บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการค้นคว้าและศึกษาเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของการสำรวจด้วยการรังวัดตำแหน่งวัตถุบนโลก
2. สัณฐานของโลก
3. มูลฐานทางภูมิมาตรศาสตร์ (Geodetic Datum)
4. ค่าความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric Height)
5. การกำหนดตำแหน่งด้วยระบบจีพีเอส
6. หลักการของระบบจีพีเอส
7. เทคนิคการรังวัดของระบบจีพีเอส
8. การพัฒนาระบบการกำหนดจุดพิกัดด้วยดาวเทียม
   - 8.1 NAVSTAR GPS
   - 8.2 GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System)
   - 8.3 GNSS (Global Navigation Satellite System)
   - 8.4 BeiDou
   - 8.5 QZSS (Quasi Zenith Satellite System)
9. องค์ประกอบของระบบจีพีเอส
10. แนวโน้มของจีพีเอสในอนาคต
11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความเป็นมาและความสำคัญของการสำรวจด้วยการรังวัดตำแหน่งวัตถุบนโลก

โครงข่ายทางยีออเดซีของประเทศไทยในอดีต ได้ขยายโครงข่ายจากการรังวัดงานสามเหลี่ยม ซึ่งการรังวัดงานดังกล่าวมีข้อจำกัดในหลายด้าน เช่น ต้องมองเห็นระหว่างสถานีวัด ต้องอาศัยสภาพอากาศที่ดีในการมองเห็น การทำงานค่อนข้างช้า เป็นต้น ความจำเป็นในการใช้งานการสำรวจแบบเดิมมีน้อย จนกระทั่งการสำรวจก้าวเข้าสู่ยุคดาวเทียม ปัจจุบันได้เปลี่ยนแนวทางในการรังวัดขยายโครงข่าย จากงานสามเหลี่ยมมาใช้เทคนิคการรังวัดจากระบบดาวเทียม GPS เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ.2534 และยังคงดำเนินการอยู่อย่างต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ในการสำรวจเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิศวกรรมและการทำแผนที่ จำเป็นจะต้องทราบค่าพิกัดทางดิ่งและทางราบของจุดในภูมิประเทศ วิธีการสำรวจหาค่าพิกัดนั้นงานรังวัดดาวเทียมจีพีเอส (GPS) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานที่ต้องการค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูง เนื่องจากงานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสมีข้อได้เปรียบงานรังวัดภาคพื้นดินอยู่หลายประการ เช่น สามารถทำงานได้ในทุกสภาพอากาศและตลอด 24 ชั่วโมง สะดวกรวดเร็วไม่มีข้อจำกัดในเรื่องการมองเห็นกันระหว่างสถานี เป็นต้น นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ก็ยังเป็นค่าพิกัดในสามมิติ (กองยีออเดซี่และยีออฟิสิกส์, 2548)

สัณฐานของโลก

สัณฐานของโลกเรียกว่า จีออยด์ (Geoid) เป็นพื้นผิวระดับหรือพื้นผิวภูมิศักย์เท่า โดยความถ่วงของโลกเท่ากันทุกจุด เพื่อให้มองเห็นภาพของจีออยด์ให้นึกถึงภาพของน้ำทะเลในขณะที่คลื่นลมสงบ พื้นผิวของน้ำทะเลในขณะนี้จะเป็นพื้นผิวระดับที่ไม่มีการไหลของน้ำจากที่หนึ่งไปยังที่หนึ่ง พื้นผิวของน้ำทะเลและมหาสมุทรนี้มี 70% ของพื้นผิวโลกทั้งหมด ดังนั้นพื้นผิวของน้ำทะเลในสภาพที่หยุดนิ่งจึงเป็นพื้นผิวของยีจีออยด์แล้ว 70% จินตนาการต่อไปว่า ถ้าเราสามารถขุดคลองเชื่อมทะเลเข้าไปในแผ่นดินในลักษณะที่เป็นร่องแห พื้นผิวของน้ำทะเลในลำคลองที่ขุดขึ้นนี้ก็จะเป็นพื้นผิวของจีออยด์ ถ้าเราขุดเอาพื้นดินส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลออกไปทั้งหมด ก็จะได้พื้นผิวของจีออยด์ที่ครอบคลุมโลกทั้งหมด เราจำเป็นต้องรู้รูปร่างลักษณะของโลกที่เรียกอย่างเป็นทางการว่าสัณฐานของโลกก็เพราะว่าการคำนวณปริมาณต่าง ๆ ในงานรังวัดได้แก่ ระยะทาง ทิศทาง และค่าพิกัดตำแหน่งต่าง ๆ เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ที่ถูกต้องสอดคล้องกับค่าที่รังวัดมาได้ก็ต่อเมื่อเราทำการคำนวณอยู่บนพื้นผิวอ้างอิงที่เป็นสัณฐานอันแท้จริงของโลกในทางปฏิบัติไม่อาจจะใช้ จีออยด์เป็นพื้นผิวอ้างอิงในการคำนวณได้ ในการคำนวณงานรังวัดนั้นได้เลือกใช้รูปทรงเรขาคณิตที่มีสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ และมีรูปทรงที่ใกล้เคียงกับจีออยด์มากที่สุดด้วย รูปทรงดังกล่าว คือ รูปทรงรีที่เกิดจากการเอาวงรีมาหมุนรอบแกนสั้นนั่นเอง (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ, 2537)

ถ้านำจีออยด์มาเปรียบเทียบกับพื้นผิวของรูปทรงรีที่มีขนาดใกล้เคียงกันจะพบว่าบางแห่งจีออยด์จะอยู่สูงกว่าบางแห่งจีออยด์ก็อยู่ต่ำกว่า ความไม่ราบเรียบของจีออยด์นี้เป็นผลมาจากมวลสารภายใต้ผิวโลกมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน บริเวณใดที่มีความหนาแน่นของมวลสารมากจีออยด์จะอยู่สูงกว่าส่วนบริเวณใดที่มีความหนาแน่นของมวลสารน้อยจีออยด์จะอยู่ต่ำกว่าความไม่ราบเรียบของจีออยด์นี้ทำให้ไม่อาจหาสมการคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ มาใช้เพื่อบ่งบอกลักษณะของพื้นผิวจีออยด์ได้ สมการที่นิยมใช้กันอยู่เป็นอนุกรมฮาร์มอนิกที่มีจำนวนเทอมเป็นค่าอนันต์จีออยด์

จึงไม่เหมาะที่จะ เป็นพื้นผิวอ้างอิงสำหรับการคำนวณปริมาณต่าง ๆ สำหรับงานรังวัด (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ, 2537)

ความพยายามในการหาขนาดและสัณฐานของโลกได้มีมาเป็นเวลานานแล้ว วิวัฒนาการของความเชื่อเกี่ยวกับสัณฐานของโลก เริ่มจากระนาบมาเป็นรูปทรงกลมเป็นรูปทรงรีและเป็นจีออยด์ในที่สุด กรีกโบราณเป็นชนชาติแรกที่มีความสนใจศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างและขนาดของโลก พิธากอรัส (Pythagoras) เป็นนักปราชญ์คนแรกที่มีความคิดว่าโลกมีรูปร่างเป็นทรงกลม ในขณะที่นักปราชญ์คนอื่นๆ มีความคิดที่แตกต่างออกไป เช่น คิดว่ารูปร่างแบน สี่เหลี่ยม หรือทรงกระบอก แต่แนวความคิดของพิธากอรัส ได้รับการยอมรับมากที่สุดในยุคนั้น และเออราทอสธีนีส (Eratosthenes) อาจเป็นคนแรกที่มีการวัดและคำนวณหาขนาดของโลก ซึ่งถึงแม้ว่าจะตั้งสมมุติฐานที่คลาดเคลื่อนมาก แต่ก็สามารถคำนวณหาระยะเส้นรอบโลกได้ละเอียดถูกต้องอย่างไม่น่าเชื่อ ต่อมาในศตวรรษที่ 15-16 กาลิเลโอ (Galileo) ได้ยืนยันว่าโลกกลม และโคลัมบัส (Columbus) ได้พยายามพิสูจน์ความเชื่อดังกล่าว ในศตวรรษที่ 17 ได้มีการวัดขนาดของโลกโดยมีการปรับปรุงเครื่องมือและวิธีการ ได้พบว่าสัณฐานของโลกโดยทั่วไปแล้ว จะมีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere) แต่รัศมีที่ขั้วโลกจะสั้นกว่าบริเวณอิเควเตอร์ คือโลกไม่กลมอย่างแท้จริง (กองยีออเดซี่และยีออฟิสิกส์, 2548)

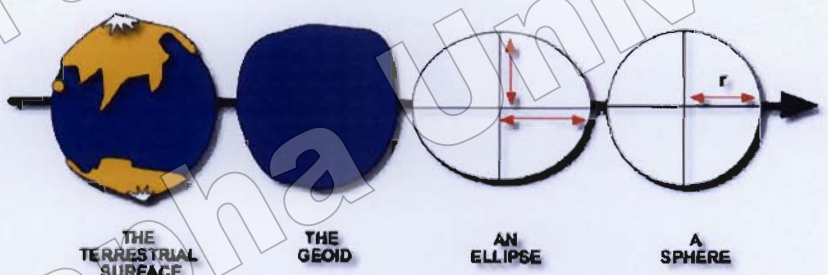
มูลฐานทางภูมิมาตรศาสตร์ (Geodetic Datum)

งานรังวัดเกี่ยวข้องกับการวัดทิศทาง ระยะทาง ค่าต่างระดับ และอื่น ๆ แล้วนำค่าที่รังวัดได้มาคำนวณเป็นค่าพิกัดตำแหน่งของสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวโลก ในการทำงานรังวัดที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น พื้นที่ของประเทศ หรือของภูมิภาค การคำนวณงานรังวัดจะต้องกระทำอยู่บนพื้นผิวที่เป็นสัณฐานของโลก โดยเหตุที่จีออยด์อันเป็นสัณฐานที่แท้จริงของโลกไม่เหมาะสมจะใช้เป็นพื้นผิวอ้างอิงสำหรับการคำนวณ ทำให้จำเป็นต้องเลือกใช้รูปทรงรีเป็นพื้นผิวอ้างอิงในการคำนวณแทนรูปจีออยด์ มูลฐานทางภูมิมาตรศาสตร์ อาจแยกได้เป็นพื้นหลักฐานทางราบและพื้นหลักฐานทางดิ่ง การแยกกันระหว่างพื้นหลักฐานทั้งสองมีประวัติความเป็นมาที่ย้อนกลับไปในอดีต โดยเหตุที่เครื่องมือที่ใช้ในการรังวัดเพื่อหาตำแหน่งทางราบและทางดิ่งแตกต่างกัน ความจำเป็นในการเลือกตำแหน่งของหมุดหลักฐานเพื่อการใช้งานก็ต่างกัน โครงข่ายของหมุดหลักฐานทางราบและทางดิ่งจึงแยกกันอยู่อย่างอิสระ เมื่อวิเคราะห์ถึงวิธีการคำนวณโครงข่ายทั้งสอง จะพบว่าการคำนวณโครงข่ายหมุดหลักฐานทางราบกระทำอยู่บนพื้นผิวของรูปทรงรีหรือมีค่าที่อ้างอิงทรงรี ในขณะที่ค่าระดับหรือค่าพิกัดทางดิ่งได้จากการทำงานที่อยู่ในสนามความถ่วงของโลก และใช้ระดับทะเลปานกลางเป็นมาตรฐาน นั่นคือ ค่าระดับเป็นค่าที่อ้างอิงอยู่กับพื้นผิวจีออยด์ ซึ่ง

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

เป็นสัณฐานอันแท้จริงของโลกนั่นเอง สรุปได้ว่า นอกจากตำแหน่งของหมุดหลักฐานทางราบและทางดิ่งจะอยู่กันคนละตำแหน่งแล้ว ค่าพิกัดทางราบและทางดิ่ง ก็ยังทำการคำนวณอยู่บนพื้นผิวคนละอันอีกด้วย ปัจจุบันการรังวัดดาวเทียมจะให้ค่าพิกัดที่เป็นสามมิติคือ ได้ทั้งตำแหน่งทางราบและตำแหน่งทางดิ่งในคราวเดียวกัน ดังนั้น การพูดถึงมูลฐานทางภูมิมาตรศาสตร์ ในอนาคตคงจะไม่มีการแยกเป็นทางราบและทางดิ่งอีกต่อไป (กองยีออเดซี่และยีออฟิสิกส์, 2548)

งานยีออเดซี่ เป็นการหาสัณฐานและสนามความโน้มถ่วงของโลกและวัตถุลอยฟ้าอื่นๆ รวมทั้งการหารูปทรงรีเฉลี่ยของโลก จากปริมาณที่รังวัดได้บนและนอกผิวโลก เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวบนโลกมีความซับซ้อน และยากที่จะกำหนดรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นการทำให้โลกมีรูปแบบที่ง่ายขึ้น ด้วยการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะและตำแหน่ง ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองที่เหมาะสมที่จะใช้แทนโลกในการคำนวณคือ รูปทรงรี แต่ในการคำนวณพื้นที่ขนาดเล็ก การใช้ทรงกลมก็สามารถให้ความถูกต้องเพียงพอ และมีรูปแบบของสมการในการคำนวณที่ง่ายกว่ารูปทรงรี (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543) ดังนั้น อาจจะกล่าวได้ว่า สัณฐานของโลกมีทั้งทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ตามภาพที่ 1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 สัณฐานของโลกทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

1. ภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก (The Terrestrial Surface) คือพื้นผิวทางกายภาพที่เป็นจริงบนพื้นผิวโลก ทั้งส่วนที่เป็นพื้นดินและพื้นน้ำ พื้นผิวดังกล่าวเป็นพื้นผิวที่สิ่งมีชีวิตได้อาศัยอยู่ และการรังวัดหาระยะหรือขนาดของพื้นที่ ก็กระทำบนพื้นผิวดังกล่าว (Dana, 2003) แต่เนื่องจากความไม่มีรูปแบบที่แน่นอนของภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

2. จีออยด์ (The Geoid) คือพื้นผิวระดับหรือพื้นผิวที่มีค่าศักยภาพความถ่วงที่เท่ากันทุกจุด ตามคำนิยามที่ว่า ถ้าเราพิจารณาถึงน้ำในมหาสมุทร ว่าเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในสนามความถ่วงของโลก โดยไม่มีแรงอื่นใดมาเกี่ยวข้องเลย ในสภาวะที่สมดุลพื้นผิวของมหาสมุทรในมโนทัศน์นี้จะเป็นพื้นผิวระดับของสนามความถ่วง และถ้าเราขยาย

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

พื้นผิวนี้เข้าไปภายใต้พื้นดิน พื้นผิวระดับอันนี้ก็คือ จีออยด์ (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ, 2537) และเนื่องจากจีออยด์ มีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของมวลสารภายในโลกแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถหาสมการอย่างง่ายมาใช้เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะของจีออยด์ได้ จึงจำเป็นต้องหารูปทรงทางเรขาคณิตซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และมีความใกล้เคียงกับพื้นผิวจีออยด์ มากที่สุดเป็นตัวแทน

3. รูปทรงรี (Ellipsoid) เกิดจากการหมุนวงรีรอบแกนสั้น ตามลักษณะการหมุนของโลก มีลักษณะใกล้เคียงกับสัณฐานที่แท้จริงของโลก คือ มีลักษณะการยุบที่บริเวณขั้ว รูปร่างของรูปทรงรีจะถูกใช้ในการคำนวณเพื่อหาระยะและตำแหน่งบนผิวโลกที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นการที่ผลการคำนวณจะมีความถูกต้องหรือใกล้เคียงความจริงมากที่สุด พื้นผิวของรูปทรงรีที่ใช้ในการคำนวณจำเป็นต้องมีความใกล้เคียงกับพื้นผิวจีออยด์ มากที่สุด ทำให้รูปทรงรีที่เป็นตัวแทนสัณฐานของโลกในการคำนวณมีจำนวนมาก เนื่องจากแต่ละพื้นที่บนโลกมีความโค้งนูนของจีออยด์ที่แตกต่างกัน (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

4. รูปทรงกลม (Sphere) เป็นอีกรูปทรงหนึ่งซึ่งใช้แทนสัณฐานของโลก ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่ารูปทรงรี ทำให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้น โดยมีตัวแปรเพียงตัวเดียวคือรัศมีจากจุดศูนย์กลาง (r) แต่รูปทรงกลมไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่บนผิวโลก และไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตที่ใช้แทนสัณฐานของโลกทั้งโลก

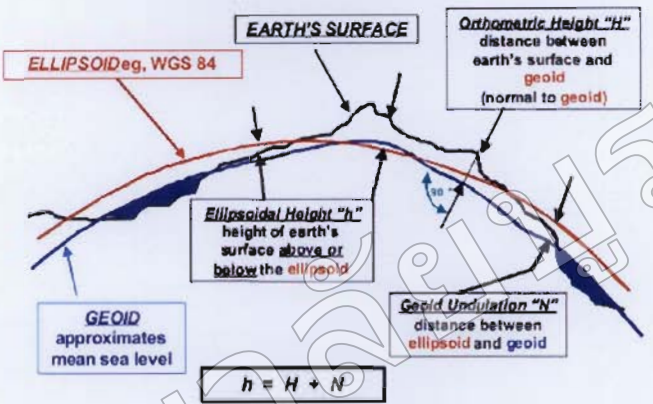
ค่าความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric Height)

การอ้างอิงตำแหน่งของจุดใดๆ อีกมิติหนึ่งที่มีความสำคัญคือความสูง ในระบบพิกัดยีออเดติก ความสูงที่ใช้ในการบอกตำแหน่งของจุดที่พิจารณา คือความสูงเหนือรูปทรงรีอ้างอิง เป็นการบอกระยะเชิงเส้นจากพื้นผิวของรูปทรงรีอ้างอิงถึงจุดที่พิจารณาตามแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวรูปทรงรี การบอกความสูงในลักษณะดังกล่าวของระบบพิกัดยีออเดติกไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลกได้ เช่น ทิศทางการไหลของน้ำ เป็นต้น ดังนั้นการทำระดับเพื่อหาความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric Height Leveling) จากระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) ย่อมอธิบายปรากฏการณ์ด้านความสูงที่สัมพันธ์กับแรงดึงดูดของโลกได้ดีกว่าการบอกความสูงเหนือรูปทรงรี ความสูงออร์โทเมตริกของจุดที่พิจารณาเป็นระยะเชิงเส้นจากพื้นผิวที่มีค่าศักยภาพความถ่วงที่เท่ากันทุกๆจุด (Equipotential Surface) ถึงจุดที่พิจารณาตามแนวสายดิ่ง (Plumb line) หรือทิศทางของแรงดึงดูดของโลก (The Gravity Vector)

สัณฐานของโลกในทางยีออเดซี่ ประกอบด้วยพื้นผิว 3 ลักษณะ (Sickle, 1996) ตามภาพที่ 2 คือ พื้นผิวภูมิประเทศ พื้นผิวทรงรี คือพื้นผิวโลกเชิงเรขาคณิต และพื้นผิวจีออยด์ ซึ่งเป็นพื้นผิว

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ที่ใกล้เคียงกับระดับทะเลปานกลางมากที่สุดโดยสามารถแสดงภาพความสัมพันธ์ของทั้งสามพื้นผิวได้ดังนี้



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงออร์โทเมตริก ความสูงเหนือรูปทรงรี และความสูงจีออยด์ (NAVSTAR Global Positioning System Surveying, 2003)

h คือ ความสูงเหนือทรงรี

H คือ ความสูงเหนือจีออยด์ หรือความสูงออร์โทเมตริก

N คือ ความสูงจีออยด์ (Geoidal Height)

สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเพื่อจะหาค่าความสูงออร์โทเตริกได้ (Singh, 2005) คือ

$$H = h - N$$

ในการสำรวจโดยการรังวัดดาวเทียมระบบจีพีเอส จะสามารถหาค่าความสูงออร์โทเมตริกจากสมการข้างบนได้ ถ้าทราบค่าความสูงยีออยอย่างละเอียด ซึ่งหลักการนี้ เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้ว สำหรับนักยีออเดซี่ แต่ปัญหาอยู่ที่ว่า จะมีวิธีการหาความสูงของจีออยด์อย่างละเอียดได้อย่างไรและละเอียดแค่ไหน

จากค่าต่างระหว่างความสูงเหนือรูปทรงรีและความสูงออร์โทเมตริก ที่เรียกว่าความสูงจีออยด์ มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากรูปทรงของจีออยด์ ไม่สม่ำเสมอ ในการนำข้อมูลจากการรังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GPS มาใช้ในงานสร้างหมุดควบคุมทางดิ่ง จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองความสูงจีออยด์ ร่วมกับหมุดควบคุมทางดิ่งที่มีอย่างเพียงพอ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความสูงจีออยด์และทอนค่าความสูงจากการรังวัดดาวเทียม ซึ่งเหนือรูปทรงรีไปสู่ค่าความสูงออร์โทเมตริกที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Zilkoski, Carlson & Smith, 2005)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การกำหนดตำแหน่งด้วยระบบจีพีเอส

ในสมัยโบราณ การเดินทางจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งต้องอาศัยทิศทางและการจำสภาพภูมิศาสตร์ต่างๆ เช่น ภูเขา ต้นไม้ แม่น้ำ ทะเลสาบ เกาะ ฯลฯ สิ่งเหล่านี้มักใช้เป็นจุดสังเกตเพื่อให้แน่ใจว่าอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง แต่แล้วก็พบว่ามันไม่แน่เสมอไป เพราะสภาพภูมิศาสตร์มันเปลี่ยนแปลงได้ สิ่งก่อสร้างทั้งที่มนุษย์สร้างขึ้น ก็ไม่ได้คงอยู่ที่เดิมตลอดไป มันอาจผุพัง และย้ายตำแหน่งได้เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการเดินทาง เพราะไม่รู้ว่าตำแหน่งจริง ๆ อยู่ที่ไหนแน่ ต่อมาในยุคที่การสำรวจการเดินเรือกำลังฟูเฟื่อง ก็เริ่มหาจุดอ้างอิงที่อยู่กับที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากๆ ในที่สุดเลือกใช้หมู่ดาวบนท้องฟ้าเป็นจุดอ้างอิง (Celestial Navigation) ซึ่งจะต้องใช้คู่กับนาฬิกา วิธีนี้จะเที่ยงตรงหรือไม่ก็อยู่ที่นาฬิกากับการวัดมุมของดาวแต่ละดวงภายหลังก็มีระบบนำร่องด้วยคลื่นวิทยุซึ่งอาศัยการหาตำแหน่งโดยการวัดเวลาการเดินทางของคลื่นในอากาศแล้วมาคำนวณหาระยะห่างจากสถานีที่เป็นจุดกำเนิดคลื่นอีกที โดยทั่วไปจะใช้คลื่นอย่างน้อย 2 ความถี่ที่ถ่ายทอดมาจากสองสถานี ตำแหน่งที่เราอยู่จะเป็นจุดตัดของคลื่นทั้งสอง ตัวอย่างระบบนำร่องด้วยคลื่นวิทยุที่มีใช้คือ ระบบ Omega ซึ่งถ่ายทอดคลื่นในย่าน VLF 4 ความถี่ แล้วอาศัยความต่างเฟสของคลื่นที่รับได้มาคำนวณหาตำแหน่ง ซึ่งมีความถูกต้องราวๆ 2-4 ไมล์ทะเล แต่ระบบนี้ก็มีปัญหาตรงที่ต้องมีสถานีที่ถ่ายทอดคลื่นอยู่บนพื้นโลกทำให้มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ให้บริการ อีกทั้งความถูกต้องยังไม่มากพอ โดยทั่วไปจึงต้องอาศัยระบบอื่นเข้าช่วย จนกระทั่งศตวรรษที่ 19 การพัฒนาระบบวิทยุสื่อสารได้ทำให้เกิดการพัฒนาระบบนำร่องที่ใช้สัญญาณวิทยุ (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

แนวคิดในการพัฒนาระบบจีพีเอส เริ่มต้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1957 เมื่อนักวิทยาศาสตร์ของสหรัฐอเมริกา นำโดย Dr. Richard B. Kershner ได้ติดตามการส่งดาวเทียมสปุตนิค(Sputnik) ของโซเวียต และพบปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ของคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากดาวเทียม พวกเขาพบว่าหากทราบตำแหน่งที่แน่นอนบนพื้นผิวโลก ก็สามารถระบุตำแหน่งของดาวเทียมได้จากการตรวจวัดดอปเปลอร์ และหากทราบตำแหน่งที่แน่นอนของดาวเทียม ก็สามารถระบุตำแหน่งบนพื้นโลกได้ ในทางกลับกันจากการที่อดีตสหภาพโซเวียต ส่งดาวเทียมดวงแรกของโลกชื่อ สปุตนิค (ภาพที่ 3) ขึ้นสู่อวกาศเมื่อ 4 ตุลาคม 1957 (พ.ศ. 2500) ทำให้ในช่วงทศวรรษปี ค.ศ. 1960 (พ.ศ. 2503) กองทัพเรือและกองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาระบบจีพีเอส (GPS: Global Positioning System) โดยสหรัฐอเมริกาได้ดำเนินโครงการพัฒนาระบบนำร่องที่เกี่ยวข้องกับการใช้ดาวเทียมถึง 3 โครงการ ได้แก่ ทรานสิท (TRANSIT) ไทเมชัน(TIMATION) และโปรแกรม 621B (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ปี1959 กองทัพเรือสหรัฐสร้างดาวเทียมนำร่องขึ้นที่ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ประยุกต์ APL (Applied Physics Laboratory) มหาวิทยาลัยจอห์นฮอปคิ้นซ์ เพื่อทดลองขบวนการคำนวณที่ใช้สำหรับทำนายตำแหน่งดาวเทียม ดาวเทียมดวงแรกชื่อ ทรานสิท1B (ภาพที่ 4) ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรในปี 1964 โดยโคจรที่ความสูง 1,100 กิโลเมตร กลุ่มดาวเทียมนำร่องทรานสิทรุ่นต่อมาประกอบด้วยดาวเทียมออสการ์ (ภาพที่ 5) และดาวเทียมโนวา (ภาพที่ 6) แต่หลังจากที่ได้ให้บริการเป็นถึงเวลา 32 ปี กลุ่มดาวเทียมทรานสิทได้ถูกปลดประจำการในปี 1996

กองทัพเรือสหรัฐดำเนินโครงการไทเมชัน (TIMATION: TIMe navigATION) ในปี 1964 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบนาฬิกาความแม่นยำสูงบนดาวเทียม โดยนาฬิกาดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ดาวเทียมไทเมชันถูกพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยทหารเรือ NRL(Naval Research Laboratory) ไทเมชัน1 และ 2 (ภาพที่ 7) ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในปี 1967 และ1969 ตามลำดับ โดยโคจรที่ความสูง 900 กิโลเมตร ดาวเทียมไทเมชัน3 (ภาพที่ 8) ได้เปลี่ยนชื่อเป็น NTS-1 (Navigation Technology Satellite 1) และถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในปี 1974 โคจรที่ความสูง 13,500 กิโลเมตร และเป็นดาวเทียมดวงแรกที่นำนาฬิกาอะตอมขึ้นไปทำงานในอวกาศ สำหรับดาวเทียมไทเมชัน4 (ภาพที่ 9) หรือ NTS-2 ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในปี 1977 เพื่อทดสอบระบบต่างๆ สำหรับการพัฒนาดาวเทียมจีพีเอส

กองทัพอากาศสหรัฐได้ดำเนินโปรแกรม 621B ในปี 1972 เพื่อทดสอบวิธีใหม่สำหรับการคำนวณหาระยะทางโดยใช้สัญญาณวิทยุที่มีลักษณะที่เรียกว่า สัญญาณรบกวนสุ่มเทียม PRN (PRN: Pseudo Random Noise) เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวไม่ได้มีการสร้างดาวเทียมนำร่อง จึงใช้อากาศยานเรือเหาะและเครื่องบินทำการแพร่สัญญาณ PRN ลงมายังเครื่องรับสัญญาณวิทยุ ข้อดีของการใช้สัญญาณ PRN ก็คือเราสามารถตรวจจับสัญญาณดังกล่าวได้ถึงแม้ว่าจะจมอยู่ในสัญญาณรบกวน (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

ภาพที่ 3 ดาวเทียมสปุตนิก (Sputnik 1, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 4 ดาวเทียมทรานสิท 1B (Transit 1, n.d.)

ภาพที่ 5 ดาวเทียมออสการ์ (Transit 1, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 6 ดาวเทียมโนวา (สมภพ ภูรีวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

ภาพที่ 7 ดาวเทียมไทเมชัน1 และ 2 (TIMATION Navigation Technology Satellite, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 8 ดาวเทียมไทเมชัน3 หรือ NTS-1 (TIMATION Navigation Technology Satellite, n.d.)

ภาพที่ 9 ดาวเทียมไทเมชัน4 หรือ NTS-2 (TIMATION Navigation Technology Satellite, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

หลักการของระบบจีพีเอส

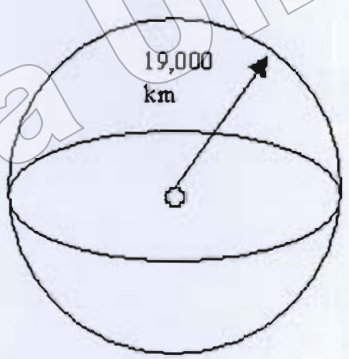
หลักการทำงานของระบบจีพีเอส แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน (Trimble Navigation Limited, 1996) คือ

1. หลักการของสามเหลี่ยมดาวเทียม

แนวความคิดทั้งหมดของระบบกำหนดตำแหน่งของโลก ด้วยระบบจีพีเอสโดยใช้ดาวเทียมในอวกาศเป็นจุดอ้างอิงเพื่อกำหนดตำแหน่งบนโลกดูแล้วอาจจะเป็นไปไม่ได้ แต่ด้วยการรังวัดระยะที่ถูกต้องจากดาวเทียมหลายดวง ซึ่งทำให้เราสามารถสร้างเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีตำแหน่งของเราบนโลกเป็นจุดตัดของรูปสามเหลี่ยม จึงทำให้เราสามารถทราบค่าพิกัดของเราได้

หลักทางคณิตศาสตร์ของวิธีการหาค่าพิกัดบนโลก โดยการรังวัดดาวเทียมในอวกาศจำนวน 3 ดวง คือ

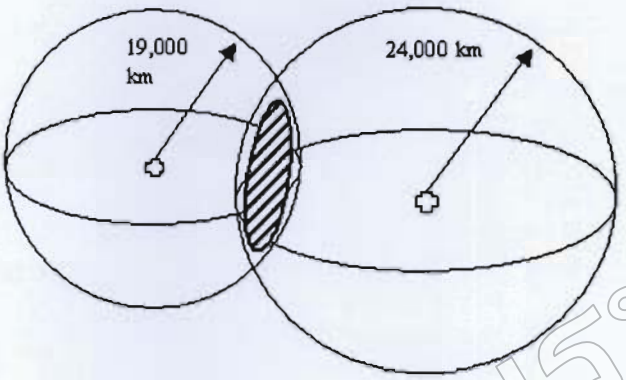
1.1 สมมติว่าเราได้ทำการรังวัดระยะไปยังดาวเทียมดวงที่หนึ่งได้ระยะ ทาง 19,000 กิโลเมตร นั่นคือเราจะอยู่ห่างจากดาวเทียมดวงนั้น เป็นระยะทาง 19,000 กิโลเมตร และตำแหน่งที่จะเป็นไปได้ก็คือ ทุกจุดในอวกาศที่อยู่บนพื้นผิวทรงกลมที่มีดาวเทียมดวงที่หนึ่งเป็นจุดศูนย์กลางและมีรัศมี 19,000 กิโลเมตร ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ตำแหน่งของจุดที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม 1 ดวง (GPS Global Positioning System, n.d.)

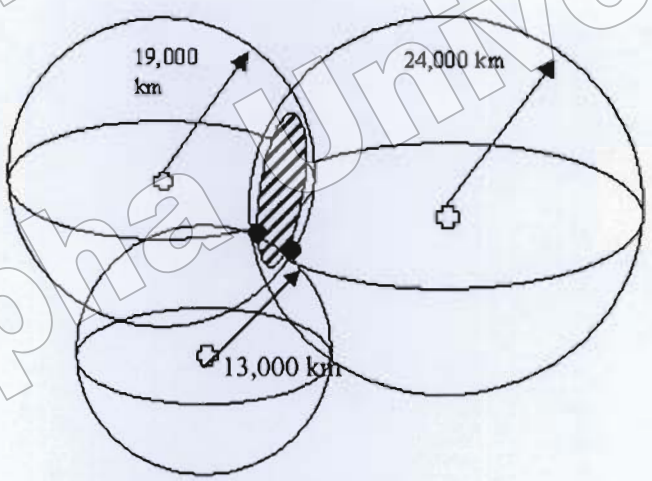
1.2 สมมติระยะทางจากดาวเทียมดวงที่ 2 เท่ากับ 24,000 กิโลเมตร นั่นหมายถึงนอกจากเราจะอยู่บนพื้นผิวของทรงกลมที่ 1 แล้ว เรายังคงอยู่บนพื้นผิวของทรงกลมที่ 2 ด้วย ซึ่งมีรัศมี 24,000 กิโลเมตร หรือถ้าจะพิจารณาให้แคบเข้า นั่นก็คือเราอยู่ ณ ที่ใดที่หนึ่งบนวงกลมที่ทรงกลมทั้งสองตัดกันนั่นเอง ดังภาพที่ 11

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 11 ตำแหน่งของจุดที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม 2 ดวง (GPS Global Positioning System, n.d.)

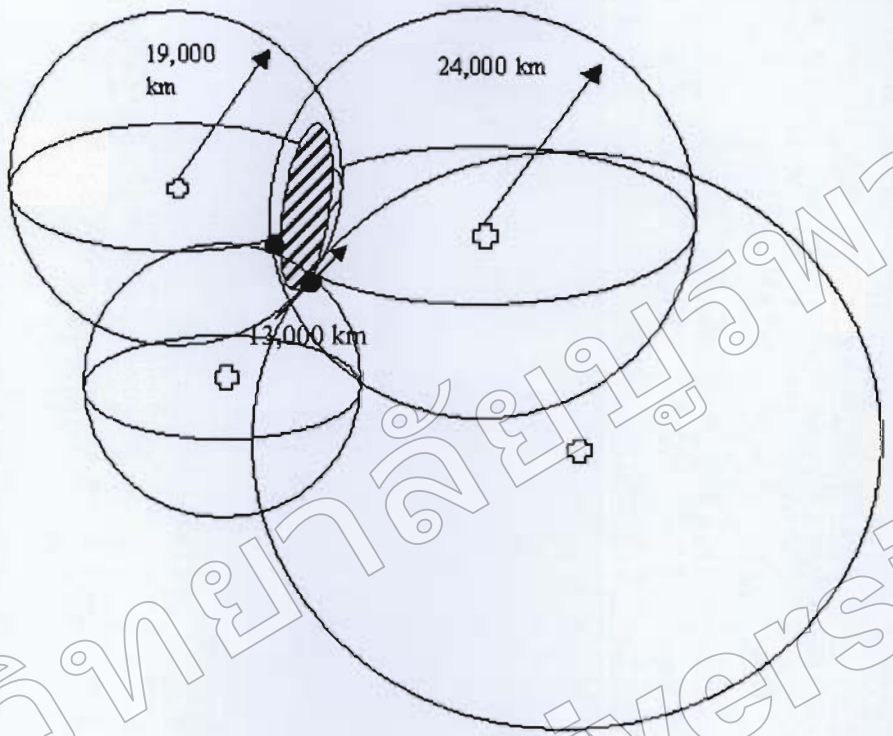
1.3 ถ้าเราทำการรังวัดระยะจากดาวเทียมดวงที่ 3 ได้เท่ากับ 13,000 กิโลเมตร ก็จะทำให้การหาตำแหน่งของเราแคบเข้าไปอีกนั่นคือ จุด 2 จุด ซึ่งทรงกลมรัศมี 13,000 กิโลเมตรตัดวงกลมที่เกิดจากการตัดกันของทรงกลม 2 ทรงกลมแรก ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ตำแหน่งของจุดที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม 3 ดวง (GPS Global Positioning System, n.d.)

โดยวิธีการรังวัดระยะจากดาวเทียม 3 ดวง เราสามารถทราบตำแหน่งของเราคือจุดสองจุดในอวกาศ การตัดสินใจว่าจุดใดเป็นตำแหน่งที่ถูกต้อง กระทำได้โดยการรังวัดดาวเทียมดวงที่ 4 ดังภาพที่ 13 แต่โดยปกติแล้วการเปรียบเทียบจุดทั้งสองจะมีคำตอบในตัวเองตัวเองอยู่แล้ว กล่าวคือ จุดที่มีค่าพิกัดอยู่ไกลจากโลกมาก หรือกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เป็นไปไม่ได้ คือจุดที่ไม่ถูกต้อง สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นส่วนประมวลผลของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจะมีเทคนิคที่สามารถทำการตรวจสอบได้ต่างกันไป

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 13 ตำแหน่งของจุดที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม 4 ดวง (GPS Global Positioning System, n.d.)

นอกจากนั้นเราสามารถทำการหาค่าพิกัดโดยอาศัยการรังวัดระยะจากดาวเทียมระบบจีพีเอสเพียง 2 ดวงได้ ถ้าเราทราบค่าความสูงของเรา ดังนั้นเราสามารถใช้โลกของเราเป็นทรงกลมดวงที่ 3 ที่มีรัศมีเท่ากับลูกโลกสมมติรวมกับความสูงที่เราทราบค่าแล้ว เราเรียกว่า การรังวัดแบบ 2 มิติ

2. การรังวัดระยะทางจากดาวเทียม

การรังวัดระยะจากดาวเทียมในอวกาศ กระทำได้โดยการรังวัดเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมมายังเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสบนโลก หลักทางคณิตศาสตร์โดยทั่วไประยะทางเท่ากับความเร็วคูณด้วยเวลา แต่ในระบบจีพีเอสเราทำการรังวัดสัญญาณวิทยุ ดังนั้นความเร็วของแสงโดยประมาณเท่ากับ 186,000 ไมล์ต่อวินาที ซึ่งปัญหาอยู่ที่การรังวัดเวลาที่สัญญาณวิทยุใช้ในการเดินทาง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก เช่น ถ้าในกรณีที่ดาวเทียมอยู่เหนือผู้รังวัด จำนวนเวลาที่สัญญาณวิทยุใช้ในการเดินทางจะมีค่าประมาณ 0.06 วินาที เราจึงจำเป็นต้องใช้นาฬิกาที่มีความละเอียดถูกต้องสูงในการรังวัด และยิ่งไปกว่านั้นถ้าเรามีนาฬิกาที่มีความละเอียดถูกต้องสูงแล้ว เราจะสามารถทำการรังวัดเวลาที่สัญญาณวิทยุใช้ในการเดินทางได้อย่างไร

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สมมติถ้าเราสามารถหาวิธีทำให้ดาวเทียมและเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสเริ่มเล่นดนตรีได้พร้อมกันอย่างแม่นยำเวลา 1200 ถ้าเสียงดนตรีจากดาวเทียมเดินทางมาถึงโลกได้ และถ้าเรายืนอยู่ ณ ที่ตั้งเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส เราจะได้ยินเสียงดนตรีนั้นแตกต่างกันจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง นั่นคือเสียงดนตรีที่ได้ยินจะไม่พร้อมกัน โดยเสียงดนตรีที่มาจากดาวเทียมจะช้ากว่าเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณวิทยุจะใช้เวลาในการเดินทางเป็นระยะทางมากกว่า 11,000 ไมล์ และถ้าเราต้องการจะทราบว่าสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมช้าไปเท่าไร เราอาจจะให้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสเริ่มเล่นดนตรีช้าลงจนกระทั่งรู้สึกว่าเสียงดนตรีจากแหล่งทั้งสองพร้อมกัน เวลาที่เราจะต้องใช้เพื่อเลื่อนเวลาการเล่นดนตรีของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส จะมีค่าเท่ากับเวลาที่เสียงดนตรีจากดาวเทียมใช้ในการเดินทางมายังเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสนั่นเอง ดังนั้นเราเพียงนำเวลานั้นมาคูณด้วยความเร็วแสง เราก็จะได้ระยะทางจากดาวเทียม ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเสียงดนตรีที่เปิดเล่นจากทั้งสองแหล่งเราเรียกว่า Pseudo Random Code (PRC)

PRC เป็นพื้นฐานของระบบจีพีเอส ซึ่งในทางฟิสิกส์ถือได้ว่าเป็นเพียงแค่รหัสเชิงเลขที่ซับซ้อน หรือเป็นค่าเปิดและปิดสัญญาณอย่างต่อเนื่อง การเปิดและปิดสัญญาณนั้นไม่แน่นอนจนดูเหมือนเป็นคลื่นรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์แบบสุ่ม นั้นคือที่มาของชื่อ Pseudo Random Code ข้อดีของความซับซ้อนของคลื่น PRC ก็คือช่วยให้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสมั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดความผิดพลาดในการเทียบสัญญาณกับคลื่นประเภทอื่นเนื่องจากรูปแบบของ PRC จะซับซ้อนมากจนไม่มีคลื่นประเภทอื่นใดจะเหมือนได้ และเนื่องจากดาวเทียมแต่ละดวงมี PRC ของตนเองไม่เหมือนกัน จึงประกันได้ว่าเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจะไม่ผิดพลาดไปรับสัญญาณดาวเทียมดวงอื่นอีกด้วย ดังนั้นดาวเทียมทั้งหมดสามารถใช้ความถี่เดียวกันโดยไม่รบกวนซึ่งกันและกัน และยังทำให้ระบบจีพีเอสยากต่อการถูกรบกวนในขณะที่ทำการรังวัดเวลาที่ใช้ในเดินทางของสัญญาณจีพีเอสโดยจะทำการเปรียบเทียบ PRC ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส กับ PRC ที่ได้รับจากดาวเทียมซึ่งถูกสร้างขึ้นในเวลาเดียวกัน และในขณะเดียวกัน PRC ยังทำให้กระทรวงกลาโหมสหรัฐสามารถควบคุมการเข้าถึงระบบได้อีกด้วย

สรุปข้อดีของ PRC คือ

1. เปรียบเทียบสัญญาณของดาวเทียมกับของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส เพื่อวัตถุประสงค์ในการรังวัดเวลา

2. รหัสช่วยให้ระบบจีพีเอสสามารถปฏิบัติการด้วยสัญญาณดาวเทียมกำลังส่งต่ำและด้วยจานรับสัญญาณขนาดเล็กได้

3. รหัสทำให้กระทรวงกลาโหมสหรัฐควบคุมการเข้าถึงระบบจีพีเอสได้

4. รหัสทำให้ดาวเทียมสามารถปฏิบัติงานได้ด้วยความถี่เดียว

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

3. การรังวัดเวลา

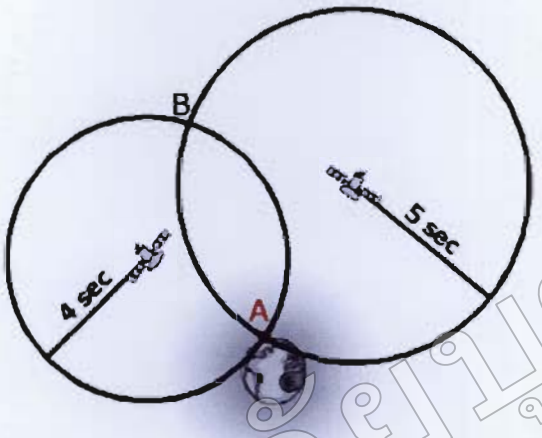
เนื่องจากการรังวัดเวลาในการเดินทางของสัญญาณวิทยุเป็นส่วนสำคัญของระบบจีพีเอส ดังนั้นนาฬิกาที่จะใช้ในการรังวัดเวลาจะต้องมีความละเอียดถูกต้องสูง นาฬิกาจับเวลาธรรมดาไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากถ้าเรารังวัดเวลาได้ละเอียดเพียง 1 ใน 1,000 ส่วนของวินาที เมื่อเทียบกับความเร็วแสงแล้ว จะมีความผิดพลาดถึง 200 ไมล์ สำหรับดาวเทียมจะมีระบบเวลาที่ค่อนข้างจะสมบูรณ์แบบ เพราะมีนาฬิกาอะตอมมิก ที่มีความละเอียดถูกต้องสูง แต่สำหรับเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสไม่สามารถติดตั้งนาฬิกาอะตอมมิกได้ เนื่องจากจะทำให้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสมีราคาสูงจนไม่มีผู้ใดสามารถซื้อได้ แต่เนื่องจากความจำเป็นที่จะต้องทำการเทียบสัญญาณ PRC เพื่อคำนวณเวลาในการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมและเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสด้วยกัน ดังนั้นเพื่อให้ระบบจีพีเอสสามารถปฏิบัติงานได้ จึงมีการออกแบบระบบจีพีเอสทางเทคนิคเพิ่ม เพื่อให้นาฬิกาของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสมีประสิทธิภาพสูงเทียบเท่านาฬิกาอะตอมมิก เทคนิคนั้นก็คือ การรังวัดสัญญาณดาวเทียมดวงที่ 4 เพิ่มเติมถึงแม้ว่าการรังวัดดาวเทียม 3 ดวง จะทำให้เราทราบค่าพิกัด 3 มิติของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสแล้วก็ตาม

ถ้าเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสมีนาฬิกาที่สมบูรณ์แบบ จะทำให้ระยะห่างจากดาวเทียมที่รังวัดได้ทั้งหมดไปตัดกันที่จุดเดียวกัน ซึ่งคือพิกัดของเรานั่นเอง แต่เนื่องด้วยนาฬิกาที่ไม่สมบูรณ์แบบนัก การรังวัดดาวเทียมดวงที่ 4 สามารถทำการตรวจสอบซ้ำได้ ซึ่งจุดตัดจะไม่ตรงกับจุดตัดของดาวเทียม 3 ดวงแรก นั่นคือมีความไม่ถูกต้องของการรังวัด หรือการเทียบสัญญาณเวลายูนิเวอร์สไม่สมบูรณ์แบบ เนื่องจากความต่างจากเวลายูนิเวอร์สจะส่งผลต่อการรังวัดของเราทั้งหมด ในขณะที่เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสต้องการค่าตัวแก้ ที่สามารถหักออกจากการรังวัดเวลา ที่จะทำให้เกิดการตัดเพียงจุดเดียว

ค่าตัวแก้จะทำให้นาฬิกาของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส เทียบกับระบบเวลายูนิเวอร์สได้นั่นคือทำให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่านาฬิกาอะตอมมิก และเมื่อทราบค่าตัวแก้แล้วทำการประยุกต์เข้ากับผลการรังวัดที่เหลือ ก็จะทำให้เราสามารถหาค่าพิกัดที่มีความละเอียดถูกต้องสูงได้ เหตุผลข้อนี้ทำให้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจำเป็นต้องมีช่องสัญญาณอย่างน้อย 4 ช่อง จึงจะสามารถทำการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสได้พร้อมกันอย่างน้อย 4 ดวง ด้วยคุณสมบัติของ PRC ซึ่งช่วยในการเทียบสัญญาณเวลาและด้วยการรังวัดสัญญาณดาวเทียมเพิ่มสามารถช่วยให้เราเทียบสัญญาณเวลายูนิเวอร์สได้ ทำให้เราทราบค่าที่เราต้องการสำหรับการรังวัดระยะจากดาวเทียมในอวกาศมายังผู้ใช้ได้

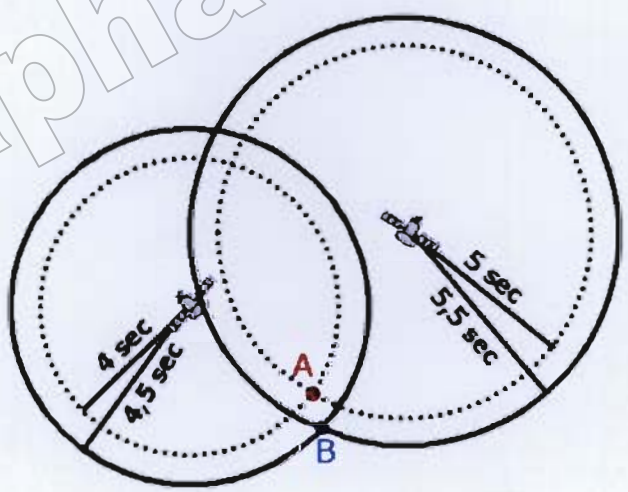
หากดาวเทียมสองดวงทำภารวัดระยะเวลาได้อย่างถูกต้อง จะหาค่าพิกัดได้จากระยะทางระหว่างดาวเทียมสองดวงที่ตัดกันตามภาพที่ 14

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 14 การรังวัดเวลาที่ถูกต้องจากดาวเทียม 2 ดวง (The GPS System, n.d.)

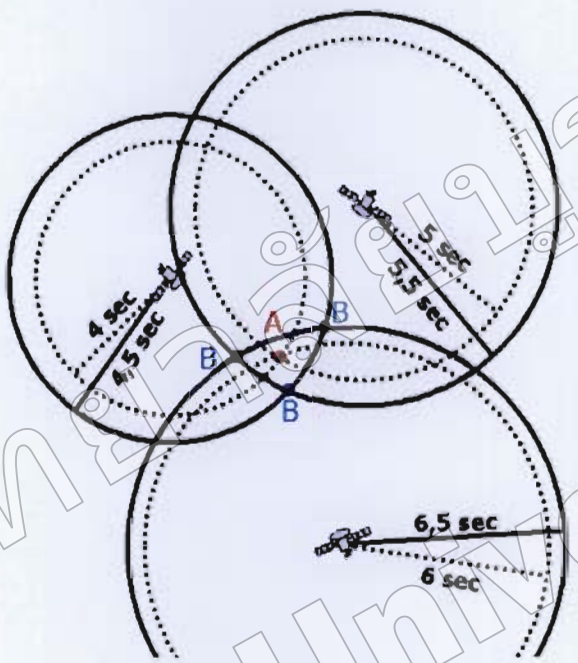
ถ้าหากเครื่องรับสัญญาณ GPS มีนาฬิกาที่คลาดเคลื่อนโดยรังวัดเวลาคลาดเคลื่อนไป 1 วินาที ระยะทางที่รังวัดได้จากดาวเทียมทั้งสองจะตัดกันคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็นตามภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การรังวัดเวลาที่ผิดพลาดจากดาวเทียม 2 ดวง (The GPS System, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

เมื่อมีการรังวัดดาวเทียมดวงที่สามเข้ามาโดยที่เครื่องรับสัญญาณ GPS ยังคงมีความคลาดเคลื่อน 1 วินาที ระยะทางจากดาวเทียมทั้งสามดวงจะตัดกันได้จุดตัดที่มากกว่า 1 จุด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าพิกัดได้ตามภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การรังวัดเวลาที่ผิดพลาดจากดาวเทียม 3 ดวง (The GPS System, n.d.)

เมื่อเครื่องรับสัญญาณ GPS ได้รับข้อมูลที่ไม่ตัดกันที่จุดๆ เดียว ส่วนประมวลผลในเครื่องรับสัญญาณ GPS จะทำการคำนวณค่าพิกัดใหม่โดยการเพิ่มหรือลดระยะเวลาที่ทำการรังวัดได้ จนกว่าระยะทางที่ได้จากดาวเทียมทั้งสามดวงจะตัดกันที่จุดเดียว หากต้องการรังวัดค่าพิกัดในระบบพิกัดฉากสามมิติจำเป็นต้องมีการรังวัดดาวเทียมทั้งสิ้นสี่ดวงเพื่อหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนทางเวลา

4. วงโคจรและตำแหน่งของดาวเทียม

จากการศึกษาที่ผ่านมาเราตั้งสมมติฐานว่าเรารู้ตำแหน่งที่แท้จริงของดาวเทียมในอวกาศและเราได้ใช้ตำแหน่งนั้นเป็นจุดอ้างอิง แต่จริงๆแล้วเราจะรู้ได้อย่างไรว่าดาวเทียมมีพิกัดอยู่ ณ ตำแหน่งใดในขณะเมื่อดาวเทียมดังกล่าวลอยอยู่สูง 11,000 ไมล์ ห่างไกลออกไปในอวกาศ ด้วยความสูง 11,000 ไมล์ ในกรณีนี้ถือว่าเป็นข้อดี เนื่องจากความสูงทำให้ปราศจากบรรยากาศและนั่นหมายถึงการคำนวณวงโคจรดาวเทียมจะอาศัยเพียงคณิตศาสตร์แบบง่ายๆ กองทัพอากาศสหรัฐจะทำการขับเคลื่อนดาวเทียมแต่ละดวงให้อยู่ในวงโคจรที่ละเอียด (Precise Orbit) โดยให้สอดคล้อง

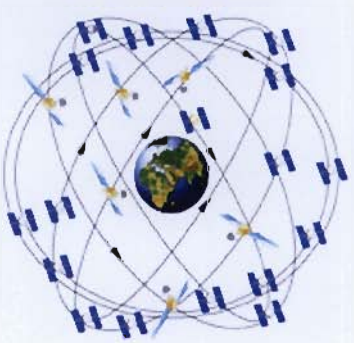
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

กับแผนหลัก สำหรับเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสบนภาคพื้นจะมีปฏิทินดาวเทียม (Almanac) ซึ่งถูกบักทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจึงสามารถคำนวณได้ว่าดาวเทียมแต่ละดวงอยู่ ณ ตำแหน่งใดในท้องฟ้าในแต่ละขณะเวลา

วงโคจรขั้นต้นของดาวเทียมเองค่อนข้างถูกต้องแน่นอน แต่เพื่อความสมบูรณ์แบบกระทรวงกลาโหมสหรัฐจะทำการรังวัดติดตามกลุ่มดาวเทียมจีพีเอสอย่างถาวร โดยใช้เรดาร์ที่มีความถูกต้องสูงทำการตรวจสอบความสูง ตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมแต่ละดวงที่ถูกต้องแน่นอน ค่าความคลาดเคลื่อนที่ทำการตรวจสอบเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนของวงโคจร (Ephemeris Errors) เพราะมันจะส่งผลต่อวงโคจรของดาวเทียมเอง (Orbit or Ephemeris) ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นผลมาจากแรงดึงดูดจากดวงจันทร์กับดวงอาทิตย์ และการแพร่ของคลื่นรังสีดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อดาวเทียม โดยทั่วไปแล้วความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีขนาดเล็กน้อย

เนื่องจากกระทรวงกลาโหมสหรัฐได้ทำการรังวัดหาตำแหน่งที่แน่นอนของดาวเทียมและทำการส่งข้อมูลดังกล่าวไปให้ดาวเทียม และดาวเทียมเองจะทำการรวบรวมและส่งสัญญาณข้อมูลค่าตัวแก้ใหม่นี้มาพร้อมกับสัญญาณเวลาที่ดาวเทียมส่งสัญญาณลงมายังโลก ดังนั้นสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส นอกจากจะมี PRC เพื่อใช้สำหรับการกำหนดระบบเวลาแล้ว ยังมีข่าวสารการนำร่องพร้อมข้อมูลวงโคจรอีกด้วย ด้วยการกำหนดระบบเวลาที่สมบูรณ์ และตำแหน่งที่แน่นอนของดาวเทียม เราจะสามารถทำการคำนวณตำแหน่งที่ถูกต้องได้ แต่ยังคงมีปัญหาอีกบ้างเล็กน้อย

ดาวเทียมจำนวน 24 ดวง เคลื่อนที่บนพื้นวงโคจร 6 พื้นวงโคจรๆ ละ 4 ดวง แต่ละพื้นวงโคจรทำมุม 55 องศากับพื้นอีเควเตอร์ ดาวเทียมโคจรด้วยความสูง 20,200 กิโลเมตร ที่ความสูงดังกล่าวอิทธิพลของบรรยากาศจะหมดไป ทำให้วงโคจรของดาวเทียมมีความคงที่ แต่ละรอบวงโคจรใช้เวลา 12 ชั่วโมง ลักษณะวงโคจรของดาวเทียมตามภาพที่ 17



ภาพที่ 17 วงโคจรดาวเทียมระบบจีพีเอส (Space – Based Positioning Navigation & Timing, n.d.)

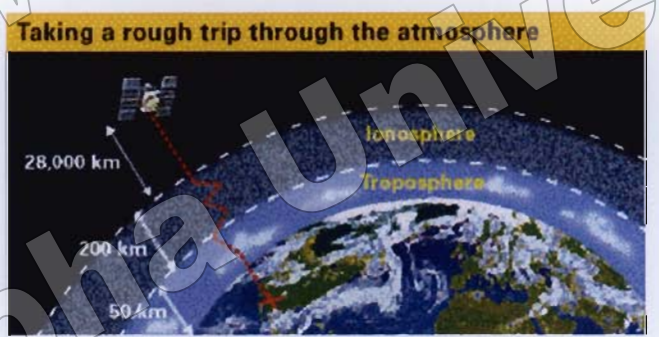
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

5. ความคลาดเคลื่อนและการขจัดความคลาดเคลื่อน

ที่ผ่านมาเราได้ทำการคำนวณหาค่าพิกัดบนโลก โดยอาศัยระบบจีพีเอสแบบง่าย ๆ โดยสมมติว่าทุกอย่างเกิดขึ้นในสุญญากาศ แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีผลกระทบอีกมากมายที่เกิดขึ้นกับสัญญาณดาวเทียมทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น เพื่อที่จะขจัดความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจะต้องสามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้

5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนประเภทต่างๆ (Schofield, 2001)

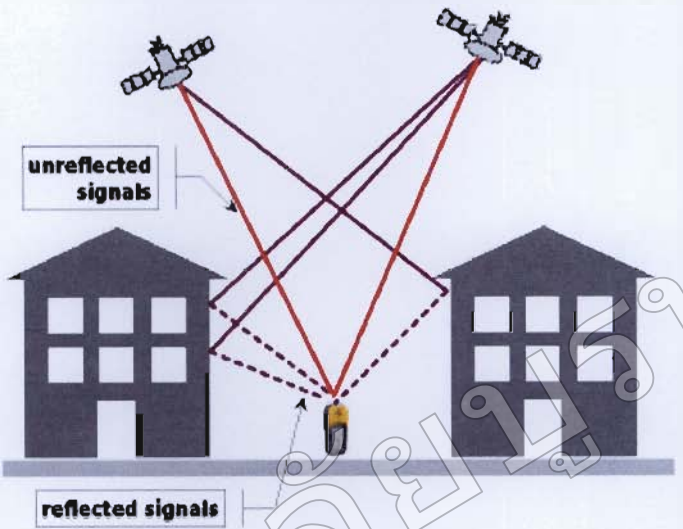
5.1.1 ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากสภาพชั้นบรรยากาศของโลกเนื่องจากความเร็วของคลื่นที่ใช้ในการคำนวณระยะทางระหว่างเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสกับดาวเทียมจะมีค่าคงที่เฉพาะเมื่อคลื่นเดินทางผ่านสภาพสุญญากาศ แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ความสูง 50–200 กิโลเมตร) และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไอน้ำของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ต่ำกว่า 20 กิโลเมตร) คลื่นจะเกิดอาการถดถอย (Delay) นั่นคือความเร็วของคลื่นจะช้าลงคล้ายกับนาฬิกาเสีย ความคลาดเคลื่อนนี้มีลักษณะตามภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากสภาพชั้นบรรยากาศของโลก (GPS Tutorial, n.d.)

5.1.2 นอกจากความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากอาการถดถอยของคลื่นสัญญาณจีพีเอสขณะเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆ ก่อนที่จะลงมาถึงพื้นดินแล้ว ยังมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนอย่างอื่นได้อีก นั่นคือการสะท้อนของสัญญาณจีพีเอสเมื่อตกกระทบกับอาคารสิ่งก่อสร้าง หรือสิ่งกำบังต่างๆ ก่อนที่จะเดินทางไปถึงเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส ซึ่งเรียกว่า Multipath Error ซึ่งเครื่องหาพิกัดจีพีเอสที่ดีจะมีเทคนิคในการขจัดความคลาดเคลื่อนนี้ให้น้อยลงได้ ความคลาดเคลื่อนนี้มีลักษณะตามภาพที่ 19

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 19 การสะท้อนของสัญญาณจีพีเอสเมื่อตกกระทบกับอาคาร สิ่งก่อสร้าง (The GPS System, n.d.)

5.1.3 ความคลาดเคลื่อนของระบบจีพีเอสเนื่องจาก เรขาคณิตของวงโคจรดาวเทียม (Geometric Dilution of Precision; GDOP) เกิดจากการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่มีวงโคจรใกล้กันมาคำนวณหาระยะทางและหาจุดตัด ซึ่งจะทำให้เกิดรอยตัดที่ใหญ่ นั่นคือพื้นที่ความเป็นไปได้ของค่าพิกัดที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงตามภาพที่ 20

ภาพที่ 20 รอยตัดที่เกิดจากการรังวัดที่มีเรขาคณิตไม่ดี (The GPS System, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ในทางกลับกันถ้านำสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่มีวงโคจรเกือบตั้งฉากกันมาคำนวณรอยตัดของระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจะปรากฏรอยตัดเป็นพื้นที่ขนาดเล็ก นั่นคือค่าพิกัดที่คำนวณได้จะมีความละเอียดถูกต้องสูงตามภาพที่ 21

ภาพที่ 21 รอยตัดที่เกิดจากการรังวัดที่มีเรขาคณิตดี (The GPS System, n.d.)

5.2 การขจัดความคลาดเคลื่อน

5.2.1 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก ขณะเมื่อคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถขจัดได้โดยการใช้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสแบบ 2 ความถี่ ทำการรับสัญญาณดาวเทียมทั้ง 2 ความถี่

5.2.2 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากเรขาคณิตของดาวเทียม ขจัดได้โดยให้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสคำนวณค่า GDOP และ PDOP โดยเลือกกลุ่มดาวเทียมเฉพาะที่คำนวณแล้วจะให้ค่าความละเอียดถูกต้องของพิกัดสูง

เทคนิคการรังวัดของระบบจีพีเอส

เทคนิคการรังวัดของระบบจีพีเอสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การรังวัดแบบสัมบูรณ์

การรังวัดแบบสัมบูรณ์ คือ การรังวัดโดยใช้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสเพียงเครื่องเดียวทำการรังวัดคลื่นรหัส C/A code หรือคลื่นพาห์ของดาวเทียมเป็นจำนวนอย่างน้อย 4 ดวงพร้อมกัน จะทำให้สามารถอ่านค่าพิกัดจากเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสได้ทันที แต่มีความละเอียดถูกต้องต่ำ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

2. การรังวัดแบบสัมพัทธ์

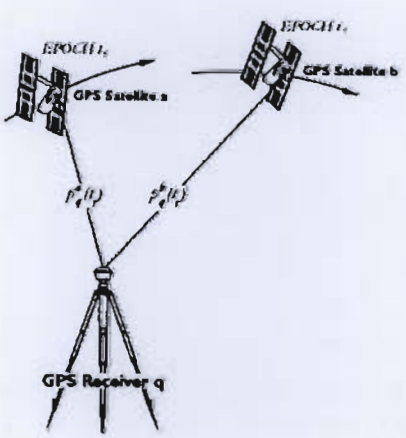
เป็นการรังวัดโดยใช้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจำนวน 2 เครื่องขึ้นไป ทำการรังวัดคลื่นรหัสและคลื่นพาห์ของสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสจำนวน 4 ดวงขึ้นไป โดยทำการรังวัดพร้อมกันและต่อเนื่องเป็นช่วงเวลาหนึ่ง โดยความนานในแต่ละช่วงเวลาที่จะทำการรังวัดสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมที่ทำการรังวัด จำนวนความถี่ที่รังวัด ระยะทางและคุณลักษณะทางเรขาคณิตของกลุ่มดาวเทียม เป็นต้น

หลักพื้นฐานของการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส คือการรังวัดคลื่นสัญญาณนั่นเอง ซึ่งถือว่าเป็นค่าความต่างศูนย์ และเราสามารถนำคลื่นที่รังวัดได้ไปประมวลผลร่วมกับคลื่นจากสัญญาณดาวเทียมดวงอื่น และจากเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสเครื่องอื่น แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ (Sickle, 1996) คือ Single Difference, Double Difference และ Triple Difference

2.1 การรังวัดแบบ Single Difference สามารถแบ่งรูปแบบการรังวัดได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

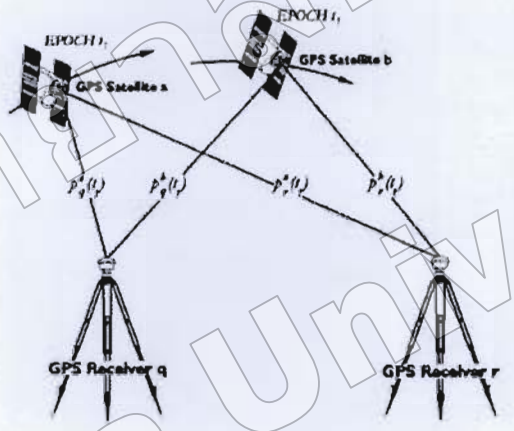
2.1.1 แบบความต่างระหว่างเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส การรังวัดความต่างแบบนี้เป็นการจัดรูปแบบของการรังวัด โดยเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจำนวน 2 เครื่อง ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสพร้อมกันจำนวน 1 ดวง ซึ่งเป็นวิธีการที่จะช่วยขจัดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความไม่มั่นคงของนาฬิกาดาวเทียม

2.2.2 แบบความต่างระหว่างดาวเทียม การรังวัดความต่างแบบนี้เป็นการจัดรูปแบบของการรังวัดโดยใช้เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส จำนวน 1 เครื่อง ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส จำนวน 2 ดวง ตามภาพที่ 22 ในกรณีนี้เราสามารถจะทำการขจัดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความไม่มั่นคงของนาฬิกาเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส



ภาพที่ 22 การรังวัดแบบ Single Difference (Sickle, 1996)

2.2 การรังวัดแบบ Double Difference คือการจัดรูปแบบความต่างของแบบการรังวัดความต่างระหว่างเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสจำนวน 2 ความต่าง กับแบบการรังวัดความต่างระหว่างดาวเทียม จำนวน 2 ความต่างของช่วงเวลาการรังวัดเดียวกัน การรังวัดแบบนี้จะช่วยขจัดผลกระทบอันเนื่องมาจากความไม่มั่นคงของนาฬิกาทั้งของดาวเทียมและเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส นอกจากนี้การรังวัดแบบ Double Difference ยังสามารถช่วยขจัดความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากการเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และ ไอโอโนสเฟียร์ เพราะเราทำการรังวัดพร้อมกันจึงถือว่าคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเดียวกัน ตามภาพที่ 23

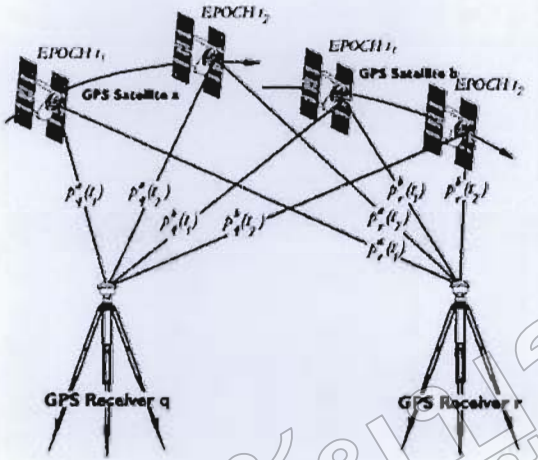


ภาพที่ 23 การรังวัดแบบ Double Difference (Sickle, 1996)

2.3 การรังวัดแบบ Triple Difference คือการรังวัดรูปแบบความต่างของการรังวัดแบบ Double Difference จำนวน 2 ความต่าง หรือเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มดาวเทียมกับเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสกลุ่มเดียวกันแต่ต่างเวลากัน ตามภาพที่ 24

ถ้าทำการจัดรูปแบบความต่างของเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอส 1 เครื่องกับดาวเทียม 1 ดวง ข้อมูลคนละเวลากันเราเรียกว่าความต่างเวลาซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการรังวัดดอปเปลอร์ของระบบ TRANSIT ดังนั้นการรังวัดแบบ Triple Difference เปรียบการรังวัดแบบดอปเปลอร์จากการรังวัดคลื่นจีพีเอสแบบ Double Difference การรังวัดแบบ Triple Difference จะช่วยขจัดค่าคลุมเครือของจำนวนลูกคลื่นได้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 24 การรังวัดแบบ Triple Difference (Sickle, 1996)

การพัฒนาระบบการกำหนดจุดพิกัดด้วยดาวเทียม

NAVSTAR GPS

ในปี 1973 โครงการไทเมชันของกองทัพเรือได้รวมกับโปรแกรม 621B ของกองทัพอากาศโดยมีชื่อใหม่ว่า NAVSTAR GPS (NAVigation System Timing And Ranging Global Positioning System) หรือถูกเรียกสั้นๆว่า GPS ในปีเดียวกัน หน่วยงานความมั่นคง (US DoD: Department of Defense) ได้จัดตั้งสำนักงานโปรแกรมร่วม JPO (Joint Program Office) ขึ้นเพื่อบริหารโครงการ GPS โดยกองทัพอากาศเป็นฝ่ายบริหารโครงการ ในขณะที่กองทัพเรือโดยเฉพาะห้องปฏิบัติการวิจัยทหารเรือ NRL เป็นหน่วยที่มีส่วนสำคัญในการออกแบบวางระบบและเทคโนโลยี โดยโครงสร้างจำนวนดาวเทียมและประเภทวงโคจร รวมไปถึงการใช้นาฬิกาอะตอมมิกได้นำมาจากโครงการไทเมชัน แต่โครงสร้างสัญญาณวิทยุที่ใช้สำหรับระบบนำร่องจีพีเอสได้นำมาจากโปรแกรม 621B หลังจากโครงการ NAVSTAR GPS ได้รับการอนุมัติจากรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (ธันวาคม 1973) บริษัท Rockwell International เป็นผู้สร้างดาวเทียม GPS จำนวน 4 ดวง เพื่อใช้ในการทดสอบระบบ โดยดาวเทียมรุ่นแรกนี้ถูกเรียกว่า Block I (ภาพที่ 25) และดาวเทียม GPS ทั้ง 4 ดวง ถูกส่งขึ้นสู่อวกาศในปี 1978 (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

ระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System - GPS) เป็นโครงการของกระทรวงกลาโหมสหรัฐ มูลค่ากว่า 12 พันล้านเหรียญสหรัฐ โดยรัฐบาลสหรัฐลงทุนกับโครงการนี้เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งบนพื้นโลกได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ใช้ในการนำร่องสำหรับยิงขีปนาวุธข้ามทวีป และใช้เป็นระบบเสริมการรบในสงคราม อย่างที่ได้ใช้ใน Operation: Desert storm ในช่วงปี 1991(ระบุตำแหน่งทั่วโลกด้วย Global Positioning Systems, 2000) แต่ GPS ไม่ได้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

จำกัดการใช้งานเฉพาะการทหารเพียงอย่างเดียว ยังมีรูปแบบการใช้ GPS ที่เป็นประโยชน์ในทางอื่นอีกมาก เช่น การนำร่องในการเดินเรือหรือการบิน การสำรวจทรัพยากร ขุดหาแร่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน การสำรวจรังวัด ฯลฯ

GPS สามารถหาตำแหน่งได้โดยใช้สัญญาณจากดาวเทียม GPS ที่ส่งไปโคจรอยู่รอบโลก ดาวเทียม GPS ชุดแรกเป็นชุดสำหรับทดลองเรียกว่า "Block I" โดยที่ Block I มีทั้งหมด 10 ดวง (ระบุตำแหน่งทั่วโลกด้วย Global Positioning Systems, 2000) ดวงแรกถูกส่งขึ้นในปี 1978 และทยอยส่งจนหมดในปี 1988

ภาพที่ 25 ดาวเทียมระบบจีพีเอส BLOCK I (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

จากนั้นในปี 1989-1994 ดาวเทียม GPS ที่จะใช้งานจริง (Block II) ก็ถูกส่งโคจรรอบโลก อายุการใช้งานของดาวเทียมประมาณ 7.5 ปี จากอดีตจนถึงปัจจุบันดาวเทียมจีพีเอสได้ถูกสร้างขึ้นมาทั้งหมด 5 รุ่น ได้แก่ GPS BLOCK I, BLOCK II/IIA, BLOCK IIR/IIR-M และ BLOCK IIF (ภาพที่ 26, 27 และ 28) สำหรับ BLOCK III อยู่ในช่วงพัฒนาโครงการ (Defense Science Board, 2005)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

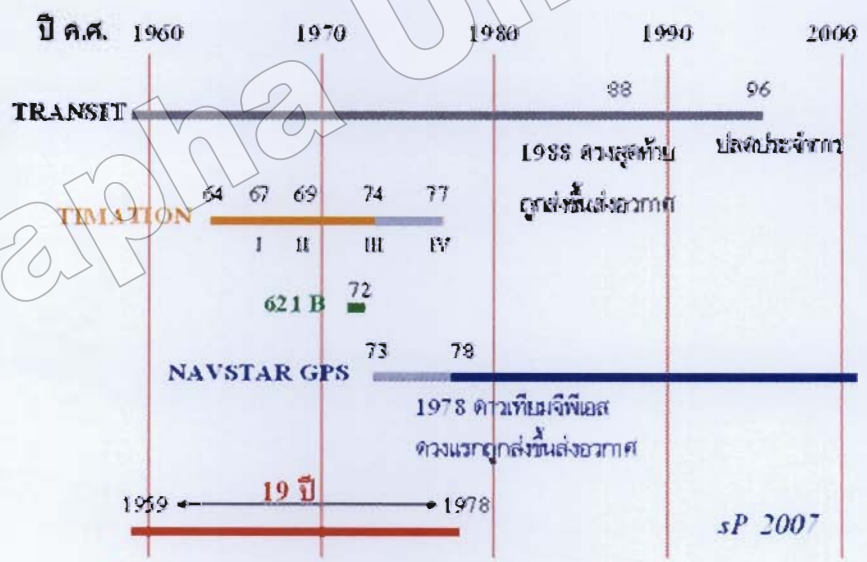
ภาพที่ 26 ดาวเทียมระบบจีพีเอส BLOCK II/IIA (Space – Based Positioning Navigation & Timing, n.d.)

ภาพที่ 27 ดาวเทียมระบบจีพีเอส BLOCK IIR/IIR-M (Space – Based Positioning Navigation & Timing, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 28 ดาวเทียมระบบจีพีเอส BLOCK IIF (Space – Based Positioning Navigation & Timing, n.d.)

สหรัฐอเมริกาใช้เวลาถึง 19 ปี ในการดำเนินโครงการต่างๆ สำหรับการเตรียมการและทดสอบเทคโนโลยีที่จะมาใช้ในระบบนำร่อง NAVSTAR GPS ตามภาพที่ 29



ภาพที่ 29 วิวัฒนาการนำร่องโดยใช้ดาวเทียม (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

อย่างไรก็ตาม ระบบนำร่องจีพีเอสได้มีการทดสอบและปฏิบัติการตั้งแต่ปี 1978 จนกระทั่งปี 1995 การปฏิบัติการนำร่องทั้งระบบจึงได้ทำงานเต็มขีดความสามารถที่ได้กำหนดไว้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

รวมแล้วเป็นเวลา 17 ปี นับจากดาวเทียมจีพีเอส ดวงแรกถูกส่งขึ้นสู่อวกาศ (PRN4 ในเดือนกุมภาพันธ์ 1978) ในปี 1996 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้จัดตั้งหน่วยงานที่ชื่อว่า IGEB (Interagency GPS Executive Board) ขึ้นเพื่อกำหนดนโยบายและการจัดการกับจีพีเอส โดยมีสมาชิกทั้งจากหน่วยงานต่างๆ อาทิเช่น ความมั่นคง การขนส่ง และ นาซ่า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในปี 2004 หน่วยงาน IGEB ได้ถูกแทนที่ด้วย National Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Executive Committee โดยทำหน้าที่ให้คำแนะนำและประสานงานกับหน่วยงานต่างๆในเรื่องจีพีเอสและระบบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System)

เป็นระบบของรัสเซีย ที่พัฒนาเพื่อแข่งขันกับสหรัฐอเมริกา แต่ระบบนี้ยังใช้งานได้ไม่สมบูรณ์ ใช้งานได้ดีเฉพาะในรัสเซีย ยุโรป และแคนาดา โดย GLONASS มีคุณลักษณะ (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, 2551) คือ

1. มีดาวเทียม 24 ดวงคล้ายกันระบบ GPS ส่วนอวกาศดวงแรกถูกส่งขึ้นสู่อวกาศ เมื่อ 12 ตุลาคม 1982

2. ดาวเทียมนำร่องทั้งกลุ่มมีจำนวน 24 ดวง ใน 3 วงโคจร แต่ละวงโคจรทำมุม 64.8 องศา ดาวเทียมโคจรด้วยความสูง 19,130 กิโลเมตร แต่ละรอบวงโคจรใช้เวลา 11 ชั่วโมง 15 นาที 40 วินาที สัญญาณ L1 มีความถี่ในย่าน 1602.0 - 1614.94 MHz อ้างอิงค่าพิกัดบนพื้นหลักฐาน PZ-90

3. สถานีควบคุมหลักอยู่ที่กรุงมอสโก สถานีย่อยจำนวน 14 สถานีเพื่อควบคุมและติดตามดาวเทียม

4. ประกาศว่าจะใช้งานได้เต็มระบบปี พ.ศ.2539 แต่ปัจจุบันมีดาวเทียมที่ใช้งานได้เพียง 12 ดวงเท่านั้น ลักษณะรุ่นของดาวเทียม GLONASS มีลักษณะตามภาพที่ 30

5. GLONASS มีความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ทางราบ 100 เมตร ทางดิ่ง 150 เมตร ในการรับด้วยสองความถี่

6. มีบริษัทผู้ผลิตหลายบริษัทผลิตเครื่องรับที่สามารถรับสัญญาณได้ทั้งสองระบบ (GPS+GLONASS) แต่ไม่ประสบความสำเร็จการขาย

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 30 ดาวเทียม GLONASS (Zaitsev, 2007)

GNSS (Global Navigation Satellite System)

โครงการอยู่ภายใต้การดูแลและควบคุมโดยองค์การอวกาศแห่งยุโรป (ESA: Europcan Space Agency) เป็นระบบนำร่องด้วยดาวเทียมของกลุ่มประเทศยุโรป สาเหตุที่ยุโรปมีความต้องการ GNSS เนื่องจาก (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, 2551)

1. จีพีเอสถูกควบคุมโดยทหาร องค์กรการบินพลเรือน และการบินเชิงพาณิชย์ มีความกังวลเรื่องเสถียรภาพ การใช้จีพีเอสระยะยาว

2. ความผิดพลาดของจีพีเอสที่มีค่าค่อนข้างสูงมาก สำหรับการบินเชิงพาณิชย์ ซึ่งต้องการการแจ้งเตือนภายใน 10-20 วินาที

3. สหภาพยุโรปพร้อมลงทุน

GNSS สามารถแบ่งออกได้เป็น

1. GNSS-1 หรือ EGNOS

2. GNSS-2 หรือ Galileo

GNSS-1 หรือ EGNOS ใช้ดาวเทียมนำร่อง GLONASS และจีพีเอสทำงานร่วมกับดาวเทียมสื่อสาร 3 ดวง ที่โคจรในวงโคจรค้างฟ้า ส่งสัญญาณนำร่องและข้อความนำร่องที่มีความแม่นยำสูงให้กับผู้ใช้ในทวีปยุโรปโดยเฉพาะ

GNSS-2 หรือ Galileo (ภาพที่ 31) เป็นระบบที่กำลังพัฒนาโดยสหภาพยุโรป ร่วมกับจีน อิสราเอล อินเดีย โมร็อกโก ซาอุดิอาระเบีย เกาหลีใต้ และยูเครน จะแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2553 Galileo มีคุณสมบัติ ดังนี้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

1. ริเริ่มโดย EU สนับสนุนโดย ESA เพื่อพัฒนาระบบดาวเทียมของยุโรปมาแข่งกับ GPS

2. ระบบนำร่อง ประกอบด้วยดาวเทียมจำนวน 30 ดวง โคจรใน 3 วงโคจร ที่ความสูง 23,222 กิโลเมตร

3. สามารถให้บริการครอบคลุมได้ถึงละติจูด 75 องศาเหนือ

4. เป็นความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชน

5. มีระดับการให้บริการการนำหน 4 ระดับและมีบริการค้นหาและช่วยเหลือ

6. ประกาศว่าจะใช้งานได้เต็มระบบปี พ.ศ. 2553

การให้บริการของ Galileo มีการให้บริการดังนี้ (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, 2551)

1. Open Service (OS): ไม่มีค่าบริการ สัญญาณนำร่องปรากฏที่สองย่านความถี่ คือ 1164-1214 MHz และ 1563-1591 MHz มีความแม่นยำ 4 เมตร ในแนวราบ และ 8 เมตร ในแนวดิ่ง สำหรับเครื่องรับสองความถี่ และ 15 เมตร ในแนวราบ 35 เมตร ในแนวดิ่ง สำหรับเครื่องรับในย่านหนึ่งความถี่

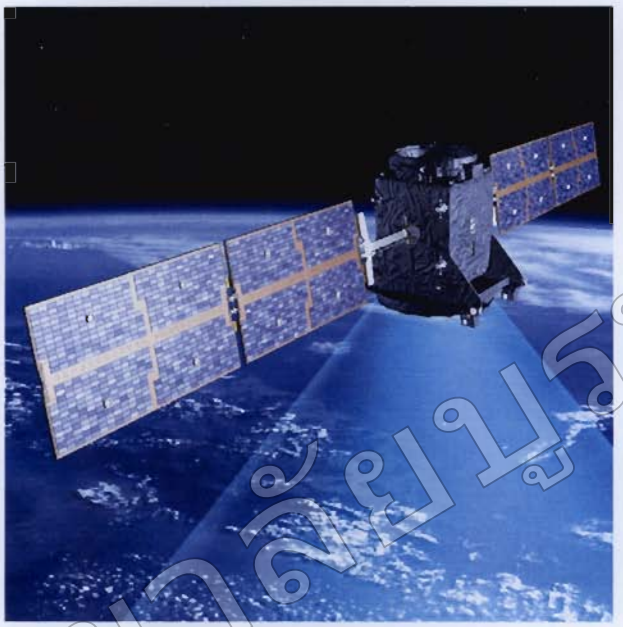
2. Encrypted Commercial Service (CS): มีค่าบริการ ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งประมาณ 1 เมตร สามารถเพิ่มความแม่นยำได้ถึง 10 เซนติเมตร โดยใช้สัญญาณแก้ไขจากสถานีภาคพื้นดิน สัญญาณนำร่องแพร่ใน 3 ย่านความถี่ โดย 2 ย่านความถี่ให้บริการแบบ OS และ 1 ย่านความถี่ที่ 1260-1300 MHz

3. Encrypted Public Regulated Service (PRS) และ Safety of Life Service (SoL) ความแม่นยำในระดับเดียวกันกับ OS ให้บริการที่มีความน่าเชื่อถือสูง และป้องกันการรบกวนสัญญาณเพื่อตอบสนองความต้องการการแจ้งเตือนภายใน 10 วินาที กลุ่มผู้ใช้ได้แก่ หน่วยงานด้านความปลอดภัย (ทหาร ตำรวจ) และหน่วยงานที่ดูแลความปลอดภัยในการขนส่ง การควบคุมจราจรทางอากาศ ระบบร่อนลงอัตโนมัติของอากาศยาน

4. Global Search and Rescue โดยดาวเทียมกาลิเลโอตรวจจับและส่งต่อสัญญาณจากอุปกรณ์ของระบบค้นหาและช่วยเหลือ Cospass-Sarsat ในย่านความถี่ 406.0-406.1 MHz สำหรับสนับสนุนการค้นหาและช่วยเหลือ ให้ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก

กำหนดการดาวเทียมกาลิเลโอ 4 ดวงแรก มีกำหนดถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรในช่วงปลายปี 2008 ถึงต้นปี 2009

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 31 ดาวเทียม Galileo (Galileo : Europe's new satellite navigation system, n.d.)

BeiDou

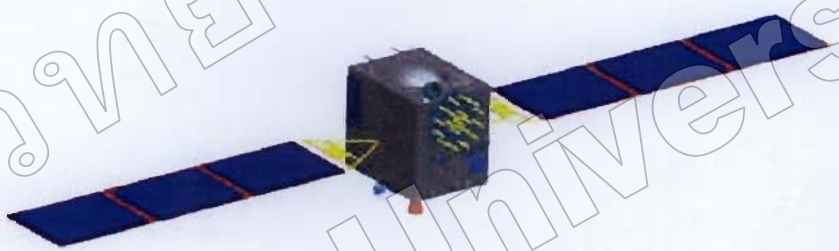
เป็นระบบนำร่องด้วยดาวเทียมของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน โดยเป็นดาวเทียม 3 ดวง วงโคจรค้างฟ้าเหนือประเทศจีน มีคุณลักษณะดังนี้ (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, 2551)

1. Beidou 1A (ภาพที่ 32) ขึ้นสู่วงโคจรเมื่อ ตุลาคม 2000
2. ปัจจุบันมีดาวเทียมนำร่องทั้งหมด 4 ดวงในอวกาศ
3. สัญญาณนำร่องในย่านความถี่ L1 และ L2
4. ความแม่นยำประมาณ 20-100 เมตร ในแนวราบ

BeiDou-2 หรือ Compass (ภาพที่ 33) เป็นระบบนำร่องในอนาคต ประกอบด้วยดาวเทียมนำร่อง 35 ดวง 30 ดวง ในวงโคจร MEO 5 ดวง วงโคจรค้างฟ้า ให้บริการทั่วโลก ไม่มีค่าบริการ ความแม่นยำ 10 เมตร โดยดาวเทียมดวงแรก BeiDou-2A หรือ Compass-M1 ขึ้นสู่วงโคจรค้างฟ้าเมื่อกุมภาพันธ์ 2007

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 32 ดาวเทียม Beidou-1 (China Develops Beidou Satellite Monitoring System. n.d.)



ภาพที่ 33 ดาวเทียม Beidou-2 (Compass-M1, n.d.)

QZSS (Quasi Zenith Satellite System)

เป็นระบบนำร่องด้วยดาวเทียมของประเทศญี่ปุ่น โดยเป็นดาวเทียม 3 ดวงที่วงโคจรค้างฟ้า ดวงแรกขึ้นสู่วงโคจรในปี 2008 (ภาพที่ 34) ดวงที่สองและสามจะขึ้นสู่วงโคจรในปี 2009 ให้บริการโดยแพร่สัญญาณจีพีเอสที่ได้รับการแก้ไขค่าความผิดพลาด แพร่ข้อมูล DGPS เชื่อมต่อกับโทรศัพท์ เคลื่อนที่โดยตรง (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, 2551)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ภาพที่ 34 ดาวเทียม QZSS (QZSS Progress Spurs Spirent Simulator Capability, 2008)

องค์ประกอบของระบบจีพีเอส

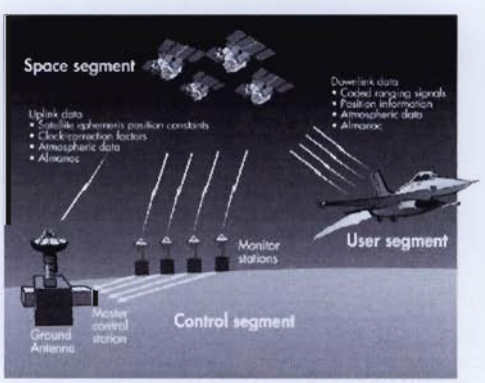
ระบบจีพีเอสแบ่งออกเป็น 3 ส่วน (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549) ตามภาพที่ 35 คือ

1. ส่วนศูนย์ควบคุมกลาง (Control Station Segment) เป็นศูนย์ควบคุมระบบและบัญชาการการทำงานของระบบ GPS รวมไปถึงการตรวจตราดูความเรียบร้อยของระบบ ตั้งอยู่ที่ฐานทัพอากาศ Colorado Spring สหรัฐอเมริกา (ภาพที่ 36) ศูนย์ควบคุมกลางประกอบด้วย

1.1 ศูนย์บัญชาการ (Master Control Station) ตั้งอยู่ฐานทัพอากาศสหรัฐอเมริกา Schriever AFB รัฐ Colorado

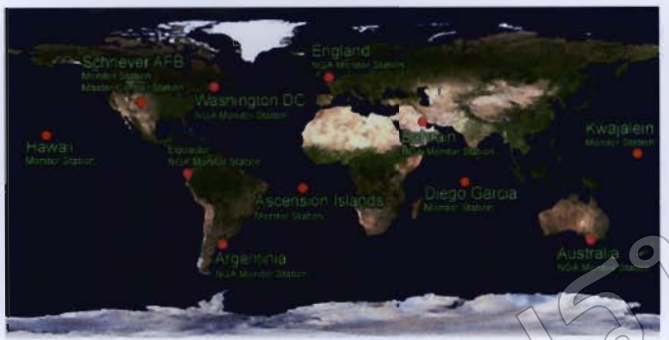
1.2 สถานีสังเกตการณ์ (Monitor Station) จำนวน 5 แห่ง กระจายอยู่ตามจุดต่างๆ ของโลก ได้แก่ Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia และ Colorado Spring

1.3 จานส่งสัญญาณภาคพื้นดิน (Ground Antennas) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 จุด ได้แก่ Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein



ภาพที่ 35 องค์ประกอบของระบบจีพีเอส (What is GPS, n.d.)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 36 ที่ตั้งสถานีควบคุมภาคพื้นดิน (The GPS System, n.d.)

สถานีรังวัดติดตามภาคพื้นเป็นสถานีที่ทราบค่าพิกัดแล้ว มีภารกิจในการส่งข้อมูลของดาวเทียมที่รับได้ไปยังสถานีควบคุมหลัก เพื่อทำการคำนวณวงโคจรดาวเทียมและพยากรณ์วงโคจรดาวเทียมไว้ล่วงหน้าพร้อมด้วยค่าตัวแก้นาฬิกาสำหรับดาวเทียมแต่ละดวง และทำการส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังดาวเทียมแต่ละดวงโดยสถานีส่งข้อมูล 3 สถานี การเทียบเวลาของดาวเทียมเป็นภารกิจสำคัญที่สุดของส่วนควบคุม ดังนั้นสถานีควบคุมหลักจะทำการเชื่อมโยงระบบโดยตรงกับสถานีรังวัดเวลากองทัพเรือสหรัฐฯ

2. ส่วนอวกาศ (Space Segment) ประกอบด้วยดาวเทียมจำนวน 24 ดวง เคลื่อนที่บนพื้นวงโคจร 6 พื้นวงโคจรๆ ละ 4 ดวง แต่ละพื้นวงโคจรทำมุม 55 องศากับพื้นอีเควเตอร์ ดาวเทียมโคจรด้วยความสูง 20,200 กิโลเมตร แต่ละรอบวงโคจรใช้เวลา 12 ชั่วโมง โครงสร้างของวงโคจร (Constellation) ในลักษณะนี้ทำให้มีดาวเทียมจำนวน 5-8 ดวง (Xu, 2007) ที่เครื่องรับ GPS สามารถรับสัญญาณได้ ณ ตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งใดได้ตลอดเวลาและดาวเทียม GPS จะมีปีกเป็นแผงเซลพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell Panels) โดยปกติจะพยายามหมุนตัวให้สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด ดังนั้นตัวดาวเทียมจะมีการหมุนปรับตัวตลอดเวลาโดยให้ปีกเซลพลังงานแสงอาทิตย์ตั้งฉากกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในตัวดาวเทียมยังบรรจุแบตเตอรี่สำหรับให้พลังงานเมื่อดาวเทียม GPS เคลื่อนตัวอยู่กายในเงาของโลก

ดาวเทียมแต่ละดวงจะมีนาฬิกาอะตอม (Atomic Clock) ที่ถูกต้องสูงมากใช้ในการควบคุมสร้างสัญญาณคลื่นส่ง (Carrier Signal) ของระบบส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ โดยคลื่นที่ส่งเป็นคลื่นในช่วง L- band จำนวน 2 ความถี่ ด้วยกำลังส่ง 50 วัตต์ (Dana, 2000) คือ

1.) คลื่น L1 (L1 Signal) ความถี่1575.42 MHz ความยาวคลื่น 19.03 เซนติเมตร โดยจะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulated) ด้วยรหัสที่เรียกว่า Pseudo – random noise (PRN) 2 ชนิด ซึ่งใช้ใน

การหาระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ (Pseudo – ranges) คือ C/A code และ P code ที่ไม่ซ้ำกันในดาวเทียมแต่ละดวง พร้อมทั้งข้อมูลนำหนของดาวเทียม (Navigation Code)

2.) คลื่น L2 (L2 Signal) ความถี่1227.60 MHz ความยาวคลื่น 24.42 เซนติเมตร โดยจะถูกกล้ำสัญญาณ (Modulated) ด้วยรหัส P code และข้อมูลนำหนดาวเทียมเท่านั้น

รหัสที่กล้ำสัญญาณเข้ากับคลื่น L1 และ L2 มีรายละเอียด (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2549) ดังภาพที่ 37 คือ

1.) รหัสข้อมูลนำหนดาวเทียม (Navigation Code)

ข้อนำหนของดาวเทียม (Navigation Message) ประกอบด้วยข้อมูลวงโคจร (Orbital Information) หรือค่า อิเฟเมอริส (Ephemeris) ซึ่งเป็นค่าพิกัดตำแหน่งดาวเทียมในแต่ละวัน ค่าอัลมาแนก (Almanac) ซึ่งเป็นค่าปฏิทินอิเฟเมอริสของดาวเทียมทุกดวงล่วงหน้า เพื่อใช้ในการวางแผนการรับสัญญาณดาวเทียม ค่าแก้สัญญาณเวลานาฬิกาของดาวเทียม โดยค่าเหล่านี้จะถูกปรับปรุงให้ทันสมัยจากสถานีควบคุมภาคพื้นดินทุกวัน

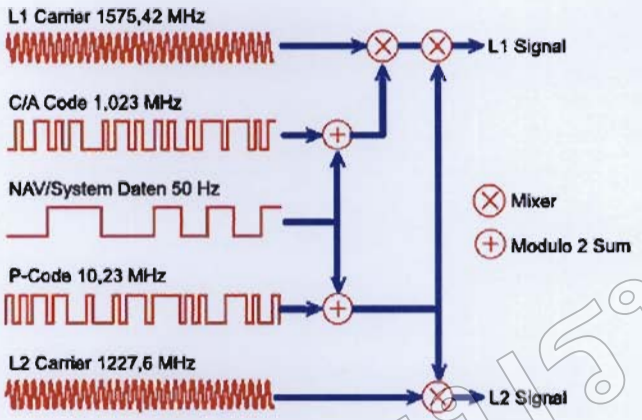
2.) รหัส P (P code)

รหัส P หรือ Precise code เป็นรหัสที่กล้ำเข้าสัญญาณทั้งคลื่น L1 และ L2 มีความถี่เท่ากับ 10.23 MHz ความยาวคลื่น 30 เซนติเมตร โดยจะมีรูปแบบที่ซ้ำกันบางส่วนทุก 7 วัน และจะซ้ำกันเต็มรูปแบบทุก 37 สัปดาห์ รหัส P เป็นรหัสที่อนุญาตให้ใช้ได้เฉพาะทางการทหารและพันธมิตรของสหรัฐอเมริกาเท่านั้น โดยมีการป้องกันการใช้ โดยเข้ารหัสสัญญาณ (Encrypted) ด้วยการเปิดระบบป้องกันที่เรียกว่า Anti – spoofing mode (A – S) ซึ่งรหัส P นี้จะเปลี่ยนเป็นรหัสที่เรียกว่า รหัส Y (Y code) หรือ P(Y)

3.) รหัส C/A (C/A code)

รหัส C/A หรือ Coarse Acquisition Code เป็นรหัสที่กล้ำเข้ากับสัญญาณเฉพาะคลื่น L1 เท่านั้น มีความถี่เท่ากับ 1.023 MHz ความยาวคลื่น 300 เมตร ดาวเทียมแต่ละดวงจะส่งรหัส C/A ที่ไม่ซ้ำรูปแบบกัน (Unique C/A Code) และมีอัตราส่งทุก 1 มิลลิวินาที

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 37 ลักษณะของการกล้ำสัญญาณ (The GPS System, n.d.)

3. ส่วนผู้ใช้งาน (User Segment) ประกอบด้วยเครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสที่ใช้ในการรังวัดสัญญาณดาวเทียมอยู่ทั่วไปทั้งทางทหารและพลเรือน แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

3.1 เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสแบบพกพาเพื่อการนำร่อง สามารถอ่านค่าพิกัดได้ทันที มีขนาดเล็กกะทัดรัด ราคาถูก แต่ความละเอียดถูกต้องต่ำ

3.2 เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสแบบติดตั้ง เพื่อใช้ในงานสำรวจที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง โดยทำการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสไว้ แล้วนำมาประมวลผลร่วม กับอีกเครื่องฯในภายหลัง เครื่องหาค่าพิกัดจีพีเอสประเภทนี้มักจะมีขนาดใหญ่และมีราคาแพง

แนวโน้มของจีพีเอสในอนาคต

จากข้อจำกัดของสัญญาณจีพีเอสที่ได้ออกแบบไว้ในยุคเริ่มต้นนั้นที่ผู้ใช้พลเรือนสามารถเข้าถึงรหัส C/A ได้เพียงความถี่เดียว (L1) ได้ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของผู้ใช้ที่เป็นพลเรือน นอกจากนี้แรงกดดันโดยเฉพาะจากองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ICAO (International Civil Aviation Organisation) และ FAA (Federal Aviation Administration) ส่งผลให้รัฐบาลสหรัฐอเมริกาปรับปรุงโครงสร้างสัญญาณจีพีเอสใหม่ โดยสาระสำคัญอยู่ตรงที่เพิ่มสองความถี่ที่พลเรือนสามารถเข้าถึง

โดยสองความถี่ที่กล่าวถึงนั้น ก็ไม่เชิงว่าเป็นความถี่ใหม่ทั้งหมด โดยมีการปรับปรุงให้ความถี่ L2 มีรหัส C/A ถูกแพร่ออกมาตลอดเวลาเหมือนกับความถี่ L1 ซึ่งแต่เดิมนั้นความถี่ L2 มอดูเลตกับสัญญาณรหัส (P code) เท่านั้นสัญญาณความถี่ L2 ที่มีการปรับปรุงใหม่นี้ มีชื่อเรียกว่า L2C ซึ่งจะถูกแพร่จากดาวเทียมจีพีเอสรุ่น Block IIR-M ที่ถูกยิงขึ้นสู่อวกาศในปี 2005 และดาวเทียมจีพีเอสรุ่นล่าสุด Block IIF ที่มีกำหนดยิงในปี 2008 สำหรับความถี่ที่สองเป็นความถี่ใหม่ที่เรียกว่า L5

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

โดยมีค่าความถี่ 1176.45 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่อยู่ในแถบความถี่สากลที่ใช้เฉพาะกับการนำร่องอากาศยานด้วยสัญญาณวิทยุ (ARNS: Aeronautical Radio Navigation Service) ส่งผลให้จีพีเอสมีความเข้มแข็งและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะกับประยุกต์ใช้งานด้านการบินพาณิชย์ ซึ่งที่ผ่านมาจีพีเอสยังมีข้อด้อยในการใช้งานด้านนี้อยู่

คุณลักษณะเด่นของโรงสร้างสัญญาณใหม่

1. รหัส C/A บนความถี่ L2 หรือที่เรียกว่า L2C
2. ความถี่ใหม่ L5 (1176.45 MHz) สำหรับการบินพาณิชย์
3. รหัส M บนความถี่ L1 และ L2 สำหรับผู้ที่ทำงานด้านความมั่นคง USA

นอกจากการเพิ่มขีดความสามารถในการเข้าถึงให้แก่ผู้ใช้ที่เป็นพลเรือนแล้ว โครงสร้างสัญญาณจีพีเอสใหม่ยังได้เพิ่มรหัส M (Military Code) บนความถี่ L1 และ L2C สำหรับผู้ใช้ที่เป็นทหารหรือทำงานด้านความมั่นคงตามความต้องการของ US DoD นอกจากนี้ ระบบนำร่องจีพีเอสในอนาคตจะมีดาวเทียมรุ่นที่ 3 หรือที่เรียกว่า Block III ซึ่งจะมีการปรับปรุงสัญญาณความถี่ L1 (เรียกว่า L1C) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยระบบนำร่องจะมีการสื่อสารกันระหว่างดาวเทียมจีพีเอส อีกทั้งมีดาวเทียมเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูแลคุณภาพและประสิทธิภาพการให้บริการผู้ใช้ ในการออกแบบและกำหนดคุณสมบัติของสัญญาณ L1C สำหรับ จีพีเอส Block III นั้น ได้มีความร่วมมือกันระหว่างสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกา เพื่อให้ได้สัญญาณนำร่องร่วมที่สามารถใช้กับดาวเทียมกาลิเลโอได้ที่ความถี่ L1 (1.57542 GHz) (สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ม.ป.ป.)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการกำหนดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส ค่าพิกัดที่ได้จะอยู่ในระบบพิกัดฉากสามมิติ ที่มีจุดกำเนิดอยู่ ณ จุดศูนย์กลางมวลสารของโลก ซึ่งบอกตำแหน่งเป็นค่าพิกัดที่ประกอบด้วยค่า ละติจูด ลองจิจูด และความสูงเหนือรูปทรงรี โดยเทียบกับรูปทรงรีอ้างอิงที่ประเทศนั้นใช้อยู่ ในทางปฏิบัติความสูงเหนือรูปทรงรีจะนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย แต่ความสูงที่ใช้อยู่โดยทั่วไปในงานรังวัด เป็นความสูงที่อ้างอิงกับพื้นผิวจีออยด์ ที่เรียกว่าความสูงออร์โทเมตริกหรือความสูงเหนือจีออยด์ ดังนั้นเพื่อให้ความสูงที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ จึงจำเป็นต้องแปลงความสูงเหนือรูปทรงรีไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ทั้งนี้จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างจีออยด์ กับรูปทรงรีที่ใช้ ซึ่งจะต้องทราบระยะระหว่างพื้นผิวทั้งสองที่เรียกว่า ความสูงจีออยด์นั่นเอง

ในปัจจุบัน ช่างรังวัดและวิศวกรได้ให้ความสนใจในการนำวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส ประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความสูงออร์โทเมตริก ซึ่งจะนำมาแทนที่วิธีการถ่ายระดับ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ด้วยกล้องระดับ อีกทั้งยังเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการปฏิบัติงานลง โดยการนำข้อมูลจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส มาใช้ร่วมกับแบบจำลองความสูงจีออยด์ ที่มีความละเอียดสูง และหมุดควบคุมทางดิ่งหลักที่กระจายครอบคลุม พื้นที่อย่างเพียงพอ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงจีออยด์ และเพื่อทอนค่าความสูงเหนือรูปทรงรีที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม ไปเป็นค่าความสูงออร์โทเมตริก ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

การหาค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส ในการศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมของค่าความสูงออร์โทเมตริกโดยการประยุกต์ใช้การรังวัดดาวเทียมจีพีเอส ร่วมกับแบบจำลองความสูงจีออยด์ EGM96 และ OSU91A ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 80,000 ตารางกิโลเมตร โดยใช้ข้อมูลหมุดหลักฐานดาวเทียมจีพีเอส จำนวน 94 หมุด และเป็นหมุดที่ทราบค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วย จำนวน 19 หมุด ซึ่งผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองความสูงจีออยด์ EGM96 มีความเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่าแบบจำลองความสูงจีออยด์ OSU91A และพบว่า จากการนำแบบจำลองความสูงจีออยด์ EGM96 มาประยุกต์ใช้ในการประมวลผลร่วมกับการกำหนดค่าระดับสูงจากหมุดระดับให้มีค่าคงที่จำนวน 4 หมุด ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าความสูงแตกต่างไปจากค่าอ้างอิง หรือค่าระดับสูงที่ได้จากการสำรวจโดยกล้องระดับ โดยเฉลี่ย 0.030 เมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.103 เมตร (ธนัช สุขวิมลเสรี, 2547)

ในการหาแบบจำลองความสูง GEOID90 ที่จะใช้เป็นแบบจำลองความสูงที่มีความถูกต้องสูงของสหรัฐอเมริกา โดยที่ GEOID90 ได้ประมวลผลจากจุดต่างๆทั้งทางบกและทางน้ำเกือบ 1.5 ล้านจุด โดยเป็นจุดวัดความโน้มถ่วงพิภพในแบบตาราง 3 × 3 ลิปดา หรือประมาณ 5 กิโลเมตร ในพื้นที่ 24 ° N ถึง 53 ° N และ 66 ° W ถึง 125 ° W ในการหาได้ใช้จีพีเอสในการหาความสูงออร์โทเมตริกเพื่อใช้เทียบกับความสูงดิ่ง เมื่อเปรียบเทียบในเชิงพื้นที่ จะให้ค่าคลาดเคลื่อน 10 เซนติเมตร ต่อระยะทาง 100 กิโลเมตร เมื่อพิจารณาปริมาณเทียบกับความผิดพลาดการใช้จีพีเอสเข้ามาช่วยในการทำงานแผนที่จึงเป็นที่ยอมรับได้ (Milbert, 1991)

ในการหา GEOID96 ได้มีการใช้ข้อมูลทั้งจากการสำรวจภาคพื้นดิน บนพื้นน้ำและการหาแรงโน้มถ่วงของโลก ความละเอียด 2 × 2 ลิปดา จำนวนเกือบ 1.8 ล้านจุดโดยที่จะได้แบบจำลองความสูง GEOID96 ที่มีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองความสูง GEOID90 และ GEOID93 ในการศึกษาการใช้การรังวัดจีพีเอสแปลงค่าความสูงจากแบบจำลองความสูง NAVD88 (North American Vertical Datum 1988) ไปเป็นแบบจำลองความสูง GEOID96 ใช้จุดที่ทำการรังวัดจีพีเอสจำนวน 2,700 จุด เพื่อหาค่าความสูงเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองความสูง โดยแต่เดิมจีพีเอสที่ทำการรังวัดจะได้ค่าพิกัดอยู่บนรูปทรงรี NAD83 และความสูงออร์โทเมตริกที่ได้อยู่บนแบบจำลองความสูง NAVD88 แต่เมื่อมีแบบจำลอง GEOID96 ซึ่งจุดศูนย์กลางทั้งของรูปทรงรีและ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ยืออยู่ที่จุดเดียวกัน ทำให้ไม่ต้องแปลง NAD83 จากจีพีเอสและแบบจำลองความสูง NAVD88 ให้ไปอยู่บนแบบจำลอง GEIOD96 โดยในการทดสอบเบื้องต้นค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 เซนติเมตร (Milbert & Smith, 1996)

ในการศึกษาหาความแตกต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากแบบจำลอง EGM96 กับความสูงบนระดับทะเลปานกลางประเทศไทย รวมทั้งต้องการหาความสูงออร์โทเมตริกของหมุดดาวเทียมจีพีเอสในโครงข่ายของกรมแผนที่ทหาร จำนวน 692 หมุด โดยวิธีการคำนวณปรับแก้โครงข่ายที่มีหมุดที่ทราบค่าความสูงออร์โทเมตริก จำนวน 237 หมุด เป็นหมุดควบคุมทางดิ่ง และหมุดดาวเทียมจีพีเอสจากโครงข่ายหลัก จำนวน 18 หมุด เป็นหมุดควบคุมทางราบ รวมทั้งประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงจีออยด์ EGM96 ร่วมด้วย เพื่อช่วยในการควบคุมพื้นผิวจีออยด์ในพื้นที่บริเวณที่มีหมุดควบคุมทางดิ่งอยู่ไกล ผลจากการศึกษาจากกลุ่มตัวอย่างหมุดดาวเทียมจีพีเอสที่มีค่าความสูงออร์โทเมตริก จำนวน 265 หมุด พบว่าความแตกต่างระหว่างความสูงจีออยด์จาก EGM96 กับระดับทะเลปานกลางมีค่าเฉลี่ย 1.05 เมตร หากกำหนดให้ค่า 1.05 เมตร เป็นค่าตัวแก้คงที่ระหว่าง EGM96 กับระดับทะเลปานกลาง พบว่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างความสูงจีออยด์ EGM96 ประยุกต์ กับระดับทะเลปานกลาง จะเหลือเพียง 0.23 เมตร เท่านั้น ซึ่งถือได้ว่าดีพอต่องานทำแผนที่ส่วนในการคำนวณปรับแก้โครงข่ายหมุดดาวเทียมพร้อมกันทั้งโครง เพื่อหาค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดดาวเทียมจีพีเอส จากการตรวจสอบเปรียบเทียบความสูงออร์โทเมตริกของหมุดดาวเทียมจีพีเอส ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้โครงข่ายกับค่าอ้างอิง จำนวน 28 หมุดพบว่าความแตกต่างเฉลี่ย 0.04 เมตร แต่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง คือ 0.31 เมตร และเมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนตามระยะทางกับงานระดับชั้นที่ 3 พบว่ามีค่าที่ผ่านเกณฑ์งานระดับชั้นที่ 3 เพียง 7 หมุด เท่านั้น สรุปได้ว่าค่าออร์โทเมริกบนหมุดจีพีเอสยังไม่อาจใช้แทนงานระดับชั้นที่ 3 ได้ เนื่องจากการหาค่า N ยังไม่ละเอียดดีพอสำหรับประเทศไทย โดยอาจมีสาเหตุมาจากการกระจายของหมุดดาวเทียมจีพีเอส ที่มีค่าความสูงออร์โทเมตริกยังไม่ครอบคลุมหนาแน่นและแบบจำลอง EGM96 ยังไม่ละเอียดดีพอ หรืออาจต้องใช้เทคนิคการประมวลผลที่ซับซ้อนมากขึ้น หรืออาจมีการนำค่าความโน้มถ่วงภาคพื้นดินมาร่วมประมวลผล (กองยืออเดซี่และยืออฟิสิกส์, 2548)

เฉลิมชนม์ สถิระพจน์, สุทธิพงศ์ วิญญูประดิษฐ์, บรรเจิด พละการ, วิชัย เยี่ยงวีรชน และอิทธิ ตริสิริสัตยวงศ์ (2547) ได้ทำการหาค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลางของสถานีวัดน้ำในอ่าวไทยด้วยจีพีเอส โดยที่ใช้สถานีวัดน้ำซึ่งเป็นสถานีที่ตั้งอยู่กลางทะเลในอ่าวไทย และอยู่ห่างจากแนวชายฝั่งประมาณ 10 กิโลเมตร ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำที่ไม่เอื้อต่อการหาค่าระดับด้วยกล้องระดับหรือวิธีการทางภาคพื้นดินจึงใช้การหาค่าระดับด้วยจีพีเอส ในวิธีการได้ใช้หมุดที่ทราบค่าระดับ

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 2 หมุด ร่วมกับการใช้แบบจำลอง EGM96 หาค่า N แบบสัมพัทธ์ โดย ในการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส ใช้วิธีการรังวัดหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ด้วยวิธีการทำงานแบบสถิต (Static GPS Survey) ในการรับสัญญาณเลือกช่วงเวลาในการรับสัญญาณที่มีค่า GDOP ต่ำกว่า 8 ตั้งค่า Cut-off angle เท่ากับ 15 องศา อัตราถี่ของการบันทึกข้อมูลเท่ากับ 15 วินาที เมื่อทำการประมวลผลและทำการวิจัยเสร็จสิ้น สรุปได้ว่าค่าระดับด้วยจีพีเอสนั้นให้ค่าความถูกต้องในระดับหลายเซนติเมตร เนื่องจากค่าความถูกต้องของค่าต่างความสูงที่ได้จากการประมวลผลเส้นฐานอยู่ที่ประมาณ 1.5 เซนติเมตร ค่าความถูกต้องของการหาค่า N แบบสัมพัทธ์จากแบบจำลอง EGM96 จึงน่าจะอยู่ในระดับ 2.5 เซนติเมตร แต่พื้นที่ที่ศึกษาเป็นพื้นราบจึงให้ความถูกต้องสูง

สุรพงษ์ รังษีสมบัติศิริ (2537) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสสำหรับหมุดควบคุมทางดิ่งในโครงการสร้างอ่างเก็บน้ำ ซึ่งตั้งอยู่ในกิ่งอำเภอสบเมย และ อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ด้วยพื้นที่ประมาณ 2,500 ตารางกิโลเมตร มีลักษณะของภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขา ในการวิจัยได้ใช้เครื่องรับสัญญาณแบบความถี่เดียว Trimble 4000SE ทำการรังวัดบนหมุดควบคุมทางดิ่ง 20 หมุด ที่มีระยะห่างกันประมาณ 5 ถึง 20 กิโลเมตร ข้อมูลจากการรังวัดจะนำมาประมวลผลเส้นฐานด้วยซอฟต์แวร์ TRIMVEC Plus ผลลัพธ์จากการประมวลผลเส้นฐานจำนวน 35 เส้น นำมาประกอบเป็นโครงข่ายและ ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ TRIMNET ทั้งนี้ได้ใช้ค่าความสูงจากการทำระดับในเกณฑ์งานชั้นสาม เป็นค่าระดับอ้างอิงของหมุดควบคุมทางดิ่งหลัก ในการทอนค่าความสูงเหนือรูปทรงรีจากการรังวัดดาวเทียมให้เป็นค่าความสูงเหนือจีออยด์ ใช้วิธีการปรับแก้โครงข่ายโดยการกำหนดค่าระดับของหมุดควบคุมทางดิ่งหลัก ตั้งแต่ 1 ถึง 7 หมุด ให้มีค่าคงที่ จากผลการวิจัยพบว่าการใช้หมุดควบคุมทางดิ่งหลัก 4 หมุด ซึ่งมีระยะห่างกัน 20 กิโลเมตร ก็เพียงพอและเหมาะสม กล่าวคือเมื่อพิจารณาค่าทางสถิติในการเปรียบเทียบผลต่างของค่าความสูงออร์โทเมตริก ระหว่างผลซึ่งได้จากการประมวลผลเมื่อมีหมุดควบคุมทางดิ่งหลัก 4 หมุด และผลซึ่งได้จากการทำระดับ จะให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ – 0.001 เมตร และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.030 เมตร ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส สามารถนำไปใช้ในงานสร้างหมุดควบคุมทางดิ่งหลักที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายและเวลา ระหว่างวิธีการเดินระดับและวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส เมื่อมีหมุดควบคุมทางดิ่งหลักเท่ากัน พบว่าวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส จะประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าประมาณ 2.3 เท่าและประหยัดเวลากว่าประมาณ 4 เท่าของโครงการสร้างหมุดควบคุมทางดิ่งดังกล่าว

ในการศึกษาและประยุกต์ใช้การรังวัดด้วยดาวเทียมระบบจีพีเอส ในการสร้างและกำหนดพิกัดตำแหน่งหมุดหลักฐานที่มีความถูกต้องสูง โดยการก่อสร้างหมุดหลักฐานที่มี

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ความถูกต้องสูง โดยการก่อสร้างหมุดหลักฐานถาวรจำนวน 8 หมุด ให้ครอบคลุมพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) วิทยาเขตทุ่งครุ และวิทยาเขตบางขุนเทียน การรังวัดได้ทำการโยงยึดเข้ากับหมุดหลักฐานกรมแผนที่ทหารซึ่งทราบค่าในระบบพิกัดของประเทศ ซึ่งจะเป็นการตรึงโครงข่ายลงบนพื้นหลักฐานของประเทศด้วยการรังวัดแบบสถิต โครงการวิจัยได้ใช้เครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่ และมีการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม SKI-PRO ผลที่ได้คือค่าพิกัด ณ ตำแหน่งหมุดหลักฐานถาวรที่ได้ทำการสร้างขึ้นจำนวน 8 หมุด โดยแสดงค่าพิกัดเป็นสามมิติ ซึ่งอ้างอิงบนพื้นหลักฐาน WGS84 โดยค่าพิกัดที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยทั้ง 8 หมุด ในแนวแกน X เท่ากับ 0.545 เซนติเมตร ในแนวแกน Y เท่ากับ 0.419 เซนติเมตร และในแนวแกน Z เท่ากับ 1.298 เซนติเมตร ซึ่งถือว่าค่าพิกัดที่ได้มีความถูกต้องในระดับสูง สามารถที่จะนำค่าพิกัดไปอ้างอิงในงานรังวัด (ธนัช สุขวิมลเสรี, กิติเดช สันติชัยอนันต์ และธีระ ลิลิตวรางกูร, 2548)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University