บทที่ 2

ความคลาดเคลื่อนในงานรังวัดดาวเทียมจีพีเอส

ในการรังวัดปริมาณทุกชนิดย่อมต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ในค่าที่วัดได้เสมอ ขนาดของความคลาเคลื่อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ วิธีการ และสภาพแวดล้อมในขณะทำงาน เมื่อนำค่าที่ได้จากการทำงานจึงจำเป็นต้องขจัดค่าคลาดเคลื่อนเหล่านี้ให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในงานรังวัดดาวเทียม ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจพิจารณาแยกได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนวงโคจรและความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม กลุ่มที่สอง เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของสัญญาณ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นบรรยากาศ และคลื่นหลายวิถี กลุ่มที่สาม เกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณ เช่น นาฬิกาของเครื่องรับ ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงในเรื่องความคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นบรรยากาศ

2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากดาวเทียม

เนื่องจากข้อมูลอีฟีเมอริสของดาวเทียมที่รับได้เป็นข้อมูลที่ได้จากการทำนายวงโคจรล่วงหน้า จึงมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ ในกรณีที่หาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ โดยที่ระยะของเส้นฐานไม่ยาว นักค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีผลน้อยมาก แต่ถ้าวัดระยะเส้นฐานที่ยาวจะมีผลมากขึ้นตามลำดับ Beulter , Bauersima , Girtner , Rothacher, Schildknecht and Geiger (1988) ได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ดังสมการ

$$\Delta x = \frac{l}{d} * \Delta X \approx \frac{l}{25{,}000} * \Delta X \qquad (2.3)$$

โดยที่ d คือ ระยะทางเฉลี่ยระหว่างพื้นที่ที่ทำการรังวัดไปยังดาวเทียม (กิโลเมตร)

l คือ ความยาวของเส้นฐานที่ทำการรังวัด (กิโลเมตร)

ΔX คือ ค่าคลาดเคลื่อนวงโคจร (เมตร)

Δx คือ ค่าคลาดเคลื่อนเส้นฐานที่เกิดขึ้น (เมตร)

จากสมการดังกล่าว Beutler et al. (1988) ได้แสดงตารางค่าคลาดเคลื่อนวงโคจรที่มีผลต่อระยะเส้นฐานแต่ละขนาดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรที่มีผลต่อระยะในเส้นฐานแต่ละขนาด

ค่าคลาดเคลื่อน วงโคจร (เมตร)	ความยาวเส้นฐาน (กิโลเมตร)	ค่าคลาดเคลื่อน เส้นฐาน (ppm)	ค่าคลาดเคลื่อน เส้นฐาน (มม.)
25 เมตร	1 กิโลเมตร	1 ppm	1 มิลลิเมตร
25 เมตร	10 กิโลเมตร	1 ppm	10 มิลลิเมตร
25 เมตร	100 กิโลเมตร	1 ppm	100 มิลลิเมตร
25 เมตร	1,000 กิโลเมตร	1 ppm	1,000 มิลลิเมตร
2.5 เมตร	10 กิโลเมตร	0.1 ppm	1 มิลลิเมตร
2.5 เมตร	100 กิโลเมตร	0.1 ppm	10 มิลลิเมตร
2.5 เมตร	1,000 กิโลเมตร	0.1 ppm	100 มิลลิเมตร
0.25 เมตร	100 กิโลเมตร	0.01 ppm	1 มิลลิเมตร
0.25 เมตร	1,000 กิโลเมตร	0.01 ppm	10 มิลลิเมตร
0.05 เมตร	100 กิโลเมตร	0.002 ppm	- มิลลิเมตร
0.05 เมตร	1,000 กิโลเมตร	0.002 ppm	0.5 มิลลิเมตร

2.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องรับ

มีสาเหตุมาจากนาฬิกาของเครื่องรับ เนื่องจากความเสถียรของระบบนาฬิกาที่ใช้ในดาวเทียมและเครื่องรับมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะนาฬิกาของเครื่องรับมีประสิทธิภาพต่ำกว่านาฬิกาดาวเทียม จึงมีผลทำให้นาฬิกาเครื่องรับและนาฬิกาดาวเทียมไม่ตรงกัน ถ้าเวลาคลาดเคลื่อนไป 1 มิลลิวินาที จะทำให้การวัดระยะทางผิดได้ถึง 300 กิโลเมตร

2.3 ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการหักเหในชั้นบรรยากาศ

การหักเหในชั้นบรรยากาศนับเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อผลลัพธ์ของการประมวลผลเส้นฐาน และชั้นบรรยากาศที่จะมีผลมากที่สุดต่อการทำงานรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสนี้ก็คือ ชั้นบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความเร็วของสัญญาณจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ จากการใช้เครื่องรับแบบสองความถี่สามารถขจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเดินทางผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้หมดไปได้

