร์ในทศวรรษ 1970 ก่อให้เกิดสถานะความพัวพันอย่างแน่นหนาของส่วนประกอบ (Tight Coupling) ตั้งแต่การคำนวณจนศาสตร์ของวงจรไปจนถึงระบบความปลอดภัย การดำเนินการแก้ไขจุดคำสั่งเพียงเพื่อปรับปรุงฟังก์ชันหรือเพิ่มสัญญาณมาตรฐานใหม่ (เช่น L5 หรือ M-Code) จะก่อให้เกิดผลกระทบสืบเนื่องแบบโดมิโน (Ripple Effect) ที่แพร่กระจายและสร้างข้อผิดพลาดในองค์ประกอบหลักอื่น ๆ ส่งผลให้กระบวนการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง (Verification and Validation) ต้องผ่านวงจรที่ใช้ทรัพยากรสูงและกินเวลายาวนานหลายปี ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีทางวิศวกรรมซอฟต์แวร์ของ Brooks ที่ระบุว่าความซับซ้อนเชิงระบบที่เพิ่มขึ้นในลักษณะทวีคูณ ไม่สามารถบรรเทาได้ด้วยการเพิ่มสมรรถนะของฮาร์ดแวร์เพียงประการเดียว [10]

2.4.2 ข้อจำกัดด้านอัตราการรับส่งข้อมูลและภาวะสูญสิ้นองค์ความรู้เชิงสถาบัน

ข้อจำกัดดังกล่าวยังมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นจากอัตราการส่งข้อมูล (Data Rate) ของโครงสร้างเดิมที่ถูกกำหนดไว้คงที่ที่ 50 bps ซึ่งปราศจากคุณสมบัติความสามารถในการขยายขนาด (Scalability) ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลแบบตายตัว (Fixed-Format) เพื่อรองรับการเข้ารหัสที่ซับซ้อนหรือแพ็คเกจข้อมูลขนาดใหญ่ การพยายามบรรจุข้อมูลสมัยใหม่ที่มีความหนาแน่นสูงลงในช่องทางการสื่อสารความเร็วต่ำเดิม ก่อให้เกิดความล่าช้าในระดับวิกฤต (High Latency) และเพิ่มความเสี่ยงต่อความล้มเหลวในการถอดรหัสสัญญาณของเครื่องรับ

นอกจากนี้ หน่วยงานที่รับผิดชอบยังต้องเผชิญกับ ภาวะสูญสิ้นความทรงจำระดับสถาบัน (Institutional Memory Loss) สืบเนื่องจากการเกษียณอายุของบุคลากรทางวิศวกรรมที่มีความเชี่ยวชาญเชิงลึกในภาษา Ada ขาดแคลนผู้สืบทอดที่สามารถตีความตรรกะระดับต่ำ (Low-level Logic) ของระบบได้อย่างถ่องแท้ ประกอบกับ หลักการทำงานแบบ Hard Real-time ของระบบเดิมมักสร้างความขัดแย้งเชิงจังหวะ (Synchronization Conflict) เมื่อต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลกับเครือข่ายโทรคมนาคมสมัยใหม่ ซึ่งความคลาดเคลื่อนเชิงเวลาเพียงไมโครวินาทีอาจส่งผลให้พิกัดคลาดเคลื่อน ปัจจุบันเหล่านี้ผลักดันให้เกิดความจำเป็นในการรื้อถอนสถาปัตยกรรมดั้งเดิมเพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มใหม่โดยสมบูรณ์ [11]

2.5 การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบควบคุมยุคใหม่ (OCX) และความจำเป็นเชิงยุทธศาสตร์

การตัดสินใจเปลี่ยนผ่านสู่สถาปัตยกรรมที่กำหนดโดยซอฟต์แวร์ (Software-Defined Transition) ในช่วงทศวรรษ 2000 ได้รับอิทธิพลจากความสำเร็จของระบบสารสนเทศเชิงพาณิชย์ หน่วยงานด้านกลาโหมสหรัฐฯ เล็งเห็นว่าความคล่องตัวของซอฟต์แวร์ (Software Agility) การใช้ฮาร์ดแวร์เชิงพาณิชย์ (Commercial Off-The-Shelf: COTS) และสถาปัตยกรรมเชิงบริการ (Service-Oriented Architecture: SOA) สามารถลดต้นทุนและเร่งการพัฒนา ระบบที่ซับซ้อนได้ กระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ และบริษัทพันธมิตร RTX (เดิมคือ Raytheon) ภายใต้สัญญาของกองทัพอวกาศสหรัฐฯ (U.S. Space Force) จึงได้ริเริ่มโครงการพัฒนาระบบควบคุมภาคพื้นดินยุคใหม่ภายใต้ชื่อ โครงการ OCX เพื่อเป็นกระดูกสันหลังของระบบดาวเทียม GPS III [12]

2.5.1 ยุทธศาสตร์การเปลี่ยนผ่านสู่สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์กำหนด

โครงการ OCX ยึดหลักการสถาปัตยกรรมแบบเปิด (Open Architecture) ที่ปรับปรุงให้ระบบสามารถประมวลผลบนเซิร์ฟเวอร์มาตรฐานเชิงพาณิชย์ (COTS) เพื่อเอื้ออำนวยให้เกิดการอัปเดตฟังก์ชันผ่านชุดคำสั่งซอฟต์แวร์โดยปราศจากความจำเป็นในการปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม วัตถุประสงค์หลักของโครงการคือการบริหารจัดการสัญญาณพลเรือนใหม่ ๆ (L1C) ควบคู่ไปกับการควบคุมและขับเคลื่อนสัญญาณทางทหาร M-Code (Military Code) ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความเข้มสูงและได้รับการเข้ารหัสขั้นสูงเพื่อต้านทานการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Anti-jamming) ในสมรภูมิสมัยใหม่ [12] เพื่อให้การเปลี่ยนผ่านระบบที่มีความเสี่ยงสูงเป็นไปอย่างเป็นระบบ โครงการ OCX จึงถูกแบ่งลำดับการพัฒนาออกเป็นระยะ (Blocks) ดังนี้:

(1) OCX Block 0 (Launch and Checkout System): ทำหน้าที่เป็นระบบสนับสนุนเบื้องต้นสำหรับการปล่อยดาวเทียม GPS III และการตรวจสอบสถานะวงโคจร (Bus Diagnostics) ซึ่งปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้งานจริงเพื่อรองรับการส่งดาวเทียมรุ่นใหม่เข้าสู่วงโคจร [12]

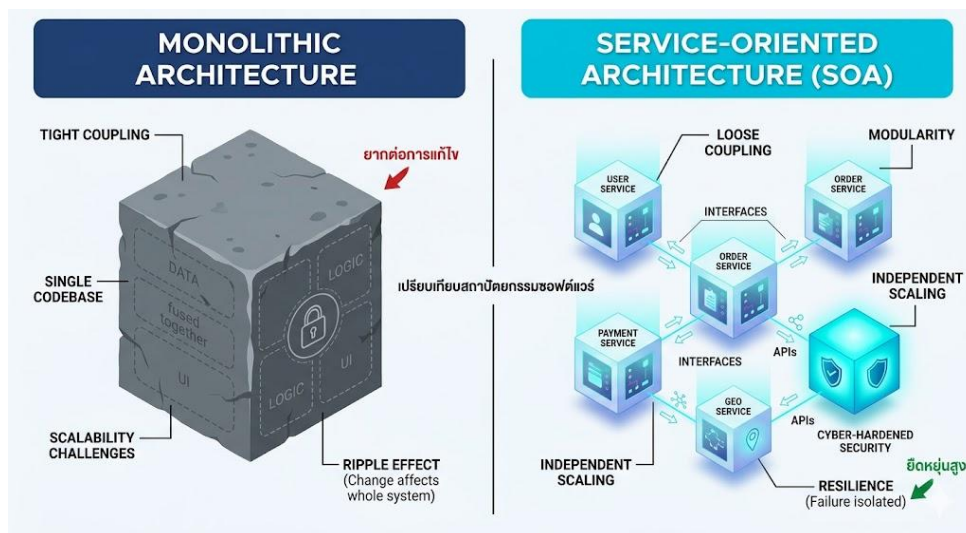
(2) OCX Block 1 & 2 (The Comprehensive Core): คือส่วนควบคุมหลักที่จะเข้าทดแทนระบบ AEP ทั้งหมด โดย Block 1 จะทำหน้าที่ควบคุมกลุ่มดาวเทียม (Constellation Management) และการประมวลผลค่า Ephemeris ขณะที่ Block 2 จะเน้นด้านการบริหารจัดการสัญญาณ M-Code และการยกระดับความปลอดภัยทางไซเบอร์ [12]

