

ปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวน
ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด

GPS ACCURACY DEGRADATION FACTORS DURING MAXIMUM
IONOSPHERIC SCINTILLATION



เอกพล มิ่งขวัญ

EKKAPHON MINGKHWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการศึกษาวิทยาศาสตร์ (คอมพิวเตอร์)

วง.
๑๗๖
๒๐๒๖

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

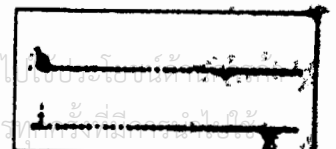
พ.ศ. 2546

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 48375

วัน, เดือน, ปี 24 ต.ค. 2546

ISBN 974-324-765-3



**GPS ACCURACY DEGRADATION FACTORS DURING MAXIMUM
IONOSPHERIC SCINTILLATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN SCIENCE EDUCATION (COMPUTER)
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-765-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด
นักศึกษา	เรือดรี เอกพล มิ่งขวัญ
รหัสประจำตัว	41064242
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	การศึกษาวิทยาศาสตร์ (คอมพิวเตอร์)
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.วิไลพร วรจิตตานนท์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	นาวาอากาศเอก ดร.เพชร โดท่าโรง

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกัน โดยทั่วไปว่า หากมีการใช้งานเครื่องรับจีพีเอสมาคำนวณหาพิกัดตำแหน่งในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) จะให้พิกัดตำแหน่งที่ได้คาดเคลื่อนจากความเป็นจริงออกมามากกว่าในช่วงเวลาที่ไม่เกิดปรากฏการณ์ Scintillation ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ Scintillation ดังกล่าวนี้มี Phase Scintillation, Amplitude Scintillation และ ปริมาณของอิเล็กตรอนบนชั้นบรรยากาศ (TEC) เป็นดัชนีชี้วัดการเกิดปรากฏการณ์ ซึ่งในการคำนวณหาพิกัดแต่ละครั้งจะมีการรวมเอาตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรหลักที่เป็นปัจจัยลดทอนความถูกต้องของการบอกพิกัดตำแหน่งเอาไว้ด้วย ในความเป็นจริงแล้วปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อตรงกับการระยะทางจากดาวเทียมจีพีเอสมายังเครื่องรับจีพีเอส Pseudorange ทำให้ระยะทางที่คำนวณได้ผิดจากความเป็นจริง และเมื่อนำระยะทางที่ผิดไปคำนวณหาพิกัดจึงได้พิกัดที่ไม่ถูกต้อง ในการแก้ไขค่า Pseudorange ที่ผิดพลาดนี้ใช้ฟังก์ชันของดัชนีชี้วัดการเกิดปรากฏการณ์ Scintillation และ TEC มาช่วยในการกำจัดข้อผิดพลาดของ Pseudorange ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่เกิดปรากฏการณ์ Scintillation ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเอาค่า Pseudorange ที่แก้ไขให้ถูกต้องมาแก้สมการจีพีเอส (Hyperbolic system of equation) เพื่อหาพิกัดตำแหน่งที่ถูกต้องมากที่สุด และแสดงรูปแบบของการแก้ไขระยะทางที่ไม่ถูกต้องในภาวะการเกิดปรากฏการณ์ Scintillation จากฟังก์ชันของปัจจัยที่ลดทอนความถูกต้องเหล่านั้น โดยใช้รูปแบบของสมการเชิงเส้น

$$\text{Range}_i = a_{1i} \text{Pseudorange}_i + a_{2i} S4 + a_{3i} \text{Sig60} + a_{4i} \text{TEC} + \text{Error}_i$$

นอกจากนี้ยัง ได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบของจำนวนดาวเทียมที่เกิดปรากฏการณ์ Scintillation แล้วรับเอาข้อมูลมาคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง ซึ่งสรุปได้ว่าในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ Scintillation

จำนวนดาวเทียมที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา I และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	GPS Accuracy Degradation Factors During Maximum Ionospheric Scintillation.
Student	Sub Lieutenant Ekkaphon Mingkhwan.
Student ID.	41064242
Degree	Master of Science
Program	Science Education (Computer)
Year	2546
Thesis Advisor	Dr. Wilaiporn Worrachittanont
Thesis Co-Advisor	Group Captain Dr. Pian Totarong

ABSTRACT

It is obvious that the position from the GPS receiver recorded during the Ionospheric Scintillation has larger error than those recorded with no scintillation. The phase and amplitude scintillation index as well as the Total Electron Content (TEC) of the ionosphere are recorded. By carefully investigating the recorded data, we can conclude roughly that among the three recorded parameters, which parameter mostly course the GPS position error. Indeed, the scintillation causes the error to the measurement of the range between GPS satellite and GPS receivers. By introducing the range correction factor, which is a function of the scintillation indices and the TEC are can eliminate the position error due to the scintillation. In the thesis the GPS equation (Hyperbolic system of equation) with the corrected psuedorange will be solved to find the position. Various forms of range correction factors will be need. One which provides the most accurate position in the scintillation, range correction function by Liner equation.

$$\hat{Range}_i = a_{1i} Pseudorange_i + a_{2i} S4 + a_{3i} Sig60 + a_{4i} TEC + Error_i$$

Moreover, the effect of the number of scintillating GPS satellites being used in the GPS equation provide the position will be investigated. In conclusion, During Ionospheric Scintillation occur, GPS receiver change the number of lock satellite that they are used position solve equation

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ดร.วิไลพร วรจิตตานนท์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ นาวาอากาศเอก ดร.เพียร โตท่าโรง อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ในขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ Dr. Richard M. Thomas และ Dr. Manuel A. Cervera ที่ช่วยถ่ายทอดความรู้ในด้านการประมวลผลสัญญาณดาวเทียม และเทคโนโลยีพีเอส

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนส่งเสริมการศึกษาแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ใดๆ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา ครู-อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกพล มิ่งขวัญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	9
1.4 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	10
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	10
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย.....	10
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 จีพีเอส.....	13
2.1.1 ส่วนอวกาศ.....	14
2.1.2 ส่วนสถานีควบคุม.....	16
2.1.3 ส่วนผู้ใช้.....	17
2.1.3.1 เครื่องรับแบบเรียงลำดับสัญญาณดาวเทียม.....	17
2.1.3.2 เครื่องรับแบบ Continuous Receivers.....	18
2.2 การบอกตำแหน่งของจีพีเอส.....	19
2.3 ปรากฏการณ์จากดวงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศโลก.....	22
2.4 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	33
2.5 ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อสัญญาณดาวเทียม.....	35
2.5.1 ฟาราเดย์โรเทชัน.....	36
2.5.2 เวลาหน่วง.....	37
2.5.3 การหักเหของสัญญาณ.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.4 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน.....	38
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	41
3.1.1 เครื่องรับจีพีเอส (GPS Receiver).....	41
3.1.2 เสาอากาศรับสัญญาณจีพีเอส (GPS Antenna Model 503).....	41
3.1.3 เครื่องคอมพิวเตอร์ (PC).....	42
3.1.4 เครื่องบันทึกข้อมูลสำรอง (Secondary Storage).....	42
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	42
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	44
3.3.1 การเตรียมข้อมูล.....	45
3.3.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของการบอกพิกัด.....	47
3.3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด.....	48
3.3.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด.....	50
3.3.4 การสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัด.....	50
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
4.1 วิเคราะห์การกระจายตัวของการบอกพิกัด.....	53
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด.....	59
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด.....	66
4.4 การสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัด.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3 ข้อเสนอแนะ.....	87
5.3.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลการวิจัยไปใช้.....	87
5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป.....	87
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดาวเทียม.....	91
ภาคผนวก ข บทความที่ตีพิมพ์.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	118



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การหาตำแหน่งของเรือจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง 2 แหล่งกำเนิด.....	2
1.2 การหาตำแหน่งของระบบ TRANSIT จากการใช้ ดาวเทียมในระบบเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 2 แหล่งกำเนิด.....	3
1.3 วงโคจรของดาวเทียมจีพีเอส 24 ดวงรอบโลก.....	3
1.4 การหาเวลาจากความแตกต่างในด้านเวลา ของสัญญาณแบบเดียวกันที่สร้างจากดาวเทียมจีพีเอสและเครื่องรับจีพีเอส.....	4
1.5 การรับสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอสมาคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส.....	6
1.6 ความแปรปรวนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดมากในบริเวณละติจูดที่ 20 องศาเหนือและ 20 องศาใต้.....	7
1.7 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อน ในการบอกตำแหน่งทางละติจูด ลองจิจูด และ Absolute Error เทียบกับ S4 , Sig60, TEC, ในช่วงเวลาเดียวกันของวันที่ 13 Sep 2000 เก็บข้อมูลจากสถานีที่ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่.....	9
1.8 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	10
2.1 ส่วนประกอบ 3 ส่วนของจีพีเอส.....	14
2.2 แสดงวงโคจรของดาวเทียมจีพีเอส.....	14
2.3 แสดงลักษณะการมอดูเลตสัญญาณของจีพีเอส.....	15
2.4 แสดงที่ตั้งของสถานีควบคุมดาวเทียมจีพีเอส.....	16
2.5 การคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส.....	20
2.6 แบบจำลองกรานูล.....	22
2.7 พายุสุริยะจากดวงอาทิตย์ที่เกิดจาก โซลาร์แฟร์ที่แพร่ไปในระบบสุริยะจักรวาลและกระทบกับชั้นบรรยากาศของโลก.....	23
2.8 จุดดำที่เกิดบนผิวของดวงอาทิตย์.....	23
2.9 ภาพแสดงจุดดำชั้นใน และจุดดำชั้นนอก.....	24
2.10 สนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ใต้พื้นผิวของดวงอาทิตย์.....	25
2.11 แสดงจุดดำแบบคู่ที่อยู่ในซีกดาวเดียวกัน จะมีทิศทางสนามแม่เหล็กวางไปในทางเดียวกัน และ ซีกดาวแต่ละซีก จะมีทิศทางสนามแม่เหล็กของจุดดำแบบคู่ตรงข้ามกันเสมอ.....	25
2.12 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดดำที่เป็นวัฏจักร.....	26

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.13 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดดำเป็นช่วง ๆ ต่อเนื่อง.....	27
2.14 (บน) แผนภูมิรูปพีสี่เหลี่ยม แสดงตำแหน่งละติจูดที่เกิดจุดดำ ในช่วงเวลาหนึ่ง (ล่าง) แผนภูมิแสดงพื้นที่รวมของจุดดำบนดวงอาทิตย์ ต่อพื้นที่ผิวหน้าของดวงอาทิตย์ (เฉพาะด้านที่มองเห็น).....	27
2.15 คอโรนาขณะเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง.....	28
2.16 ภาพดวงอาทิตย์ที่ถ่ายในย่านรังสีเอกซ์	29
2.17 ภาพพื้นผิวดวงอาทิตย์แสดงการเกิด โซลาร์แฟลร์.....	30
2.18 การบิดตัวอย่างรุนแรงของ โซลาร์แฟลร์ หรือ ซิกมอด.....	31
2.19 คอโรนัลแมสอีเจกชัน.....	31
2.20 การเกิดพวยก๊าซพุ่งขึ้นจากขอบของดวงอาทิตย์และตกกลับมาสู่ผิวของดวงอาทิตย์.....	31
2.21 ภาพต่อเนื่องของการเกิดคอโรนัลแมสอีเจกชัน.....	32
2.22 ภาพแสดง โครงสร้างและปรากฏการณ์บนดวงอาทิตย์.....	32
2.23 แสดงชั้นย่อยต่าง ๆ ของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	34
2.24 แสดงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลต่อการสื่อสารในย่านความถี่ต่าง ๆ.....	35
2.25 แสดงผลกระทบหลัก ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากความถี่ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	36
2.26 แสดงความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน.....	39
3.1 GPS Antenna.....	41
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในเก็บข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส.....	42
3.3 ภาพส่วนประกอบของระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	43
3.4 แสดงการประมวลผลเพื่อเตรียมข้อมูลดิบให้เป็นข้อมูลที่มีโครงสร้าง.....	41
3.5 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกลูก (Scatter).....	44
3.6 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงการความสัมพันธ์ระหว่าง S4 Sig60 และ TEC กับความคลาดเคลื่อนในการบอกลูก.....	45
3.7 แสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Pseudorange ซึ่งมีผลลดทอนความแม่นยำในการบอกลูกของจีพีเอส.....	47

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 3	54
4.2 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 3 (ต่อ).....	55
4.3 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 3 (ต่อ).....	56
4.4 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 1.....	57
4.5 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 1 (ต่อ).....	58
4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 25 กันยายน 2544	59
4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 3 ตุลาคม 2544.....	60
4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2545.....	61
4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545.....	62
4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545.....	63
4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545.....	64
4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 7 มิถุนายน 2543.....	65
4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับ ความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 25 กันยายน 2544.....	66
4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 3 ตุลาคม 2544.....	67
4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับ ความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2545.....	67
4.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด ของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545.....	68

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545.....	68
4.18 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545.....	69
4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 25 กันยายน 2544.....	73
4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดของจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 25 กันยายน 2544.....	73
4.21 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนเวลา ของวันที่ 25 กันยายน 2544.....	74
4.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 26 กันยายน 2544.....	75
4.23 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดของจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 25 กันยายน 2544.....	75
4.24 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนเวลา ของวันที่ 25 กันยายน 2544.....	76
4.25 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545.....	77
4.26 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดของจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2544.....	77
4.27 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนเวลา ของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545.....	78
4.28 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545.....	79
4.29 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดของจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545.....	79

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่

หน้า

4.30 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบจริงพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนเวลา ของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545.....	80
---	----



บทที่ 1

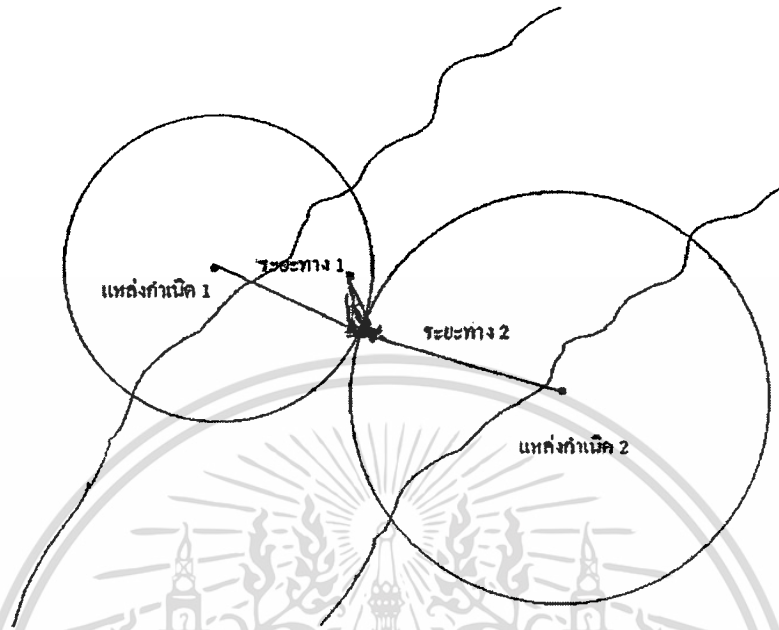
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กิจกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญกับการดำรงชีวิตของมนุษย์ นับตั้งแต่ในอดีตมาจนถึงปัจจุบันคือการเดินทางติดต่อไปมาหาสู่กัน ยังสถานที่ต่างๆ ในอดีตมนุษย์มีการเดินทางเพื่อเสาะแสวงหาแหล่งอาหารที่อุดมสมบูรณ์ หรือเดินทางอพยพย้ายถิ่นฐานเพื่อหลบหนีจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ หรือเพื่อเสาะแสวงหาสิ่งที่ตอบสนองกับภาวะความต้องการพื้นฐานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่นปัจจัย 4 หรือเป็นไปเพื่อการติดต่อค้าขาย แลกเปลี่ยนสินค้า มาจนถึงในปัจจุบันการเดินทางของมนุษย์ก็ยังไม่ได้สิ้นสุดลงแต่ยังคงทวีความสำคัญมากขึ้นกว่าในอดีตหลายเท่า มนุษย์จึงได้พยายามคิดค้นกรรมวิธีและพัฒนาเครื่องมือหรือสิ่งต่างๆ เพื่อช่วยให้การเดินทางติดต่อระหว่างกันให้เกิดความสะดวก และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สิ่งหนึ่งที่นับว่าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการเดินทาง คือสิ่งที่ช่วยบอกได้ว่า การเดินทางที่กำลังเดินทางไปยังตำแหน่งใดหรือ ที่อยู่ ณ ตำแหน่งปัจจุบันนั้น อยู่ในตำแหน่งใด เครื่องมืออย่างแรกของมนุษย์ คือมนุษย์ได้พยายามสังเกตและอาศัยเอาปรากฏการณ์ต่างๆ ในธรรมชาติเป็นเครื่องมือช่วยในการบอกตำแหน่ง (Position) และการนำร่อง (Navigation) กำหนดทิศทางสำหรับการเดินทาง หรือการหาทิศทาง เช่นในอดีตการเดินทางเรือได้อาศัยวิธีการทางดาราศาสตร์ โดยการสังเกตกลุ่มดาวบนท้องฟ้าเพื่อบอกทิศทางของการเดินเรือ ความรู้ทางด้านดาราศาสตร์เพื่อกำหนดตำแหน่งและการนำร่องในการเดินทางนี้มีการถ่ายทอดและเรียนรู้กันต่อ ๆ กันมาในหมู่ของนักเดินทางเป็นเวลายาวนาน เนื่องจากการหาตำแหน่งและการนำร่องด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยการสังเกตกลุ่มดาวบนท้องฟ้า ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของการหาตำแหน่งและการนำร่องด้วยวิธีนี้คือจะทำได้เพียงในเวลากลางคืนของวันที่ท้องฟ้าเปิดสามารถสังเกตกลุ่มดาวต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจนเท่านั้น ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวมนุษย์จึงได้คิดวิธีบอกตำแหน่งให้กับการเดินเรือในบริเวณใกล้ ๆ ชายฝั่งโดยการ ใช้สัญญาณไฟและแหล่งกำเนิดเสียง แต่สัญญาณไฟจะใช้ใช้กับการมองเห็นเท่านั้น จึงใช้แหล่งกำเนิดเสียง เช่นเสียงที่เกิดจากการเป่าจากเขาสัตว์ หรือการตีระฆังบอกเวลา ใช้เป็นแหล่งกำเนิดเสียงอย่างน้อย 2 แหล่งกำเนิด กำเนิดเสียงในช่วงเวลาที่แน่นอนและตรงกัน และจะทำการคำนวณหาตำแหน่งโดยอาศัยการตัดกันของคลื่นเสียงที่มาถึง ณ ตำแหน่งที่เรืออยู่ การหาตำแหน่งโดยวิธีนี้ สิ่งที่สำคัญที่สุดคือจะต้องทราบเวลาจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มาถึงอย่างถูกต้องซึ่งจะทำให้ทราบระยะทางจากแหล่งกำเนิดเสียงที่แท้จริง ยิ่งเวลาที่มาถึงของคลื่นเสียงมีความถูกต้องมากเท่าใดการหาตำแหน่งของเรือจึงจะถูกต้องแม่นยำมากขึ้น หากเวลาที่มาถึงมีการผิดพลาดการคำนวณหาตำแหน่งก็จะคลาดเคลื่อนออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



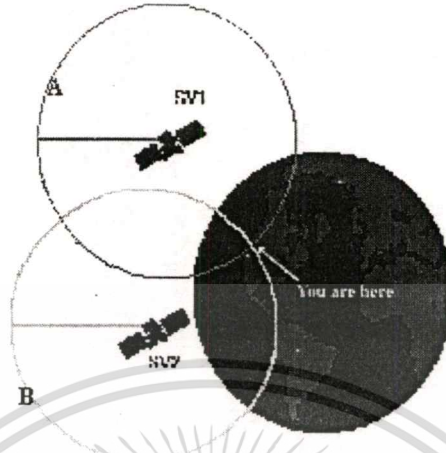
ภาพที่ 1.1 การหาตำแหน่งของเรือจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง 2 แหล่งกำเนิด

ต่อมาในยุคของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการพัฒนาเป็นเครื่องมือช่วยในการหาตำแหน่ง และการนำร่องสำหรับการเดินเรือ แบบใหม่ เรียกว่าระบบ LORAN-C เป็นระบบที่คำนวณหาตำแหน่ง โดยอาศัยการตัดกันของคลื่นวิทยุ แทนคลื่นเสียงแบบเดิมที่มีข้อจำกัดอยู่ที่ระยะทาง โดยการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุไว้ตามที่ต่างๆ และสามารถคำนวณตำแหน่งและระยะทางของตัวเองโดยใช้ความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุตั้งแต่ 2 แหล่งขึ้นไป ซึ่งระบบนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่ใช้ได้บางจุด โดยเฉพาะในบริเวณใกล้ชายฝั่ง ไม่ครอบคลุมพื้นที่ได้ทั่วโลก เนื่องจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุที่ใช้นี้ติดตั้งได้ไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด

เมื่อการพัฒนาการทางด้านกิจกรรมอวกาศก้าวหน้ามากขึ้น ได้มีการส่งดาวเทียมออกไป โคจรนอกโลก จึงมีแนวคิดในการส่งดาวเทียมขึ้นไปเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ ลงมาบนโลก แทนการใช้แหล่งกำเนิดวิทยุที่ติดตั้งบนโลกที่ใช้ได้ในบริเวณแคบ ๆ ในการหาตำแหน่งของตัวเอง ทำให้สามารถใช้งานได้ในบริเวณกว้าง ระบบใหม่นี้เรียกว่าระบบ TRANSIT System หรือ SATNAV (รูปบนนัท นิลรัตน์ และวิเชียร เนียมอ่อน. 2544ก) ซึ่งสามารถบอกตำแหน่งได้ครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าระบบ LORAN-C แต่มีข้อจำกัดอยู่คือระบบ TRANSIT เป็นดาวเทียมวงโคจรของระบบอยู่ในระดับต่ำ และมีจำนวนดาวเทียมในระบบน้อยเกินไปทำให้ระบบใช้งานได้ในพื้นที่บางแห่ง

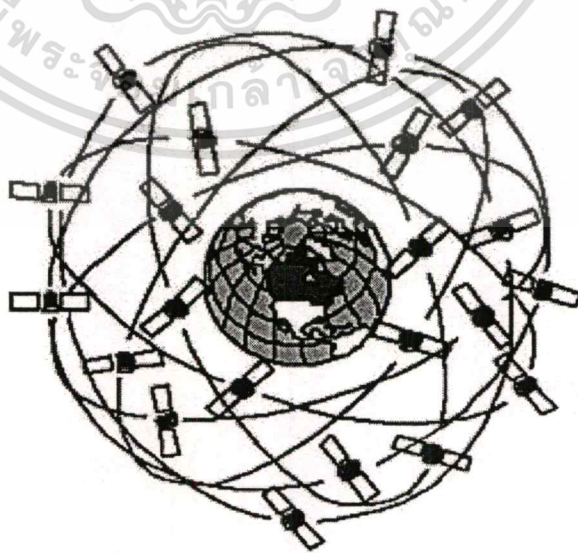
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สามารถรับคลื่นวิทยุจากดาวเทียมได้อย่างชัดเจน และเนื่องจากระบบ TRANSIT ใช้วิธีการวัดคลื่นแบบ Doppler ซึ่งถ้าเครื่องรับสัญญาณมีการเคลื่อนที่ก็จะเกิดความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่ง



ภาพที่ 1.2 การหาตำแหน่งของระบบ TRANSIT จากการใช้ ดาวเทียมในระบบเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 2 แหล่งกำเนิด

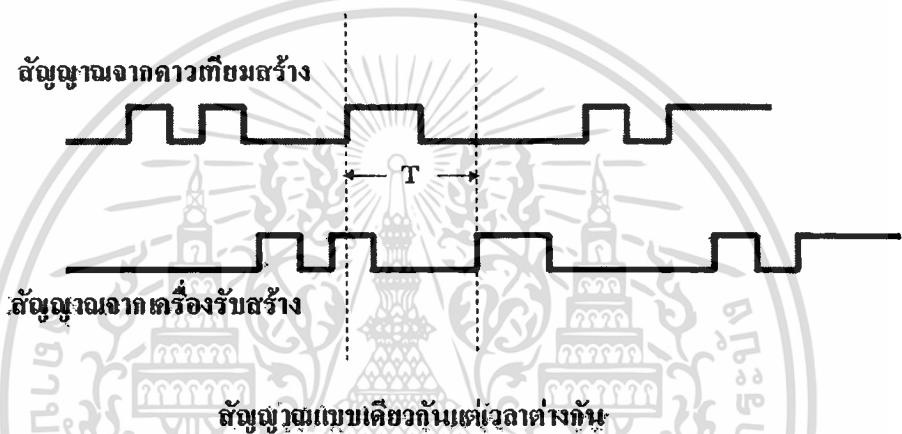
เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดข้อที่เกิดขึ้นในระบบ TRANSIT จึงได้มีการพัฒนาจีพีเอส หรือระบบกำหนดตำแหน่งบน โลก (Global Positioning System : GPS) (คณะกรรมการบัญญัติศัพท์เทคโนโลยีสารสนเทศ. 2544) ซึ่งระบบจะใช้ดาวเทียม NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging) ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยหน่วยงานทางการทหารของสหรัฐอเมริกา จำนวน 24 ดวงโคจรรอบโลกในวงโคจรระดับกลางสูงประมาณ 20,200 ก.ม. เหนือพื้นโลก เป็น 6 วงโคจร แต่ละวงโคจรมีดาวเทียม 4 ดวง



ภาพที่ 1.3 วงโคจรของดาวเทียมจีพีเอส 24 ดวงรอบโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาวเทียมจีพีเอส (GPS Satellite) แต่ละดวงนี้จะกระจายสัญญาณ ที่บอกข้อมูลตำแหน่งของตัวเอง ณ เวลาปัจจุบัน กลับมายังพื้นโลกในรูปของคลื่นวิทยุซึ่ง มี 2 ความถี่คือ คลื่น L1 มีความถี่ 1575.42 MHz และ L2 มีความถี่ 1227.60 MHz และในการคำนวณตำแหน่งบนโลกแต่ละครั้งจะอาศัยข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียม และเวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับของดาวเทียมแต่ละดวง ซึ่งนำมาคำนวณหาระยะทาง ระยะทางที่ได้จึงเรียกว่า Pseudorange (วิชัย ชันดิพร้อมผล. 2536 : 7) หรือ Pseudorange (Novatel Inc. 1999:265) สาเหตุที่เรียกว่า Pseudorange เพราะระยะทางไม่ใช่ระยะทางที่วัดได้จริงๆ แต่เกิดจากการคำนวณจากการนำเอาเวลาที่ได้คู่กับความเร็วที่คลื่นสัญญาณใช้เดินทาง จึงได้ระยะทางจากดาวเทียมจีพีเอสถึงเครื่องรับจีพีเอสออกมา เวลาที่ใช้ในการหาระยะทาง สามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่เครื่องรับจีพีเอสสร้างขึ้นมากับสัญญาณที่ส่งลงมาจากดาวเทียมจีพีเอส



ภาพที่ 1.4 การหาเวลาจากความแตกต่างในด้านเวลา ของสัญญาณแบบเดียวกันที่สร้างจากดาวเทียมจีพีเอสและเครื่องรับจีพีเอส

ผลต่างของเวลาจะมีความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกา หรือ Clock Bias แฝงอยู่ด้วย ซึ่งเวลาที่ได้นี้จะทำให้ทราบระยะทางจากดาวเทียมแต่ละดวงมาถึงเครื่องรับจีพีเอส โดยการนำไปคูณกับความเร็วแสง เพราะคลื่นวิทยุเดินทางด้วยความเร็วแสง(ธีรวัฒน์ อิศรไพโรจน์. 2540 : 10)

$$PR = TOA \times C \tag{1.1}$$

โดยที่

- PR = Pseudorange
- TOA = เวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับจีพีเอส(Time Of Arrival)
- C = ความเร็วแสง

เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสจะใช้ดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง ในการแก้สมการที่สามารถกำหนดเป็น 4 สมการหลัก เพื่อหาค่าของ 4 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งก็คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งในระบบสามมิติตามแกน X, Y และ Z ของเครื่องรับจีพีเอสบนพื้นโลก และค่าความผิดพลาดของเวลาหรือ Clock bias โดยที่ตำแหน่งทางแกน X, Y และ Z คือ ลองจิจูด ละติจูด และ อัลติจูด โดยอาศัยข้อมูลพิกัดตำแหน่ง และเวลาจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับของดาวเทียมแต่ละดวงที่ถูกเลือกมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งให้ความถูกต้องแม่นยำค่อนข้างสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตำแหน่งทางราบต่ำกว่า 50 เมตร โดยคำนวณจากสมการพื้นฐานดังนี้ (Natural Resources Canada. 1993 : 10)

$$P_r^{s1} = \sqrt{(x^{s1} - x_r)^2 + (y^{s1} - y_r)^2 + (z^{s1} - z_r)^2} + error \quad (1.2)$$

สมการสำหรับดาวเทียมดวงที่ 1

โดยที่ P = ระยะทาง = ความเร็วแสง x (เวลาที่รับสัญญาณ - เวลาที่ส่งสัญญาณ)

$$P = C (t_r - t_t) \quad (1.3)$$

$$C = \text{ความเร็วแสง} = 299792458 \text{ m/s}$$

$$P = \text{ระยะทาง} + error$$

$$P = p + error \quad (1.4)$$

เมื่อใส่ตัวแปรจากดาวเทียมทั้ง 4 ดวงเข้าไป

$$\begin{aligned} (P_r^{s1} - error)^2 &= (x^{s1} - x_r)^2 + (y^{s1} - y_r)^2 + (z^{s1} - y_r)^2 \\ (P_r^{s2} - error)^2 &= (x^{s2} - x_r)^2 + (y^{s2} - y_r)^2 + (z^{s2} - y_r)^2 \\ (P_r^{s3} - error)^2 &= (x^{s3} - x_r)^2 + (y^{s3} - y_r)^2 + (z^{s3} - y_r)^2 \\ (P_r^{s4} - error)^2 &= (x^{s4} - x_r)^2 + (y^{s4} - y_r)^2 + (z^{s4} - y_r)^2 \end{aligned} \quad (1.5)$$

โดยที่

x^{s1}, y^{s1}, z^{s1} = พิกัดของดาวเทียมดวงที่ 1

x^{s2}, y^{s2}, z^{s2} = พิกัดของดาวเทียมดวงที่ 2

x^{s3}, y^{s3}, z^{s3} = พิกัดของดาวเทียมดวงที่ 3

x^{s4}, y^{s4}, z^{s4} = พิกัดของดาวเทียมดวงที่ 4

P_r^{s1} = ระยะทางจากดาวเทียมดวงที่ 1 ถึง โลก(มาจากเวลาที่เดินทาง T_1 คูณความเร็วแสง C)

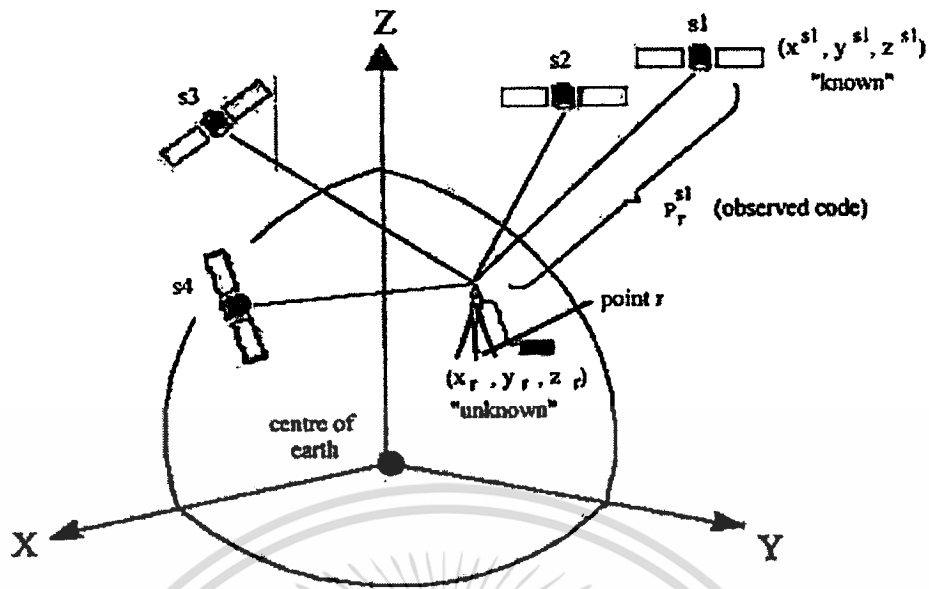
P_r^{s2} = ระยะทางจากดาวเทียมดวงที่ 2 ถึง โลก(มาจากเวลาที่เดินทาง T_2 คูณความเร็วแสง C)

P_r^{s3} = ระยะทางจากดาวเทียมดวงที่ 3 ถึง โลก(มาจากเวลาที่เดินทาง T_3 คูณความเร็วแสง C)

P_r^{s4} = ระยะทางจากดาวเทียมดวงที่ 4 ถึง โลก(มาจากเวลาที่เดินทาง T_4 คูณความเร็วแสง C)

error = ค่าความคลาดเคลื่อนที่อ่านได้ เช่น Clock Bias :CB

x_r, y_r, z_r = ตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส

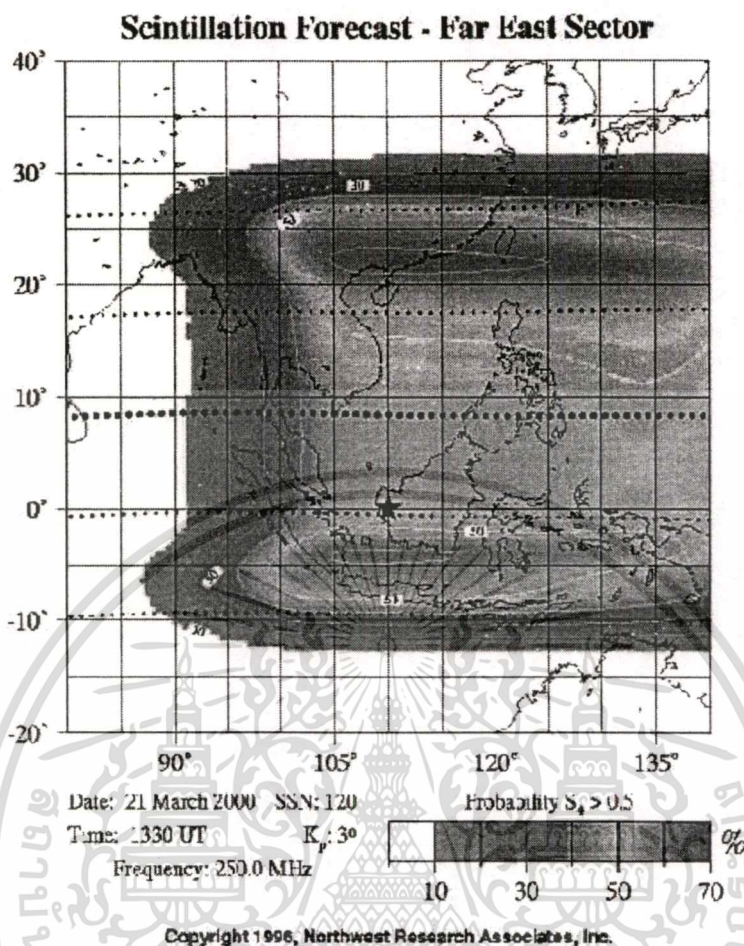


ภาพที่ 1.5 การรับสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอสมาคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส

แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยบางอย่างที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณหาตำแหน่งบนโลกของจีพีเอส นั่นก็คือความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศต่างที่ห่อหุ้มผิวโลกอยู่ โดยเฉพาะชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งทำให้สัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียมจีพีเอสผ่านชั้นบรรยากาศนี้ลงมายังเครื่องรับจีพีเอส มีการผิดพลาดทำให้มีการคำนวณตำแหน่งบนโลกผิดพลาดไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องรับจีพีเอสแบบความถี่เดียว ซึ่งความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หรือ Ionospheric Scintillation นี้จะเกิดขึ้นมากจากปรากฏการณ์ครบรอบ 11 ปีที่จุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot Cycle) มากที่สุด ซึ่งจะทำให้เกิดลมสุริยะมากที่สุดในรอบ 11 ปีด้วย ลมสุริยะนี้ก็คือกลุ่มของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ เมื่อถูกสาดออกมาในระบบสุริยะจักรวาล และกระทบเข้ากับบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ของโลก ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนบนชั้นบรรยากาศ เมื่อมีสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอสเคลื่อนที่ผ่านมาในชั้นบรรยากาศนี้ทำให้ค่าต่างๆ ที่ส่งมาในสัญญาณจีพีเอสเกิดความผิดพลาด โดยจะเกิดการหน่วงเวลาของสัญญาณทำให้เวลาที่ได้มาคำนวณหา Pseudorange ผิดพลาด เมื่อนำ Pseudorange มาคำนวณหาตำแหน่งในสมการทำให้ตำแหน่งที่ได้มาเกิดความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงปี พ.ศ. 2543 – 2545 ซึ่งครบรอบจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์สูงสุดอีกครั้งและจะเกิดความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากที่สุดอีกช่วงหนึ่งในรอบ 11 ปี และบริเวณที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุดคือในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตร (Anderson, 1999 : 106) ซึ่งจะส่งผลถึงความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส โดยเฉพาะความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นมากที่สุดในบริเวณเส้นละติจูดที่ 20 องศาเหนือ และ 20 องศาใต้ (W. Phlawadana, 2001.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.6 ความแปรปรวนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดมากในบริเวณละติจูดที่ 20 องศาเหนือ และ 20 องศาใต้

การบอกตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนของเครื่องรับจีพีเอสนี้มีสาเหตุมาจากความผิดพลาดสองสิ่ง คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งดาวเทียม (Ephemeris Error) และความผิดพลาดของเวลา (Time bias) ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์โดยจะมีผลทำให้เกิดการกระจายตัวคลื่นสัญญาณในช่วงความถี่ L-band หรือ Scintillation ที่เกิดจากความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ นอกจากการหน่วงเวลาแล้วในบางครั้งอาจจะทำให้เครื่องรับจีพีเอสไม่สามารถรับสัญญาณได้ ทำให้ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งลดลง โดยจะเกิดปรากฏการณ์ในสองลักษณะคือ Amplitude Scintillation และ Phase Scintillation ซึ่ง Amplitude Scintillation นี้มีผลทำให้เกิดการหมุนควงของสัญญาณในชั้นบรรยากาศ และข้อมูลที่รับมาจากสัญญาณสูญเสียในบางช่วง ส่วน Phase Scintillation มีผลทำให้สัญญาณมีการเปลี่ยน Phase เร็วมากจนเครื่องรับจีพีเอสไม่สามารถจับสัญญาณได้ (Alison Brown et. al. 2002) ทำให้สัญญาณที่รับได้เกิด

การผิดพลาด และเมื่อนำสัญญาณที่ผิดพลาดมาคำนวณหาตำแหน่ง ทำให้ตำแหน่งที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่เป็นจริง

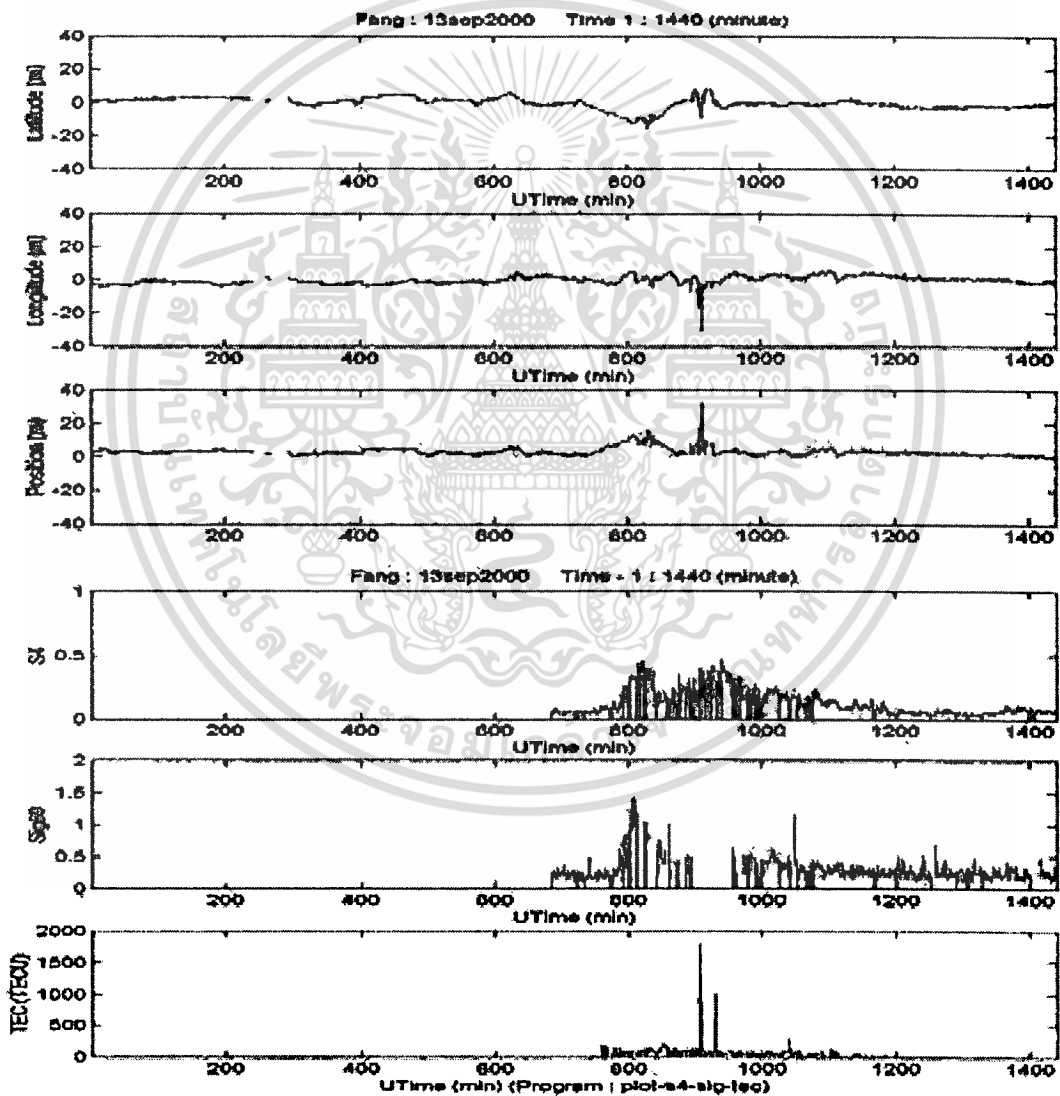
จากสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสที่กล่าวมาข้างต้น นี้พบว่ามีความสัมพันธ์กับปัจจัยบางอย่างซึ่งถ้าทราบได้ว่าปัจจัยตัวใดที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสบ้างแล้วก็สามารถที่จะทำการแก้ไขให้เครื่องรับจีพีเอส มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอส โดยศึกษาจากระยะทางที่เครื่องรับจีพีเอสบอกตำแหน่งคลาดเคลื่อนกับตัวแปรที่เครื่องรับจีพีเอสคำนวณออกมาจากสัญญาณ และบันทึกไว้ในเครื่องสำรองข้อมูลได้แก่ S4 (Scintillation index ที่ 4) หรือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับของสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจีพีเอส (A. J. Vandereendonck and Quyen Hua. 2001a), Sig60 (60-second Phase sigma) หรือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Phase ของสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจีพีเอสในเวลา 60 วินาที (K.M.Groves et. al. 2000 : A. J. Vandereendonck and Quyen Hua. 2001b), ปริมาณอิเล็กตรอนบนชั้นบรรยากาศ Total Electron content หรือ TEC (A. J. Vandereendonck and Quyen Hua. 2001c) และ จำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งในขณะนั้น (Number of Satellite) เหล่านี้เป็นปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสซึ่งออกมาในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนออกจากตำแหน่งจริงทาง ละติจูด (Latitude) ลองจิจูด (Longitude) และ การคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจากละติจูด และลองจิจูด (Absolute Position Error) เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลลดทอนความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส เพื่อที่จะนำเอาปัจจัยเหล่านั้นไปสร้างเป็นฟังก์ชันในรูปแบบของตัวแปร S4, Sig60 และ TEC เข้าคำนวณร่วมกับข้อมูลพิกัดของดาวเทียม และระยะทางจากดาวเทียมจีพีเอสมาถึงเครื่องรับจีพีเอส ในการคำนวณแก้สมการไฮเปอร์โบลิก เพื่อหาค่าตามแกน X, Y และ Z คำนวณหาการหาตำแหน่งเครื่องรับจีพีเอส เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสให้มากขึ้นต่อไป พร้อมทั้งหาข้อสรุปที่เกี่ยวกับ จำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งในขณะเกิดปรากฏการณ์แปรปรวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในสถานะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด
2. เพื่อสร้างสมการจากปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอส เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่งทางละติจูด ลองจิจูด และ Absolute Position Error ในภาวะที่ปรากฏการณ์ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นจากข้อมูลในโครงการศึกษาความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ต่อเครื่องรับจีพีเอส ของศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กองบัญชาการทหารสูงสุด พบว่าระยะทางที่เครื่องรับจีพีเอสบอกตำแหน่งคลาดเคลื่อนพบว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปร S4, Sig60 และ TEC โดยค่ามีค่า Dilution Of Position : DOP เป็นตัวชี้วัดว่าสัญญาณที่เครื่องรับจีพีเอสรับได้และนำมาคำนวณหาตำแหน่งมีความน่าเชื่อถือเพียงใด ดังนั้นในภาวะที่มีค่า DOP ที่เหมาะสมในการคำนวณหาตำแหน่ง S4, Sig60 และ TEC น่าจะเป็นตัวแปรที่เป็นปัจจัยลดทอนความแม่นยำของเครื่องรับจีพีเอสมากที่สุด และสามารถที่จะแก้ไขความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด โดยใช้ฟังก์ชันของ S4, Sig60, TEC

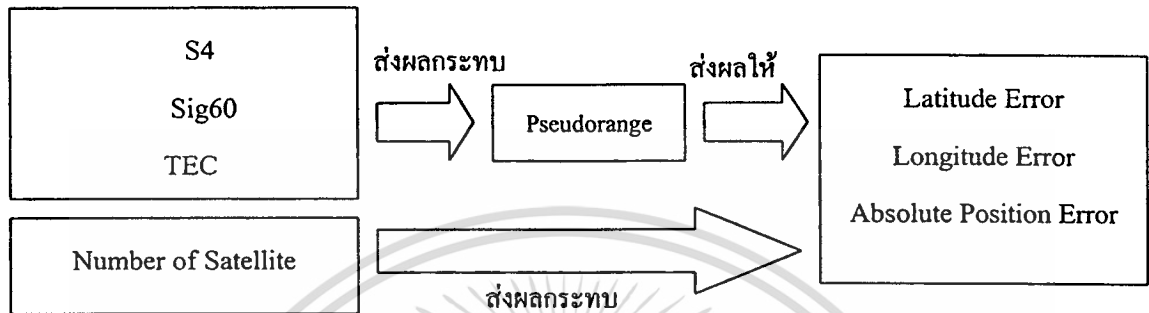


ภาพที่ 1.7 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่งทางละติจูด ลองจิจูด และ Absolute Error เทียบกับ S4, Sig60, TEC, ในช่วงเวลาเดียวกันของวันที่ 13 Sep 2000 เก็บข้อมูลจากสถานีที่ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4. กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการทำการศึกษานี้ปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอส จะศึกษาปัจจัย S4, Sig60, TEC และ Number of satellite ว่าเป็นปัจจัยที่ลดทอนต่อความแม่นยำ โดยจะศึกษาผ่านค่า ความคลาดเคลื่อนทางละติจูด ความคลาดเคลื่อนทางลองจิจูด และ Absolute Position Error



ปัจจัยที่เชื่อว่ามีผลในการลดทอนแม่นยำของจีพีเอส

การบอกตำแหน่งคลาดเคลื่อน

ภาพที่ 1.8 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

จากงานวิจัยของ Anderson D.N. (1999 : 106) ที่แสดงว่าความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นสูงสุดในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรและ โดยเฉพาะในบริเวณเส้นละติจูดที่ 20 องศาเหนือ และ 20 องศาใต้ และเกิดความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศขึ้นพร้อมๆ กัน (R.M.Thomas. et. al. 2001) ดังนั้นในการศึกษานี้ที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอส ในภาวะที่เกิดความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ในครั้งนี้จะทำการติดตั้งสถานีรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลจากดาวเทียมจีพีเอส โดยใช้เครื่องรับจีพีเอสแบบความถี่เดียว ในบริเวณละติจูดที่ 20 องศาเหนือเพียงบริเวณเดียวเท่านั้น คือในบริเวณ ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมพลังงานทหาร สำนักปลัดกระทรวงกลาโหม อ. ผ่าง จ.เชียงใหม่ และ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏเชียงราย อ. เมือง จ.เชียงราย ไม่ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลในบริเวณแถบเส้นศูนย์สูตร และบริเวณ ละติจูดที่ 20 องศาใต้

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องตรงกัน ในการสื่อความหมายของศัพท์เฉพาะ และตัวแปรตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย จึงกำหนดความหมายของคำศัพท์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จีพีเอส (GPS) หมายถึง ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global positioning system) ประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ

1.1 ส่วนอวกาศ คือ ดาวเทียมในระบบที่โคจรรอบโลก 24 ดวง

1.2 ส่วนควบคุม คือ สถานีควบคุมความถูกต้องของตำแหน่งและสัญญาณนาฬิกาของดาวเทียมบนภาคพื้น

1.3 ส่วนผู้ใช้ คือ เครื่องรับจีพีเอสแบบความถี่เดียว L1

2. ปัจจัยลดทอน (Degradation Factors) หมายถึง ตัวแปรที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของจีพีเอสประกอบด้วย

2.1 S_4 (Amplitude Scintillation index ที่ 4) หมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับของสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจีพีเอสเป็นตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะความแปรปรวนไม่สม่ำเสมอของสัญญาณ หาได้จาก (A. J. Vandereendonck and Quyen Hua. 2001d. [Internet])

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}} \quad (1.6)$$

เมื่อ

SI = ระดับของสัญญาณที่มาถึง

$\langle \rangle$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยในเวลา 60 วินาที

2.2 Sig60 (60-Second Phase Scintillation Index) หมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Phase ของสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจีพีเอสในเวลา 60 วินาที (A. J. Vandereendonck and Quyen Hua. 2001e. [Internet])

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \sigma_\phi^2 \rangle} \quad \text{เมื่อ } \phi \text{ คือ เฟสของสัญญาณ} \quad (1.7)$$

2.3 TEC (Total Electron Content) คือ ปริมาณอิเล็กตรอนบนชั้นบรรยากาศที่สัญญาณจีพีเอสแบบความถี่เดียว ผ่านลงมาหาได้จาก (Lao Sheng Lin 1997 : 35)

$$TEC = \frac{1}{40.3} \times \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right)^{-1} \times (p_2 - p_1) \quad (1.8)$$

เมื่อ

f_1 = ความถี่ของคลื่น $L_1 = 1575.42$ MHz

f_2 = ความถี่ของคลื่น $L_2 = 1227.60$ MHz

p_1 = Pseudorange 1

p_2 = Pseudorange 2

2.4 Number of Satellite หมายถึง จำนวนของดาวเทียมที่รับได้และนำสัญญาณที่ได้ คำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส

3. Pseudorange หมายถึงระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับจีพีเอส เป็นตัวแปรในการ คำนวณหาตำแหน่งบนพื้นโลก

4. ความแม่นยำของจีพีเอส หมายถึงการบอกตำแหน่งบนโลกที่มีความคลาดเคลื่อนค่าโดย พิจารณาจากระยะทางที่คลาดเคลื่อนออกมาจากค่าตำแหน่งทั้งหมดที่คำนวณได้เฉลี่ย ทางละติจูด (Latitude Error), ทางลองจิจูด (Longitude Error) และทางตำแหน่ง (Absolute Position Error)

$$Absolute\ Position\ Error = \sqrt{(\overline{lat} - \overline{lat})^2 + (\overline{lon} - \overline{lon})^2} \quad (1.9)$$

5. ความคลาดเคลื่อน หมายถึง ระยะทางซึ่งเป็นผลต่างของตำแหน่งที่คำนวณและ ตำแหน่งเฉลี่ยทั้งหมดตามช่วงเวลาที่กำหนด

6. DOP (Dilution of Position) คือ ค่าที่แสดงถึงความน่าเชื่อถือของสัญญาณจีพีเอสที่รับ เข้ามาคำนวณหาพิกัด

7. ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) หมายถึง ชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่ มี ขอบเขตประมาณ 80 กม. ถึง 1000 กม.หรือมากกว่านั้น(Boonsap Witchayangkoon. 2000 : 22) เหนือ ชั้นจากพื้นโลก เป็นชั้นที่ประกอบด้วยก๊าซไอโอไนซ์เรียกว่า พลาสมา โดยในธรรมชาติชั้นนี้ประกอบด้วยประจุบวก(ไอออน) และประจุลบ(อิเล็กตรอน) อยู่ในปริมาณที่เท่ากัน

8. ความแปรปรวนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scintillation) หมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เมื่อมีสัญญาณวิทยุผ่าน เข้ามา หรือมากระทบ ทำให้เกิดการ สะท้อนกลับ ไปกลับมา หมุนควงเป็นวง หรือเกิดการเลี้ยวเบนของ สัญญาณ

9. Scintillation Numsats หมายถึง จำนวนของดาวเทียมที่รับได้โดยส่งสัญญาณผ่านชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงที่เกิดความแปรปรวน(Ionospheric Scintillation) และนำสัญญาณ คำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส โดยมีเงื่อนไขดังนี้ คือ

9.1 Amplitude Scintillation หรือ ความแปรปรวนทางแอมพลิจูด เงื่อนไขของการ เกิดปรากฏการณ์นี้คือ ดาวเทียมดวงนั้นจะต้องมีมุมเงย (Elevation) ของดาวเทียมมากกว่า 15 องศา และ S4 มีค่ามากกว่า 0.3

9.2 Phase Scintillation หรือ ความแปรปรวนทางเฟส เงื่อนไขของการเกิดปรากฏ การณ์นี้คือ ดาวเทียมดวงนั้นจะต้องมีมุมเงย (Elevation) ของดาวเทียมมากกว่า 15 องศา และ Sig60 มีค่า มากกว่า 1

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและกำหนดแนวทางในการดำเนินการวิจัย โดยทำการศึกษาตามรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

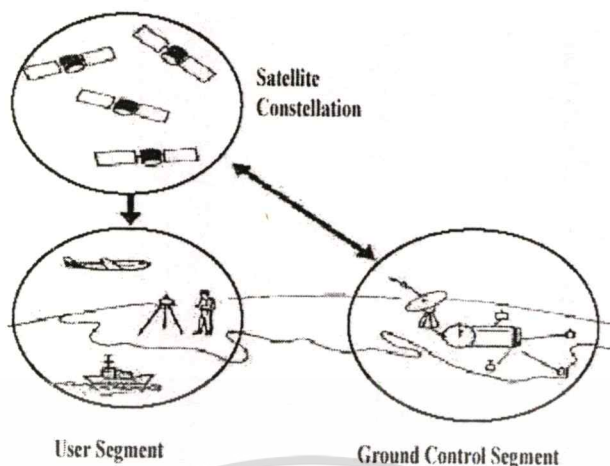
- 2.1. จีพีเอส
- 2.2. การบอกตำแหน่งของจีพีเอส
- 2.3. ปรัชญาการณบนดวงอาทิตย์
- 2.4. ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
- 2.5. ผลกระทบต่อความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อสัญญาณดาวเทียม

2.1. จีพีเอส

ตามความหมายที่ คณะกรรมการบัญญัติศัพท์เทคโนโลยีสารสนเทศ ราชบัณฑิตยสถานได้ให้ความหมายไว้ในการประชุมครั้งที่ 5/2541 1 พฤษภาคม 2541 ว่า“ GPS (Global Positioning System) คือ จีพีเอส (ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก)” (คณะกรรมการบัญญัติเทคโนโลยีสารสนเทศ ราชบัณฑิตยสถาน. 2543) จีพีเอสถูกพัฒนาขึ้นมาโดยหน่วยงาน The United States Department of Defence (DOD) ของสหรัฐอเมริกา ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งในที่ต่าง ๆ บนโลกด้วยดาวเทียม โดยการใช้ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุลงมายังโลก เมื่อเครื่องรับจีพีเอสรับสัญญาณได้ จึงเอาข้อมูลต่างๆ ที่มากับสัญญาณจีพีเอสไปคำนวณหาตำแหน่ง เพื่อประโยชน์ทางการทหาร และหน่วยงานราชการบางหน่วยของสหรัฐอเมริกา และพัฒนาระบบจนสมบูรณ์ในปี 1993 ในขณะที่ระบบยังไม่สมบูรณ์ แต่ได้มีการใช้อย่างจริงจังครั้งแรกในช่วงสงครามอ่าว ในปี 1991 ต่อมาจึงเปิดโอกาสให้ภาคเอกชน และหน่วยงานต่างๆ นำระบบไปใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก แต่ DOD ยังเปิดสัญญาณ Selective Available : SA เพื่อลดความถูกต้องของการบอกตำแหน่งเพื่อประโยชน์ทางการทหาร และต่อมาได้ทำการปิดสัญญาณ SA เมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม 2000 ด้วยเหตุผลทางการตลาดในการแข่งขันกับคู่แข่งในการพัฒนาของระบบบอกตำแหน่ง ทำให้การบอกตำแหน่งของจีพีเอสมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จีพีเอสประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้คือ (Natural Resources Canada. 1995 : 3)

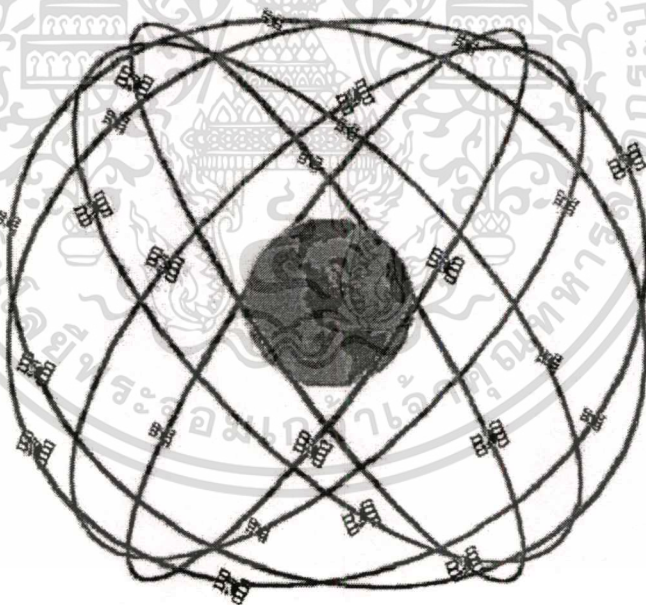
1. ส่วนอวกาศ
2. ส่วนสถานีควบคุม
3. ส่วนผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบ 3 ส่วนของจีพีเอส

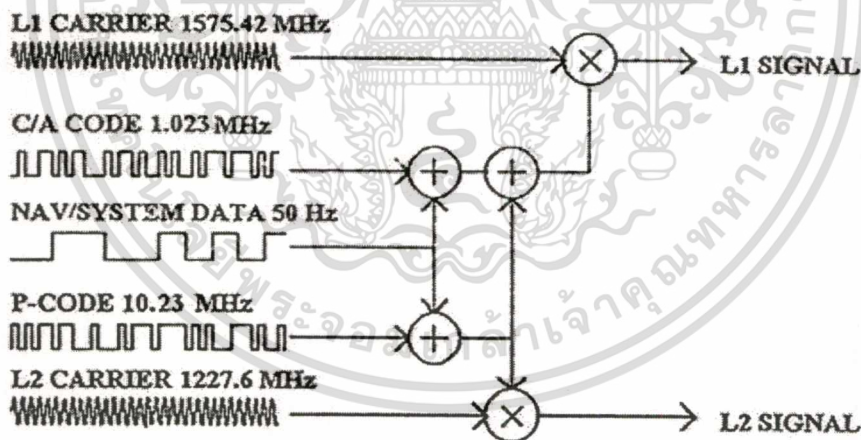
2.1.1 ส่วนอวกาศ Satellite Constellation ของระบบจีพีเอส ประกอบไปด้วยดาวเทียม 24 ดวง โคจรรอบโลก 20,200 กม. โดยประมาณ ด้วยวงโคจร Non-Geostationary orbit 6 วงโคจร แต่ละวงประกอบด้วยดาวเทียม 4 ดวง แต่ละวงโคจรเอียงทำมุม 55 องศา



ภาพที่ 2.2 แสดงวงโคจรของดาวเทียมจีพีเอส

การบอกตำแหน่งบนพื้นโลกจะรับสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวงถ้ามีมุมเงย 15 องศาขึ้นไป และจะสามารถรับสัญญาณได้ถึง 12 ดวงถ้ามีมุมเงย 5 องศา ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของจีพีเอสเกิดขึ้นการใช้สัญญาณนาฬิกาที่มีความเที่ยงตรงสูง และตรงกันระหว่างเครื่องรับจีพีเอสกับดาวเทียมจีพีเอส ซึ่งในจีพีเอสนี้จะใช้สัญญาณนาฬิกาจากอะตอม ในดาวเทียม GPS Block II จะมีนาฬิกาเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมแบบรูบิเดียม 2 เครื่อง และแบบซีเซียม 2 เครื่องซึ่งจะให้ความผิดพลาดต่อวันไม่เกิน 10^{-14} วินาที (เนื่องจากความผิดพลาดของเวลาเพียง 10^{-9} วินาทีจะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งถึง 30 เซนติเมตร) ดาวเทียมจะใช้สัญญาณจากนาฬิกาสร้างเป็น Clock สร้างความถี่พื้นฐาน 10.23 MHz แล้วสร้างความถี่พื้นฐานในแบนด์ L_1 และ L_2 โดยการคูณความถี่พื้นฐานด้วย 154 และ 120 ดังนั้นความถี่ของคลื่นพาห้ในแบนด์ L_1 จะเท่ากับ 1,575.42 MHz และความถี่ของคลื่นพาห้ในแบนด์ L_2 จะเท่ากับ 1,227.60 MHz การคำนวณหาระยะทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับเรียกว่า Pseudo-Range จะคำนวณจากระยะเวลาที่สัญญาณทั้งสองที่อยู่ในรูป Pseudorandom Noise (PRN) Code ที่ผสมเข้ากับคลื่นพาห้ทั้งสองแบนด์เดินทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ สัญญาณรหัสแรกที่ส่งเรียกว่า C/A Code (Coarse/Acquisition Code) เป็นสัญญาณที่อนุญาตให้บุคคลทั่วไปใช้งาน สัญญาณจะผสมออกมาที่แบนด์ L_1 เท่านั้น สัญญาณรหัสที่สองคือ P-Code (Precision Code) เป็นสัญญาณที่ใช้ในทางทหารสหรัฐและบุคคลที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น สัญญาณที่ผสมจะออกมาทั้ง 2 แบนด์คือ L_1 และ L_2 ทำให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำกว่า ซึ่งก็มีการเข้ารหัสไว้เพื่อรักษาความปลอดภัยของการทหารสหรัฐอเมริกา ในคลื่นพาห้ L_1 นั้นใช้สำหรับการส่งสัญญาณทั้ง 2 แบบจึงต้องมีการชิพท์เฟสของแคเรียร์ เพื่อมิให้ให้สัญญาณรบกวนกัน หลังจากรหัส PRN จะมีข้อมูลอื่นๆ ที่ผสมมาในสัญญาณด้วย ได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับวงโคจรดาวเทียม สัมประสิทธิ์สภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สภาพการใช้งานของดาวเทียม เวลาของระบบ และสัญญาณเวลาของดาวเทียม เป็นต้น (กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา. 2540 : 32-33ก)



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะการมอดคูเลตสัญญาณของจีพีเอส

P-Code และ C/A Code นั้นได้ถูกออกแบบมาเพื่อไม่ให้มีการรบกวนกัน โดย P-Code จะถูกมอดคูเลตกับคลื่นพาห้พร้อม ๆ กับ C/A Code ที่ถูกมอดคูเลตกับสัญญาณของคลื่นพาห้ที่ถูกชิพท์เฟสไป 90 องศา โดยสัญญาณของคลื่นพาห้ที่ถูกมอดคูเลตไปทั้งสองนี้จะรวมกันด้วยวิธี Phase Quadrature และข้อมูลที่ถูส่งมาจากดาวเทียมนั้นจะถูก Modulo-2 ลงบน P-Code หรือ C/A Code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

State sequence ของ P-Code, C/A Code และ navigation message คือ $P(t)$, $C/A(t)$ และ $D(t)$ ตามลำดับ โดยการมอดคูเลตคลื่นพาห์แสดงได้ดังต่อไปนี้ (อรอนงค์ เพชรนิ่ม. 2542 : 37-38ก)

$$L_1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos f_1(t) + a_1 C/A(t) D(t) \sin f_1(t) \quad (2.1)$$

$$L_2(t) = a_1 P(t) D(t) \cos (f_2 t) \quad (2.2)$$

และการอันมอดคูเลตคลื่นพาห์โดย

$$L_i(t) = a_i \cos (f_i t) \quad (2.3)$$

2.1.2 ส่วนสถานีควบคุม Ground Control Segment สถานีควบคุมนี้จะมินาฬิกาอะตอมแบบซีเซียมที่มีความแม่นยำสูงและเครื่องรับที่สามารถคำนวณ P-Code Pseudo-Range ของดาวเทียมทุกดวงรับสัญญาณได้ ข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการจะถูกคำนวณแล้วส่งไปให้สถานีควบคุม ซึ่งจะนำข้อมูลมาหาตัวแปรต่าง ๆ แล้วส่งกลับไปยังดาวเทียมจีพีเอสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ในส่วนของสถานีควบคุมนี้จะประกอบไปด้วย 5 สถานีย่อย (รูปบนนท นิลรัตน์และวิเชียร เนียมอ่อน. 2544ข) เป็น Monitor station ตั้งอยู่ที่เมือง Diego Garsia, Ascension Island, Kwajalien และ Hawaii ส่วนสถานีควบคุมหลัก 1 สถานีทำหน้าที่เป็นศูนย์ควบคุมการทำงานของระบบดาวเทียมจีพีเอสตั้งอยู่ที่เมือง Colorado Springs รัฐ Colorado สหรัฐอเมริกา

Peter H. Dana 5/27/95



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

ภาพที่ 2.4 แสดงที่ตั้งของสถานีควบคุมดาวเทียมจีพีเอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ส่วนผู้ใช้ User Segment หรือเครื่องรับจีพีเอส (รูปบนนท นิลรัตน์ และวิเชียร นิยม-อ่อน. 2544ค) แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ เครื่องประเภทที่สามารถรับดาวเทียมได้ 4 ดวง หรือมากกว่า ได้พร้อมกันทีเดียว กับเครื่องที่มีการรับดาวเทียม โดยการเรียงลำดับ และแต่ละกลุ่มยังแบ่งย่อยได้อีกคือ

2.1.3.1. เครื่องรับแบบเรียงลำดับสัญญาณดาวเทียม ปกติเครื่องรับจีพีเอสจะต้องมี ข้อมูลจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง จึงสามารถคำนวณหาตำแหน่งที่ได้ เครื่องรับจีพีเอสที่ใช้เรียงลำดับ ใช้ช่องรับสัญญาณเพียงช่องเดียว รับข้อมูลจากดาวเทียมดวงหนึ่งระยะหนึ่งแล้วเปลี่ยนไปยังอีกดวงหนึ่ง เครื่องประเภทนี้จะมีแผงวงจรเล็ก ดังนั้นจึงมีราคาถูกและใช้กำลังน้อย ข้อเสียของการเรียงลำดับ สัญญาณอาจเกิดขาดตอนและทำให้มีผลต่อความถูกต้องของผลที่ได้ ในกลุ่มนี้จะมี "Starved Power" Single-Channel Receivers, Two Channel Receivers และ Fast-Multiplexing Single Receivers

1) Starved-Power Single Receivers เครื่องแบบนี้ออกแบบให้พกพาได้และ สามารถทำงานได้ด้วยถ่านไฟฉายขนาดเล็ก การจำกัดการใช้กระแสไฟโดยให้ปิดการทำงานตัวเองโดย อัตโนมัติเมื่อแสดงตำแหน่งครั้งสองครั้งใน 1 นาที เหมาะสำหรับใช้งานบอกตำแหน่งส่วนตัว เช่น นักไต่เขาหรือเล่นเรือในเวลากลางวัน โดยไม่ต้องมีแบตเตอรี่ไฟฉายหลายก้อน นับว่าเป็นเครื่องที่ใช้ การได้สามารถให้ความถูกต้องที่ดีกว่าระบบ LORAN ทำงานได้ทุกที่บนโลก ข้อเสียคือความถูกต้อง ของจีพีเอสไม่ดี ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์อื่นไม่ได้ และไม่สามารถใช้ในการวัดหาความเร็วได้ การที่หา ความเร็วไม่ได้เนื่องจากต้องปิดเครื่องเองในระหว่างการวัด เพราะว่าเครื่องใช้แผงวงจรรนาฬิกาที่ใช้ไฟ น้อย (นาฬิกาจะต้องเดินอยู่ตลอดเวลา) นาฬิกาที่ใช้จึงไม่ให้ความถูกต้องเท่าที่ควร

2) Single Channel Receivers เหมือนกับแบบ Starved-Power Single Receivers เป็นเครื่องรับสัญญาณห้องเดียวใช้ทำงานหาระยะจากดาวเทียมทุกดวง แต่ที่ไม่เหมือนกันคือเครื่องรับ ช่องเดียวแบบมาตรฐานไม่จำกัดที่กัลังไฟ ดังนั้นจึงทำการรับต่อเนื่องได้ มีผลทำให้ความถูกต้องสูงกว่า และใช้วัดหาความเร็วได้ จากที่มีเพียงช่องเดียวที่ต้องใช้ทั้งการรับข้อมูลดาวเทียมและคำนวณหาระยะ จึงไม่สามารถหาตำแหน่งต่อเนื่องได้ ยิ่งกว่านั้นตามเหตุผลของวิชาการ ความไม่เที่ยงตรงของนาฬิกา มีผลโดยตรงต่อความถูกต้องของการวัดหาความเร็ว เครื่องราคาถูกบางชนิดใช้นาฬิการาคาถูกเพื่อให้ ราคาเครื่องลดลงจึงทำให้ค่าความเร็วที่แสดงมาเชื่อถือไม่ได้

3) Fast-Multiplexing Single Receivers เครื่องประเภทนี้เหมือนกับเครื่องทั้ง สองประเภทข้างที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งรับซ้ำ แต่เครื่องรับนี้สามารถเปลี่ยนดาวเทียมได้เร็วกว่ามาก ข้อดี คือ สามารถทำการวัดได้ในขณะที่กำลังรับข้อมูลจากดาวเทียม ดังนั้นเครื่องทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และ การที่มีนาฬิกาไม่เที่ยงตรงจึงมีผลต่อเครื่องประเภทนี้น้อย เครื่องแบบนี้ต้องการใช้แผงวงจรที่ค่อนข้าง ซับซ้อนและราคาพอ ๆ กับเครื่องแบบสองช่องรับสัญญาณที่ใช้เครื่องซึ่งให้ความถูกต้องสูงกว่าและมี ลักษณะการยืดหยุ่นการใช้งานได้ดีกว่า

4) **Two-Channel Sequencing Receivers** การเพิ่มช่องรับสัญญาณขึ้นอีกหนึ่งช่องช่วยให้เครื่องเพิ่มขีดความสามารถขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ข้อหนึ่งความแรงสัญญาณ Signal-to-Noise เป็นสองเท่าทันที หมายถึงสามารถจับสัญญาณภายใต้สภาวะที่ไม่ดีได้และสามารถรับความถี่ความถี่ที่อยู่ระดับต่ำใกล้เคียงขอบฟ้าได้ จากการศึกษาที่ช่องหนึ่งสามารถรับข้อมูลตำแหน่งอย่างต่อเนื่องได้ในขณะที่อีกช่องหนึ่งค้นหาความถี่ความถี่ต่อไป เครื่องแบบสองช่องนี้จะทำงานแบบนาร์รองได้โดยไม่ต้องมีการขาดตอน และความเร็วก็จะมีค่าที่ถูกต้องขึ้น ความจริงเครื่องรับสองช่องที่มีคุณภาพดีก็สามารถใช้คำนวณหาและตัดค่าที่เวลาของนาฬิกาเครื่องรับไม่ดีทิ้งเพื่อใช้ในการวัดหาความเร็ว ข้อเสีย ของเครื่องแบบสองช่องคือ มีราคาสูงกว่าและกินไฟมากกว่า ในเครื่องรับรุ่นใหม่บ้างก็มักใช้ แบบ IC ที่สามารถเพิ่มช่องรับสัญญาณที่สอง และมีราคาสูง เครื่องแบบสองช่องยังมีราคาแพงกว่าเครื่องแบบช่องเดียวมาก ทั้งนี้ เนื่องจากผู้ใช้เครื่องรับจีพีเอสสองช่องมักต้องการความถูกต้อง ต้องการเครื่องที่แข็งแรง และสามารถควบคุมสังเกตการณ์แสดงผลที่ดีกว่า

2.1.3.2. เครื่องรับแบบ **Continuous Receivers** ได้แก่เครื่องรับที่สามารถรับสัญญาณความถี่พร้อมกัน ได้ตั้งแต่ 4 ความถี่ขึ้นไป และสามารถแสดงผลค่าตำแหน่งและความเร็วได้ทันที การรับสัญญาณความถี่ได้ทั้ง 4 ความถี่ พร้อมกับที่มีค่าในการวัดหาในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งรวดเร็วหรือต้องการความถูกต้องสูง ดังนั้นเครื่องแบบนี้จึงนำมาใช้ในงานรังวัดและทางด้านวิทยุ ซึ่งจะพบว่าจะมีช่องรับสัญญาณทั้ง 4, 5, 8, 10 และ 12 ช่อง นอกจากนี้ข้อดีที่ใช้วัดตำแหน่งอย่างต่อเนื่องได้แล้ว เครื่องรับจีพีเอสแบบหลายช่องสามารถช่วยขจัดปัญหา GDOP ได้อีกด้วย คือแทนที่จะรับความถี่ 4 ความถี่ก็ได้จะคำนวณหาค่า GDOP ความถี่ 4 ความถี่ของกลุ่มความถี่ที่ขึ้นอยู่ และทำการวัดจากดาวกลุ่มที่มีค่า GDOP ต่ำสุด เครื่องรับ 4 ช่องสัญญาณ สามารถให้ค่า Signal to Noise Ratio เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของเครื่อง 2 ช่อง และเป็นสี่เท่าของเครื่องรับแบบช่องเดียว และโดยการเปรียบเทียบค่าการรับสัญญาณของแต่ละช่อง เครื่องสามารถปรับตั้งค่าพิสัยระหว่างช่องรับสัญญาณ ซึ่งช่วยทำให้การวัดมีความถูกต้องดีขึ้น นอกเหนือจากข้อดี ข้อเสียที่กล่าวแล้ว ยังมีข้ออื่นมาพิจารณาอีกคือ มีเครื่องแบบใหม่สามารถได้ค่าความถูกต้องสูงมาก โดยการใช้อัลกอริทึม Pseudo Random ที่กล่าวมาแล้ว และใช้ความถี่ของคลื่นพาหะ ซึ่งทำให้เครื่องรับทำงานมีความเที่ยงสูง ที่รหัส Pseudo Random ไม่สามารถให้ได้ และใช้ในการวัดหาเวลาได้แม่นยำมากขึ้น ซึ่งช่วยในการบอกตำแหน่งได้ดีขึ้นด้วย และมีบางเครื่องที่ไม่ต้องใส่ค่าประมาณตำแหน่งและเวลาโดยประมาณให้เครื่องก่อนทำการวัด เครื่องรับแบบนี้ใช้ตัวเองใส่ค่าเริ่มต้นตำแหน่งได้โดยตัวมันเอง ข้อที่ควรพิจารณา คือการต่อเชื่อมกับอุปกรณ์อื่นและความสะดวกบางเครื่องแสดงได้เฉพาะพิกัดภูมิศาสตร์ บางเครื่องไม่สามารถต่อเข้ากับเครื่องมืออื่นหรือคอมพิวเตอร์ได้ และมีข้อใหญ่ที่ต้องพิจารณาอีกข้อคือ ความแข็งแรงทนทานถ้าต้องใช้เครื่องทำงานในพื้นที่ทะเล หรือในพื้นที่ป่าเขา การใช้ไฟและความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นตัวที่สำคัญที่จะต้องเอาใจใส่ ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าอัตราของค่าความผิดพลาดจะเพิ่มเป็นสองเท่าของความร้อนในเครื่องที่เพิ่มทุก 7 องศาฟาเรนไฮต์ เครื่องรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จีพีเอสรุ่นใหม่ปัจจุบันได้เพิ่มคุณค่าให้แก่เครื่องรับจีพีเอสอีกหลายประการ เช่น ใช้การประมวลผลที่มีความซับซ้อน แสดงผลด้วยจอภาพรายละเอียด เครื่องรับจีพีเอส อาจแสดงจุดตำแหน่งบนแผนที่ที่ได้วาดไว้แล้วให้เห็นทันที

2.2 การบอกตำแหน่งของจีพีเอส

หลักการทำงานในการบอกตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสคือการรับเอาสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอสอย่างน้อย 4 ซึ่งสัญญาณที่รับมานี้จะทำให้ทราบข้อมูลที่สำคัญต่อการคำนวณตำแหน่งสองอย่าง คือ ตำแหน่งของดาวเทียมแต่ละดวง และ เวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึง ซึ่งจะทำให้ทราบระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับจีพีเอส โดยการนำเอาเวลาที่ได้หลังจากตัดความคลาดเคลื่อนของเวลา มาคูณกับความเร็วแสง ระยะทางที่ได้นี้คือ Pseudorange มาทำการแก้สมการเพื่อหาค่าที่ไม่ทราบค่า จากสมการ (อรอนงค์ เพชรนิ่ม 2542 : 43ข)

$$\begin{aligned} (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 &= [c \times (t_1 - t_0)]^2 \\ (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 &= [c \times (t_2 - t_0)]^2 \\ (X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2 &= [c \times (t_3 - t_0)]^2 \\ (X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2 &= [c \times (t_4 - t_0)]^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง

X_1, Y_1, Z_1 คือตำแหน่งของดาวเทียมดวงที่ 1

X_2, Y_2, Z_2 คือตำแหน่งของดาวเทียมดวงที่ 2

X_3, Y_3, Z_3 คือตำแหน่งของดาวเทียมดวงที่ 3

X_4, Y_4, Z_4 คือตำแหน่งของดาวเทียมดวงที่ 4

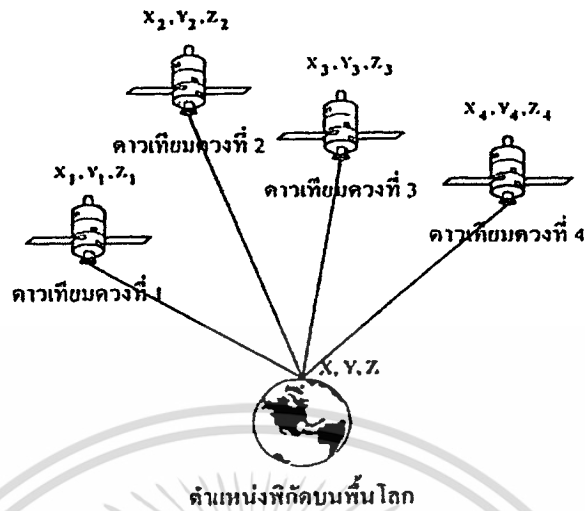
t_0 คือค่าเวลาที่ผิดพลาดของดาวเทียมกับเครื่องรับจีพีเอส

t_1 คือเวลาที่สัญญาณดาวเทียมดวงที่ 1 มาถึงเครื่องรับ

t_2 คือเวลาที่สัญญาณดาวเทียมดวงที่ 2 มาถึงเครื่องรับ

t_3 คือเวลาที่สัญญาณดาวเทียมดวงที่ 3 มาถึงเครื่องรับ

t_4 คือเวลาที่สัญญาณดาวเทียมดวงที่ 4 มาถึงเครื่องรับ



ภาพที่ 2.5 การคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอส

ในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับจีพีเอสบนพื้นโลกนี้ Bancroft ได้อธิบายการแก้สมการเพื่อหาค่า 4 ตัวแปรจากสมการ 4 สมการด้วยวิธี Least-Squares Solution ดังนี้ (Bancroft S. 1985 : 56-59) จากสมการพื้นฐาน

ระยะทางจากดาวเทียมแต่ละดวงถึงเครื่องรับ

$$\rho_i = C(T_i - t_r) \quad [\text{meters}] \quad (2.5)$$

เมื่อ C = ความเร็วแสง = 299792458 m/s

นำข้อมูลข้อมูลที่รับได้จากดาวเทียม i มาสร้างเป็นเวกเตอร์แถวเดียว

$$\vec{s}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ \rho_i \end{bmatrix} \quad (\text{ข้อมูลข้อมูลที่รับได้จากดาวเทียม } i) \quad (2.6)$$

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ b \end{bmatrix} \quad (\text{ตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าของเครื่องรับ}) \quad (2.7)$$

ระยะทาง Pseudo-range จากจากดาวเทียม i แต่ละดวงถึงเครื่องรับ

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + b = \rho_i \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวม ความคลาดเคลื่อนในสมการ

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = (\rho_i - b)^2 \quad (2.9)$$

กระจายสมการ

$$x_i^2 - 2x_i x + x^2 + y_i^2 - 2y_i y + z_i^2 - 2z_i z = \rho_i^2 - 2\rho_i b + b^2 \quad (2.10)$$

ย้ายข้างสมการ

$$(x_i^2 - y_i^2 + z_i^2 - \rho_i^2) - 2(x_i x + y_i y + z_i z - \rho_i b) + (x^2 + y^2 + z^2 - b^2) = 0 \quad (2.11)$$

จากเวกเตอร์ Loren inner product

$$\langle \vec{u}, \vec{v} \rangle = u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3 - u_4 v_4 \quad (2.12)$$

แปลงเวกเตอร์ของสมการให้อยู่ในรูปของ เวกเตอร์ Loren inner product

$$\langle \vec{s}_i, \vec{s}_i \rangle - 2\langle \vec{s}_i, \vec{u} \rangle + \langle \vec{u}, \vec{u} \rangle = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{2}\langle \vec{s}_i, \vec{s}_i \rangle - \langle \vec{s}_i, \vec{u} \rangle + \frac{1}{2}\langle \vec{u}, \vec{u} \rangle = 0 \quad (2.14)$$

นำค่าที่ได้จากตามเทียบแต่ละดวงมาจัดให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์

$$B = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -\rho_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & -\rho_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & -\rho_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 & -\rho_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \vec{a} = \begin{bmatrix} \langle \vec{s}_1, \vec{s}_1 \rangle \\ \langle \vec{s}_2, \vec{s}_2 \rangle \\ \langle \vec{s}_3, \vec{s}_3 \rangle \\ \langle \vec{s}_4, \vec{s}_4 \rangle \\ \vdots \end{bmatrix}, \vec{e} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix}, \Delta = \frac{1}{2}\langle \vec{u}, \vec{u} \rangle \quad (2.15)$$

เมื่อ B คือ เมตริกซ์ n x 4 สามารถจะสร้างเมตริกซ์จาก n สมการพร้อมๆกันจากสมการ (2.14)

$$\vec{a} - B\vec{u} + \Delta\vec{e} = 0 \quad (2.16)$$

หรือ $B\vec{u} = (\vec{a} + \Delta\vec{e}) \quad (2.17)$

หาค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจาก

$$\vec{u}^* = B^+(\vec{a} + \Delta\vec{e}) \quad \text{เมื่อ} \quad B^+ = (B^T B)^{-1} B^T \quad (2.18)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\Delta = \frac{1}{2}\langle B^+(\vec{a} + \Delta\vec{e}), B^+(\vec{a} + \Delta\vec{e}) \rangle, B^+ = \frac{1}{2}\langle B^+\vec{a}, B^+\vec{a} \rangle + \Delta\langle B^+\vec{a}, B^+\vec{a} \rangle + \frac{1}{2}\Delta^2\langle B^+\vec{e}, B^+\vec{e} \rangle \quad (2.19)$$

$$\Delta^2\langle B^+\vec{e}, B^+\vec{e} \rangle + \Delta 2\langle B^+\vec{a}, B^+\vec{a} \rangle - 1 + \langle B^+\vec{a}, B^+\vec{a} \rangle = 0 \quad (2.20)$$

แก้สมการเพื่อหาค่าของเวกเตอร์ \vec{u}_1^*, \vec{u}_2^* เพื่อหาค่า X Y Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปรากฏการณ์จากดวงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศโลก

การทำการศึกษาความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งความแปรปรวนนี้มีส่วนมาจากปรากฏการณ์จากดวงอาทิตย์ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงสาเหตุและที่มาของความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศที่จะส่งผลกระทบต่อถึงความแม่นยำในการบอกพิคซ์ของจีพีเอส จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจกับดวงอาทิตย์และปรากฏการณ์ต่างๆ บนดวงอาทิตย์เสียก่อน

ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซร้อนจัดขนาดใหญ่ ที่รวมตัวเป็นทรงกลมอยู่ได้ด้วยแรงโน้มถ่วงและการหมุนรอบตนเองของดวงอาทิตย์ ดวงอาทิตย์มีอายุประมาณราว 5,000 ล้านปี ดวงอาทิตย์มีธาตุต่าง ๆ อยู่ 67 ชนิด ธาตุที่มากที่สุดถึง 3 ใน 4 ส่วนคือ ไฮโดรเจน รองลงมาคือ ฮีเลียม ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ อยู่ในสถานะที่เรียกว่า พลาสมา คือมีประจุไฟฟ้าอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงมาก ซึ่งสูงมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ หลอมเหลวไฮโดรเจนให้กลายเป็นฮีเลียม กระบวนการนี้ให้พลังงานจำนวนมาก ตัวดวงอาทิตย์ที่เรามองเห็นนั้นเป็นบรรยากาศชั้นบางๆ ในระดับผิวของดวงอาทิตย์ที่ส่องแสงสว่างเรียกว่าชั้นโฟโตสเฟียร์ ที่ระดับผิวนี้มีอุณหภูมิสูงถึง 6,000 องศาเซลเซียส เมื่อมองผ่านเครื่องกรองแสงพิเศษจะเห็นผิวของดวงอาทิตย์มีการหมุนวนปั่นป่วน มีการปะทุและระเบิดของก๊าซร้อน และมีสนามแม่เหล็กพลังงานสูงปรากฏเป็นกลุ่ม ปกคลุมด้วยเมฆสว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราว 1,000 กิโลเมตร เรียกว่า กรานูล (Granule) เรียงชิดติดกัน

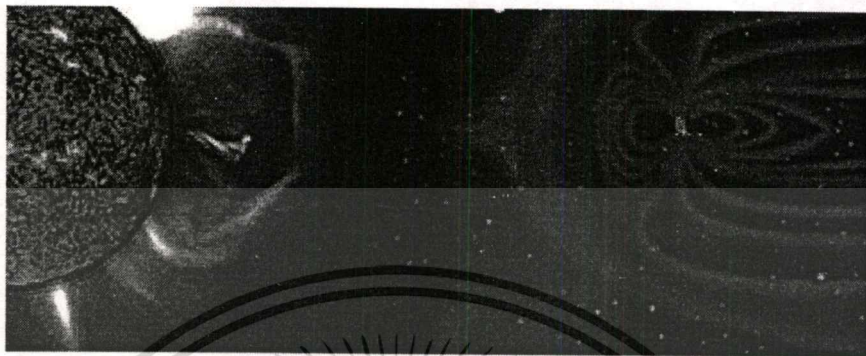


ภาพที่ 2.6 แบบจำลองกรานูล

เมื่อกกรานูลจะเกิดขึ้นและจางหายไปเป็นระยะเวลาสั้น ๆ และมีเส้นกล้าเป็นขอบคล้ายร่างแหหรือ รังผึ้งล้อมรอบ กรานูลมีลักษณะเป็นของเหลวชั้นร้อนจัดและเค็ดพลาสมา เกิดจากการนำพลังงานความร้อนในชั้นล่างเคลื่อนพาออกสู่ชั้นผิวและปรากฏเป็นแสงสว่างที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์

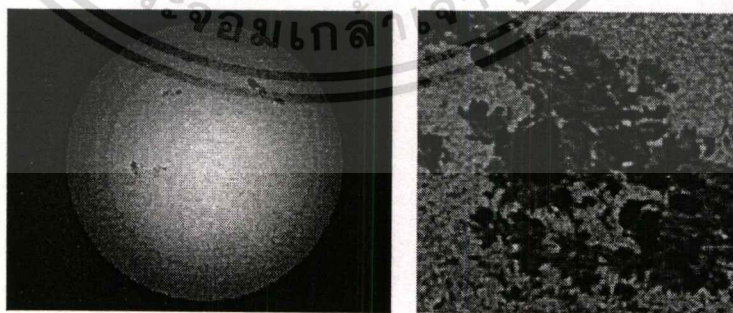
เหนือชั้นบรรยากาศโลกขึ้นไปในอวกาศ รวมไปถึงบริเวณระบบสุริยะชั้นใน จะถูกปกคลุมไปด้วยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ ในบริเวณ 150 ล้านกิโลเมตรจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นบริเวณที่โลกโคจรอยู่นี้ยังอยู่ในชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะมีอนุภาคพลังงานสูง ที่มีประจุไฟฟ้าเช่น อิเล็กตรอนและ โปรตอน แพร่มาจากดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง กระแสของกลุ่มอนุภาคเหล่านี้เรียกว่า ลมสุริยะ และในบางครั้งที่การแพร่ของลมสุริยะที่ทวีความรุนแรงกว่าปกติหลายเท่า โดยเฉพาะในช่วงที่เอกซารันเป็นเอกซารันที่สว่างไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครบวัฏจักรของดวงอาทิตย์อาจเรียกได้ว่าเป็น พายุสุริยะ ซึ่งปริมาณความมากน้อย และความรุนแรงของ พายุสุริยะนี้ พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับจุดดำบนดวงอาทิตย์ และการระเบิดรุกจ้าหรือ โซลาร์แฟลร์ (Solar Flar)บนผิวของดวงอาทิตย์



ภาพที่ 2.7 พายุสุริยะจากดวงอาทิตย์ที่เกิดจาก โซลาร์แฟลร์ที่แพร่ไปในระบบสุริยะจักรวาลและกระทบ กับชั้นบรรยากาศของโลก

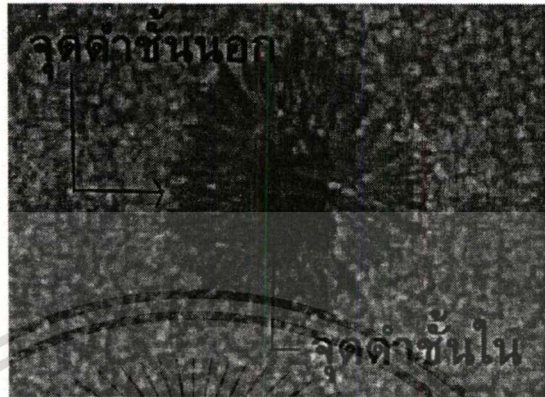
จุดดำบนดวงอาทิตย์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ชั้น โฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์ ขนาดของ จุดดำมีตั้งแต่เท่ากับกรามูลฟองเดียว หรืออาจจะใหญ่กว่านั้น และจุดดำอาจมีการรวมกันเป็นกลุ่มจนมี พื้นที่หลายพันล้านตารางกิโลเมตร การกระจายตัวของจุดดำก็เกิดขึ้นเป็นคู่หรือ รวมเป็นกลุ่มของจุดดำ จำนวนมาก ๆ แต่จุดดำคู่จะพบ ได้มากกว่าจุดดำที่เกิดขึ้นเดี่ยวๆ จุดดำบนดวงอาทิตย์มีการเกิดขึ้นและ สลายตัวตลอดเวลา โดยปกติแล้วจุดดำแต่ละจุดจะมีอายุประมาณ ไม่เกินสองสัปดาห์ แต่ก็อาจมีบางจุด ที่มีอายุยาวนานนับเดือนก็เป็นได้



ภาพที่ 2.8 จุดดำที่เกิดบนผิวของดวงอาทิตย์

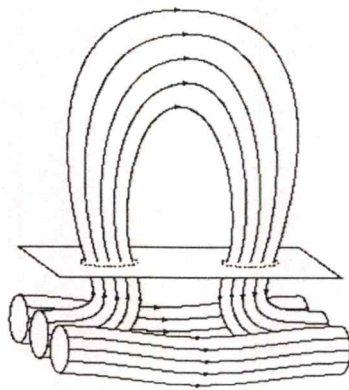
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของจุดดำบนดวงอาทิตย์ไม่ได้มีลักษณะดำมืดแต่เพียงอย่างเดียวหากพิจารณาดูดีๆ จะพบว่าจุดดำแต่ละจุดนั้นจะมีลักษณะซ้อนกันสองชั้น โดย จุดดำชั้นใน หรือ umbra จะมีสีดำเข้ม ส่วนจุดดำชั้นนอก หรือ penumbra ซึ่งล้อมรอบอยู่จะมีลักษณะจางกว่าและมีรูปร่างเป็นเส้น ในแนวรัศมี



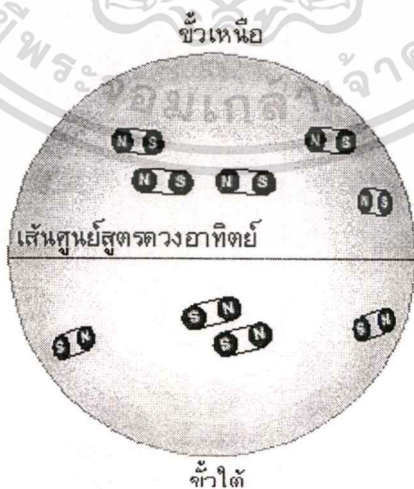
ภาพที่ 2.9 ภาพแสดงจุดดำชั้นใน และจุดดำชั้นนอก

โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ส่วนจุดดำชั้นนอกมีพื้นที่มากกว่า บางครั้งอาจมากถึง 80% ของพื้นที่จุดดำทั้งหมด บริเวณจุดดำชั้นนอกเป็นบริเวณที่มีการไหลของก๊าซจากบริเวณจุดดำชั้นใน ไปสู่พื้นที่นอกจุดดำ เมื่อก๊าซ ไหลออกไปนอกจุดดำชั้นนอกแล้วก็จะเปลี่ยนทิศพุ่งขึ้นตั้งฉากกับผิวของดวงอาทิตย์จนถึงชั้น โครโมสเฟียร์ หลังจากนั้นจึงย้อนกลับพุ่งลงในใจกลางของจุดดำอีกครั้งเป็นวัฏจักรต่อไป ถึงแม้ว่าจุดดำชั้นในจะเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิค่าที่สุดบนดวงอาทิตย์จนมองเห็นเป็นสีดำสนิท แต่มันก็ยังมีอุณหภูมิสูงถึง 4,000 เคลวิน ในความเป็นจริง ก๊าซที่มีอุณหภูมิขนาดนี้จะมีแสงสว่างมาก แต่สาเหตุที่เห็นเป็นสีดำนั้นเนื่องจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์โดยรอบจุดดำหรือชั้น โฟโตสเฟียร์นั้นมีความสว่างมากกว่ามาก เพราะมีอุณหภูมิสูงถึง 6,000 เคลวิน ส่วนบริเวณจุดดำชั้นนอกนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าชั้นโฟโตสเฟียร์ คือประมาณ 5,600 เคลวิน ในขณะที่ความสว่างของบริเวณจุดดำบนดวงอาทิตย์จะน้อยกว่าที่อื่น ๆ แต่สนามแม่เหล็กบริเวณนี้ก็กลับมีความเข้มสูงมาก เราพบว่าสนามแม่เหล็กจะมีทิศจะพุ่งออกจากจุดดำพร้อม ๆ กับนำเอาก๊าซร้อนจัดจากภายในพื้นผิวดวงอาทิตย์ขึ้นมาด้วย รูปร่างและทิศทางของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับลักษณะการรวมกลุ่มของจุดดำ คือ บริเวณที่มีจุดดำที่เกิดเป็นคู่ สนามแม่เหล็กจะพุ่งขึ้นออกจากจุดดำจุดหนึ่งแล้วเลี้ยวโค้งวกกลับลงสู่จุดดำอีกจุดหนึ่งที่อยู่คู่กัน จุดดำสองจุดนี้จึงมีขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกันเสมอ เหมือนกับแม่เหล็กแบบเกือกม้าที่ติดอยู่บนผิวดวงอาทิตย์ เรียกสนามแม่เหล็กรูปร่างแบบนี้ว่า สนามแม่เหล็กแบบ ไบโพลาร์



ภาพที่ 2.10 สนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ใต้พื้นผิวของดวงอาทิตย์

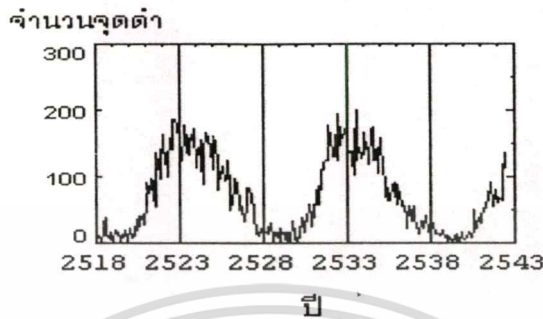
บริเวณที่มีจุดดำรวมกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่จะมีรูปร่างของสนามแม่เหล็กที่ซับซ้อนมากขึ้น แต่ยังคงเป็นสนามแม่เหล็กปิดเช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ ส่วนจุดดำที่เป็นจุดเดี่ยวไม่รวมกลุ่มหรือเข้าคู่กับจุดดำอื่น ๆ สนามแม่เหล็กจะพุ่งออกจากจุดดำชั้นในและสาดออกไปสู่อวกาศโดยไม่ย้อนกลับลงมา เรียกว่าเป็นสนามแม่เหล็กเปิด ซึ่งเป็นอีกช่องทางหนึ่งที่มวลสารจำนวนมากดวงอาทิตย์พุ่งทะลักสู่อวกาศ และเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดลมสุริยะ สนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์บนดวงอาทิตย์มีลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งคือ ทุก ๆ คู่ของจุดดำจะเรียงกันในแนวอนเกือบขนานกับเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ จุดดำสองจุดในแต่ละคู่มักเรียกว่า จุดนำ และ จุดตาม เรามักพบว่าจุดนำของแต่ละคู่มักจะอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากกว่าจุดตามเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ที่เกิดขึ้นในซีกดาวเดียวกันจะมีทิศทางตรงกันทั้งหมด และทิศทางของสนามแม่เหล็กของซีกเหนือและซีกใต้ของดวงอาทิตย์จะตรงข้ามกันเสมออีกด้วย



ภาพที่ 2.11 แสดงจุดดำแบบคู่ที่อยู่ในซีกดาวเดียวกัน จะมีทิศทางสนามแม่เหล็กวงไปในทางเดียวกัน และ ซีกดาวแต่ละซีก จะมีทิศทางสนามแม่เหล็กของจุดดำแบบคู่ตรงข้ามกันเสมอ

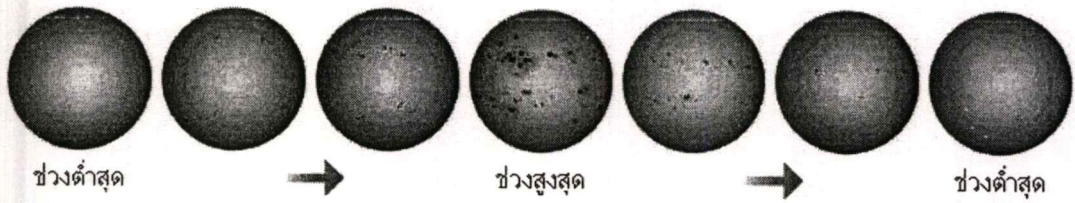
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนการเกิดจุดดำบนดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นวัฏจักรมีคาบค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 8 ปี ถึง 16 ปี มีค่าเฉลี่ย 11.1 ปี คาบนี้เรียกว่า วัฏจักรของดวงอาทิตย์ (Solar Cycle) หรือ วัฏจักรของจุดดำ (Sunspot Cycle)

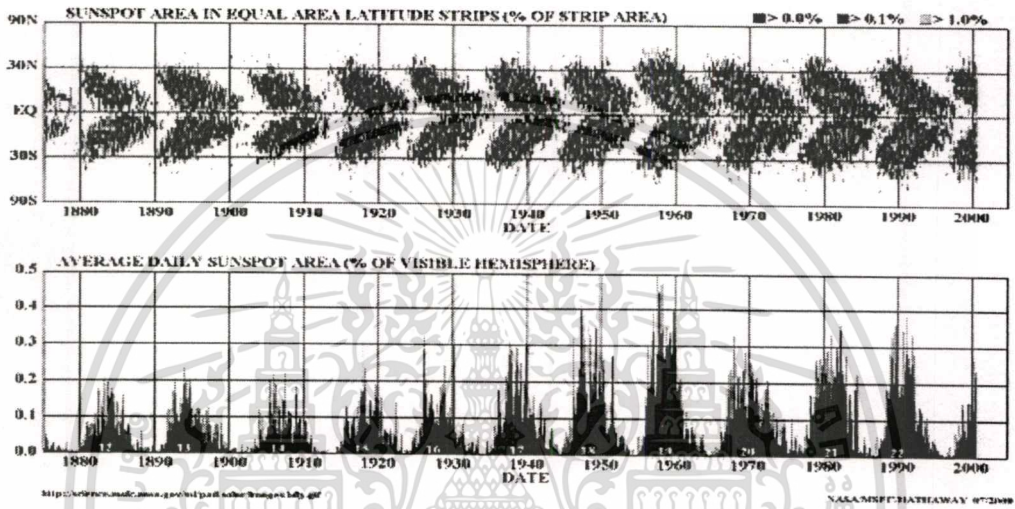


ภาพที่ 2.12 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดดำที่เป็นวัฏจักร

จากแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดดำบนดวงอาทิตย์กับเวลา โดยให้เวลาอยู่ในแนวนอน และจำนวนจุดดำเป็นแนวตั้ง จะพบว่ารูปกราฟที่ได้คล้ายกับคลื่นรูปฟันเลื่อย โดยช่วงขึ้น (จากช่วงที่มีจุดดำน้อยที่สุด ไปสู่ช่วงที่มีจุดดำมากที่สุด) จะชันกว่าช่วงลงเล็กน้อย โดยเฉลี่ยแล้วช่วงขึ้นจะใช้เวลาประมาณ 4.8 ปี ส่วนช่วงลงใช้เวลาประมาณ 6.2 ปี ตำแหน่งของการเกิดของจุดดำมีลักษณะเฉพาะคือหลังจากที่ดวงอาทิตย์เพิ่งพ้นจากช่วงต่ำสุดมาและกำลังจะเริ่มวัฏจักรใหม่ จุดดำจะเกิดขึ้นที่บริเวณละติจูดประมาณ 35 องศาทั้งซีกเหนือและซีกใต้ หลังจากนั้น จุดดำก็จะเลื่อนไหลไปรอบ ๆ ดวงอาทิตย์ตามการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ พร้อม ๆ กับเคลื่อนเข้าหาเส้นศูนย์สูตรอย่างช้า ๆ แต่ก็ไม่ไปถึงเส้นศูนย์สูตรเพราะจุดดำนั้นสลายตัวไปเสียก่อน จุดดำที่เกิดขึ้นในรอบต่อ ๆ มา ก็จะเกิดขึ้นอีกที่ละติจูดเริ่มต้นต่ำกว่าระดับของจุดดำรุ่นที่แล้วเล็กน้อย แล้วก็เคลื่อนเข้าหาเส้นศูนย์สูตรในลักษณะเดียวกัน จุดเริ่มต้นของการเกิดจุดดำจะเปลี่ยนตำแหน่งเช่นนี้เรื่อย ๆ จนกระทั่งใกล้ถึงช่วงต่ำสุดของดวงอาทิตย์ ซึ่งเมื่อถึงช่วงนี้ละติจูดเฉลี่ยของจุดดำจะอยู่ประมาณ 7 องศาเหนือและ 7 องศาใต้ เท่านั้น หากสังเกตตำแหน่งของจุดดำทุก ๆ จุดอย่างต่อเนื่องและยาวนานพอ แล้วนำตำแหน่งของจุดดำมาเขียนเป็นแผนภูมิ โดยให้แกนแนวนอนเป็นเวลา และแกนตั้งเป็นละติจูดของจุดดำ แผนภูมิที่ได้จะมีลักษณะเหมือนผีเสื้อมาเกาะเรียงต่อกัน แผนภูมินี้จึงมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แผนภูมिरูปผีเสื้อ หรือ butterfly diagram ในหนึ่งวัฏจักรของดวงอาทิตย์ จุดดำบนดวงอาทิตย์จะเริ่มเกิดที่ละติจูดสูงประมาณ 35 องศา ทั้งเหนือและใต้ ส่วนจุดดำในรอบต่อ ๆ มาจะเกิดขึ้นที่ละติจูดต่ำลงมาเรื่อย ๆ จนถึงระดับใกล้ศูนย์สูตร



ภาพที่ 2.13 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดดำเป็นช่วง ๆ ต่อเนื่อง

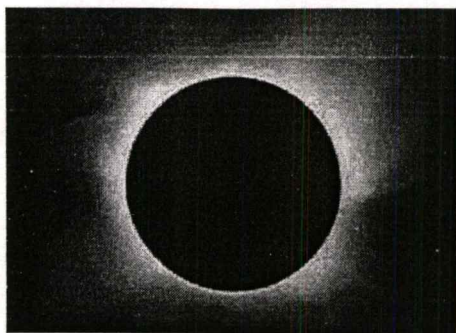


ภาพที่ 2.14 (บน)แผนภูมิรูปผีเสื้อ และ(ล่าง)แผนภูมิแสดงพื้นที่รวมของจุดดำบนดวงอาทิตย์

จากภาพที่ 2.14 ภาพบนจะแสดงให้เห็นแผนภูมิรูปผีเสื้อ แสดงตำแหน่งละติจูดที่เกิดจุดดำ ในช่วงเวลาหนึ่ง และภาพล่างแผนภูมิแสดงพื้นที่รวมของจุดดำบนดวงอาทิตย์ ต่อพื้นที่ผิวหน้าของดวงอาทิตย์ (เฉพาะด้านที่มองเห็น)

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดดำบนดวงอาทิตย์จะมีทิศทางเดียวกันในแต่ละซีกดาว แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กนี้จะไม่คงทิศเดิมตลอดไปเพราะทุก ๆ ครั้งที่ตั้งช่วงต่ำสุด (sunspot minimum) นั้น จะมีการสลับขั้วของสนามแม่เหล็กทั้งซีกเหนือและซีกใต้ของดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กในจุดดำของซีกใหม่จะมีทิศทางตรงข้ามกับซีกเดิม ดังนั้นวัฏจักรของสนามแม่เหล็กบนจุดดำของดวงอาทิตย์จึงเป็นสองเท่าของวัฏจักรของจุดดำ คือประมาณ 22.2 ปี จากการสำรวจดวงอาทิตย์ของนักดาราศาสตร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน นักดาราศาสตร์ยังได้พบว่า ปรากฏวัฏจักรที่ยาวประมาณ 80 ปี ซ่อนอยู่บนคาบ 11.1 ปีนี้อีกด้วย นอกจากนี้วัฏจักรของจุดดำบนดวงอาทิตย์ก็ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอมาตลอด ในปี ค.ศ. 1645 ถึง 1715 วัฏจักรของดวงอาทิตย์ได้หยุดไปนานถึง 70 ปี เรียกว่า ช่วงต่ำสุด มอนเดอร์ (Maunder minimum) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวเกือบจะไม่มีจุดดำเกิดขึ้นเลย (วิมุติ วสะหลาย, 2543ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 คอโรนาขณะเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง

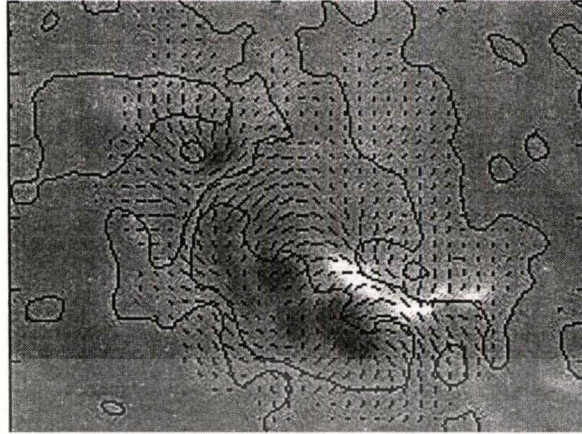
ในขณะที่เกิดสุริยุปราคาเต็มดวง สิ่งที่เราเห็นเป็นเส้นรัศมีสว่างอยู่ล้อมรอบวงกลมสีดำนั้น คือบรรยากาศของดวงอาทิตย์ เรียกว่า คอโรนา (Corona) เป็นบรรยากาศชั้นนอกสุดของดวงอาทิตย์ จากการศึกษาสเปกตรัมของคอโรนาพบว่าคอโรนามีอุณหภูมิสูงนับล้านองศาเซลเซียส พลังงานความร้อนที่สูงมากทำให้คอโรนาขยายตัวออกเรื่อย ๆ จนในที่สุดอนุภาคในชั้นบรรยากาศจะหลุดพ้นจากแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และหนีออกจากดวงอาทิตย์ไปทุกทิศทุกทาง เป็นกระแสธารของอนุภาคแพร่ไปในระบบสุริยะจักรวาล กลายเป็นลมสุริยะ (David H. Hathaway, 2000a)

ลมสุริยะที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมีความเร็วต่างกันตามละติจูดที่เกิด คือลมสุริยะที่ขึ้นบริเวณขั้วเหนือและใต้ของดวงอาทิตย์จะมีความเร็วสูงมาก ซึ่งเป็นเพราะบริเวณขั้วเหนือและใต้มีคอรอโรนา ขนาดใหญ่ปรากฏอยู่ ซึ่งโพรงคอโรนาเป็นที่ ๆ มีลมสุริยะความเร็วสูงและรุนแรงพัดออกมาจากดวงอาทิตย์ในบริเวณนั้น ในขณะที่ลมสุริยะที่เกิดขึ้นบริเวณแนวใกล้ศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ จะมีความเร็วต่ำ ลมสุริยะโดยเฉลี่ยประมาณ 450 กิโลเมตรต่อวินาที หลังจากนั้นจะเร่งความเร็วจนถึงราว 800 กิโลเมตรต่อวินาที สาเหตุของการเร่งความเร็วของลมสุริยะ เกิดจากสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ลมสุริยะที่กล่าวมานี้จะมีความเร็วถึงเกือบพันกิโลเมตรต่อวินาที ใช้เวลาประมาณ 26 ชั่วโมงในการเดินทางผ่านอวกาศเป็นระยะทางราว 150 ล้านกิโลเมตรมาถึงโลก แต่ก็ยังจัดว่าไม่ใช่สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดผลกระทบต่างๆ บนโลก ลมสุริยะที่มีความรุนแรงและมีอิทธิพลต่อโลกอย่างมากจะเกิดจากปรากฏการณ์อย่างอื่นที่มีความรุนแรงมากกว่ามาก นั่นคือ โซลาร์แฟลร์ และ คอโรนัลแมสอีเจกชัน Coronal Mass Ejection :CME (David H. Hathaway, 2000b)



ภาพที่ 2.16 ภาพดวงอาทิตย์ที่ถ่ายในย่านรังสีเอกซ์

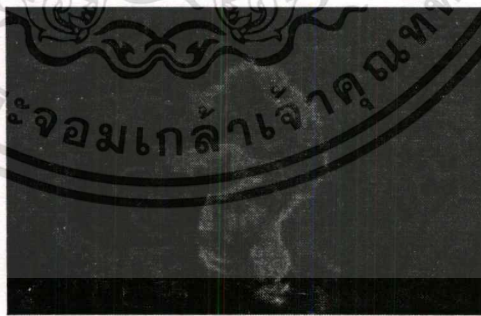
โซลาร์แฟลร์ เป็นการระเบิดอย่างรุนแรงที่เกิดขึ้นที่ชั้น โคร โมสเฟียร์ จากภาพที่ 2.16 แสดงให้เห็นจุดสว่างของ โซลาร์แฟลร์จำนวนมาก ส่วนพื้นที่มืดของดวงอาทิตย์คือบรรยากาศดวงอาทิตย์หรือ โฟโตสเฟียร์ เนื่องจากโฟโตสเฟียร์มีอุณหภูมิต่ำกว่าเพียง 6,000 องศาเซลเซียสและมักเกิดขึ้นเหนือรอยต่อระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็ก เช่นบริเวณกึ่งกลางของจุดดำแบบคู่หรือท่ามกลางกลุ่มของจุดดำที่มีสนามแม่เหล็กปั่นป่วนไม่คงที่ โซลาร์แฟลร์ให้พลังงานสูงมาก โดยเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอกซ์และย่านอัลตราไวโอเล็ต โซลาร์แฟลร์จะปรากฏในรูปของการเกิดแสงสว่างลุกจ้าขึ้นมาอย่างฉับพลัน ปล่อยพลังงานออกมาอย่างรุนแรง มีอุณหภูมิสูงถึงหลายล้านเคลวิน พร้อม ๆ กับสาดอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าออกมาอย่างรุนแรงและรวดเร็ว ช่วยเสริมกำลังให้กับลมสุริยะให้เร็วและรุนแรงยิ่งกว่าในภาวะปกติมาก ลมสุริยะที่เกิดขึ้นจาก โซลาร์แฟลร์มีความเร็วสูงมาก และสามารถเดินทางมาถึงโลกภายในเวลาไม่กี่สิบนาทีเท่านั้น ในสนามแม่เหล็กแบบไบ โพลาร์ซึ่งจะเกิดขึ้นกับคู่ของจุดดำเป็นบริเวณที่มักเกิด โซลาร์แฟลร์ขึ้นเสมอ และอาจเกิดขึ้นได้บ่อย ๆ ลมสุริยะที่เกิดจาก โซลาร์แฟลร์จากจุดดำแบบคู่นี้ถือว่ายังมีความรุนแรงไม่มากนักหากเทียบกับลมสุริยะที่มาจาก โซลาร์แฟลร์ ที่เกิดขึ้นท่ามกลางกลุ่มของจุดดำ เนื่องจากกลุ่มของจุดดำมีสนามแม่เหล็กซับซ้อนและเข้มข้นมากกว่า เมื่อเกิด โซลาร์แฟลร์ขึ้นในบริเวณนี้จึงกลายเป็นแหล่งกำเนิดลมสุริยะที่รุนแรงมาก ทำให้เกิดปรากฏการณ์พายุสุริยะ โซลาร์แฟลร์มักเกิดอยู่ระหว่างกึ่งกลางของที่มีขั้วแม่เหล็กต่างกัน หรือเกิดขึ้นท่ามกลางกลุ่มของจุดดำที่มีสนามแม่เหล็กปั่นป่วน ตามสมมติฐานปัจจุบันเชื่อว่า โซลาร์แฟลร์ น่าจะเกิดจากการตัดขาดและเชื่อมต่ออีกครั้งของสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 2.17 ภาพพื้นผิวดวงอาทิตย์แสดงการเกิดโซลาร์แฟลร์

จากภาพที่ 2.17 แสดงให้เห็นชัดเจน ๆ สีดำแสดงทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งตัวยาวหมายถึงสนามแม่เหล็กที่ยังเข้มข้น บริเวณสีเข้มคือบริเวณที่เกิดจุดดำ และสีขาวคือบริเวณที่เกิดโซลาร์แฟลร์จะเห็นว่าโซลาร์แฟลร์ มักเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กสองขั้วและเกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีการตัดขาดจากกันและเชื่อมต่อกันอีกครั้ง

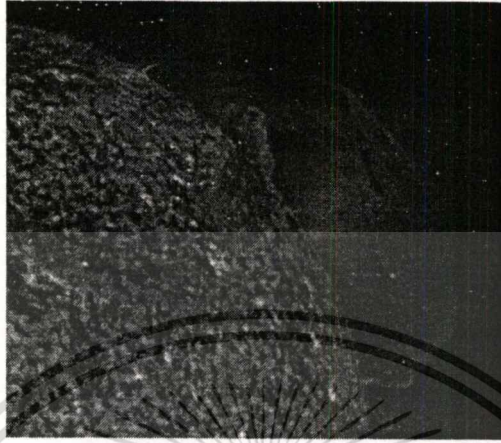
รูปร่างของโซลาร์แฟลร์บริเวณกลุ่มของจุดดำที่มีการบิดตัวอย่างรุนแรงเป็นรูปคล้ายตัว S ในภาษาอังกฤษ เรียกว่า ซิกมอด จะเป็นสัญญาณบอกเหตุให้รู้ว่า จะเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงในเวลาต่อมา และจะปลดกระแสนิวทริโนออกไปสู่ระบบสุริยะจักรวาล



ภาพที่ 2.18 การบิดตัวอย่างรุนแรงของโซลาร์แฟลร์ หรือ ซิกมอด

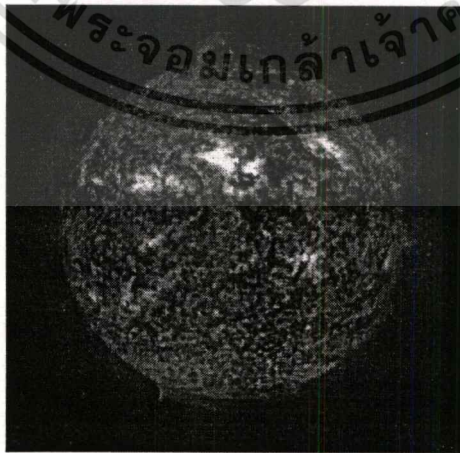
ปรากฏการณ์บนดวงอาทิตย์ที่เกี่ยวข้องกับลมสุริยะอีกอย่างหนึ่งที่มีความรุนแรงยิ่งกว่าโซลาร์แฟลร์ก็คือ คอโรนัลแมสอีเจกชัน (Coronal Mass Ejection : CME) เป็นปรากฏการณ์ที่มีการปลดมวลสารจำนวนมาก ออกจากดวงอาทิตย์ดูเหมือนฟองขนาดมหึมาถูกเป่าออกมาจากผิวดวงอาทิตย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนเกิดเป็นพองคอโรนาเกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง อีออนจำนวนมหาศาลจากดวงอาทิตย์จะถูกเป่าออกสู่อวกาศด้วยความเร็วสูงนับพันกิโลเมตรต่อวินาที



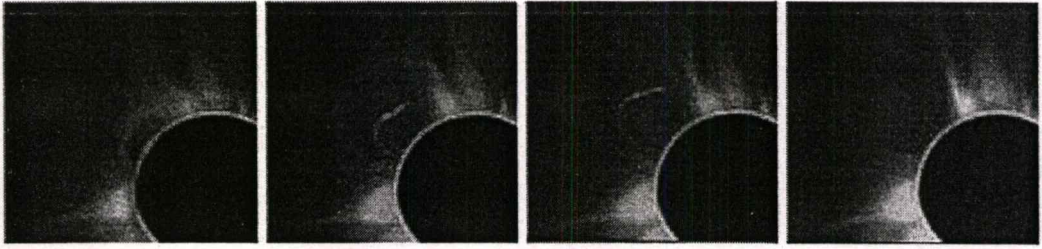
ภาพที่ 2.19 คอโรนัลแมสอีเจกชัน CME

แม้ในปัจจุบันยังไม่ทราบแน่ชัดว่าคอโรนัลแมสอีเจกชันมีสาเหตุมาจากอะไร บ่อยครั้งที่พบว่าเกิดขึ้นร่วมกับโซลาร์แฟลร์ หรือ พวยก๊าซที่พุ่งขึ้นแล้วตกกลับลงมาสู่ผิวดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า โปรมิเนนซ์ (Prominence) แต่บางครั้งก็อาจเกิดขึ้นโดยไม่มีปรากฏการณ์สองอย่างนี้เลย นอกจากนี้ ความถี่ในการเกิดขึ้นแปรผันตามวัฏจักรของดวงอาทิตย์อีกด้วย ในช่วงใกล้เคียงกับช่วงต่ำสุดของดวงอาทิตย์อาจเกิดคอโรนัลแมสอีเจกชันประมาณสัปดาห์ละครั้ง หากเป็นช่วงใกล้กับจุดสูงสุดของดวงอาทิตย์ ก็อาจเกิดขึ้นบ่อยถึงประมาณสองหรือสามครั้งต่อวัน (วิมุตติวสะหลาย, 2543ข)



ภาพที่ 2.20 การเกิดพวยก๊าซพุ่งขึ้นจากขอบของดวงอาทิตย์และตกกลับมาสู่ผิวของดวงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.21 ภาพต่อเนื่องของการเกิดคอคโรนัลแมสอีเจกชัน

ปรากฏการณ์เหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุของการพักระแสธารอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้ามากระทบกับชั้นบรรยากาศของโลกโดยตรง โดยเฉพาะในช่วงปี 2543 – 2544 นี้เป็นช่วงสูงสุดของวัฏจักรของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของจีพีเอส



ภาพที่ 2.22 ภาพแสดงโครงสร้างและปรากฏการณ์บนดวงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

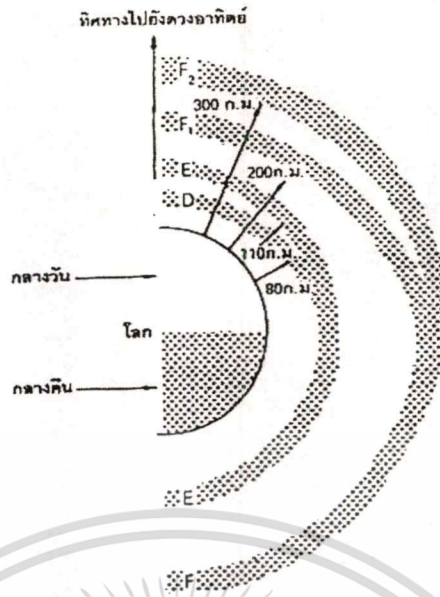
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เริ่มมีความสำคัญเมื่อนมนุษย์สามารถใช้ประโยชน์ได้เมื่อปี ค.ศ. 1901 โดย Marconi ได้ประสบความสำเร็จในการส่งสัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติก โดยที่ก่อนหน้านี้การส่งสัญญาณวิทยุส่งได้ประมาณ 200 – 300 กิโลเมตรเท่านั้น ซึ่งการศึกษาต่อมาได้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่นดิน (ground wave) ซึ่งต่อมาพบว่าการทำงานของ Marconi นั้นไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นดินเพียงอย่างเดียว จึงสรุปว่าต้องมีการเดินทางของคลื่นในลักษณะอื่นนอกจากใช้ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่น