2.4 ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

การหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นส่งแต่ขึ้นอยู่กับความกดดันบรรยากาศ อุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศ โดยทั่วไปจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนประกอบคือ ส่วนประกอบแห้งและส่วนประกอบชื้น โดยส่วนประกอบแห้งจะมีขนาด 90 % ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ส่วนประกอบชื้นจะขึ้นอยู่กับความกดดันของไอน้ำในอากาศประมาณ 10 % ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ การหักเหในแนวดิ่งมีค่าประมาณ 2 – 3 เมตร และเพิ่มมากขึ้นในแนวราบ ที่มุมสูงใกล้ 0 องศา การหักเหมีค่าประมาณ 20 – 30 เมตร ถึงแม้อิทธิพลของส่วนประกอบแห้งจะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนชื้น แต่การคำนวณส่วนแห้งจะมีค่าความถูกต้องมากกว่าส่วนชื้น ความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ ± 1% (Rizos,1997)

การหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Hofmann-Wellenhof et al, 2001) สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\Delta^{Trop} = \int (n-1)ds \tag{2.4}$$

ถ้าให้ n เป็นดัชนีการหักเหในชั้นบรรยากาศ

นิยาม

$$N^{Trop} = 10^{6}(n-1) \tag{2.5}$$

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6}\int N^{Trop} ds \tag{2.6}$$

Hopfield (1969) สามารถแสดงถึงการแยกส่วนประกอบแห้งและส่วนประกอบชื้น ได้ดังนี้

$$N^{Trop} = N_d^{Trop} + N_w^{Trop} \tag{2.7}$$

โดยที่

N_d^{Trop} คือ อิทธิพลของส่วนประกอบแห้ง

N_w^{Trop} คือ อิทธิพลของส่วนประกอบชื้น

ฉะนั้น

$$\Delta_d^{Trop} = 10^{-6}\int N_d^{Trop} ds \tag{2.8}$$

$$\Delta_w^{Trop} = 10^{-6}\int N_w^{Trop} ds \tag{2.9}$$

และ

$$\Delta^{Trop} = \Delta_d^{Trop} + \Delta_w^{Trop} = 10^{-6}\int N_d^{Trop} ds + 10^{-6}\int N_w^{Trop} ds \tag{2.10}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่

$$N_d^{Trop} = 77.6\frac{P}{T} \quad , \quad N_w^{Trop} = 77.6\frac{4810e}{T^2}$$

P คือ ความกดดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

e คือ ความดันของไอน้ำ (มิลลิบาร์)

โดยทั่วไปในการลดค่าคลาดเคลื่อนนี้จำเป็นต้องมีการใช้แบบจำลองมาตรฐานที่เหมาะสมที่ใช้ในการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

2.5 แบบจำลองมาตรฐานของโทรโพสเฟียร์

การทำงานรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดค่าการหักเหจากคลื่นเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้แบบจำลองมาตรฐานที่เหมาะสมในการปรับแก้ค่าการหักเหของคลื่นในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทั้งนี้เนื่องจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีผลต่อค่าความถูกต้องของเส้นฐานที่ได้จากการประมวลผลเส้นฐานโดยตรง ปัจจุบันได้มีแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ในการปรับแก้การหักเหชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์อยู่มากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่ถูกพัฒนาขึ้นจากการเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่มีอยู่ในภูมิภาคหรือพื้นที่ที่ทำการทดลอง โดยไม่เคยมีการใช้หรือทดสอบกับข้อมูลในบริเวณประเทศไทย

ในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะมีแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ในการลดค่าการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์อยู่ 3 แบบจำลอง คือ

Hopfield Model แบบจำลองนี้ได้ถูกพัฒนาโดย Hopfield ในปี พ.ศ. 2512 ซึ่งใช้ข้อมูลจริงที่กระจายอยู่ทั่วโลกมาสร้างแบบจำลอง แบบจำลองนี้มีพื้นฐานมาจาก Single layer polytropic model โดย Hopfield (1969) ได้ให้สูตรที่ใช้คำนวณค่าการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ไว้ดังนี้

$$\Delta^{\mathrm{Trop}} = \frac{10^{-6}}{5}[\mathrm{N}_{\mathrm{d},0}^{\mathrm{Trop}}\mathrm{h}_{\mathrm{d}} + \mathrm{N}_{\mathrm{w},0}^{\mathrm{Trop}}\mathrm{h}_{\mathrm{w}}] \qquad (2.4)$$

