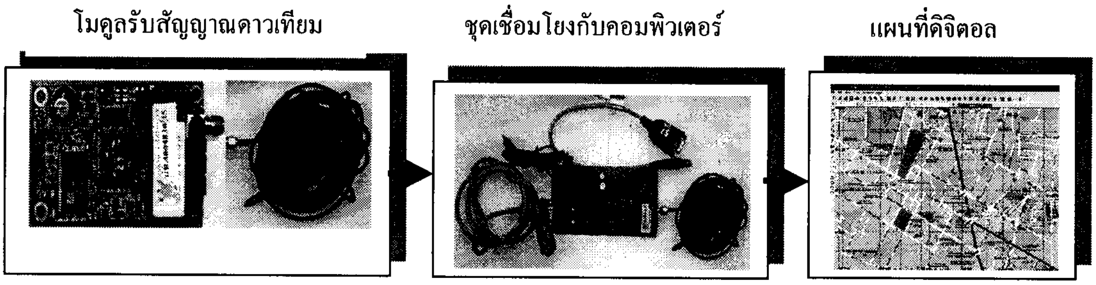
บทที่ 3
เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS

ระบบแสดงเส้นทางยานพาหนะโดยใช้เครื่องรับสัญญาณ GPS แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ โมดูลเครื่องรับสัญญาณ GPS ชุดเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ โปรแกรมแสดงผลโดยใช้แผนที่ดิจิตอล โดยส่วนของแผนที่จะใช้ในการแสดงภาพแผนที่เพื่อให้ผู้ขับขี่ได้ทราบถึงตำแหน่งของรถยนต์ที่วิ่งอยู่และเส้นทางวิ่ง สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการลดค่าความผิดพลาดของเครื่องรับ GPS ชนิดราคาต่ำโดยเปรียบเทียบกับเครื่องรับสัญญาณ GPS ในระดับกลาง สำหรับการทำงานของระบบแสดงเส้นทางยานพาหนะ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

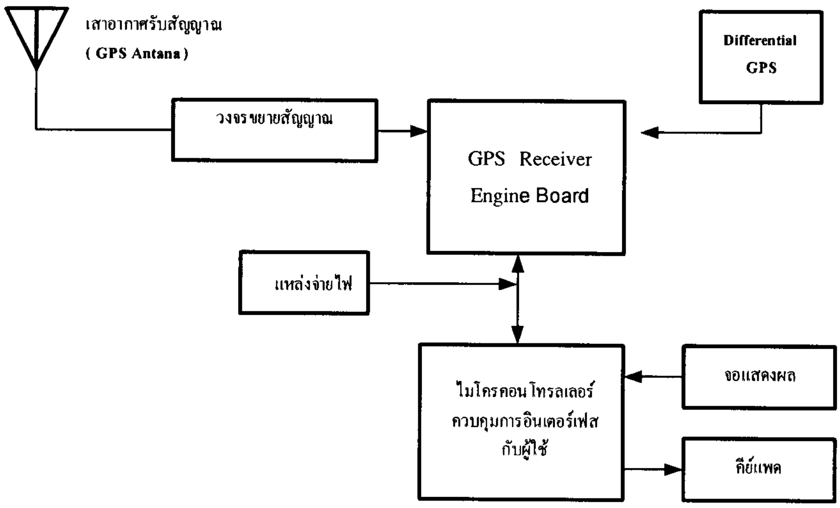


ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของระบบแสดงเส้นทางยานพาหนะ

3.1 ระบบแสดงเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Tracking System) ประกอบด้วย

3.1.1 โมดูลเครื่องรับสัญญาณ GPS (GPS Receiver Module)

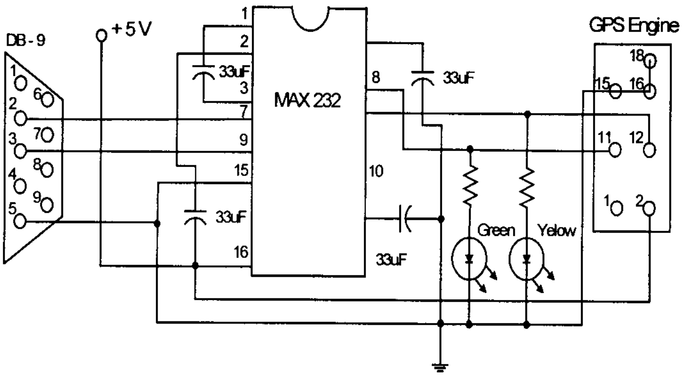
โมดูลเครื่องรับสัญญาณ GPS จะทำหน้าที่ในการรับข้อมูลจากดาวเทียม GPS จากนั้นทำการแปลงสัญญาณที่ได้เป็นข้อมูลตำแหน่ง ความเร็ว วันที่ เวลา และความสูง โดยแสดงตำแหน่งเป็นค่าลองติจูดและละติจูด ซึ่งค่าตำแหน่งที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงทุกวินาที ทางด้านอินพุตเชื่อมต่อกับสายอากาศ ส่วนด้านเอาต์พุตของเครื่องรับสัญญาณ GPS จะเชื่อมต่อเข้ากับชุดเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ สำหรับงานวิจัยเรื่องนี้เลือกใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ของบริษัท Holux รุ่น GM 80 ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณที่มีราคาต่ำทำให้ข้อมูลที่ได้มีความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งระหว่าง 50 – 100 เมตร นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น เช่น สภาพของชั้นบรรยากาศ ความผิดพลาดของเวลา ความผิดพลาดของตำแหน่งการโคจรของดาวเทียม สัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากตัวเครื่องรับ GPS และชนิดของเครื่องรับ GPS โดยโครงสร้างของเครื่องรับสัญญาณ GPS มีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.2 โมดูลเครื่องรับสัญญาณ GPS ราคาต่ำ

3.1.2 ชุดเชื่อมโยงทางคอมพิวเตอร์

ในการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับโมดูลรับสัญญาณ GPS สามารถติดต่อผ่านทางพอร์ตอนุกรมผ่านไอซี MAX 232 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณเพื่อให้คอมพิวเตอร์กับโมดูลรับสัญญาณ GPS สามารถรับส่งข้อมูลกันได้ โดยส่งข้อมูล ของละติจูด ลองติจูด วันที่ เวลา ความเร็วไปยังคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.3 วงจรเชื่อมต่อโมดูลรับสัญญาณดาวเทียมกับเครื่องคอมพิวเตอร์

3.1.3 โปรแกรมแสดงเส้นทางยานพาหนะ

สำหรับวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ใช้โปรแกรม GPS Track Maker ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทำหน้าที่ในการแสดงเส้นทางของยานพาหนะแบบ Off Line Tracking คือ การแสดงเส้นทางยานพาหนะขณะที่มีการเคลื่อนที่แต่ไม่มีการส่งข้อมูลแบบทันทีทันใดไปยังสถานีควบคุม โดยสามารถแสดงเส้นทางตำแหน่งของยานพาหนะ วันที่ เวลา และความเร็ว ซึ่งข้อดีของโปรแกรมนี้คือสามารถที่จะเพิ่มไฟล์รูปแผนที่ที่มีนามสกุล .BMP, .JPEG, .GIF ในโปรแกรมได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องใช้ไฟล์ที่เป็นแผนที่ดิจิตอล

3.2 ระบบหาตำแหน่งพิกัดบนพื้นโลก (Global Positioning Syetem : GPS)

ระบบหาตำแหน่งพิกัดบนพื้นโลก (Global Positioning System : GPS) จะใช้ดาวเทียมจำนวน 24 ดวง ที่โคจรอยู่ในระดับสูงที่พ้นจากคลื่นวิทยุรบกวนของโลก โดยโมดูลรับสัญญาณดาวเทียมจะต้องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงเพื่อที่จะคำนวณหาตำแหน่งพิกัดบนพื้นโลก ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถให้ความถูกต้องเพียงพอที่จะใช้ชี้บอกตำแหน่งได้ทุกแห่งบนโลกตลอดเวลา 24 ชั่วโมงองค์ประกอบที่สำคัญของระบบ GPS

การนำร่องด้วยระบบ GPS มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ภาค ได้แก่ ภาคอวกาศ (Space Segment) ภาคผู้ใช้หรือเครื่องรับสัญญาณ (User Segment) และ ภาคควบคุมการทำงาน (Control Segment) โดยแต่ละภาคมีบทบาทและหน้าที่ของตัวเองดังนี้

ส่วนการทำงานบนอวกาศ การทำงานของระบบ GPS ในภาคอวกาศ ประกอบด้วยกลุ่ม ดาวเทียมซึ่งจะโคจรอยู่รอบ ๆ โลกตลอดเวลา (Nongeostationary) และการกระจายสัญญาณจากดาวเทียมเหล่านั้น ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการได้มาซึ่งพิกัดที่อยู่บนพื้นโลก ความเร็วในการเคลื่อนที่ และเวลา หน้าที่โดยพื้นฐานของระบบดาวเทียมเหล่านี้คือ การรับและเก็บสำเนาข้อมูลที่ส่งมาจากส่วนควบคุมภาคพื้นดิน ควบคุมและรักษาความแม่นยำของเวลาโดยใช้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากนาฬิกาอะตอม (Atomic clock) ในดาวเทียมเอง ส่งข้อมูลและสัญญาณไปยังผู้ใช้ (เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS) ด้วยความถี่พาหะ 2 ค่าในย่าน L (L-Band) การโคจรรอบโลกเพื่อส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่การใช้งานทั่วโลก

สถานีควบคุมดาวเทียมภาคพื้นดินของระบบ GPS ประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดินที่กระจายอยู่บนภูมิภาคต่างๆของโลกหน้าที่ของสถานีควบคุมภาคพื้นดิน ก็คือ การตรวจสอบการทำงาน ตำแหน่งที่อยู่และวงโคจรของดาวเทียม GPS ว่าทั้งหมดถูกต้องอย่างที่อย่างที่ควรเป็นหรือไม่สถานีควบคุมภาคพื้นดินปัจจุบันมีตั้งอยู่ 5 แห่งด้วยกัน ได้แก่ที่ เกาะฮาวาย(Hawaii) และเกาะกวาจาริน(Kwajalin) ดิเอโกคาร์เซีย(Diego Carcia) เกาะแอสเซนชัน(Ascension Island) และ ที่โคโลราโดสปริง (Colorado Spring) รัฐโคโลราโด สหรัฐอเมริกา ทุกสถานีอยู่ภายใต้การควบคุมของกระทรวงกลาโหมของประเทศสหรัฐอเมริกา

ภาคผู้ใช้หรือเครื่องรับสัญญาณ ส่วนนี้ของระบบ GPS เป็นส่วนที่อยู่ใกล้ตัวเราในฐานะผู้ใช้มากที่สุดโดยเครื่องรับสัญญาณ GPS ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมีทั้งที่เป็นแบบพกพาและแบบติดตั้งบนยานพาหนะ เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน รถยนต์ส่วนตัว หรือแม้แต่รถบรรทุกสินค้า เครื่องรับสัญญาณจะทำหน้าที่ตรวจจับ ถอดรหัส และประมวลผลสัญญาณที่ได้รับจากดาวเทียม GPS และนำผลลัพท์ที่ได้ซึ่งเป็นค่าพิกัดตำแหน่งเวลามาตรฐาน ณ จุดที่เครื่องรับสัญญาณอยู่ในขณะนั้นมาแสดงในรูปของตัวเลขหรือกราฟฟิกส์ที่ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ง่าย

3.3 พิกัดภูมิศาสตร์

ละติจูด(Latitude) คือ เส้นเสมือนที่ลากตามแนวตะวันออก-ตะวันตกไปบนพื้นผิวโลกคำเรียกในภาษาไทยคือ "เส้นรุ้ง" ละติจูดเป็นส่วนที่ใช้ในการบอกตำแหน่งของจุดที่สนใจว่าตั้งอยู่ทางซีกโลกด้านเหนือหรือใต้ เส้นรุ้งที่ 0 จะเรียกว่า เส้นศูนย์สูตร (The Equator) เส้นรุ้งที่ 90 เหนือ คือขั้วโลกเหนือ เส้นรุ้งที่ 90 ใต้ คือขั้วโลกใต้ การอ้างถึงค่าพิกัดของละติจูดมีรูปแบบเป็น 00000 (องศาลิปดา ฟิลิปดา ตามลำดับ)

ลองติจูด (Longtitude) คือ เส้นเสมือนที่ลากตามแนวเหนือ-ใต้ผ่านขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ไปบนพื้นผิวโลก คำเรียกในภาษาไทยคือ " เส้นแวง " โดยเส้นแวงที่เรียกว่า เส้นเมอริเดียนหลัก (Prime Meridian) เป็นเส้น

ที่เกิดขึ้นจากการตกลงกัน โดยถือให้เส้นที่ลากผ่าน Royal Astronomical Observatory ที่เมืองกรีนิช ประเทศอังกฤษ ให้เป็นเส้นเริ่มต้นสำหรับใช้ในการอ้างตำแหน่งลองติจูด เส้นแวงจะถูกนับเริ่มจากเส้นเมอริเดียนหลักไปทางตะวันตกและตะวันออกด้านละ 180 องศา โดยจะไปบรรจบทับกัน ณ เส้นแวงที่ 180 และอยู่ตรงข้ามกับเส้นเมอริเดียนหลักพอดี โดยเส้นแวงที่ว่านี้คือ เส้นแบ่งเขตวันสากล (International Date Line) ซึ่งถูกกำหนดขึ้นจากการทำข้อตกลงร่วมกันของประเทศต่าง ๆ ณ กรุงวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1884

3.4 การอ้างพิกัดตำแหน่งในระบบนำร่องด้วยดาวเทียม GPS

ระบบในการอ้างพิกัดของ GPS (GPS Coordinate System) ที่ใช้กันมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่นิยมใช้งานกัน 3 แบบได้การอ้างพิกัดแบบ องศา/ลิปดา/ฟิลิปดา / การอ้างพิกัดแบบองศา/ลิปดาแบบทศนิยม และ / การอ้างพิกัดแบบ UTM

3.4.1 การอ้างพิกัดตำแหน่งโดยใช้ องศา/ลิปดา/ฟิลิปดา

เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดตัวอย่างโดยทั่วไปในการอ้างพิกัดของระบบ เช่น 7. RAPDS N61 11 05.5" W1.30 30 10.0" ซึ่งมีความหมายเทียบเท่ากับ N61 11 05.5" W1.30 30 10.0" ความหมายของชุดนี้ข้อมูลที่ยกมานี้ คือตัวเลขตัวแรก คือ Waypoint Number ชุดตัวอักษรที่อยู่ถัดมาคือ Waypoint Name และตามมาด้วยค่าพิกัด ความหมายของ N61 ในที่นี้คือ ค่าเส้นละติจูด 61 เหนือ ซึ่งถ้าหากดูเทียบกับแผ่นที่ก็จะอยู่ตรงตำแหน่งเหนือชายแดนของ British Columbia มาเล็กน้อย ส่วนตัวเลข 11 หมายถึงค่าลิปดา (" = ฟิลิปดา) ความหมายของ 1 ลิปดา เหนือขึ้นไปจากค่า N61 ในการอ้างพิกัดก็คือค่า 1/60ของมุม 1 องศา ตัวเลข 05.5" หมายถึงค่าฟิลิปดา (" = ฟิลิปดา) ความหมายของฟิลิปดาในที่นี้ก็คือ 1/60 ของ 1 ลิปดา เหนือขึ้นไปจาก 11 ลิปดา ส่วนตัวเลขหลังตัวอักษร W ก็สื่อความหมายในทำนองเดียวกันโดยจะเป็นค่าของเส้นลองติจูด แน่นอนว่าค่าทั้งหมดจะเปรียบเทียบโดยอ้างอิงกับเส้นศูนย์สูตรและเส้นเมอริเดียนหลัก ตามลำดับ

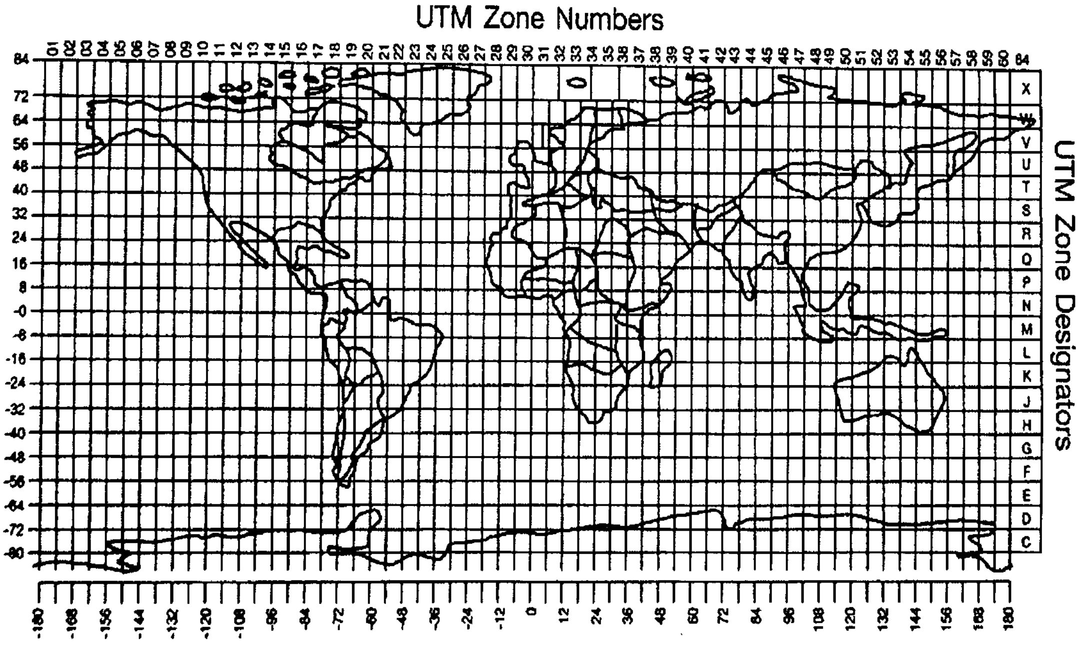
3.4.2 การอ้างพิกัดตำแหน่งโดยใช้ องศา/ลิปดาแบบทศนิยม

เป็นวิธีที่นิยมใช้เช่นกันลักษณะโดยทั่วไปในการอ้างพิกัดของระบบที่ว่านี้คือ ตัวอย่าง เช่น 7.W TSPIDS N61 11.0524 W1.30 30.1660 ซึ่งมีหมายความเทียบเท่ากับ N61" 11.0524" W1.30 W 30.1660 ชุดข้อมูลข้างต้นมีที่มาจากการนำค่าในระบบ องศา/ลิปดา/ฟิลิปดา มาปรับเปลี่ยนด้วยการนำส่วนที่สองของพิกัดตำแหน่งมาหารด้วย 60 นำมาบวกกับค่าลิปดาที่อยู่ก่อนหน้า เพื่อแปลงค่าให้เป็นพิกัดลิปดาในรูปแบบตัวเลข ทศนิยม ยกตัวอย่างเช่น N61 11 05.5" ส่วนที่ของค่าพิกัดคือ 05.5" จะถูกนำมาหารด้วย 60 ได้เป็น 0.0916666 นำมาบวกกับ 11 จะได้ผลลัพธ์ของพิกัดในหน่วย องศา/ลิปดาแบบทศนิยม เท่ากับ N60 11.0916 (โดยมากจะแสดงทศนิยมเพียง 4 ตำแหน่ง) ในทางกลับกันการจะเปลี่ยนพิกัดในหน่วยองศา/ลิปดาแบบทศนิยม กลับไปเป็นพิกัดแบบ องศา/ลิปดา/ฟิลิปดา ก็ต้องนำเอาส่วนที่เป็นทศนิยมคูณด้วย 60 โดยใช้ 0.916 มาคูณ 60 ได้เท่ากับ 5.496 จะได้พิกัดแบบองศา/ลิปดา/ฟิลิปดากลับมาเป็น N61 11 05.49"

3.4.3 Universal Transverse Mercator (UTM)

การอ้างพิกัดตำแหน่งแบบ UTM เป็นระบบกริดตาราง (Grid) ที่พัฒนาขึ้นได้โดยกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี ค.ศ 1974 สำหรับใช้ชี้ตำแหน่งที่ตั้งบนโลกอย่างรวดเร็วและแม่นยำในการทหาร วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและได้ผลลัพธ์ที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการส่งข้อมูลจากแผนที่หนึ่งไปยังอีกแผนที่

หนึ่ง ตัวอย่างที่ดีตัวอย่างหนึ่งก็คือ การส่งข้อมูลของพิกัดตำแหน่งจากแผนที่ส่งหนึ่งไปให้ผู้รับ โดยผู้รับสามารถเอาข้อมูลของพิกัดตำแหน่งดังกล่าวไปใช้เพื่อจะได้ทราบที่ตั้งจริง ๆ บนแผนที่ได้โดยง่ายสำหรับคำนิยามโดยทั่วไปของ UTM ก็คือ ภาพเสมือนของพื้นผิวโลกที่ถูกนำมาฉายลงยังพื้นผิวของรูปทรงกระบอกซึ่งวางตัวในแนวขวาง การอ้างพิกัดตำแหน่งในระบบ UTM จะครอบคลุมในช่วงเส้นละติจูด 80 ใต้ ถึง 84 เหนือ แต่ในพื้นที่ที่นอกเหนือออกไปจะขาดความแม่นยำไปจากความผิดเพี้ยนของการฉายภาพ หากแต่อยู่ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ (การอ้างพิกัดแบบ UTM จะมีความแม่นยำและเหมาะสำหรับพื้นที่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร แต่สำหรับบริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ การอ้างอิงพิกัดแบบ UTM จะขาดความแม่นยำ การอ้างพิกัดบริเวณดังกล่าวจึงต้องอ้างอิงด้วยรูปแบบอื่น ๆ แทน) ในการอ้างพิกัดแบบ UTM จะแบ่งพื้นที่บนโลกออกเป็น 60 ส่วน โดยพื้นที่แต่ละส่วนจะมีความกว้าง 6 ทางลองติจูดแต่ละโซนมีการกำหนดหมายเลขกำกับไว้เรียงจากซีกโลกทางด้านตะวันตกมายังด้านตะวันออกนับเริ่มจากเส้นละติจูด 180 ซึ่งแม้ว่ากริดของระบบ UTM จะมีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยมหากแต่จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันทั้งหมด เนื่องจากช่วงความห่างระหว่างเส้นละติจูดจะมีการเปลี่ยนค่าไปในแนวซีกโลกด้านใต้และด้านเหนือ สำหรับค่าพิกัดของจุดต่าง ๆ ในระบบ UTM ทั้งหมดจะมีค่าเป็นตัวเลขบวก โดยหน่วยที่ใช้เป็นหลักคือหน่วยเมตร (สำหรับประเทศไทยก็ตั้งอยู่ในโซน 47 และ 48 มีเส้นลองติจูด 120 เป็นเส้นแบ่ง)



ภาพที่ 3.4 ตารางการแบ่งพื้นออกเป็นโซน (Zone) สำหรับการอ้างพิกัดแบบ UTM (Universal Transverse Mercator)

3.5 เครื่องรับสัญญาณ GPS

3.5.1 ประเภทของเครื่องรับ GPS จำแนกตามลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งซึ่งจัดได้เป็น แบบรหัส C/A / แบบรหัส C/A และเฟสคลื่นส่ง L1 / แบบรหัส C/A และเฟสคลื่นส่ง L1 & L2 / แบบรหัส C/A & P และเฟสคลื่นส่ง L1 & L2 / แบบเฟสคลื่นส่ง L แบบเฟสคลื่นส่ง L1 & L2

3.5.2 การจำแนกประเภทเครื่องรับอีกแบบหนึ่ง คือ การแบ่งตามชนิดของช่องรับสัญญาณคือ แบบหลายช่อง (Multi-Channel)ใช้ช่องรับสัญญาณแบบต่อเนื่อง / แบบเรียงแถว (Sequential) ใช้ช่องรับสัญญาณแบบสับเปลี่ยนเร็ว / และแบบมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing) ใช้ช่องรับสัญญาณแบบมัลติเพล็กซ์

3.5.3 การจำแนกประเภทของเครื่องรับที่จะกล่าวถึงเป็นลำดับสุดท้าย คือ การจำแนกตามกลุ่มผู้ใช้ได้แก่ แบบทหาร (Military) / แบบพลเรือน (Civilian) / แบบนำหน (Navigation) / แบบนาฬิกา (Timing) / แบบรังวัด (Surveying or Geodetic)

สำหรับวิทยานิพนธ์เรื่องนี้จะจำแนกประเภทของเครื่องรับอย่างกว้าง ๆ เป็น 2 กลุ่ม คือ เครื่องรับระบบนำหน และเครื่องรับแบบรังวัด เครื่องรับแบบนำหนเป็นเครื่องรับที่วัดระยะทางจากเครื่องรับไปยังดาวเทียมโดยอาศัยรหัส ซึ่งปกติจะเป็นรหัส C/A เครื่องรับแบบนี้จะคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับให้ได้ในทันทีเมื่อรับสัญญาณจากดาวเทียมได้แล้วอย่างน้อย 4 ดวง สำหรับเครื่องรับแบบรังวัดเป็นเครื่องรับที่ใช้เฟสของคลื่นส่งมาคำนวณหาตำแหน่งสัมพันธ์ที่มีความถูกต้องสูงมากและนำมาประยุกต์ใช้ในวิธีการทำงานรังวัดสมัยใหม่ที่ทดแทนวิธีการทางภาคพื้นดิน (Ground Survey) เครื่องรับแบบรังวัดอาจจะแยกย่อยต่อไปได้เป็น ชนิดความถี่เดียว (Single frequency) และชนิดสองความถี่ (Dual Frequency)

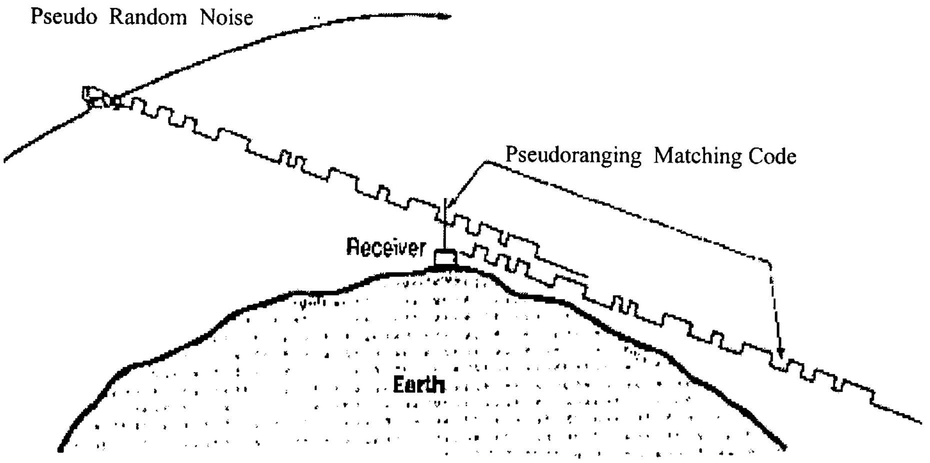
3.6 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

3.6.1 การประมวลผลสัญญาณโดยใช้รหัส (Code-Dependent Signal Processing)

รหัสสุ่มเทียม (Pseudo Random Code) มีลักษณะคล้ายคลื่นวิทยุรบกวนเกิดขึ้นเป็นคลื่นไม่เป็นรูปแบบ แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญคือ เรารู้รูปร่างของคลื่นแล้วถ้าหากว่านำเอาคลื่น Pseudo Random ไปเปรียบเข้ากับคลื่นวิทยุรบกวนการเปรียบเทียบจะแบ่งคลื่นออกเป็นช่วงเวลา ให้ส่วนที่เหมือนกันเป็น "X" ถ้าเราให้ค่าคลื่นที่เหมือนกันเป็น 1 และที่ไม่เหมือนกันเป็น -1 จะพบว่าหลังจากเปรียบเทียบนาน ๆ จะได้ค่าสุดท้ายเป็น 0 แต่ถ้า GPS เริ่มส่งสัญญาณเข้าเครื่องรับที่มีรูปแบบเหมือนกับ Pseudo Random สัญญาณนี้ถึงแม้จะอ่อน จะถูกทำให้แรงขึ้นแล้วนำมาเปรียบเทียบกันได้และถ้าเราเลื่อนรหัสที่ส่งจากดาวเทียม เราก็จะได้คลื่นที่เข้ากันได้มากขึ้นและคะแนนก็จะมากขึ้นเรื่อยๆ ยิ่งเปรียบเทียบนานตัวเลขจะเพิ่มมากขึ้นและจากที่ผลการเปรียบเทียบให้ผลตรงกันข้ามคลื่นวิทยุรบกวนซึ่งจะมีค่าเกือบศูนย์ ช่วงเวลานี้จะส่งกำลังขยายให้แก่สัญญาณดาวเทียมมากขึ้นเป็นพันเท่า รหัส Pseudo Random ช่วยให้เราจับสัญญาณที่อ่อนมากได้ รหัส Pseudo Random Noise (PRN) ประกอบด้วยรหัสฐานสองซึ่งมีลำดับเฉพาะตัวมีลักษณะแบบสุ่ม โดยความจริงแล้วรหัสนี้จะถูกสร้างขึ้นโดยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ ในดาวเทียมแต่ละดวงจะส่งรหัสออกมา 2 ชนิดได้แก่สัญญาณ L1 ซึ่งถูกปรับด้วยรหัสที่เรียกว่า Precision Code หรือ P Code และรหัสที่เรียกว่า Coarse / Acquisition Code หรือ C/A Code สัญญาณ L2 จะมีเฉพาะ P Code อย่างเดียว ดาวเทียมแต่ละดวงจะส่งรหัสออกมาเป็นรหัสเฉพาะตัว ทำให้เครื่องรับสามารถที่จะบอกรหัสที่ได้รับว่ามีจุดกำเนิดจากดาวเทียมดวงใด จากกระบวนการนี้ทำให้สามารถทราบได้เมื่อรับสัญญาณจาก

ดาวเทียมหลายดวงในเวลาเดียวกัน รหัส C/A (Coarse / Acquistion) มีความถี่เป็น 1/10 ของความถี่พื้นฐานคือ 1.023 MHz และความยาวคลื่นประมาณ 300 เมตร มีคาบเป็น 1 ใน 1000 วินาที นั่นคือ ในช่วงเวลา 1 วินาที จะสร้างรหัส C/A ที่มีรูปแบบเหมือนกันซ้ำถึง 1,000 ครั้ง ซึ่งผู้ใช้สามารถจะใช้ได้ทั่วไป ส่วน P code ซึ่งมีความถี่ 10.23 MHz และความยาวคลื่น 30 เมตร ความละเอียดเป็น 10 เท่า ของ C/A Code ความถี่ของ GPS ทั้งหมดเป็นอนุพันธ์ของ P Code พื้นฐานความถี่ของ P Code จะถูกสร้างโดยเครื่องกำเนิดความถี่ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงอยู่ในดาวเทียมแต่ละดวง

Pseudoranging เป็นวิธีวัดระยะทางด้วย GPS โดยใช้รหัส PRN หลักการก็คือดาวเทียมและเครื่องรับ GPS ทั้งสองจะสร้างชุดรหัสเลขฐานสองเป็นชุดเดียวกันในเวลาเดียวกันในภาพที่ (3.5) เมื่อรหัสส่งมาจากดาวเทียมจะใช้เวลาเดินทางระยะหนึ่งมาถึงเครื่องรับบนพื้นดินเมื่อเครื่องรับจะรับสัญญาณแล้วจะเปรียบเทียบกับสัญญาณนี้กับสัญญาณเครื่องรับ เพราะว่าความถี่และความสัมพันธ์ระหว่างรหัสฐานสองที่ส่งออกมา สามารถทราบได้เป็นอย่างดี เครื่องรับภาคพื้นดินจะสามารถหาเวลาที่สัญญาณเคลื่อนที่มาถึงเครื่องรับได้ซึ่งมันจะส่งสัญญาณเป็นรหัสเดียวกัน โดยอาศัยเวลาและความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านบรรยากาศ (186,000 ไมล์/วินาที) ทำให้คำนวณระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับได้ ซึ่งเรียกกระบวนการวัดนี้ว่า Ranging สำหรับการวัดอย่างละเอียดกระบวนการขึ้นอยู่กับการทำให้นาฬิกาบนดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณสอดคล้องกัน นาฬิกาที่ใช้บนดาวเทียมเป็นนาฬิกา ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงซึ่งเป็นนาฬิกาอะตอมมิกที่มีราคาแพง ส่วนนาฬิกาของเครื่องรับใช้นาฬิการาคาถูกและความถูกต้องแม่นยำต่ำ เวลาของนาฬิกาทั้งสองไม่สอดคล้องกันทำให้เกิดเวลาที่แตกต่างกันซึ่งเรียกว่า Clock Bias ดังนั้น เมื่อเวลาที่แตกต่างกันจะทำให้การคำนวณหาระยะทางเกิดความคลาดเคลื่อนไม่ถูกต้องระยะทางที่เกิดความคลาดเคลื่อนนี้เรียกว่า Pseudo Ranges จากข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่ส่งออกมาพร้อมกันกับสัญญาณในเวลาเดียวกันกับเครื่องรับซึ่งสามารถจับคู่รหัสเดียวกัน แล้วคำนวณระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ การคำนวณระยะทางจะใช้ระยะทางจากดาวเทียมหลายดวงเพื่อที่จะหาตำแหน่งบนพื้นโลก กระบวนการนี้เรียกว่า Pseudoranging Matching Code รหัสเปรียบเทียบ



ภาพที่ 3.5 การจับคู่รหัสสัญญาณดาวเทียมและเครื่องรับเพื่อวัดระยะทางจากดาวเทียมกับเครื่องรับSatellite orbit วงโคจรดาวเทียม

เครื่องรับที่ผลิตจะเป็นแบบใช้ประโยชน์จากรหัส C/A หรือรหัส P เป็นส่วนมาก เครื่องรับประเภทนี้สามารถถอดรหัสจากสัญญาณดาวเทียมและแปลข้อมูลดาวเทียมนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณตำแหน่งได้ ปกติเครื่องรับเหล่านี้มีวงจรหลัก 2 วงจรคือ วงจรติดตามรหัส (Code Tracking Loop) และวงจรติดตามคลื่นส่ง (Carrier Tracking Loop) วัตถุประสงค์ที่สำคัญของวงจรติดตามรหัส คือ วัดระยะทางที่เรียกว่าซูโดเรนจ์จากรหัส C/A หรือ P ในขณะเดียวกันก็จะทำให้รับข้อมูลดาวเทียมที่มอดูเลตมากับสัญญาณดาวเทียมได้ด้วยภายในวงจรนี้จะสร้างรหัส PRN เช่นเดียวกับที่สร้างขึ้นในดาวเทียม ในตอนแรกจุดเริ่มต้นของรหัสที่สร้างขึ้นถูกออฟเซตเป็นเวลาเท่ากับเวลาที่คลื่นเดินทางจากดาวเทียมมายังโลก จากนั้นเวลาในการเดินทางที่ถูกต้องหาได้โดยการนำรหัสที่สร้างขึ้นนี้มาหาสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross Correlation) กับสัญญาณดาวเทียมที่รับได้ ถ้ารหัสทั้งสองยังไม่ตรงกันรหัส PRN ชุดใหม่จะถูกสร้างขึ้นมาเปรียบเทียบอีกจนกว่าจะได้รหัสชุดที่ถูกต้อง เมื่อได้รหัสที่ตรงกันแล้ว วงจรก็จะล็อกสัญญาณดาวเทียมนั้นไว้ และทำให้สามารถอ่านเวลาของนาฬิกาดาวเทียม ค่าต่างเวลาที่หาได้จากรหัสกับเวลาของนาฬิกาเครื่องรับก็คือเวลาที่นำมาหาซูโดเรนจ์นั่นเอง เมื่อสัญญาณดาวเทียมถูกล็อกแล้วนั้น รหัส PRN ที่มอดูเลตอยู่ในสัญญาณจะถูกกำจัดออกไปโดยการเอาสัญญาณนั้นมาผสมกับคลื่นที่สร้างขึ้นในเครื่องรับแล้วปล่อยผ่านวงจรกรองผ่านราบ (Bandpass Filtering) สัญญาณผสมจะถูกผ่านต่อเข้าไปในวงจรติดตามคลื่นส่งซึ่งจะแยกเอาข้อมูลดาวเทียม (Satellite Message) ออกไป คลื่นส่งที่สร้างจากออสซิลเลเตอร์ของเครื่องรับจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณส่วนที่เหลือนี้ ค่าที่วัดได้เป็นค่าต่างเฟสของสัญญาณคลื่นส่งที่รับได้กับความถี่คลื่นส่งที่เครื่องรับสร้างเรียกว่า Carrier Beat Phase วงจรที่ล็อกคลื่นส่งไว้ได้แล้วจะนับจำนวนรอบของค่าต่างเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากระยะไปยังดาวเทียมเปลี่ยนแปลงและบันทึกค่าไว้

การประมวลผลสัญญาณโดยใช้รหัสที่สมบูรณ์จะให้ค่าที่วัดได้และข้อมูลต่อไปนี้รหัสสุ่มเทียม (Pseudo Range) เฟสของคลื่นส่ง(Carrier Phase) ความถี่ดอปเปลอร์(Doppler Frequency) ข้อมูลดาวเทียม (Satellite Message) การประมวลผลสัญญาณของคลื่นส่ง L2 โดยการใช้รหัสนี้สามารถทำได้ถ้ารู้รหัส P ที่ใช้ในดาวเทียมต่าง ๆ เท่านั้น และในกรณีที่รหัส P ถูกเปลี่ยนไปเป็นรหัส Y ที่มีการปกปิดผู้ใช้จะถูกกำจัดอยู่ในกลุ่มที่มีสิทธิเท่านั้น

3.6.2 การประมวลผลสัญญาณโดยไม่ใช้รหัส

ช่องรับสัญญาณประเภทนี้ใช้ประโยชน์จากสัญญาณดาวเทียม GPS โดยไม่ต้องมีความรู้เกี่ยวกับรหัส C/A หรือ P เลย ข้อดีของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้วิธีการนี้คือ ในอนาคตถ้ามีการจำกัดสิทธิของพลเรือนในการใช้ระบบดาวเทียม GPS เครื่องรับประเภทนี้จะยังคงใช้งานได้ต่อไป ส่วนข้อเสียคือจะไม่รู้ข้อมูลดาวเทียมและเวลาที่มีความเที่ยงตรงสูงจากสัญญาณดาวเทียมผลที่ตามมาคือก่อนนำเครื่องรับออกทำการรังวัดจะต้องนำเครื่องรับมาเทียบเวลาให้ตรงกันเสียก่อน ในปัจจุบันเป็นที่แน่นอนแล้วว่าอย่างน้อยรหัส C/A จะเปิดให้พลเรือนใช้ได้อย่างเสรี ดังนั้นจึงไม่มีเครื่องรับสัญญาณประเภทที่ไม่ใช้รหัสอีกต่อไป วิธีประมวลผลสัญญาณโดยไม่ใช้รหัสที่นิยมใช้มากคือ เทคนิคการยกกำลังสอง (Squaring Technique) ช่องรับสัญญาณแบบนี้นำเอาสัญญาณดาวเทียมที่รับได้คูณตัวมันเอง ผลที่ได้จะเป็นฮาร์มอนิกของคลื่นส่งซึ่งไม่มีรหัสและข้อมูลดาวเทียมมอดูเลตอยู่ ถ้าให้ $B\sin(\omega_2 t)$ เป็นคลื่นส่ง L2 และให้ $P_1(t)$ เป็นรหัส P ซึ่งลำดับตัวเลขที่มีค่าเป็น ± 1 คลื่นส่ง L2 ที่มอดูเลตแล้วจะเขียนได้เป็น

$$X = P_1(t)\ B\ \sin\omega_2\ t \qquad (3.1)$$

เมื่อยกกำลังสองจะได้

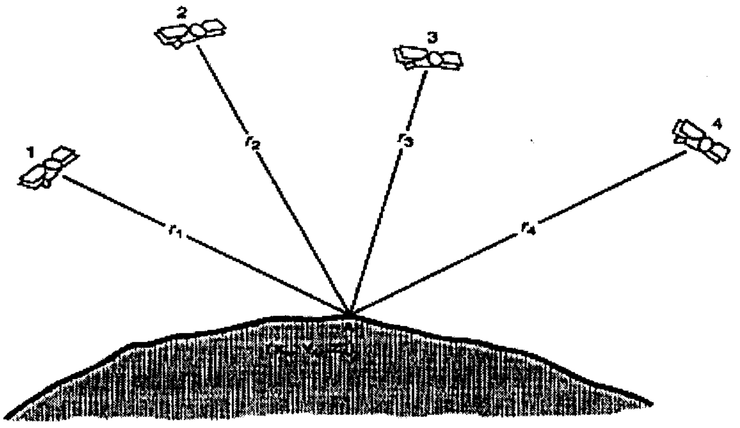
$$X^2 = P_1^2(t)\, B^2\, (1-\cos 2\omega t)/2 \qquad (3.2)$$

เนื่องจาก $P_1^2(t)$ มีค่าเป็น +1 ไม่ว่า $P_1(t)$ จะมีค่า +1 หรือ –1 ดังนั้นจึงตัด $P_1^2(t)$ ทิ้งไปได้ x^2 ที่เหลืออยู่จึงเป็นส่วนมาจากคลื่นส่ง L2 เดิมทั้งสิ้น ซึ่งเฟสของคลื่น x^2 เดิมทั้งสิ้น ซึ่งเฟสของคลื่น x^2 จะมีความสัมพันธ์กับคลื่นส่งเดิม และจะสังเกตได้ว่าคลื่นส่งใหม่มีความถี่เป็นสองเท่าของคลื่นเดิมในการยกกำลังสองนี้จะทำให้สัญญาณรบกวน (Noise) เพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองด้วยผลที่ตามมาคือค่า Signal-to-Noise Ratio (S/N) แย่ลง

ในการวัดค่าเฟสของคลื่นยกกำลังสองสามารถใช้วงจรติดตามคลื่นส่งเหมือนกับที่ใช้ในการประมวลผลโดยใช้รหัสเทคนิคการยกกำลังสองนี้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Counseimar (1932) และถูกนำมาใช้ในเครื่องรับที่มีชื่อว่า Macrometer วิธีการประมวลผลสัญญาณอีกวิธีหนึ่งเทคนิคของคลื่นแทรกสอดซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กับวิธีการวัดคลื่นแทรกสอดสำหรับเส้นฐานขนาดยาวมาก (VLBI) หรือ Very Long Baseline Interferomery ตามวิธีการนี้สัญญาณดาวเทียม GPS ที่จุดสองจุจะถูกบันทึกไว้พร้อมทั้งสัญญาณเวลาที่มีความถูกต้องสูงจากออสซิลเลเตอร์ภายนอกเครื่องรับ โดยการนำสัญญาณซึ่งบันทึกไว้มาหาสหสัมพันธ์กันจะทำให้ได้ค่าต่างของเวลา τ ที่สัญญาณดาวเทียมเดินทางมาถึงเครื่องรับที่จุดทั้งสองไม่พร้อมกัน ค่าต่าง τ ก็คือ ค่าต่างระยะทางที่นำมาประมวลผลหาระยะทางระหว่างจุดทั้งสองได้ เนื่องจากความยุ่งยากในการสร้างเครื่องมือเพื่อรับสัญญาณและเพื่อการประมวลผล ทำให้หลักการทำงานนี้ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์

3.5.3 การหาตำแหน่งโดยวิธี Pseudo Ranging สามารถทำได้ดังนี้ สมมติว่าตำแหน่งดาวเทียม 4 ดวง ดังแสดงในภาพที่ (3.6) มีระยะทาง (Pseudo Ranging) r_1, r_2, r_3 และ r_4 ตามลำดับ สมมติว่าตำแหน่งดาวเทียมมีพิกัด 3 มิติ คือ $X_1, Y_1, Z_1 / X_2, Y_2, Z_2 / X_3, Y_3, Z_3 / X_4, Y_4, Z_4$ เป็นพิกัดที่ทราบตำแหน่งของดาวเทียมดวงที่ 1 , 2 ,3 และ 4 ตามลำดับ และสถานีรับ A มีพิกัดตำแหน่งซึ่งไม่ทราบค่า X_A, Y_A และ Z_A ระยะทาง r_1, r_2, r_3 และ r_4 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$\left.\begin{aligned}
r_1 &= [(X_1 - X_A)^2 + (Y_1 - Y_A)^2 + (Z_1 - Z_A)^2]^{1/2} \\
r_2 &= [(X_2 - X_A)^2 + (Y_2 - Y_A)^2 + (Z_2 - Z_A)^2]^{1/2} \\
r_3 &= [(X_3 - X_A)^2 + (Y_3 - Y_A)^2 + (Z_3 - Z_A)^2]^{1/2} \\
r_4 &= [(X_4 - X_A)^2 + (Y_4 - Y_A)^2 + (Z_4 - Z_A)^2]^{1/2}
\end{aligned}\right\} \qquad (3.3)$$



ภาพที่ 3.6 แสดงการรับสัญญาณดาวเทียม GPS 4 ดวงพร้อมกัน

จากสมการที่ (3.3) สามารถที่จะหาค่าพิกัดของตำแหน่งรับสัญญาณดาวเทียม X_A ,Y_A และ Z_A ได้จากการคำนวณในกระบวนการนี้ไม่ได้พิจารณาความคลาดเคลื่อนจากนาฬิกา ซึ่งจะทำให้พิกัดของสถานีคลาดเคลื่อนไปสมมติให้ค่าเวลาที่คลาดเคลื่อนเป็น Δt และสมมติว่าเป็นค่าคงที่ที่เกิดขึ้น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น Δr ของระยะทางจากดาวเทียมแต่ละดวงมายังสถานี A มีค่าเท่ากับ $V(\Delta t)$ เมื่อ V คือความเร็วของสัญญาณที่ส่งออกมา ดังนั้นระยะทางสามารถที่จะคำนวณ โดยพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนของเวลาได้ตามสมการที่ (3.4) ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} r_1+\Delta r &= [(X_1-X_A)^2+(Y_1-Y_A)^2+(Z_1-Z_A)^2]^{1/2} \\ r_2+\Delta r &= [(X_2-X_A)^2+(Y_2-Y_A)^2+(Z_2-Z_A)^2]^{1/2} \\ r_3+\Delta r &= [(X_3-X_A)^2+(Y_3-Y_A)^2+(Z_3-Z_A)^2]^{1/2} \\ r_4+\Delta r &= [(X_4-X_A)^2+(Y_4-Y_A)^2+(Z_4-Z_A)^2]^{1/2} \end{aligned}\right\} \quad (3.4)$$

ในสมการที่ (3.4) มีค่าที่ไม่ทราบค่า 4 ค่า คือ $\Delta r, X_A, Y_A, Z_A$ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการวิธีการนี้สามารถลดความคลาดเคลื่อนของเวลาได้ ในทางปฏิบัติเครื่องรับจะยังคงรับสัญญาณซ้ำอีกจาก ดาวเทียมหลายดวง ดังนั้นในการรับแต่ละครั้งเราสามารถจะเพิ่มสมการ (3.4)ไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะเพิ่มความถูกต้องและสามารถใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) มาคำนวณได้ แม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาของเครื่องรับ ซึ่งไม่มีความแม่นยำจะสามารถปรับปรุงได้โดยอาศัยการรับสัญญาณจากดาวเทียมหลายดวง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอื่นๆ หลงเหลืออยู่

3.7 ความคลาดเคลื่อนของระบบดาวเทียม GPS

ในการวัดปริมาณทุกชนิดย่อมต้องมีความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ ขนาดของความคลาดเคลื่อนจะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ วิธีการ และสภาพแวดล้อมในขณะทำการวัด เมื่อจะนำค่าที่วัดได้มาใช้เราจำเป็นต้องกำจัด

ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในงานรังวัดดาวเทียม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจพิจารณาแยกได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม ได้แก่ความคลาดเคลื่อนวงโคจรและความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของสัญญาณ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นบรรยากาศ และการเกิดคลื่นสะท้อน กลุ่มสุดท้ายเกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณ เช่นนาฬิกาเครื่องรับ ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงผลของความคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดที่เกิดขึ้น

3.7.1 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากโลกหมุน

ในขณะที่ดาวเทียมส่งสัญญาณมายังเครื่องรับซึ่งใช้เวลานานเท่ากับ τ นั้นโลกซึ่งหมุนรอบตัวเองอยู่ด้วยความเร็วเชิงมุม Ω_e นั้นจะทำให้ตำแหน่งของเครื่องรับเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมที่ดาวเทียมเริ่มส่งสัญญาณออกมา ถ้าให้ระยะเชิงมุมที่เคลื่อนที่ไปนี้มีขนาดเท่ากับ α จะได้ $\alpha = \tau \cdot \Omega_e$ ถ้าหากการคำนวณค่าพิกัดอยู่ในระบบพิกัดติดโลก จำเป็นต้องตรวจแก้ตำแหน่งของดาวเทียมให้ถูกต้องด้วย

ถ้าให้ x, y, z เป็นพิกัดตำแหน่งในขณะเวลาที่เริ่มส่งสัญญาณ และ x', y', z' เป็นพิกัดตำแหน่งที่ตรวจแก้แล้ว

จะได้

$$x = x' \cos\alpha + y' \sin\alpha \tag{3.5}$$

$$y = y' \cos\alpha + x' \sin\alpha \tag{3.6}$$

$$z = z' \tag{3.7}$$

โดยปกติ α จะมีขนาดเล็กกว่า 1.5 ฟิลิปดา

3.7.2 ความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม

ความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียมมีสาเหตุมาจากวงโคจรดาวเทียมที่มาจากข้อมูลดาวเทียมในสัญญาณที่รับได้นั้นเป็นวงโคจรที่ได้จากการคำนวณล่วงหน้า โดยอาศัยรูปจำลองของแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อดาวเทียม รูปจำลองที่ใช้อาจจะไม่ถูกต้องหรือไม่ละเอียดเพียงพอเมื่อเทียบกับแรงจริง ๆ ที่กระทำต่อดาวเทียมในขณะที่ทำการวัด ดังนั้น ตำแหน่งของดาวเทียมจากอิฟิเมอริสดาวเทียมที่ส่งกระจายลงมาพร้อมสัญญาณดาวเทียมนั้นจึงไม่ถูกต้อง ความคลาดเคลื่อนวงโคจรแยกได้เป็นองค์ประกอบในแนวรัศมี (Radial) และแนวสัมผัสในทิศทางการโคจรและในทิศทางขวางการโคจร (Along and Across Track) องค์ประกอบในแนวรัศมีมีผลโดยตรงต่อการวัดซูโดเรนจ์ซึ่งมีผลต่อการหาตำแหน่งสมบูรณ์มากกว่าการหาตำแหน่งสัมพัทธ์ เพราะในการหาตำแหน่งสัมพัทธ์นั้น ความคลาดเคลื่อนวงโคจรจะมีผลต่อจุดปลายทั้งสองของเส้นฐานในลักษณะที่คล้ายคลึงกันและมีขนาดใกล้เคียงกัน ความคลาดเคลื่อนที่เหลืออยู่ในการคำนวณเส้นฐานจึงน้อยมาก มีกฎหัวแม่มือ (Rule of Thumb) สำหรับความคลาดเคลื่อนของเส้นฐาน db ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนวงโคจร dr ในการคำนวณเส้นฐาน b คือ

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{p} \tag{3.8}$$

ได้ว่าความคลาดเคลื่อนของเส้นฐานที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นฐาน b กับระยะทางไปยังดาวเทียม p ในกรณีของดาวเทียม GPS ระยะทางไปยังดาวเทียมมีค่าสูงสุดไม่เกิน 25,000 กม. ถ้าต้องการเส้นฐานที่มีความคลาดเคลื่อน 1 ซม. ความคลาดเคลื่อนวงโคจรสูงสุดที่ยอมรับได้คือค่าในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความคลาดเคลื่อนของวงโคจร

ความยาวเส้นฐาน (กม.)	ความคลาดเคลื่อนวงโคจรที่ยอมรับได้ (ม.)
0.1	2500
1.0	250
10	25
100	25
1000	0.25

จากตัวอย่างของตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าความถูกต้อง 1 ซม. ที่ต้องการขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นฐาน ถ้างานที่เกี่ยวข้องกับเส้นฐานขนาดสั้นความคลาดเคลื่อนวงโคจรจะไม่ใช่ค่าวิกฤตที่ต้องนำมาพิจารณา แต่ในการทำงานบางอย่าง เช่น ทางด้าน Geodynamic ที่วัดความยาวเส้นฐานเป็น 1000 กม. มีความต้องการวงโคจร ดาวเทียมที่มีความถูกต้องดีกว่า 1 เมตร จากกฎหัวแม่มือถ้าพิจารณาในเทอมของความถูกต้องสัมพัทธ์ (Relative Accuracy) กับความคลาดเคลื่อนวงโคจรที่ยอมรับได้ จะได้

ตารางที่ 3.2 ตารางความคลาดเคลื่อนวงโคจรที่ยอมรับได้

ความถูกต้องสัมพัทธ์ (หน่วยต่อล้าน ppm)	ความคลาดเคลื่อน วงโคจรที่ยอมรับได้ (ม.)
5	125
1	25
0.5	12.5
0.1	2.5

กฎหัวแม่มือนี้เป็นดัชนีบ่งชี้ อย่างหยาบ ๆ ในการวางแผนการทำงานเท่านั้น และเป็นตัวเลขที่ประมาณการในแง่ร้าย (Pessimistic) ด้วยการใช้กฎหัวแม่มือจึงต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง จากการศึกษาตำแหน่งวงโคจรที่ได้จากข้อมูลดาวเทียมที่ส่งกระจายลงมาพบว่า ความถูกต้องของวงโคจรอยู่ในเกณฑ์ 15 เมตร ถึง 25 เมตร ในงานที่ต้องการความถูกต้องวงโคจรดีกว่านี้ จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณปรับวงจรให้ดีขึ้น ซึ่งมักกระทำโดยใช้เทคนิคการคำนวณปรับแก้

3.7.3 ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมและนาฬิกาเครื่องรับ

เมื่อกล่าวถึง เวลา GPS หมายถึง เวลาที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงในระบบ GPS สถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) เป็นผู้ทำหน้าที่เฝ้าระวังและรักษาเวลา GPS ให้มีความถูกต้องและเที่ยงตรง โดยปกติ เวลา GPS และเวลามาตรฐานสากล (UTC) จะถูกรักษาให้ต่างกันไม่เกิน 100 ns (10×10^{-11} วินาที)

เวลาดาวเทียม หมายถึง เวลาที่อ่านได้จากนาฬิกาของดาวเทียมบนดาวเทียมแต่ละวงมีมาตรฐานความถี่อะตอมที่เป็นรูบิเดียม 2 เครื่องและซีเซียม 2 เครื่อง เวลาดาวเทียมอ้างอิงมาจากค่าเฉลี่ยของมาตรฐานความถี่ 4 เครื่องนี้ สถานีควบคุมหลักสามารถเทียบเวลาดาวเทียมให้ตรงกับเวลา GPS ไม่เกินกว่า 1 ใน 1000 วินาที (1 ms) และควบคุมความถี่ให้มีความถูกต้องถึง 10^{-9} นอกจากความคลาดเคลื่อนในส่วนของการเทียบเวลาและความถี่มาตรฐานแล้ว ยังมีความคลาดเคลื่อนระยะยาวที่เกิดจากความไม่เสถียรของมาตรฐานความถี่ที่ เรียกว่า ดริฟท์ (drift) อีกด้วย รูปจำลองที่ใช้ในการคำนวณความคลาดเคลื่อนนาฬิกา จึงเขียนได้เป็น

$$dt = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \qquad (3.11)$$

เมื่อ t_0 เป็นเวลาอ้างอิง a_0 เป็นออฟเซตของเวลาซึ่งเป็นค่าต่างของเวลาดาวเทียมกับเวลา GPS ที่ขณะเวลา t_0 , a_1 เป็นออฟเซตของความถี่ซึ่งเป็นค่าต่างของความถี่ที่ขณะเวลา t_1 , a_2 เป็นดริฟท์ของความถี่ ค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1 และ a_2 ของดาวเทียมแต่ละดวงอยู่ในข้อมูลดาวเทียมที่ส่งกระจายลงมาค่าเหล่านี้ได้จากการคำนวณล่วงหน้าโดยสถานีควบคุมหลักเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แท้จริงจึงอาจแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากการส่งกระจายลงมาค่าที่ถูกต้องสามารถหาได้จากวิธีการคำนวณปรับแก้ เช่น เดียวกันกับการปรับแก้วงโคจร

3.7.4 ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ

ความต้องการมาตรฐานความถี่ที่มีคุณภาพสูงมาก ๆ ถือว่าไม่มีความจำเป็นสำหรับเครื่องรับสัญญาณ ทั้งนี้เพราะเวลาที่ถูกต้องหาได้จากสัญญาณดาวเทียมที่มีเวลาจากนาฬิกาดาวเทียมอยู่ ในทันทีที่เครื่องรับสัญญาณสามารถถอดรหัสได้ก็จะรู้เวลา GPS ดังนั้นความมีเสถียรของแหล่งกำเนิดความถี่ สำหรับเครื่องรับจึงไม่สูงเหมือนนาฬิกาดาวเทียม ในการหาตำแหน่งสัมบูรณ์ในทันทีของเครื่องรับแบบนำหน ถ้าใช้นาฬิกาอะตอมมิคที่มีเสถียรสูงและเทียบเวลากับระบบ GPS แล้วนำมาเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องรับจะทำให้จำนวนดาวเทียมที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่งแบบสามมิติลดลงเหลือเพียง 3 ดวงเท่านั้น

3.7.5 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหักเหในชั้นบรรยากาศ

บรรยากาศ หรือ อากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่เป็นส่วนผสมของก๊าซต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน อากาศที่บริเวณใกล้พื้นดินจะมีความแน่นมาก ส่วนที่ระดับสูงอากาศจะบางหรือเจือจางลง บรรยากาศของโลกถูกแบ่งออกเป็นหลายชั้น แต่ละชั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ชั้นบรรยากาศที่ติดอยู่กับพื้นโลกเรียกว่า โทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นชั้นที่มีปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฝน เมฆ พายุ อุณหภูมิของบรรยากาศในชั้นนี้จะลดลงราว 6.5 องศาเซลเซียสทุก ๆ ความสูง 1 กิโลเมตร ขอบเขตของโทรโพสเฟียร์ในบริเวณศูนย์สูตรสูงถึง 16-17 กิโลเมตร ส่วนในบริเวณขั้วโลกสูง 8-10 กิโลเมตร สุดเขตชั้นโทรโพสเฟียร์มีชื่อว่า โทรโพพอส (Tropopause) เหนือโทรโพพอสขึ้นไป คือ สตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) เป็นชั้นที่อุณหภูมิไม่ลดลงตามความสูง บรรยากาศในชั้นนี้ค่อนข้างเรียบและไม่ค่อยมีความปั่นป่วนมาก ในชั้นนี้เริ่มมีก๊าซโอนโซนซึ่งสามารถดูดซับรังสีอัตราไวโอเลตไว้ได้มากสุดเขตของชั้น เรียกว่า สตราโทพอส สูงจากพื้นดินราว 55 กิโลเมตร ชั้นบรรยากาศที่อยู่เหนือสตราโทพอส คือ เมโซสเฟียร์ (Mesosphere) อุณหภูมิของบรรยากาศจะลดลงตามความสูงอีก เมโซพอสอยู่สูงจากพื้นดินราว 70-80 กิโลเมตร ที่สุดเขตนี้อุณหภูมิเย็นราว -140 องศาเซลเซียส ต่อไปเป็นชั้นเทอร์มอสเฟียร์ (Thermosohere) อุณหภูมิจะร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วตามความสูง

ความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากปรมาณูออกซิเจนซึ่งดูดขับรังรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ก๊าซในบรรยากาศมีการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนจากระดับที่สูงกว่า 800กิโลเมตรขึ้นไปเรียกว่า เอกโซสเฟียร์ (Exosphere) บรรยากาศในชั้นนี้มีปรมาณูหรืออณุหภูมิก๊าซอยู่แยกกันและไม่ค่อยจะมีการปะทะกัน ในชั้นบรรยากาศที่รังสีอัตราไวโอเลตแยกปรมาณูของก๊าซออกเป็นไอออน ซึ่งครอบคลุมบริเวณตั้งแต่ระดับความสูงราว 50 กิโลเมตร จนถึง 1000 กิโลเมตร มีชื่อเรียกว่า ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ซึ่งรวมชั้นบรรยากาศเมโซสเฟียร์และเทอร์มอสเฟียร์ ชั้นบรรยากาศที่มีผลต่อการหักเหคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเบี่ยงเบนไป คือ ชั้นไอโอโนสเฟียร์และชั้นโทรโพสเฟียร์

การหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นไอโอโนสเฟียร์ขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนตามเส้นทางที่คลื่นผ่านลงมา สิ่งที่มีผลต่อจำนวนอิเล็กตรอนคือ Solar activity และสนามแม่เหล็กโลก ดังนั้น การหักเหของคลื่นจึงขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่น ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ และ เวลา ผลของการวัดระยะอาจแปรเปลี่ยนตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 1 เมตรไปจนถึง 100 เมตร โดยเหตุที่การหักเหของคลื่นในชั้นไอโอโนสเฟียร์แปรผันกับความถี่ เครื่องรับแบบสองความถี่จึงใช้ประโยชน์จากข้อเท็จจริงนี้ กำจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเดินทางผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ให้หมดไปได้ ดัชนีการหักเหสำหรับการวัดเฟสคลื่นส่งคำนวณได้จาก

$$n_p = 1 + 40.3\frac{n_e}{f^2} \tag{3.12}$$

โดยมี n_e เป็นจำนวนอีเล็กตรอนตามเส้นทางที่คลื่นผ่าน และ f เป็นความถี่ของคลื่นส่งผลของไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อคลื่นส่งกับรหัสที่มอดูเลตมาตรงข้ามกัน นั่นคือดัชนีการหักเหของรหัสซึ่งเรียกว่า Group Delay มีสมการดังต่อไปนี้

$$n_g = 1 + 40.3\frac{n_e}{f^2} \tag{3.13}$$

โดยการอินทิเกรตตามเส้นทางที่คลื่นผ่าน จะได้

$$\delta R_{10N} = \int_S (n_g - 1)ds \tag{3.14}$$

$$\delta R_{10N} = \frac{40.3}{f^2}\int_S n_e\, ds \tag{3.15}$$

ซึ่งเป็นเป็นความคลาดเคลื่อนของซูโดเรนท์ที่วัดได้โดยการใช้รหัสในทำนองเดียวกันความคลาดเคลื่อนในการวัดเฟสคลื่นส่งจะเป็น

$$\delta R_{10N} = -\frac{40.3}{f^2}\int_S n_e\, ds \tag{3.16}$$

ดังนั้น ผลของการหักเหในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการวัดระยะไปยังดาวเทียม โดยใช้รหัส (11) จะได้ระยะทางที่ยาวเกินไป และโดยใช้คลื่นส่ง (12) จะได้ระยะทางที่สั้นเกินไป

$$R = R1 - \delta R1_{10N} \tag{3.17}$$

$$R = R2 - \delta R2_{10N} \tag{3.18}$$

โดยมี R1 และ R2 เป็นระยะทางที่วัดได้โดยใช้คลื่นส่ง L1 และ L2 ตามลำดับ ค่าตรวจแก้สำหรับการวัดโดยใช้รหัสของคลื่นส่ง L1 มีสมการเป็น

$$\delta R1_{10N} = \frac{R1 - R2}{1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2} \tag{3.19}$$

ในทำนองเดียวกันการวัดเฟสคลื่นส่งจะได้ความคลาดเคลื่อนของการวัดโดยใช้คลื่นส่ง L1 มีสมการเป็น

$$\delta\Phi_{10N}(L1) = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}\left[\Phi(L1) - N(L1) - \frac{f_1}{f_2}(\Phi(L2) - N(L2))\right] \tag{3.20}$$

โดยมี N (L1) และ N(L2) เป็นเลขปริศนาในการวัดเฟสคลื่นส่ง L1 และ L2 ตามลำดับ หลังจากที่ตรวจแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นไอโอโนสเฟียร์แล้ว จะให้ค่าเฟสคลื่นส่งที่เป็นค่าร่วมระหว่าง L1 และ L2 ที่ปราศจากการหักเหในชั้นไอโอสเฟียร์ มีสมการเป็น

$$\Phi(L_0) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi(L1) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\Phi(L2) \tag{3.21}$$

สำหรับการรับสัญญาณดาวเทียมความถี่เดียว การแก้ความคลาดเคลื่อนกระทำได้โดยการสร้างรูปจำลองสำหรับการตรวจแก้ ระบบ GPS ใช้รูปจำลองของโกลบูชาร์ (Klobuchar, 1987) รูปจำลองนี้ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ α_i และ β_i จำนวน 8 ตัว ใช้คำนวณค่าตรวจแก้ของเวลาประวิงในแนวดิ่งจาก

$$\Delta T_{10N} = DC + A\cos(2\pi(t - \Phi)/P) \tag{3.22}$$

โดย Δt_{10N} เป็นค่าตรวจแก้ในแนวดิ่งมีหน่วยเป็น ns (10^{-9} วินาที)

DC เป็นค่าออฟเซตคงที่ของเวลากลางวันและกลางคืน

A เป็นช่วงกว้างของการแปรเปลี่ยน

Φ เป็นค่าออฟเซตคงที่ของเฟส

T เป็นเวลาท้องถิ่น

P เป็นคาบเวลาของการแปรเปลี่ยน

ค่า A และ P คำนวณจากสัมประสิทธิ์ α_i และ β_i คือ

$$A = \sum_{i=0}^{3} \alpha_1 \Phi^i \text{ (หน่วยเป็นวินาที)} \tag{3.23}$$

$$P = \sum_{i=0}^{3} \beta_1 \Phi^i \text{ (หน่วยเป็นวินาที)} \tag{3.24}$$

สัมประสิทธิ์ทั้ง 8 ตัวนี้อยู่ในข้อมูลดาวเทียมที่ส่งกระจายลงมาจากดาวเทียม สมการ (3.21) ใช้กับการวัดในเวลากลางวัน สำหรับช่วงเวลากลางคืน $\Delta T_{10N} = DC$ มีค่าเป็น 5 ns รูปจำลองโกลบูชาร์สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนได้สูงถึง 50%

การหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheric Refraction)

การหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นส่ง แต่ขึ้นอยู่กับความกดดันอุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศ จุดที่อยู่ห่างกันมาจะไม่มีความสัมพันธ์ของการหักเห นั่นคือ พารามิเตอร์ของการหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์จะไม่ค่อยมีสหสัมพันธ์กัน อิทธิพลของบรรยากาศที่มีต่อการวัดระยะแยกออกเป็นส่วนประกอบชื้นและแห้ง ส่วนชื้นขึ้นอยู่กับความกดดันของไอน้ำในอากาศมีขนาดราว 10% ของการหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์ การหักเหในแนวดิ่งมีค่าราว 2-3 ม. และเพิ่มมากขึ้นในแนวราบ ที่มุมสูง 10° การหักเหมีค่าราว 20 เมตร ถึงแม้อิทธิพลของส่วนประกอบแห้งจะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนชื้น แต่การคำนวณค่าส่วนแห้งจะมีความถูกต้องมากว่าส่วนชื้นความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ ±1%

ถ้าให้ n เป็นดัชนีการหักเหของบรรยากาศ

นิยาม

$$N = (n-1)\times 10^6 \tag{3.25}$$

$$N = N_D + N_W \tag{3.26}$$

เมื่อ N_D และ N_W เป็นอิทธิพลของส่วนประกอบแห้งและชื้น ตามลำดับ คำนวณค่าได้จาก

$$N_D = 77.6\frac{P}{T} \tag{3.27}$$

$$N_W = 77.6\frac{4810e}{T^2} \tag{3.28}$$

ค่า P เป็นความกดดันบรรยากาศหน่วยเป็นมิลลิบาร์ (millibar) T เป็นอุณหภูมิหน่วยเป็นองศาเคลวิน(°k) ส่วน E เป็นความกดดันของไอน้ำหน่วยเป็นมิลลิบาร์ ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งได้จากการอินทิเกรตดัชนีการหักเห นั่นคือ

$$\delta h = 10^{-6}\int_o^h N * dh \tag{3.29}$$

$$\delta h = 10^{-6}\int_o^h N_D dh + 10^{-6}\int_o^h N_w dh \tag{3.30}$$

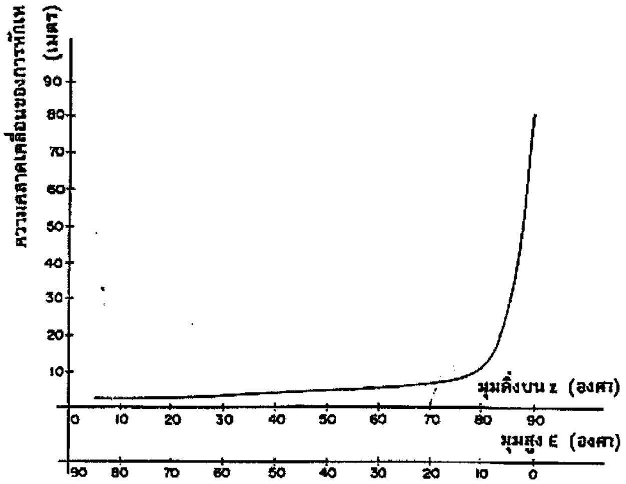
$$\delta h = \delta h_D + \delta h_W \tag{3.31}$$

ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งเนื่องจากการหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์ที่เกิดจากส่วนประกอบแห้งมีขนาด 2.32 ม. ± 2.5ซม และที่เกิดจากส่วนประกอบชื้นมีขนาด 20 ซม. ± 15-25 ซม. เมื่อรู้ความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งแล้วจะคำนวณความคลาดเคลื่อนในแนวที่มีมุมสูง E ได้จาก

$$\delta r_D = \delta h_D / \sin E \tag{3. 32}$$

$$\delta r_W = \delta h_W / \sin E \tag{3. 33}$$

สมการ (3.31) ใช้ได้กับแนวทางเส้นทางที่มีมุมสูง E มากกว่า 20° ในแนวเส้นทางที่มีมุมสูงต่ำ ขนาดความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความแปรปรวนมาก จึงหลีกเลี่ยงที่จะรับสัญญาณที่มาในระดับต่ำกว่า 10° ภาพที่ 3. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการหักเหกับทิศทางของการวัดระยะ



ภาพที่ 3.7 ความคลาดเคลื่อนจากการหักเหในชั้นโทรโพสเฟียร์เทียบกับทิศทางในการวัดระยะ

3.7.6 คลื่นสะท้อน (Multipath)

คลื่นสะท้อน หมายถึง การแพร่กระจายของคลื่นที่มีการสะท้อนตั้งแต่หนึ่งครั้งขึ้นไป พื้นผิวที่สะท้อนอาจจะอยู่ในแนวดิ่ง ราบ หรือเอียงก็ได้ เช่น ผนังตึก ถนน ผิวน้ำ หรือยานพาหนะ คลื่นสะท้อนมีผลกับทั้งรหัสและคลื่นส่งผลที่มีต่อรหัส P มีขนาดเป็น 100 เท่าของคลื่นส่ง ผลของคลื่นสะท้อนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคลื่นหลุด (Cycle Slip) เพราะช่องรับสัญญาณไม่สามารถล็อกสัญญาณดาวเทียมไว้ได้ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่มีต่อคลื่นส่งL1มีขนาดราว5 ซม. คาบของการเกิดคลื่นสะท้อนเป็น 15 นาที ดังนั้น การรังวัดเป็นเวลานานจะทำให้ผลของคลื่นสะท้อนลดลง อย่างไรก็ดีเทคนิคของการรังวัดบางวิธีไม่สามารถวางเสาอากาศทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ได้ เราจึงต้องหลีกเลี่ยง การรับสัญญาณที่มีคลื่นสะท้อนโดยเลือกจุดวางเครื่องรับที่ไม่มีพื้นผิวสะท้อนอยู่ใกล้เคียง เลือกเสาอากาศที่ออกแบบเฉพาะ เช่น เสาอากาศที่มีแผ่นกราวนด์ ใช้วัสดุที่ดูดซับคลื่นวางรอบเสาอากาศ

3.7.7 ความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับ GPS

ความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับมีสาเหตุมาจากหลายส่วนได้แก่ Noiseในการวัดของเครื่องรับ Bias ระหว่างช่องรับสัญญาณ การประวิงของเฟส ความไม่เสถียรของออสซิลเลเตอร์ จุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ Noiseในการวัดขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณที่รับได้หรืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับ Noise (S/N Ratio) กฎหัวแม่มือที่ใช้ในการประมาณขนาดของ Noise คือ 1% ของค่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่กำลังวัดสำหรับสัญญาณ GPS จะได้

รหัส C/A λ = 300 ม. Noise Error = 3 ม.

รหัส P	λ = 3 ม.	Noise Error = 30 ซม.
คลื่นส่ง	λ = 20 ซม.	Noise Error = 2 มม.

ในเครื่องรับรุ่นใหม่สามารถทำให้ Noise Error ในการวัดเฟสคลื่นส่งลดลงมาเหลือน้อยกว่า 1 มม. ส่วนการวัดรหัสอยู่ระดับเซนติเมตรเท่านั้น การวัดรหัสโดยมีค่า Noise ต่ำนี้ มีความสำคัญในการหาค่าเลขปริศนาในทันที เครื่องรับสัญญาณที่มีช่องรับสัญญาณหลายช่อง เวลาประวิงช่องสัญญาณที่ผ่านช่องแต่ละช่องจะไม่เท่ากัน เนื่องจากต้องเดินทางผ่านอุปกรณ์อีเล็กทรอนิกส์ที่ไม่เหมือนกัน ผู้ผลิตเครื่องรับจะพยายามวัดสอบเพื่อชดเชยความแตกต่างเหล่านี้ ความคลาดเคลื่อนของเฟสคลื่นส่ง 5° มีค่าเท่ากับความยาว 2.5 มม. เครื่องรับที่ใช้ช่องรับสัญญาณแบบสับเปลี่ยนเร็วและแบบมัลติเพล็กซ์จะไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก Bias ระหว่างช่องรับสัญญาณนี้ การประวิงของเฟสขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณ ความแรงของสัญญาณที่ต่างกันจะทำให้เกิดการประวิงของเฟสที่ต่างกัน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดความคลาดเคลื่อนในการวัดนี้จะลดลงถ้าเลือกใช้ดาวเทียมต่างกันหลาย ๆ ดวงในการคำนวณตำแหน่งความไม่เสถียรของออสซิลเลเตอร์ คือความคลาดเคลื่อนนาฬิกาของเครื่องรับ ในงานรังวัดดาวเทียมตำแหน่งที่ทำการวัด คือ จุดศูนย์กลางเฟสเชิงไฟฟ้าของเสาอากาศ ซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามความเข้มและทิศทางของสัญญาณที่เข้ามายังเสาอากาศ ในงานรังวัดที่ต้องการความถูกต้องสูงจึงต้องมีการจัดให้เสาอากาศวางตัวอยู่ในทิศทางเดียว ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากจุดศูนย์กลางเฟสลดลงได้ด้วยการออกแบบเสาอากาศให้ดี เสาอากาศรุ่นใหม่จะมีการเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางในระดับของมิลลิเมตรเท่านั้น