2.5.2 สถาปัตยกรรมเชิงบริการ (SOA) และมาตรการระบบปฏิบัติการสำรอง (COPs)

ในมิติของวิศวกรรมซอฟต์แวร์ การพัฒนาระบบ OCX ขับเคลื่อนด้วยสถาปัตยกรรมเชิงบริการ (Service-Oriented Architecture: SOA) นวัตกรรมหลักคือการประยุกต์ใช้แบบจำลองความละเอียดสูง (High-Fidelity Modeling)

สำหรับกระบวนการพยากรณ์วิถีโคจร (Ephemeris) ให้แม่นยำกว่าเดิมหลายเท่า ทว่าการออกแบบที่เปลี่ยนจาก Monolithic มาเป็นโมดูลย่อยที่กระจายตัวทำงานเป็นอิสระนี้ นำมาซึ่งความเสี่ยงเชิงระบบ หากซอฟต์แวร์เกิดความล่าช้าในการซิงโครไนซ์ข้อมูลระหว่างสถานี ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล Ephemeris ที่ส่งไปยังดาวเทียมอาจจะไม่อัปเดตหรือผิดพลาด ส่งผลให้เครื่องรับ GPS ทั่วโลกคำนวณตำแหน่งคลาดเคลื่อนได้ [12]

เพื่อบรรเทาความเสี่ยง in-flight system transition ในระหว่างที่โครงการเกิดความล่าช้า กองทัพอากาศสหรัฐฯ จึงมีความจำเป็นต้องจัดสรรงบประมาณเพิ่มให้แก่ Lockheed Martin เพื่อพัฒนาระบบปฏิบัติการสำรองที่เรียกว่า COps (Contingency Operations) เพื่อให้ระบบ AEP เดิมสามารถส่งการดาวเทียมรุ่นใหม่ (GPS III) ได้เป็นการชั่วคราว สะท้อนถึงการยอมรับความจริงที่ว่าระบบที่มีความซับซ้อนสูงต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนผ่านมากกว่าที่คาดการณ์ไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงข้อเปรียบเทียบเชิงสถาปัตยกรรมระหว่างโครงสร้างกระจายตัวแบบโมดูลกับระบบเอกภาพแบบดั้งเดิม [12]



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบโครงสร้างระบบแบบรวมศูนย์ (Monolithic) กับสถาปัตยกรรมเชิงบริการ (SOA)

แหล่งที่มา: ผู้วิจัยดัดแปลงจาก [11-12]

2.6 บทวิเคราะห์ความท้าทายเชิงโครงสร้างและงบประมาณที่เพิ่มสูงขึ้น

แม้หลักการทางวิศวกรรมของโครงการ OCX จะมีความสมบูรณ์ในเชิงทฤษฎี แต่กระบวนการนำไปปฏิบัติจริงกลับตกอยู่ในสถานะความท้าทายในการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Software-Defined Transition Challenges) ส่งผลให้โครงการล่าช้ากว่ากำหนดเดิมกว่าหนึ่งทศวรรษ (สะสมกว่า 16 ปี) และมีงบประมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเกินกรอบที่กำหนด (Cost Overrun) สูงกว่า 8 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งเป็นการละเมิดเกณฑ์กฎหมายงบประมาณป้องกันประเทศ (Nunn-McCurdy Breach) โดยจากการวิเคราะห์เชิงระบบพบสาเหตุหลัก 4 ประการ

2.6.1 ภาวะโหลดเกินพิกัดในระบบประมวลผลแบบกระจายศูนย์

ปัญหาพื้นฐานประการแรกเกิดจากภาวะโหลดเกินพิกัดในระบบประมวลผลแบบกระจายศูนย์ (Distributed System Overload) การประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรม SOA กับระบบนำทางที่ต้องการอัตราการตอบสนองระดับนาโนวินาที ก่อให้เกิดสถานะคอขวดทางเครือข่าย เมื่อฟังก์ชันที่เคยทำงานอยู่บนหน่วยประมวลผลเดียวกันในระบบ Monolithic ถูกแยกย่อยออกเป็นบริการขนาดเล็ก (Microservices) กระจายตัวอยู่บน Middleware ความล่าช้าแฝงในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดเครือข่าย (Network Latency) และภาระในการจัดการสถานะข้อมูล (State Management) กลายเป็นอุปสรรคสำคัญในการคำนวณวิถีโคจร (Ephemeris) และการปรับแก้เวลาของนาฬิกาอะตอม ความพยายามในการขจัดความล่าช้าเหล่านี้นำไปสู่การขยายตัวของฐานรหัสคำสั่ง (Codebase) ซึ่งมีบรรทัดคำสั่ง (Lines of Code) พุ่งสูงเกินกว่า 10 ล้านบรรทัด ส่งผลให้การทดสอบและหาจุดข้อผิดพลาด (Debugging) ทำได้ยากลำบากอย่างยิ่ง [13]

2.6.2 มาตรฐานความมั่นคงปลอดภัยและวัฏจักรแห่งความล้าสมัยทางเทคโนโลยี

ปัจจัยที่สองสืบเนื่องจากข้อกำหนดด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ระดับสูง (Cyber-hardened) ที่เน้นการวางกรอบป้องกันไว้ตั้งแต่เริ่มต้น (Security by Design / Cybersecurity Integrated Framework) ทุกโมดูลซอฟต์แวร์ต้องผ่านการตรวจสอบช่องโหว่ซ้ำแล้วซ้ำเล่า กรอบ V&V (Verification & Validation) ที่เข้มงวดสร้างภาระการประมวลผลและทำให้ประสิทธิภาพการประมวลผลลดลง [14]

ปัจจัยที่สามคือ "วัฏจักรแห่งความล้าสมัยทางเทคโนโลยี" (The Obsolescence Cycle) ระยะเวลาดำเนินโครงการที่ยืดเยื้อส่งผลให้ฮาร์ดแวร์เซิร์ฟเวอร์ ระบบปฏิบัติการ และไลบรารีซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้ในระยะเริ่มต้น ทอยยลสิ้นสุดวงจรชีวิตการสนับสนุน (End-of-Life) ทีมวิศวกรจึงต้องติดอยู่ในวงจรที่ต้องทำการเขียนโครงสร้างโค้ดใหม่ (Refactoring / Update-on-Update) เพื่อให้อัปเดตตามแพตช์ความปลอดภัยสมัยใหม่ตลอดเวลา แทนที่จะได้ใช้เวลาไปกับการพัฒนาฟังก์ชันหลัก (Core Logic) ของการควบคุมดาวเทียม เปลี่ยนสถานะของนวัตกรรมให้กลายเป็นภาระทางเทคโนโลยี (Technical Debt) [15]

2.6.3 การกิจ Zero Downtime และการเข้ากันได้ย้อนหลัง

ปัจจัยที่สี่คือการกิจที่ต้องไม่มีช่วงเวลาหยุดทำงาน (Zero Downtime) การย้ายระบบควบคุมจากระบบเก่าไปสู่ระบบใหม่ถือเป็น การเปลี่ยนผ่านระบบขณะปฏิบัติการ (In-flight System Transition) ซึ่งความผิดพลาดเพียงเสี้ยววินาทีอาจส่งผลต่อความแม่นยำของระบบนำร่องทั่วโลก ซ้ำร้ายด้วยข้อกำหนดที่บังคับให้ระบบใหม่ต้องมีความสามารถในการทำงานร่วมกับระบบเก่าได้ (Backward Compatibility) โดย OCX ต้องสามารถควบคุมดาวเทียมรุ่นเก่าอย่าง GPS IIF และ IIR ได้ด้วย การสร้างเลเยอร์ซอฟต์แวร์เพื่อจำลองโปรโตคอลการสื่อสารในยุค 1980 ให้ทำงานบนระบบ Virtualization ของศตวรรษที่ 21 ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการจำลองพฤติกรรมฮาร์ดแวร์ (Hardware Emulation) ซึ่งข้อผิดพลาดเพียงเล็กน้อยนำไปสู่บั๊กและการสั่งการที่คลาดเคลื่อน โครงการ OCX จึงสูญเสียทรัพยากรไปกับการแก้ปัญหาจุดเชื่อมต่อระหว่างยุคมากกว่าการสร้างนวัตกรรมแห่งอนาคต [16]

2.7 นวัตกรรมเทคโนโลยีและการกำหนดทิศทางยุทธศาสตร์แห่งอนาคต

จากความท้าทายความซับซ้อนทางซอฟต์แวร์ กองทัพอวกาศสหรัฐฯ และ RTX จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนแนวทางการบริหารจัดการโครงการและการนำเทคโนโลยีอุบัติใหม่ (Emerging Technologies) เข้ามาบูรณาการเพื่อกระจายความเสี่ยงเชิงโครงสร้าง (Risk Distribution) และสร้างระบบนำทางที่ปราศจากจุดล้มเหลวแบบรวมศูนย์ (Single Point of Failure) [17]

2.7.1 กระบวนทัศน์ MOSA และการสถาปนาระบบ DevSecOps

เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องเชิงโครงสร้างของโครงการ OCX กองทัพอวกาศสหรัฐฯ ได้ปรับเปลี่ยนมาใช้ระเบียบวิธี Modular Open Systems Approach (MOSA) บูรณาการร่วมกับการพัฒนาซอฟต์แวร์สมัยใหม่ที่รวมการรักษาความปลอดภัยไว้ในทุกขั้นตอน (DevSecOps) แนวทางนี้เน้นการแยกส่วนประกอบของซอฟต์แวร์ให้เป็นโมดูลที่เป็นอิสระต่อกัน (Decoupling) ช่วยให้ทีมวิศวกรสามารถส่งมอบฟังก์ชันการทำงานเป็นส่วนย่อย (Incremental Delivery) เช่น โครงการ OCX Block 0) ทำให้สามารถบริหารจัดการ อัปเดต หรือซ่อมแซมเฉพาะส่วนได้โดยไม่กระทบต่อระบบหลักทั้งหมด ช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบและปล่อยฟีเจอร์ใหม่ได้อย่างมีนัยสำคัญ [18]

2.7.2 ปัญหาความเสี่ยงเชิงระบบของระบบ OCX ได้ถูกแก้ได้อย่างไรผ่านระบบ MOSA

ในระบบสถาปัตยกรรมแบบเปิดและยืดหยุ่นของ MOSA ความท้าทายในการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ของโครงการ OCX ซึ่งเสี่ยงต่อข้อมูล Ephemeris ผิดพลาดอันเนื่องมาจากภาวะโหลตเกินพิกัดของระบบประมวลผลแบบกระจายศูนย์ ได้ถูกแก้ไขผ่านการแยกส่วนประกอบซอฟต์แวร์ (Decoupling) จากเดิมที่โมดูลประมวลผลข้อมูล Ephemeris และโมดูลการซิงโครไนซ์ข้อมูลภาคพื้นดินถูกผูกติดกันผ่าน Middleware ของระบบ SOA ที่มีความหนาแน่นสูง MOSA ได้ทำการแยกฟังก์ชันการคำนวณวงโคจรความละเอียดสูง (High-Fidelity Modeling)

ออกมาเป็นไมโครเซอร์วิสอิสระที่ทำงานอยู่บนเลเยอร์โครงสร้างพื้นฐานที่มีการควบคุมลำดับความสำคัญของแบนด์วิดท์เครือข่ายอย่างเข้มงวด (Traffic Prioritization) [19]

เมื่อเกิดภาวะเครือข่ายหน่วง (Network Latency) หรือเกิดข้อผิดพลาด (Bug) ในโมดูลย่อยอื่น ๆ เช่น โมดูลการยืนยันตัวตนทางไซเบอร์ หรือโมดูลจัดการข้อมูลพลเรือน ระบบ MOSA จะจำกัดผลกระทบให้อยู่เฉพาะภายในโมดูลนั้น ๆ (Fault Isolation) โดยจะไม่ส่งผลกระทบแบบโดมิโน (Ripple Effect) มายังโมดูลคำนวณและอัปโหลดข้อมูล Ephemeris หลัก ส่งผลให้สถานีควบคุมหลักยังคงสามารถคำนวณและส่งผ่านข้อมูลวงโคจรที่ถูกต้องไปยังดาวเทียมได้ตามรอบเวลาที่กำหนดอย่างต่อเนื่อง ปราศจากความเสี่ยงทางฟิสิกส์ศาสตร์คลาดเคลื่อนในเครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้งานทั่วโลก ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง

2.7.3 การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และยุทธศาสตร์ระบบนำทางสำรอง

สำหรับการยกระดับขีดความสามารถเชิงปฏิบัติการ ได้มีการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวิถีโคจร (Ephemeris) ที่มีความผันผวนสูงจากปัจจัยรบกวนในอวกาศ ช่วยให้การพยากรณ์ทำได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าอัลกอริทึมแบบคงที่ รวมถึงการใช้ AI ในการตรวจจับความผิดปกติของพฤติกรรมระบบ (Anomaly Detection) เชิงรุกเพื่อป้องกันภัยคุกคามและการโจมตีไซเบอร์แบบ Zero-day [20] นอกจากนี้ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับสภาวะสมรรถนะที่ระบบ GPS ถูกปฏิเสธการเข้าถึง (GNSS-Denied Environments) กระทรวงกลาโหมได้อัดฉีดทุนวิจัยในเทคโนโลยีแห่งอนาคต 2 รูปแบบหลัก

(1) เทคโนโลยี Quantum PNT: ประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การแทรกสอดของอะตอมเย็น (Cold Atom Interferometry) ในสภาวะอุณหภูมิต่ำสุดขีด เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและการหมุน ช่วยพัฒนาระบบนำทางเฉื่อย (Inertial Navigation) ความแม่นยำสูงยิ่งยวดที่ไม่ต้องพึ่งพาสัญญาณวิทยุภายนอก และลดการสะสมของความคลาดเคลื่อน (Drift) ทำหน้าที่เป็นระบบสำรองเชิงยุทธศาสตร์ในสภาวะสงครามอิเล็กทรอนิกส์เต็มรูปแบบ [21]

(2) สถาปัตยกรรมดาวเทียมวงโคจรต่ำ (LEO PNT): นำมาใช้เพื่อเสริมทัพดาวเทียมในวงโคจรระดับปานกลาง (MEO) แบบดั้งเดิม เนื่องจากระบบ LEO PNT มีระยะทางทางกายภาพที่ใกล้โลกมากกว่า (~500 กม. เทียบกับ MEO ที่ ~20,000 กม.) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระดับพลังงานและความเข้มข้นของสัญญาณที่แผ่ลงมาถึงพื้นโลก โดยสัญญาณจากระบบ LEO PNT จะมีความเข้มข้นของคลื่นสัญญาณแรงกว่า GPS ดั้งเดิมถึง 1,000 เท่า ทำให้สามารถทะลุทะลวงสิ่งปลูกสร้างได้ดีกว่า และให้ยุทธศาสตร์การป้องกันการรบกวนสัญญาณ (Anti-jamming) ในระดับสูง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงตำแหน่งและโครงข่ายความหนาแน่นเชิงยุทธศาสตร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนในสนามรบยุคดิจิทัล [22]



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบเชิงยุทธศาสตร์ระหว่างระบบ LEO PNT และวงโคจรระดับกลาง (MEO)
แหล่งที่มา: ผู้วิจัยดัดแปลงจาก [22]

3. บทวิจารณ์และสรุป

ความท้าทายในการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ของโครงการ OCX เป็นบทเรียนเชิงประจักษ์ในงานวิศวกรรมระบบที่สะท้อนว่า การพยายามสร้างระบบที่ครอบคลุมทุกด้าน (Omnipotent System) ท่ามกลางการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีที่รวดเร็ว ความเข้มงวดของมาตรการความปลอดภัย และข้อจำกัดในการพึ่งพาระบบมรดกนำไปสู่ความซับซ้อนเชิงโครงสร้างและการบริหารจัดการที่ยากลำบาก

แนวทางเชิงยุทธศาสตร์อุบัติใหม่อย่าง MOSA, DevSecOps, AI, Quantum PNT และระบบ LEO PNT ไม่ควรถูกตีความว่าเป็นคำตอบสำเร็จรูป (Silver Bullet) ที่จะมาทดแทนระบบเดิมโดยสมบูรณ์ หากแต่เป็นกรอบในการกระจายความเสี่ยงเชิงโครงสร้าง (Risk Distribution) และเพิ่มความยืดหยุ่นเชิงระบบ (System Resilience) การก้าวข้ามจากระบบปิดในยุคสงครามเย็นไปสู่ระบบเปิดในอนาคต จำเป็นต้องอาศัยการรักษาสมดุลอย่างระมัดระวังระหว่างนวัตกรรมที่ล้ำสมัยและความยั่งยืนเชิงวิศวกรรม เพื่อรับประกันว่าโครงสร้างพื้นฐานระดับโลกอันเป็นศูนย์กลางของการนำทางจะยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงในระยะยาว

4. บันทึกเพิ่มเติมท้ายบทความ

หลังจากบทความนี้ได้รับการตอบรับ กองทัพอวกาศสหรัฐฯ (U.S. Space Force) ได้ประกาศยกเลิกโครงการ Next-Generation Operational Control System (OCX) อย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 17 เมษายน 2569 ภายหลังกระบวนการทดสอบเชิงบูรณาการเผยให้เห็นปัญหาทางเทคนิคที่ไม่สามารถแก้ไขได้ในกรอบเวลาที่เหมาะสม โดยกองทัพอวกาศสหรัฐฯ ตัดสินใจหันไปพัฒนาต่อยอดระบบควบคุมภาคพื้นดินเดิม (Architecture Evolution Plan: AEP) แทน เหตุการณ์นี้เป็นประจักษ์พยานเชิงประจักษ์ที่ตอกย้ำแก่นของ "ภาวะย้อนแย้งของวิศวกรรมมรดก" ที่บทความนี้นำเสนอ กล่าวคือ ความพยายามสร้างระบบทดแทนที่ครอบคลุมทุกด้านโดยสมบูรณ์ (Omnipotent Replacement) ภายใต้ภาระทางเทคนิคสะสมและข้อจำกัดด้านเวลา อาจมีความเสี่ยงสูงกว่าการทยอยปรับปรุงระบบมรดกเดิมแบบต่อเนื่อง ข้อเสนอเชิงยุทธศาสตร์ในบทความนี้ (MOSA, DevSecOps, AI, Quantum PNT และ LEO PNT) จึงยังคงมีความเกี่ยวข้องในฐานะกรอบแนวคิดสำหรับการกระจายความเสี่ยงเชิงโครงสร้างของระบบนำทางในอนาคต ไม่ว่าจะเป็นการผ่านโครงการทดแทนใหม่หรือผ่านการปรับปรุงระบบ AEP ที่มีอยู่เดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Misra P, Enge P. Global positioning system: signals, measurements, and performance. Lincoln (MA): Ganga-Jamuna Press; 2006.
- [2] Spilker JJ Jr. GPS signal structure and performance characteristics. Washington (DC): American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1994.
- [3] Congressional Research Service. The global positioning system (GPS): military and civilian modernization. Washington (DC): Congressional Research Service; 2023 Nov 15. Report No.: R47184.
- [4] Misra P, Enge P. Global positioning system: signals, measurements, and performance. Section on navigation message: ephemeris and almanac plurality. Lincoln (MA): Ganga-Jamuna Press; 2006.
- [5] Alley CO. Relativity and clocks in the Global Positioning System. Proc 13th Annu PTTI Appl Plan Meet. 1983;13(1):112–21.
- [6] Ashby N. Relativity in the Global Positioning System. Living Rev Relativ. 2003;6(1):1. doi:10.12942/lrr-2003-1.

- [7] Larson KM. GPS and relativity: an engineering success. *Phys Today*. 2021;74(5):42–8. doi:10.1063/PT.3.4748.
- [8] Spilker JJ Jr. GPS signal structure and performance characteristics. Section on spread spectrum and gold code modulation. Washington (DC): American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1994.
- [9] Department of Defense (US). Military standard: Ada programming language (MIL-STD-1815). Washington (DC): Department of Defense; 1980.
- [10] Brooks FP. No silver bullet: essence and accidents of software engineering. *IEEE Comput*. 1987;20(4):10–9. doi:10.1109/MC.1987.1663532.
- [11] Lockheed Martin. Legacy GPS operational control system (AEP) overview. Bethesda (MD): Lockheed Martin Space Systems; 2020.
- [12] RTX (Raytheon Technologies). Next-generation operational control system (OCX) fact sheet and milestone recovery report. Dulles (VA): RTX Intelligence & Space; 2025.
- [13] Clark S. 16 years and \$8 billion, the military's new GPS software still doesn't work [Internet]. *Ars Technica*; 2026 Mar 31 [cited 2026 May 28]. Available from: <https://arstechnica.com/space/2026/03/military-new-gps-software-challenges/>
- [14] Government Accountability Office (US). GPS modernization: OCX program faces technical and schedule challenges. Washington (DC): GAO; 2023. Report No.: GAO-23-106018.
- [15] Defense Science Board (US). Report on the GPS OCX program: root cause analysis of Nunn-McCurdy breach. Washington (DC): Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics; 2016.
- [16] Department of Defense, Chief Information Officer (US). DoD digital modernization strategy: software modernization and cybersecurity integration. Washington (DC): Office of the Chief Information Officer; 2020.
- [17] The Space Force's software struggle: from OCX to future systems. *Air Space Forces Mag*. 2026;109(3):22–9.
- [18] Government Accountability Office (US). GPS modernization: Space Force should reassess future ground control needs. Washington (DC): GAO; 2023. Report No.: GAO-23-105123.
- [19] GPS National Coordination Office (US). Operational constraints of legacy and new signal integration (LNAV to M-code). Washington (DC): National Space-Based PNT Coordination Office; 2025.
- [20] Department of Defense (US). Modular open systems approach (MOSA) for defense systems: engineering guidance. Washington (DC): Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering; 2020.
- [21] Department of Defense (US). Modular open systems approach (MOSA) implementation guide. Washington (DC): Product Support Manager Toolset; 2022.
- [22] National Institute of Standards and Technology (US). Quantum sensors for next-generation PNT. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology; 2024. NIST Special Publication 1200. doi:10.6028/NIST.SP.1200.