โดยที่

Δ^{Trop} คือ ผลรวมความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งเนื่องจากการหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์ (มิลลิเมตร)

$\mathrm{N}_{\mathrm{d},0}^{\mathrm{Trop}}$, $\mathrm{N}_{\mathrm{w},0}^{\mathrm{Trop}}$ คือ อิทธิพลของส่วนประกอบแห้งและชื้นตามลำดับ (ดูรายละเอียดได้ใน IBID, 1969)

h_d , h_w คือ ความสูงจากพื้นผิวโลกจนถึงชั้นบรรยากาศที่ชื้นและแห้งตามลำดับ ซึ่ง h_d มีค่าอยู่ระหว่าง 40 – 45 กิโลเมตร และ h_w มีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 13 กิโลเมตร

Simplified Hopfield Model ได้ถูกพัฒนามาจากแบบจำลอง Hopfield ได้มีการทดลองให้ช่วงของความยาวทางตำแหน่งแทนที่ด้วยความสูง โดยรัศมีของโลกคือ R_E และยังให้ค่า $r_d = R_E + h_d$ และ $r = R_E + h$ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Goad and Goodman,1974)

$$\Delta_d^{Trop}(z) = \frac{10^{-6} N_{d,0}^{Trop}}{(r_d - R_E)^4} \int_{r=R_E}^{r=r_d} \frac{r(r_d - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_E^2 \sin^2 z_0}} dr \qquad (2.5)$$

$N_{d,0}^{Trop}$ คืออิทธิพลของส่วนประกอบแห้ง (ดูรายละเอียดใน IBID, 1974)

z_0 คือมุมสูงเหนือศีรษะในขณะรังวัด (องศา)

R_E คือรัศมีโลก (กิโลเมตร)

r_d คือผลรวมของ R_E และ h_d (กิโลเมตร)

r คือผลรวมของ R_E และ h (โดยที่ h คือค่าความสูงของจุดที่ตั้งเครื่องรับสัญญาณ) (กิโลเมตร)

สมการข้างต้นจะให้ผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งเนื่องจากการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในส่วนประกอบที่แห้ง สำหรับส่วนประกอบที่ชื้นก็สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับส่วนประกอบที่แห้งเพียงแต่แทนค่าส่วนประกอบที่ชื้นแทนที่ส่วนประกอบแห้งเท่านั้น

Saastamoinen Model แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาโดย Saastamoinen โดยได้แบ่งสภาพบรรยากาศแบบแห้งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วน Polytropic Troposphere ซึ่งขยายจากพื้นผิวไปจนถึงความสูงประมาณ 11 – 12 กิโลเมตร และส่วน Isothermal Stratosphere ที่นับต่อเนื่องจากชั้นโทรโพสเฟียร์ไปประมาณ 50 กิโลเมตร ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ (Saastamoinen,1973)

$$\Delta^{Trop} = \frac{0.002277}{\cos z}[p + (\frac{1255}{T} + 0.05)e - \tan^2 z] \qquad (2.6)$$

โดยที่

Δ^{Trop} คือผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งเนื่องจากการหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์ (มิลลิเมตร)

z คือมุมสูงเหนือศีรษะของดาวเทียม (องศา)

p คือความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)

T คืออุณหภูมิ (เคลวิน)

e คือความดันไอน้ำ (มิลลิบาร์)

แบบจำลองมาตรฐานที่กล่าวมาในข้างต้นล้วนแล้วแต่ถูกพัฒนาขึ้นจากการใช้ข้อมูลจริงที่มีอยู่ในภูมิภาคหรือพื้นที่ที่ทำการทดลองในต่างประเทศ ซึ่งแน่นอนว่าไม่เคยมีการใช้หรือทดสอบกับข้อมูลในบริเวณประเทศไทย อีกทั้ง Gurtner et al. (1989) ยังได้กล่าวไว้ว่า การใช้แบบจำลองของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์จะเหมาะสมกับพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ราบหรือพื้นที่ระดับเดียวกัน ถ้าเป็นพื้นที่ที่มีความต่างระดับกันจะทำให้ระยะทางของเส้นฐานระหว่าง 2 จุด มีค่าความผิดเกิดขึ้นได้ 2 - 5 มิลลิเมตร ต่อความสูง 100 เมตร และยังส่งผลให้เส้นฐานที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเป็นการศึกษาเปรียบเทียบการใช้แบบจำลองมาตรฐานโทรโพสเฟียร์ที่แตกต่างกัน รวมถึงการไม่ใช้แบบจำลองมาตรฐานใด ๆ ในการประมวลผลเส้นฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย