บทที่ 2

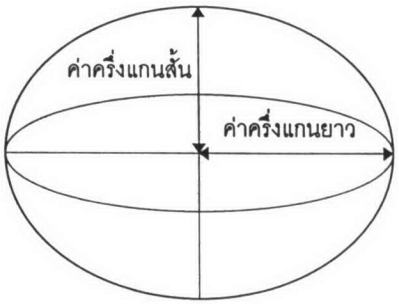
การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับเรื่องที่ศึกษา (Related Literatures)

2.1 สัณฐานของโลก (The Earth's Figure)

สัณฐานของโลกมีทั้งทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ สัณฐานของโลกทางกายภาพหมายถึง แนวเขตระหว่างผิวดิน หรือผิวน้ำกับบรรยากาศรอบผิวโลก ค่าพิกัดตำแหน่งของหมุดหลักฐานจากการทำงานรังวัดขั้นสูง ใช้แสดงสัณฐานส่วนที่เป็นพื้นดินได้อย่างหยาบๆ ในขณะที่สัณฐานทางกายภาพของโลกส่วนที่เป็นพื้นน้ำมองเห็นได้ง่าย เพราะภายใต้สมมุติฐานบางอย่างจะถือได้ว่า ผิวน้ำของมหาสมุทรคือพื้นผิวระดับของสนามความถ่วงของโลกที่มีศักยภาพความถ่วงเท่ากันทุกจุด สำหรับสัณฐานของโลกทางคณิตศาสตร์ ได้จากการจินตนาการว่าพื้นผิวระดับของมหาสมุทรนี้ต่อยื่นเข้าไปในส่วนที่เป็นพื้นดิน พื้นผิวระดับที่ครอบคลุมโลกทั้งหมดนี้ มีชื่อเรียกว่า ยีออย (Geoid) ในงานยีออเดซี เมื่อกล่าวถึงสัณฐานของโลกจะหมายความถึง ยีออย ซึ่งเป็นพื้นผิวอ้างอิงในขณะทำงานรังวัดขั้นสูงและงานรังวัดทางดาราศาสตร์ รวมทั้งงานรังวัดอื่นๆ ด้วย ทั้งนี้เพราะระนาบราบที่เป็นพื้นผิวอ้างอิงในงานรังวัดอื่นๆ นั้นคือ ส่วนที่เล็กส่วนหนึ่งของยีออยในพื้นที่ของโลกส่วนนั้นนั่นเอง (ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ, 2537)

เนื่องจากยีออยมีรูปทรงที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของมวลสารภายใต้ผิวโลกไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถหาสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายมาใช้เพื่อบ่งบอกลักษณะของพื้นผิวยีออยได้ (สมการที่นิยมใช้กันอยู่ เป็นอนุกรมฮาร์มอนิกที่มีจำนวนเทอมเป็นค่าอนันต์) ยีออยจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพื้นผิวอ้างอิงสำหรับการคำนวณในงานยีออเดซี และงานรังวัดขั้นสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหารูปทรงทางเรขาคณิตที่ใกล้เคียงกับยีออยมากที่สุด และทราบคุณสมบัติหรือคำนวณหาได้อย่างง่าย โดยปกตินิยมใช้รูปทรงรี ซึ่งเกิดจากการหมุนวงรีรอบแกนสั้น ตามลักษณะการหมุนของโลก มีชื่อเฉพาะว่า รูปทรงรีอ้างอิง (Reference ellipsoid) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 รูปทรงรีอ้างอิง

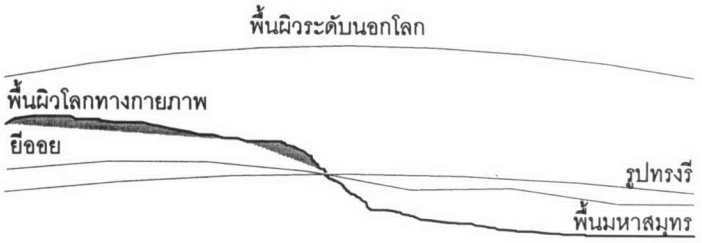
รูปทรงรีอ้างอิงที่ใช้เป็นสัณฐานของโลก สำหรับการคำนวณงานรังวัดขั้นสูง มีอยู่หลายรูป ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สาเหตุที่เกิดรูปทรงรีอ้างอิงขึ้นมากมาย เพราะในแต่ละประเทศมีความต้องการที่จะสร้างพื้นหลักฐาน (Datum) สำหรับการอ้างอิงในงานรังวัดขั้นสูง จากข้อมูลที่แตกต่างกัน จะทำให้การคำนวณหาขนาด และสัณฐานของรูปทรงรีที่มีความเหมาะสมกับยีออยในพื้นที่ของประเทศหรือภูมิภาคนั้นๆ แตกต่างกันออกไปด้วย สำหรับคำว่า "รูปทรงรีเฉลี่ยของโลก"

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์รูปทรงรีอ้างอิง

ชื่อรูปทรงรี และ ปี ค.ศ.	ค่าครึ่งแกนยาว a (เมตร)	ส่วนกลับของอัตราการยุบ 1 / f
Airy 1830	6378563.396	299.324964
Everest 1830	6377276.345	300.8017
Bessel 1841	6377397.155	299.152813
Clarke 1866	6378206.4	294.978698
Clarke 1880	6378249.145	293.465
Clarke 1880 (modified)	6378249.145	293.4663
International 1924	6378388	297
Krassovski 1940	6378245	298.3
Mercury 1960	6378166	298.3
Australian National 1965	6378160	298.25
Geodetic Reference System 1967	6378160	298.2471674273
South America 1969	6378160	298.25
World Geodetic System 1972	6378135	298.26
Int. Assoc. of Geodesy 1975	6378140	298.257 ± .0015
Geodetic Reference System 1980	6378137	298.257222101
Int. Assoc. of Geodesy 1983	6378136	298.257
World Geodetic system 1984	6378137	298.257223563

หมายถึง รูปทรงรีที่มีขนาดและคุณสมบัติใกล้เคียงกับยีออยมากที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปทรงรีของระบบอ้างอิงทางยีออเดซี (Geodetic Reference System 1967 and 1980)

ในการทำงานรังวัดขั้นสูง จะตั้งเครื่องมืออยู่บนพื้นผิวดิน ซึ่งเป็นสัณฐานของโลกทางกายภาพ ค่าที่วัดได้จึงเป็นค่าที่อ้างอิงกับพื้นผิวยีออย และเมื่อจะนำมาใช้ในการคำนวณจึงมักจะมีการทอนค่าให้เป็นค่าที่อ้างอิงกับพื้นผิวของรูปทรงรี ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวต่างๆ ในงานยีออเดซี



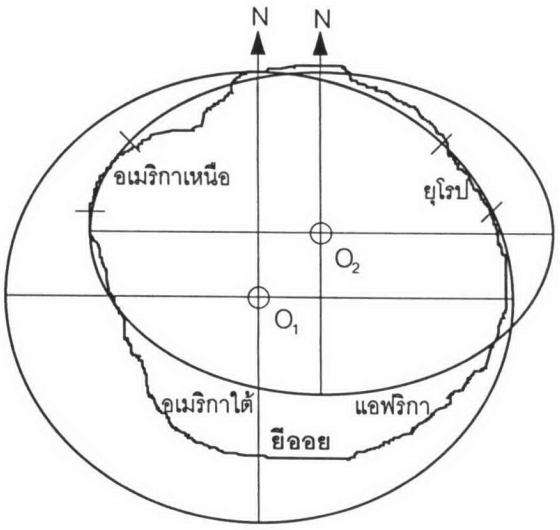
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวต่างๆ ในงานยีออเดซี

2.2 พื้นหลักฐานทางยีออเดซี (Geodetic Datum)

พื้นหลักฐานทางยีออเดซี อาจแยกออกได้เป็นพื้นหลักฐานทางราบ และพื้นหลักฐานทางดิ่ง การแยกกันระหว่างพื้นหลักฐานทั้งสอง ก็โดยเหตุที่เครื่องมือที่ใช้ในการรังวัดเพื่อหาตำแหน่งทางราบและทางดิ่งแตกต่างกัน ความจำเป็นในการเลือกตำแหน่งของหมุดหลักฐานเพื่อการใช้งานก็ต่างกัน โครงข่ายของหมุดหลักฐานทางราบและทางดิ่งจึงแยกกันอยู่อย่างอิสระ เมื่อวิเคราะห์ถึงวิธีการคำนวณโครงข่ายทั้งสอง จะพบว่า การคำนวณโครงข่ายหมุดหลักฐานทางราบกระทำอยู่บนพื้นผิวของรูปทรงรี หรือมีค่าที่อ้างอิงอยู่กับรูปทรงรี ในขณะที่ค่าระดับหรือค่าพิกัดทางดิ่งเป็นค่าที่อ้างอิงอยู่กับพื้นผิวยีออย ซึ่งเป็นสัณฐานอันแท้จริงของโลก นั่นเอง กล่าวโดยสรุปนอกจากตำแหน่งของหมุดหลักฐานทางราบและทางดิ่งจะอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกันแล้ว ค่าพิกัดทางราบและทางดิ่ง ก็ยังทำการคำนวณอยู่บนพื้นผิวที่ต่างกันอีกด้วย ในปัจจุบัน การรังวัดดาวเทียมจะให้ค่าพิกัดที่เป็นสามมิติคือ ได้ทั้งตำแหน่งทางราบและตำแหน่งทางดิ่งในคราวเดียวกัน ดังนั้น การกล่าวถึงพื้นหลักฐานทางยีออเดซีในอนาคตคงจะไม่มีการแยกเป็นทางราบและทางดิ่งอีกต่อไป

พื้นหลักฐานทางยีออเดซีได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ในงานรังวัดของแต่ละประเทศหรือภูมิภาค จึงได้เกิดพื้นหลักฐานต่างๆ ขึ้นมากมาย บางพื้นหลักฐานครอบคลุมพื้นที่เกือบทั้งทวีป ในขณะที่บางพื้นหลักฐานใช้กับเกาะเล็กๆ เพียงหนึ่ง หรือสองเกาะเท่านั้น เนื่องจากพื้นหลักฐาน

ส่วนใหญ่เหล่านี้ได้จากการคำนวณงานรังวัดของข้อมูลเฉพาะพื้นที่ ดังนั้น รูปทรงรีจึงซ้อนทับกับพื้นผิวของยีออยเฉพาะส่วนนั้นๆ ของโลก ภาพที่ 2.3 แสดงพื้นหลักฐานของยุโรปตะวันตกและของทวีปอเมริกาเหนือ ที่ใช้เป็นสัณฐานของโลกได้เฉพาะบริเวณที่มีการนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณสร้างพื้นหลักฐานเท่านั้น ถ้านำไปใช้ในส่วนอื่นของโลกที่ไม่มีข้อมูลของการรังวัดพื้นผิวของรูปทรงรี จะไม่สามารถใช้ในการประมาณรูปทรงของพื้นผิวยีออยได้ พื้นหลักฐานที่มีพื้นผิวของรูปทรงรีซ้อนทับกับพื้นผิวยีออยเฉพาะพื้นที่นี้ เรียกว่า พื้นหลักฐานส่วนท้องถิ่น (Local datum) เมื่อดาวเทียมเริ่มเข้ามามีบทบาทในการทำงานรังวัด ทำให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลในส่วนต่างๆ ของโลกเข้าหากัน และทำให้สามารถคำนวณหารูปทรงรีที่มีขนาด และรูปร่างใกล้เคียงกับยีออยทั่วทั้งโลกได้ พื้นหลักฐานแบบนี้เรียกว่า พื้นหลักฐานพิภพ (Global datum) ดังตัวอย่างเช่น World Geodetic System 1984 (WGS84) ซึ่งเป็นพื้นหลักฐานที่ใช้ในระบบดาวเทียมจีพีเอส (Global Positioning System) อยู่ในปัจจุบันนี้



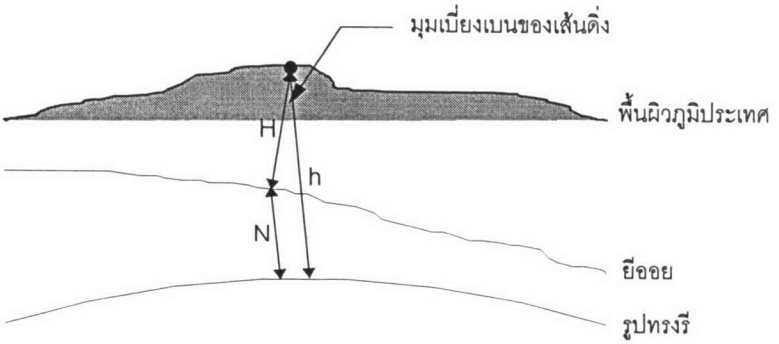
ภาพที่ 2.3 รูปทรงรีที่ใช้เป็นพื้นหลักฐานของยุโรปตะวันตกและของทวีปอเมริกาเหนือ เปรียบเทียบกับยีออย

พื้นหลักฐานที่ใช้ในงานรังวัดของประเทศ จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุง หรือพัฒนาให้มีความถูกต้อง และเหมาะสมอยู่เสมอ โดยอาศัยข้อมูลที่มีการรังวัดเพิ่มเติมอยู่ตลอดเวลา ดังเช่น วิวัฒนาการของพื้นหลักฐานของประเทศไทย ที่เริ่มต้นจากการใช้พื้นหลักฐานราชบุรี (Ratchaburi datum) เป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2450 ต่อมาเป็นพื้นหลักฐานอินเดียน 2459 (Indian 1916 datum) และมีการปรับปรุงเป็นพื้นหลักฐานอินเดียน 2497 (Indian 1954 datum) จนกระทั่งในปัจจุบันเป็น

พื้นหลักฐานอินเดียน 2518 (Indian 1975 datum) พื้นหลักฐานเหล่านี้ใช้รูปทรงรีเอเวอเรสท์ (Everest ellipsoid) เป็นรูปทรงรีอ้างอิง (อภิชาต แสงรุ่งเรือง, 2527)

2.3 ความสูง (Height)

ความสูง หรือค่าระดับที่ใช้อยู่โดยทั่วไปในงานรังวัด คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง ถือได้ว่าเป็นความสูงเหนือยีออย มีชื่อเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric height) ซึ่งเป็นระยะที่วัดตามแนวสายดิ่งหรือเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวยีออย โดยเหตุที่ค่าพิกัดตำแหน่งทางราบ ใช้รูปทรงรีเป็นพื้นผิวอ้างอิงในการคำนวณ ดังนั้น ถ้าจะบอกพิกัดตำแหน่งสามมิติของจุดใดจุดหนึ่ง ค่าพิกัดตำแหน่งทางราบ และความสูงของจุดนั้น ก็จะต้องอ้างอิงอยู่กับพื้นผิวเดียวกัน ในกรณีของการใช้ค่าละติจูดและลองจิจูดทางยีออเดซี (ϕ , λ) ซึ่งอ้างอิงอยู่กับรูปทรงรี ความสูงที่ใช้ต้องเป็นความสูงเหนือรูปทรงรี (Ellipsoidal height) ซึ่งเป็นระยะที่วัดตามแนวเส้นตั้งฉากกับรูปทรงรี ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ถึงแม้ว่าแนวความสูงทั้งสองจะแตกต่างกันด้วยค่ามุมเบี่ยงเบนของเส้นดิ่ง (Deflections of the vertical) แต่ค่าต่างดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก คือน้อยกว่า 12 ลิปดา จึงไม่มีผลต่อค่าความสูง ไม่ว่าจะใช้แนวใดเป็นหลัก ส่วนระยะห่างระหว่างพื้นผิวของรูปทรงรีกับพื้นผิวยีออย เรียกว่า ความสูงยีออย (Geoidal height) มีชื่อเรียกอย่างอื่นได้แก่ Geoid undulation หรือ Geoid anomaly และ Geoid-ellipsoid seperation เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงออร์โทเมตริก ความสูงเหนือรูปทรงรี และความสูงยีออย

ความสัมพันธ์ของค่าความสูง สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ คือ

$$H = h - N \tag{2.1}$$

เมื่อ H คือความสูงออร์โทเมตริก h คือความสูงเหนือรูปทรงรี และ N คือ ความสูงยีออย

ความสูงยีออยในสมการข้างต้นนี้มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ ถ้ามีค่าเป็นบวก แสดงว่าพื้นผิวยีออยอยู่สูงกว่าพื้นผิวของรูปทรงรี ถ้ามีค่าเป็นลบ แสดงว่าพื้นผิวยีออยอยู่ต่ำกว่าพื้นผิวของรูปทรงรี

2.4 การหาความสูงยีออย (Geoid Undulation Determination)

การศึกษาเพื่อหารูปทรงของยีออยหรือสัณฐานของโลก ถือเป็นปัญหาสำคัญของงานยีออเดซีพิภพ ทั้งนี้การหาความสูงยีออย ก็เช่นกัน มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาวิธีการหรือเทคนิคต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ และได้เขียนเป็นรายงานการวิจัยขึ้นอยู่หลายฉบับ วิธีในการหาความสูงยีออย ซึ่งจะกล่าวในที่นี้ อาจแบ่งออกเป็น 3 วิธี (Torge, 1980) คือ

2.4.1 วิธีการทางดาราศาสตร์-ยีออเดซี (Astrogeodetic Methods)

วิธีการนี้อาศัยการรังวัดทางดาราศาสตร์และการวัดในงานรังวัดขั้นสูง การคำนวณในงานรังวัดขั้นสูง ใช้ระบบอ้างอิงกับรูปทรงรี ที่มีค่าพิกัดตำแหน่งเป็น ϕ, λ และ h ส่วนปริมาณต่างๆ ที่วัดมา ยกเว้นระยะทาง จะอ้างอิงอยู่กับสนามความถ่วงของโลก หรือยีออย ปริมาณเดียวกันในระบบอ้างอิงกับรูปทรงรี และระบบอ้างอิงกับยีออย จะมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นในการนำค่าที่รังวัดได้มาคำนวณในงานรังวัดขั้นสูง จึงต้องรวมค่าตรวจแก้ขนาดเล็กนี้ด้วย ดังเช่น ค่าละติจูดทางดาราศาสตร์ (Φ) ค่าลองจิจูดทางดาราศาสตร์ (Λ) ค่าความสูงออร์โทเมตริก (H) จะแตกต่างกับค่าละติจูดทางยีออเดซี (ϕ) ค่าลองจิจูดทางยีออเดซี (λ) และค่าความสูงเหนือรูปทรงรี (h) ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \xi &= \Phi - \phi \\ \eta &= (\Lambda - \lambda)\cos\phi \\ N &= h - H \end{aligned} \tag{2.2}$$

ค่า ξ และ η คือ มุมเบี่ยงเบนของเส้นดิ่งในแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก-ตะวันตก ตามลำดับ ส่วนค่า N คือ ความสูงยีออย

การหารูปทรงของยีออย โดยวิธีการทางดาราศาสตร์-ยีออเดซี กระทำได้โดยการหาค่าผลต่างของความสูงยีออยระหว่างจุดสองจุด ซึ่งหาได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าต่างความสูงแบบตรีโกณมิติ (Trigonometric levelling) ซึ่งจะให้ค่าต่างความสูงเหนือรูปทรงรี (Δh) และการทำระดับแบบสูงต่าง (Differential levelling or geometric levelling) ซึ่งจะให้ค่าต่างความสูงเหนือยีออย (ΔH) ดังนั้น

$$\Delta N = \Delta h - \Delta H \tag{2.3}$$

ด้วยวิธีการทางดาราศาสตร์-ยีออเดซีนี้ จำเป็นจะต้องอาศัยข้อมูลจากงานรังวัดทางดาราศาสตร์ และงานรังวัดขั้นสูง ดังนั้นสัณฐานของโลกที่ได้จากวิธีการนี้ จึงมีเฉพาะพื้นผิวโลกในส่วนที่เป็นพื้นผิวดินเท่านั้น

2.4.2 วิธีการทางความถ่วง (Gravimetric Methods)

การหารูปทรงของยีออย โดยวิธีการทางความถ่วง อาจจะอาศัยวิธีที่เรียกว่าปัญหาค่าขอบเขตทางยีออเดซี (Geodetic boundary value problem) วิธีการนี้ พื้นผิวของยีออยก็คือเส้นขอบเขตของรูปทรงที่ต้องการหา และจะไม่มีมวลสารอยู่ภายนอกยีออย ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ทฤษฎีปัญหาค่าขอบเขต จึงจำเป็นที่จะต้องเลื่อนมวลสารภายนอกยีออยให้เข้ามาอยู่ภายในยีออย โดยไม่ทำให้สนามความถ่วงของโลกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ในการหาค่าความสูงยีออย ณ จุดใดๆ สามารถที่จะคำนวณได้โดยการใช้รูปของการกระจายสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกทรงกลม (Leick, 1990) ได้ดังนี้

$$N = \frac{GM}{r\gamma}\sum_{n=2}^{n_{max}}\left(\frac{a}{r}\right)^n\sum_{m=0}^{n}\left(\bar{C}^{*}_{nm}\cos m\lambda + \bar{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\bar{P}_{nm}(\cos\theta) \tag{2.4}$$

เมื่อ GM คือ ค่าคงที่ความดึงดูดของมวลโลก (Geocentric gravitational constant) r คือ รัศมีที่ศูนย์กลางโลก (Geocentric radius) γ คือ ค่าแรงถ่วงปกติ (Normal gravity) a คือ ค่าครึ่งแกนยาวของรูปทรงรี (Semi-major axis of the ellipsoid) n, m คือ ระดับขั้น และอันดับ (Degree and order of the spherical harmonic term) θ, λ คือ ระยะขั้ว (Polar distance or geocentric colatitude) และลองจิจูดภูมิศาสตร์ (Geographical longitude) ตามลำดับ $\bar{C}^{*}_{nm}$ และ $\bar{S}_{nm}$ คือ สัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกที่นอร์แมลไลซ์เต็มที่ (Fully normalized harmonic coefficients) ส่วน $\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ จะมีชื่อเรียกว่า ฟังก์ชันเลอจองด์สมทบที่นอร์แมลไลซ์

(Normalized associated Legendre function)

ในปี ค.ศ.1849 สโตกส์ (G.G.Stokes) ได้เสนอวิธีการหาค่าความสูงยีออยไว้ดังนี้คือ

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g_0 \, S(\psi) d\sigma \qquad (2.5)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของโลก γ คือ ค่าแรงถ่วงปกติ ณ จุดที่กำลังพิจารณา σ แทนพื้นผิวของรูปทรงกลมที่มีรัศมีหนึ่งหน่วย Δg_0 เป็นค่าอะนอมะลีแรงถ่วง (Gravity anomaly) ที่วัดได้ตลอดพื้นผิวของยีออย ส่วน $S(\psi)$ มีชื่อเรียกว่า ฟังก์ชันสโตกส์ (Stokes function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางเชิงมุม ψ ระหว่างจุดที่กำลังพิจารณากับจุดที่มีค่า Δg_0 โดยค่า $S(\psi)$ คำนวณได้จาก

$$S(\psi) = \frac{1}{\sin(\psi/2)} + 1 - 5\cos\psi - 6\sin(\psi/2) - 3\cos\psi \ln\left[\sin(\psi/2) + \sin^2(\psi/2)\right] \qquad (2.6)$$

สิ่งที่เป็นปัญหาเกี่ยวกับสมการของสโตกส์ คือ ความต้องการในค่าอะนอมะลีแรงถ่วงตลอดทั้งพื้นผิวโลกหรือยีออย รวมถึงการอินทิเกรตตลอดทั้งรูปทรงกลม สำหรับการคำนวณค่าที่จุดเพียงจุดเดียว ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ไม่ง่ายนัก ด้วยเหตุผลดังกล่าว ในทางปฏิบัติจึงได้มีวิธีการและเทคนิคต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

2.4.3 วิธีการทางยีออเดซีดาวเทียม (Methods of Satellite Geodesy)

การคำนวณงานรังวัดดาวเทียม ใช้วิธีการคำนวณปรับแก้ โดยการสร้างสมการค่าสังเกต (Observation equations) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้กับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าหรือต้องการหาค่า การคำนวณอาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

2.4.3.1 วิธีการทางเรขาคณิต (Geometric Method)

ในวิธีการนี้ จะใช้ดาวเทียมเป็นเป้าเล็งในระยะไกล ซึ่งค่าพิกัดตำแหน่งของดาวเทียม อาจจะใช้ประโยชน์ได้เพียงแต่หาทิศทางของดาวเทียม เพื่อที่จะรังวัดได้อย่างถูกต้องเท่านั้น ส่วนในการคำนวณ ถ้าหากมีการรังวัดมายังดาวเทียมพร้อมๆ กันมากกว่าสองจุดขึ้นไป พิกัดตำแหน่งของดาวเทียมจะถูกกำจัดออกไปจากสมการค่าสังเกต คงเหลือเพียงพิกัด

i17851622

ตำแหน่งของสถานีรังวัด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในสมการเท่านั้น ในทางปฏิบัติจะรังวัดดาวเทียมตลอดเวลาที่ดาวเทียมโคจรอยู่เหนือศีรษะ ซึ่งจะเป็นเส้นของการโคจรเส้นหนึ่ง เนื่องจากทุกสถานีรังวัดไปยังดาวเทียมดวงเดียวกัน เส้นของการโคจรจะต้องเป็นเส้นเดียวกันและถือได้ว่าเป็นเส้นที่ราบเรียบ (Smooth)

2.4.3.2 วิธีการทางพลวัต (Dynamic Method)

ในวิธีการนี้ ดาวเทียมเปรียบเสมือนเครื่องวัดแรงถ่วงที่เคลื่อนที่ไปในสนามความถ่วงของโลก พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในสมการค่าสังเกต จะเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของดาวเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พารามิเตอร์ที่บ่งชี้คุณลักษณะของสนามความถ่วงของโลก ซึ่งนิยมใช้ในรูปของสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิก (Harmonic coefficients) การแทนสนามความถ่วงของโลกด้วยอนุกรมฮาร์มอนิกในลักษณะนี้ สามารถกระทำได้จนถึงดีกรีสูงสุดที่เหมาะสมกับการแก้สมการระบบหนึ่งๆ เท่านั้น และในทางปฏิบัติก็จะพยายามกำจัดสัมประสิทธิ์บางตัวที่ทราบค่าแน่นอนแล้วหรือที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการคำนวณ หรือที่จะทำให้ระบบสมการมีค่าไม่เป็นเอกภาพ (Unique) เพื่อให้เหลือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจำนวนน้อยที่สุดในการคำนวณปรับแก้

2.5 แบบจำลองความสูงยีออย (Geoid Undulation Model)

แบบจำลองความสูงยีออยที่ใช้ในการวิจัย มีอยู่ 2 แบบ คือ

2.5.1 แบบจำลองความสูงยีออยของพิภพ (Global Geoid Undulation Model)

แบบจำลองความสูงยีออยของพิภพ หรือแบบจำลองภูมิศักยภาพของพิภพ (Global geopotential model) คำนวณมาจากอนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมของสนามความถ่วงของโลก ตัวอย่างของแบบจำลองเช่น Goddard Earth Model GEM-T1 GEM-T2 และ GEM-T3 ซึ่งใช้สัมประสิทธิ์ที่มีระดับขั้น (degree) สูง 36, 50 และ 50 ตามลำดับ

ในการพัฒนาแบบจำลองให้มีระดับขั้นและอันดับที่สูงขึ้น จะอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดความถ่วงของพื้นผิวโลก (Surface gravity data) และข้อมูลจากการวัดความสูงของผิวน้ำทะเลด้วยดาวเทียม (Satellite altimetry data) ร่วมกับการรังวัดดาวเทียม (Satellite-only observation) ตัวอย่างของแบบจำลองเช่น OSU81 ใช้สัมประสิทธิ์ที่มีระดับขั้นสูง 180 นอกจากนี้ยังมีแบบจำลอง OSU86E OSU86F OSU89A OSU89B และOSU91A ซึ่งใช้สัมประสิทธิ์ ที่มีระดับขั้นสูงถึง 360 เป็นต้น

แบบจำลองความสูงยีออยของพิภพ หรือแบบจำลองภูมิศักยภาพของพิภพที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

2.5.1.1 แบบจำลองภูมิศักยภาพของพิภพ ปี ค.ศ.1991

(The Ohio State University 1991 Global Geopotential Model or OSU91A)

แบบจำลองนี้ ได้จัดทำขึ้นโดยมหาวิทยาลัยแห่งรัฐโอไฮโอ (Rapp, Wang และ Pavlis, 1991) ซึ่งค่าความสูงยีออยนั้น คำนวณมาจากอนุกรมฮาร์มอนิกของสนามความถ่วงของโลก ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ที่มีระดับขั้นสูงถึง 360 โดยอยู่บนพื้นฐานของการใช้แบบจำลอง GEM-T2 ร่วมกับข้อมูลความถ่วงภาคพื้นดิน และข้อมูลการวัดความสูงด้วยดาวเทียม GEOSAT รูปทรงรีที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณเป็นรูปทรงรีของพื้นหลักฐานพิภพคือ ระบบอ้างอิงทางยีออเดซี 1980 (Geodetic Reference System 1980 or GRS80) ที่มีค่าพารามิเตอร์ a = 6,378,137 เมตร และ e^2 = 0.006 694 380 022 90 ความละเอียด (resolution) ของแบบจำลองคือ 0.5°x 0.5°

2.5.1.2 แบบจำลองภูมิศักยภาพของพิภพ ปี ค.ศ.1996

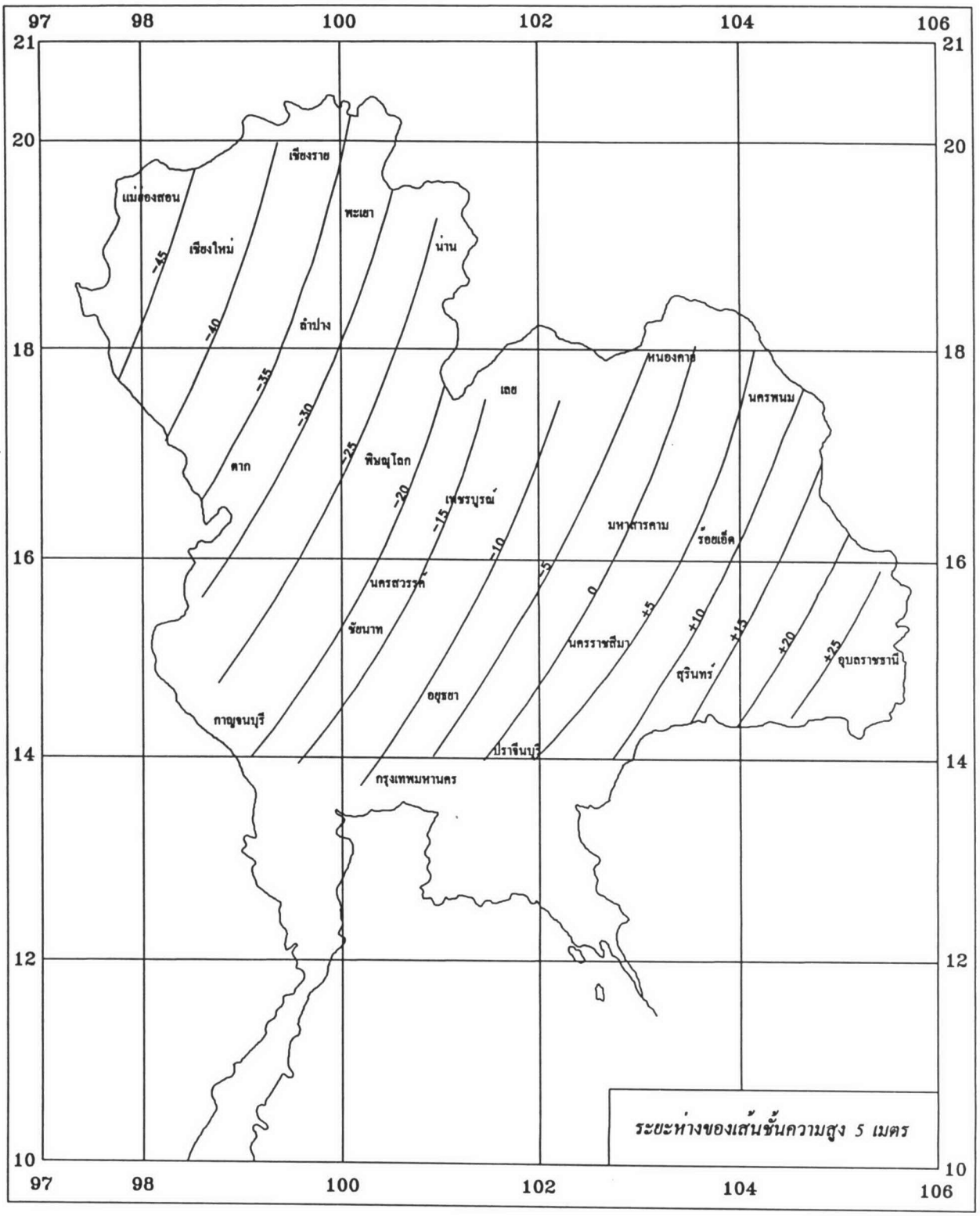
(Earth Geopotential Model of 1996 or EGM96)

แบบจำลองนี้ ได้รับการพัฒนาโดยความร่วมมือระหว่างหน่วยงานแผนที่และภาพถ่ายแห่งชาติ สหรัฐอเมริกา (National Imagery and Mapping Agency or NIMA) ศูนย์การบินอวกาศกอดดาร์ด องค์การนาซา (NASA Goddard Space Flight Center or NASA GSFC) และมหาวิทยาลัยแห่งรัฐโอไฮโอ ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกทรงกลมที่มีระดับขั้นและอันดับสูงถึง 360 โดยอยู่บนพื้นฐานของการใช้ข้อมูลความถ่วงภาคพื้นดิน ข้อมูลความถ่วงจากการวัดความสูงด้วยดาวเทียม GEOSAT ERS-1 และ TOPEX/POSEIDON นอกจากนี้ยังมีข้อมูลการติดตามดาวเทียม GPS TDRSS SLR และ DORIS เป็นต้น ความละเอียดของแบบจำลองคือ 0.5°x 0.5°

2.5.2 แบบจำลองความสูงยีออยของพื้นหลักฐานอินเดียน 2518

(Indian 1975 Datum Geoid Undulation Model)

ในปี พ.ศ. 2534 กรมแผนที่ทหาร ประเทศไทย ได้เริ่มทำการวางโครงข่ายหมุดหลักฐานด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส โดยการรังวัดโยงยึดออกจากหมุดที่ทราบค่าแล้ว คือหมุดหลักฐานงานสามเหลี่ยมชั้นที่หนึ่ง หมายเลข 91 (เขาสะแกกรัง จ. อุทัยธานี) ทั้งนี้ได้ทำการรังวัดบนหมุดหลักฐานเดิมของงานต่างๆ ซึ่งได้แก่ หมุดหลักฐานงานสามเหลี่ยมชั้นที่หนึ่ง หมุดหลักฐาน



ภาพที่ 2.5 แผนที่แสดงเส้นชั้นความสูงยีออยของพื้นหลักฐานอินเดียน 2518

งานวงรอบชั้นที่หนึ่ง หมุดหลักฐานดาวเทียมดอปเปลอร์ รวมทั้งหมุดหลักฐานการระดับชั้นที่หนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง ถ้าในกรณีที่ไม่สามารถใช้เป็นสถานีรังวัดโดยตรงได้ ก็จะเลือกสถานีรังวัดในบริเวณใกล้เคียง แล้วทำการเดินสายการระดับจากหมุดหลักฐานการระดับชั้นที่หนึ่งดังกล่าวไปยังสถานีรังวัด ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสได้อย่างเต็มที่ในการรังวัดแบบสามมิติ นั่นคือนอกจากจะได้ค่าพิกัดทางราบแล้ว ยังทำให้ทราบค่าความสูงยีออยของสถานีรังวัดนั้นๆ ด้วย หลังจากนั้นจะใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ด้วยระยะห่างของหมุดประมาณ 30-70 กิโลเมตร เพื่อสร้างเส้นชั้นความสูงยีออยขึ้น โดยพบว่า ค่าความสูงยีออยของพื้นหลักฐานอินเดียน 2518 ที่ครอบคลุมทั่วทั้งประเทศ มีค่าอยู่ระหว่าง -45 ถึง 45 เมตร

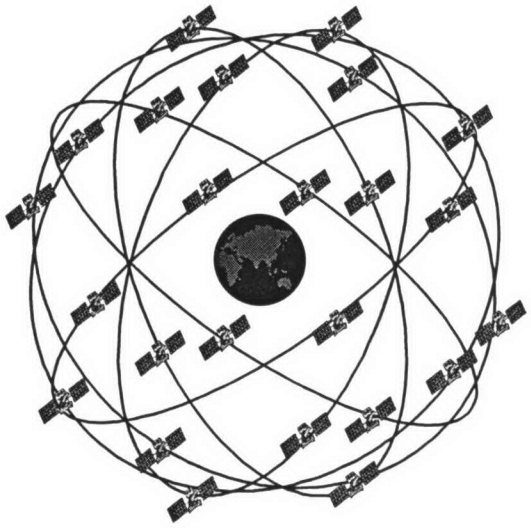
แบบจำลองความสูงยีออยของพื้นหลักฐานอินเดียน 2518 ซึ่งอยู่ในรูปของแผนที่แสดงเส้นชั้นความสูงยีออย (Geoid undulation contour map) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 สามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาหาแนวทางที่จะทำการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความสูงออร์โทเมตริก อีกทั้งยังใช้ศึกษาความเหมาะสมของรูปทรงรีอ้างอิงที่ดีที่สุดสำหรับประเทศไทยได้อีกด้วย

2.6 ระบบดาวเทียมจีพีเอส (Global Positioning System or GPS)

2.6.1 กล่าวนำ (Introduction)

ระบบดาวเทียมจีพีเอส เป็นระบบนำวิถีที่พัฒนาต่อเนื่องมาจากดาวเทียมระบบทรานซิต (Transit) โดยหน่วยงานทางทหารของสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วยดาวเทียม NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging) 24 ดวง จัดเป็นวงโคจรอยู่ใน 6 ระนาบๆ ละ 4 ดวง โดยแต่ละระนาบเอียงทำมุม 55° กับระนาบศูนย์สูตร และทำมุมระหว่างกัน 60° ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ดาวเทียมเหล่านี้อยู่สูงจากผิวโลก 20,200 กิโลเมตร มีคาบของการโคจร 12 ชั่วโมง

หลักการรังวัดเพื่อหาพิกัดตำแหน่ง คือ มีสถานีภาคพื้นดินที่คอยติดตามการเคลื่อนที่ของดาวเทียมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ทราบวงโคจรหรือตำแหน่งของดาวเทียมที่ขณะเวลาต่างๆ ข้อมูลการรังวัดของสถานีติดตามดาวเทียม จะนำไปพยากรณ์วงโคจรล่วงหน้า จากนั้นจึงส่งไปเก็บบันทึกไว้ในดาวเทียม เพื่อที่จะส่งกระจายลงมาพร้อมกับคลื่นวิทยุความถี่สูง ถ้าต้องการทราบพิกัดตำแหน่งของจุดใด ก็นำเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมไปตั้งวาง ณ จุดนั้น แล้วนำข้อมูลที่รังวัดได้มาประมวลผล เพื่อหาตำแหน่งของจุดที่เครื่องรับวางอยู่ต่อไป



ภาพที่ 2.6 กลุ่มดาวเทียมจีพีเอส

ในการทำงานรังวัดภาคสนามโดยการใช้เครื่องรับแบบรังวัด (Geodetic receiver) เป็นการวัดเฟสของคลื่นส่ง ที่จะต้องนำมาประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative positioning or differential positioning) ซึ่งให้ความถูกต้องสูง ด้วยวิธีการรังวัดแบบสถิต (Static surveying) เป็นวิธีที่เครื่องรับสัญญาณไม่มีการเคลื่อนที่ และจะถูกวางไว้ ณ ตำแหน่งจุดปลายของเส้นฐานที่ต้องการหาความยาว หรือตำแหน่งสัมพัทธ์ ระยะเวลาที่ใช้รับสัญญาณ จะต้องนานเพียงพอที่จะนำมาคำนวณหาค่าเลขปริศนา (Ambiguity) ได้ตามเกณฑ์ความถูกต้องที่ต้องการ กล่าวคือ ระยะเวลาที่ใช้รับสัญญาณ จะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นฐาน จำนวนของดาวเทียม รวมทั้งเรขาคณิตของดาวเทียมด้วย

2.6.2 การหาความสูงด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส
(Height Determination with GPS)

ในการกำหนดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส ค่าพิกัดที่ได้จะอยู่ในระบบพิกัดฉากสามมิติ ที่มีจุดกำเนิดอยู่ ณ จุดศูนย์มวลสารของโลก ระบบพิกัดดังกล่าว จะสามารถแปลงเป็นระบบพิกัดภูมิศาสตร์ หรือระบบพิกัดทางยีออเดซี ซึ่งบอกตำแหน่งเป็นค่าพิกัดที่ประกอบด้วยค่าละติจูด ลองจิจูด และความสูงเหนือรูปทรงรี โดยเทียบกับรูปทรงรีอ้างอิงที่ประเทศนั้นใช้อยู่ ในทางปฏิบัติ ความสูงเหนือรูปทรงรีจะนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ด้วยเหตุที่ความสูงที่ใช้อยู่โดยทั่วไปในงานรังวัด เป็นความสูงที่อ้างอิงกับพื้นผิวยีออย ที่เรียกว่า ความสูงออร์โทเมตริก หรือความสูงเหนือยีออย หรืออีกนัยหนึ่งคือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง ดังนั้นเพื่อให้ความสูงที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ จึงจำเป็นต้องแปลงความสูงเหนือรูปทรงรีไป

เป็นความสูงออร์โทเมตริก ทั้งนี้จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างยีออยกับรูปทรงรีที่ใช้ ซึ่งก็คือ จะต้องทราบระยะห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ที่เรียกว่า ความสูงยีออย นั่นเอง

ในปัจจุบัน ช่างรังวัดและวิศวกร ได้ให้ความสนใจในการนำวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความสูงออร์โทเมตริก ซึ่งจะนำมาแทนที่วิธีการถ่ายระดับด้วยกล้องระดับ อีกทั้งยังเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดค่าใช้จ่าย และเวลาในการปฏิบัติงานลง โดยการนำข้อมูลจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส มาใช้ร่วมกับแบบจำลองความสูงยีออยที่มีความละเอียดสูง (High-resolution geoid undulation model) และหมุดควบคุมทางดิ่งหลักที่กระจายครอบคลุมพื้นที่อย่างเพียงพอ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงยีออย และเพื่อทอนค่าความสูงเหนือรูปทรงรีที่ได้จากการรังวัดดาวเทียม ไปเป็นค่าความสูงออร์โทเมตริก ที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

การหาค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส (GPS-derived orthometric height) ได้มีผู้ทำการศึกษา และเสนอเป็นรายงานการวิจัยขึ้นหลายฉบับ ซึ่งจะนำมากล่าวเป็นตัวอย่างดังต่อไปนี้

Collins (1989) ศึกษาการหาค่าความสูงออร์โทเมตริก ด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส พบว่าในการนำข้อมูลจากการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส มาใช้ร่วมกับการกำหนดหมุดควบคุมทางดิ่งหนึ่งหมุด ซึ่งมีตำแหน่งของหมุดอยู่กลางพื้นที่ของโครงการขนาดใหญ่ เช่น 50x50 กิโลเมตร จะให้ค่าความสูงออร์โทเมตริกที่มีความถูกต้องประมาณ 0.300 เมตร โดยทั้งนี้ในการประมวลผลโครงข่าย ได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงยีออยที่มีระดับขั้นสูงถึง 360 ร่วมอยู่ด้วย

Milbert (1991) ศึกษาการหาค่าความสูงออร์โทเมตริกจากการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงยีออย OSU89B[·] และ GEOID90[··] ในโครงการ

[·] เป็นแบบจำลองภูมิศักยภาพของพิภพ คำนวณมาจากอนุกรมฮาร์มอนิกทรงกลมของสนามความถ่วงของโลก ด้วยสัมประสิทธิ์ที่มีระดับขั้นสูงถึง 360 และมีความละเอียดของแบบจำลองคือ 0.5°x 0.5° โดย Rapp และ Pavlis ในปี ค.ศ.1990 ณ มหาวิทยาลัยแห่งรัฐโอไฮโอ

[··] เป็นแบบจำลองความสูงยีออยส่วนท้องถิ่นที่มีความละเอียดสูง (High-resolution local geoidal undulation model) สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา ถูกพัฒนาขึ้นด้วยระยะห่างของกริด 3′x 3′ มีขอบเขตระหว่าง 24° N ถึง 53° N และ 66° W ถึง 125° W ค่าความสูงยีออยของแบบจำลอง จะอ้างอิงกับรูปทรงรีระบบอ้างอิงทางยีออเดซี 1980 หรือ GRS80

สร้างหมุดควบคุมทางดิ่งของเมืองปรินซ์วิลเลียม (Prince William) รัฐเวอร์จิเนีย มีพื้นที่โครงการประมาณ 1,600 ตารางกิโลเมตร การรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส จะกระทำบนหมุดหลักฐานการระดับที่มีอยู่เดิมด้วย ในการวิจัย ได้ใช้วิธีการกำหนดค่าระดับของหมุดควบคุมทางดิ่งหลักให้มีค่าคงที่ ร่วมกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงยีออย OSU89B และ GEOID90 เพื่อประมวลผลหาค่าความสูงออร์โทเมตริกจากการรังวัดดาวเทียม แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าความสูงเหนือพื้นหลักฐานทางดิ่งแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (National Geodetic Vertical Datum of 1929 or NGVD29) ของหมุดหลักฐานการระดับดังกล่าว จากผลการวิจัยพบว่า ผลต่างของค่าความสูงออร์โทเมตริก ในกรณีของการประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงยีออย OSU89B จะมีความคลาดเคลื่อน (RMS) เท่ากับ 0.123 เมตร และเมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองความสูงยีออย GEOID90 จะเกิดความคลาดเคลื่อนในผลต่างของค่าความสูงออร์โทเมตริกเพียง 0.016 เมตร เท่านั้น ดังนั้น การวิจัยจึงได้ให้ข้อสรุปในการนำแบบจำลองความสูงยีออย GEOID90 ไปใช้ในโครงการสร้างหมุดควบคุมทางดิ่งดังกล่าว

สุรพงษ์ รังษีสมบัติศิริ (2537) ศึกษาการประยุกต์ใช้งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอส สำหรับหมุดควบคุมทางดิ่ง ในโครงการสร้างอ่างเก็บน้ำ ซึ่งตั้งอยู่ในกิ่งอำเภอสบเมย และอำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ด้วยพื้นที่ประมาณ 2,500 ตารางกิโลเมตร มีลักษณะของภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นภูเขา ในการวิจัย ได้ใช้เครื่องรับสัญญาณแบบความถี่เดียว Trimble 4000SE ทำการรังวัดบนหมุดควบคุมทางดิ่ง 20 หมุด ที่มีระยะห่างกันประมาณ 5 ถึง 20 กิโลเมตร ข้อมูลจากการรังวัด จะนำมาประมวลผลเส้นฐาน ด้วยซอฟต์แวร์ TRIMVEC Plus ผลลัพธ์จากการประมวลผลเส้นฐานจำนวน 35 เส้น นำมาประกอบเป็นโครงข่าย และประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ TRIMNET ทั้งนี้ได้ใช้ค่าความสูงจากการทำระดับในเกณฑ์งานชั้นสาม เป็นค่าระดับอ้างอิงของหมุดควบคุมทางดิ่งหลัก ในการทอนค่าความสูงเหนือรูปทรงรีจากการรังวัดดาวเทียม ให้เป็นค่าความสูงเหนือยีออย ใช้วิธีการปรับแก้โครงข่าย โดยการกำหนดค่าระดับของหมุดควบคุมทางดิ่งหลัก ตั้งแต่ 1 ถึง 7 หมุด ให้มีค่าคงที่ จากผลการวิจัยพบว่า การใช้หมุดควบคุมทางดิ่งหลัก 4 หมุด ซึ่งมีระยะห่างกัน 20 กิโลเมตร ก็เพียงพอ และเหมาะสม กล่าวคือ เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติในการเปรียบเทียบผลต่างของค่าความสูงออร์โทเมตริก ระหว่างผลซึ่งได้จากการประมวลผล เมื่อมีหมุดควบคุมทางดิ่งหลัก 4 หมุด และผลซึ่งได้จากการทำระดับ จะให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.001 เมตร และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.030 เมตร ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า การรังวัดดาวเทียมจีพีเอส สามารถนำไปใช้ในงานสร้างหมุดควบคุมทางดิ่งหลักที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย และเวลา ระหว่างวิธีการเดินระดับ และวิธีการรังวัดด้วย

ระบบดาวเทียมจีพีเอส เมื่อมีหมุดควบคุมทางดิ่งหลักเท่ากัน พบว่าวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส จะประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าประมาณ 2.3 เท่า และประหยัดเวลากว่าประมาณ 4 เท่า