ปี ค.ศ. 1902 Heaviside ได้เสนอแนวความคิดที่ว่าเวลาที่คลื่นวิทยุสามารถเดินทางได้ไกลมากนั้นน่าจะมีการสะท้อนจากชั้นบรรยากาศที่มีโมเลกุลหรืออะตอมของชั้นบรรยากาศ เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ก็จะเกิดการแตกตัว ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไอออไนเซชันการที่คลื่นสามารถเดินทางได้ไกลนั้นคลื่นสัญญาณวิทยุจะมีการสะท้อนไปมาระหว่างชั้นบรรยากาศนี้กับพื้นดินหลายครั้งจนมาถึงเครื่องรับวิทยุ

ปี ค.ศ. 1925 Appleton และ Barnett ใช้เครื่องส่งวิทยุของ BBC ในการทดลอง ซึ่งมีการพบชั้นย่อยต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศนี้ซึ่งให้ชื่อเรียกว่า ชั้น E และ ชั้น F จาก คำว่า “ Electric ” และ “ Field ” ซึ่งหลังจากนั้นก็ได้มีการค้นพบชั้นย่อยที่ต่ำกว่าชั้น E และชั้น F อีก 2 ชั้นจึงตั้งชื่อตามอักษรว่า ชั้น D และชั้น C ช่วงแรกมีการใช้ชื่อชั้นบรรยากาศนี้หลายชื่อเช่น “ Heaviside layer ” หรือ “ Appleton layer ” จึงทำให้ Plendl ได้เสนอชื่อชั้นบรรยากาศนี้ว่า “ Ionosphere ” และต่อมาได้มีการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อย่างแพร่หลาย จึงกลายเป็นการศึกษาแขนงใหม่ซึ่งเรียกว่า “ Ionosphere physics ”

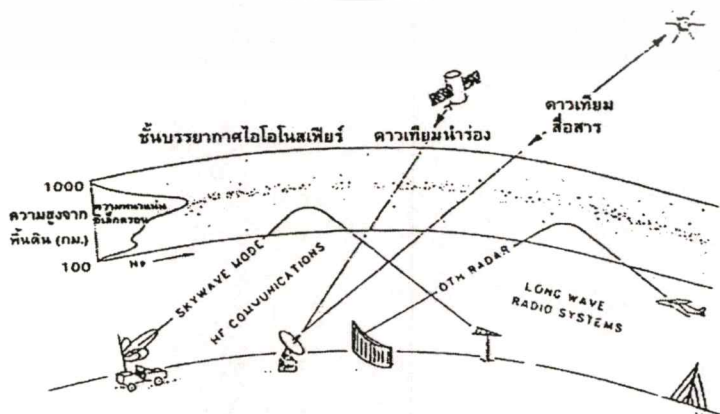
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่มีการไอออไนซ์ของก๊าซ มีขอบเขตประมาณ 50-2,000 กม. เหนือชั้นไอโอโนสเฟียร์คือชั้นพลาสมาสเฟียร์หรือโปรโตโนสเฟียร์ ซึ่งก็ยังคงมีอิเล็กตรอนอิสระหลงเหลืออยู่ ซึ่งทั้ง 2 ชั้นอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กของโลกซึ่งเรียกว่าชั้น แมกนิโตสเฟียร์ที่ทำหน้าที่ต่อต้านลมสุริยะ (Solar Wind) ที่เกิดจากการขยายตัวของบรรยากาศชั้นนอกของดวงอาทิตย์ ปฏิกริยาระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก ลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะแบ่งเป็นชั้นย่อย ๆ ได้ดังนี้

- 1.) ชั้น F (140 กม. ขึ้นไป) ประกอบด้วย 2 ชั้น คือ F_1 และ F_2 ซึ่งเกิดจากแสงอาทิตย์ในย่าน Extreme Ultra Violet (EUV) ชั้น F_1 และ F_2 จะเกิดในเวลากลางวัน ซึ่งเวลากลางคืนชั้นทั้ง 2 จะรวมกันเป็นชั้นเดียวคือชั้น F
- 2.) ชั้น E (90 กม. – 140 กม.) ประกอบด้วยชั้น E ธรรมดา และชั้น Sporadic E (Es) ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว เกิดจากแสงอาทิตย์ที่อยู่ในย่าน Soft X-Rays
- 3.) ชั้น D (60 กม. – 90 กม.) เกิดจากแสงอาทิตย์ในย่าน Ly α , Hard X-Rays
- 4.) ชั้น C (50 กม. 60 กม.) เกิดจากแสงอาทิตย์ในย่าน Cosmic Rays แสดงชั้นย่อยต่าง ๆ ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



ภาพที่ 2.23 แสดงชั้นย่อยต่างๆ ของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์

การเกิดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการแตกตัวของก๊าซอันเนื่องมาจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นเมื่อมีแสงอัลตราไวโอเล็ตมากถ้าความสูงจากพื้นดินมากปริมาณแสงอัลตราไวโอเล็ตก็จะมาก) และมีโมเลกุลของก๊าซมาก (คือที่ที่ความกดดันอากาศสูงซึ่งความสูงจากพื้นดินมีค่าน้อย) แสดงว่าที่ความสูงจากพื้นดินจุดหนึ่งจะมีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่แตกตัวเกิดขึ้นมาก ซึ่งก็คือความสูงที่ตรงกับชั้น E นั้นเอง แต่อิเล็กตรอนอิสระนี้จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระเมื่อชนกับไอออนบวก ซึ่งเกิดจากอะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป ก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination process) ในชั้น E ได้ง่ายกว่าชั้น F ซึ่งมีความสูงจากพื้นดินมากกว่าทำให้ความกดดันอากาศน้อยกว่า เนื่องจากชั้น F มีการรวมตัวกันใหม่ ได้ยากกว่า จึงเป็นสาเหตุที่ชั้น F มีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากกว่าชั้น E ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F นั้นจะมากกว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนใน ชั้น E นั้นเอง



ภาพที่ 2.24 แสดงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลต่อการสื่อสาร ในย่านความถี่ต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการสื่อสารในย่านความถี่ต่าง ๆ มีดังนี้

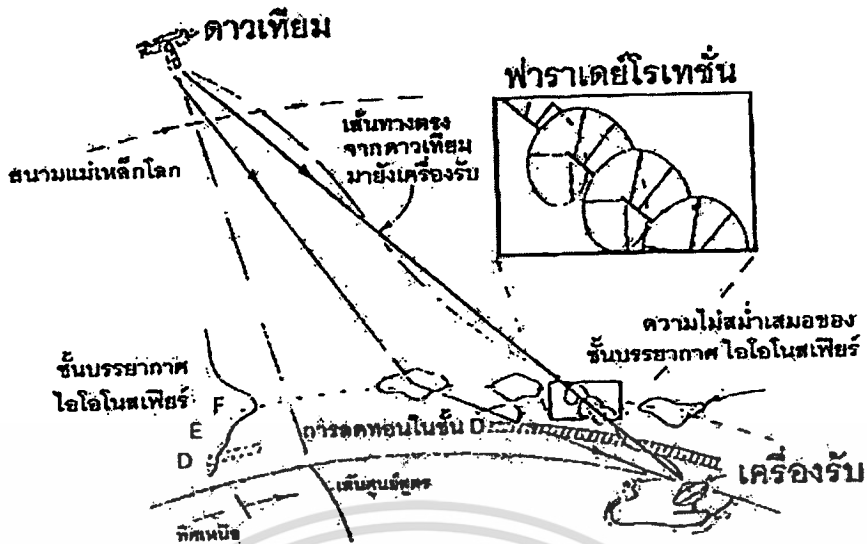
- 1.) ย่านความถี่ LF และ MF ใช้ในงานประเภทการกระจายเสียงวิทยุซึ่งจะใช้ชั้น E และ ชั้น D ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการสะท้อนคลื่น
- 2.) ย่านความถี่ VHF และย่านความถี่ดาวเทียม สัญญาณจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะถูกผลกระทบต่าง ๆ (กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา. 2540 : 5-8ข)

2.5 ผลกระทบความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ต่อสัญญาณดาวเทียม

ผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่มีต่อสัญญาณดาวเทียมนั้นมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะในย่านที่มีความถี่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุดาวเทียมมีดังนี้(กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา 2540 : 25ค)

1. Dispersive คณิตการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นฟังก์ชันกับความถี่และความเร็วกลุ่มจะไม่เท่ากับความเร็วเฟส
2. Absorptive ในแถบขั้วโลกคณิตการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ การลดทอนนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของคลื่นไปในกระบวนการชนกันของอนุภาค (Collision process) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
3. Birefringent คณิตการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มี 2 ค่าไม่เท่ากันเนื่องจากการมีอยู่ของสนามแม่เหล็กโลกและ โมบิลิตี้ของอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งคุณสมบัตินี้อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่น 2 ทางที่มีความเร็วกลุ่มและเร็วเฟสต่างกัน
4. Anisotropic แต่ละคณิตการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 2 คณิตนี้จะต่างเป็นฟังก์ชันของการเรียงตัวของผิวของ constant wave phase ที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโลก

จากคุณสมบัติดังกล่าวผลกระทบต่าง ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะแบ่งได้หลายประเภทจากภาพที่ 2.25 ดังนี้



ภาพที่ 2.25 แสดงผลกระทบหลัก ๆ ของคลื่นสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ผลกระทบนั้นจะประกอบด้วย การหมุนของมุมสนามไฟฟ้าของคลื่นหรือพาราเดย์โรเทชั่น เวลาหน่วง การรับคลื่นที่แตกกระจายจากหลายทาง และการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์, การลดทอนของสัญญาณจากชั้น D ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นต้น

2.5.1 พาราเดย์โรเทชั่น

คลื่นสัญญาณวิทยุที่มีโพลาไรซ์ แบบเส้นตรงนั้นเมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะเกิดการหมุนของระนาบโพลาไรซ์ เนื่องจากการผ่านตัวกลางที่เป็นแบบ Anisotropy ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่าพาราเดย์โรเทชั่น มีสมการในการหาค่าระหว่างค่าดังนี้

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2} \int NB \cos \theta_B dS_0 \quad [\text{เรเดียน}] \quad (2.21)$$

เมื่อ B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กโลก [เวเบอร์ต่อตารางเมตร]

θ_B คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดที่ตั้ง)

ส่วนมากปริมาณ $B \cos \theta_0$ จะใช้ค่าเฉลี่ย B_{AV} แทนที่ซึ่งสมการ (2.6) ก็จะลดลงเหลือ

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2} B_{AV} \int N ds_0 \quad [\text{เรเดียน}] \quad (2.22)$$

เนื่องจากนิยามที่ว่า $TEC = \int N ds_0$

ดังนั้นฟาราเดย์โรเทชันจะกลายเป็น

$$\Omega = \frac{C}{f^2} TEC \quad [\text{เรเดียน}] \quad (2.23)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่ มีค่า $2.365 \times 10^4 B_{AV}$

จะเห็นว่าปริมาณฟาราเดย์โรเทชันนั้นจะแปรผกผันกับความถี่และแปรตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็กโลกและปริมาณ TEC เมื่อรู้ค่าปริมาณอิเล็กตรอน TEC ค่ามุมฟาราเดย์และปริมาณอื่น ๆ ก็สามารถคำนวณได้

2.5.2 เวลาหน่วง

ดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งทำให้ระยะทางของคลื่นที่เดินทางนั้นจะมากกว่าระยะทางจริง ซึ่งระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น ถ้าค่า TEC มีค่า 10^{17} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ค่าระยะทางที่คลาดเคลื่อนของสัญญาณ 4 GHz จะมีค่า 2.5 เมตร

$$T_d = \frac{40.3}{C \cdot f^2} \cdot TEC \quad (2.24)$$

เมื่อ T_d คือ เวลาหน่วงของสัญญาณ

c คือ ความเร็วของแสง

จะเห็นว่าเมื่อทราบปริมาณ TEC ก็จะสามารถคำนวณค่าเวลาหน่วงได้

2.5.3 การหักเหของสัญญาณ

การหักเหของสัญญาณที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มุมคลาดเคลื่อน ζ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าระยะเวลาทางคลาดเคลื่อนดังสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi = \frac{(S_0 + R_e \sin el) R_e \cos el}{h_m (2R_e + h_m) + R_e^2 \sin^2 el} \times \frac{\Delta R_{gr}}{S_0} \approx \frac{(S_0 + R_e \sin el) \cos el}{2h_m + R_e \sin^2 el} \times \frac{\Delta R_{gr}}{S_0} \quad (2.25)$$

เมื่อ S_0 คือ ระยะทางตรงจากดาวเทียมถึงสถานีภาคพื้นดิน

R_e คือ รัศมีเฉลี่ยของโลก

h_m คือ ความสูงเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

el คือ มุมเงยของสายอากาศที่แท้จริง

2.5.4 การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันคือการที่สัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของเฟส (phase scintillation) หรือ แอมพลิจูด (amplitude scintillation) จากระดับค่าเฉลี่ยอย่างกะทันหัน การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ซึ่งพบว่าจะมีผลกระทบต่อลักษณะสัญญาณดาวเทียม จึงได้มีการกำหนดเป็นตัวแปรหนึ่งในการออกแบบระบบดาวเทียม โดยมีการเผื่อค่าไว้ชัดเจนกับระดับสัญญาณที่อาจเพิ่มหรือลดลงเกินกว่าระดับที่ต้องการเช่นเดียวกับตัวแปรอื่นๆ

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันนั้นเกิดจากชั้นบรรยากาศหลัก 2 ชั้น

- 1.) ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีผลกระทบต่อคลื่นความถี่ 4 GHz ขึ้นไปซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์
- 2.) ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีผลกระทบต่อคลื่นความถี่น้อยกว่า 4 GHz เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นอิเล็กตรอน

การหาระดับการเปลี่ยนแปลงสามารถวัดได้จากดัชนีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน ซึ่งโดยมากใช้ดัชนี S_4 ซึ่งเป็นค่า RMS ของค่าระดับสัญญาณ P กับค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย \bar{P}

$$S_4 = \sqrt{\frac{\sum (p - \bar{p})^2}{\bar{p}}} \quad (2.26)$$

เมื่อ P คือค่าระดับสัญญาณ

\bar{P} คือค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย

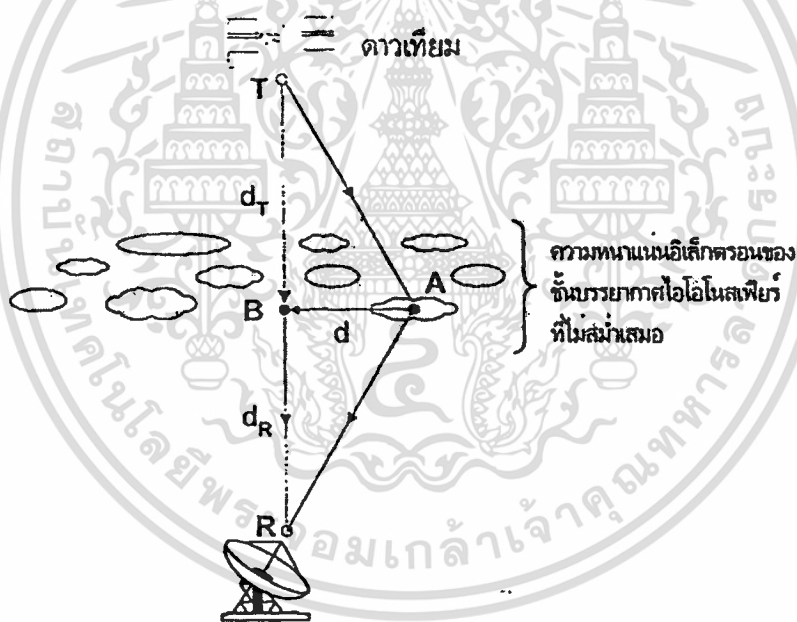
อีกดัชนีหนึ่งซึ่งง่ายกว่าการคำนวณดัชนี S_4 คือ Scintillation Index หรือ SI

$$SI = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2.27)$$

เมื่อ P_{\max} คือ ค่ามากที่สุดของระดับสัญญาณอันดับที่ 3

P_{\min} คือ ค่าน้อยที่สุดของระดับสัญญาณอันดับที่ 3

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันในย่านความถี่ต่ำกว่า 4 GHz นั้นสาเหตุมาจากความสม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และขึ้นอยู่กับ จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปี เวลาระหว่างวันฤดูกาล จุดพิกัดที่ตั้ง และอื่น ๆ ในการสื่อสารดาวเทียมนั้นย่านที่มีผลกระทบของปรากฏการณ์ การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันมากอยู่ที่ย่านเส้นศูนย์สูตร (Equatorial zone) ไม่สม่ำเสมอ ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถแสดงเป็นแบบจำลองได้



ภาพที่ 2.26 แสดงความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหัน

จากภาพ ถ้าระยะทาง TAR มากกว่า ระยะทาง TBR อยู่ $\lambda/2$ จะได้ดังสมการ

$$TAR = TBR + \lambda/2 \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่เดินทางในเส้นทาง TAR จะกลับเฟส 180 องศาที่คลื่นที่เดินทางในเส้นทางตรง ทำให้ระดับความแรงสัญญาณที่เครื่องรับมีค่าน้อยลง ซึ่งเรียกว่าเฟรสเนลโซนอันดับที่หนึ่ง (First Fresnel zone)

$$d = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_T d_r}{d_T + d_r}} \quad (2.29)$$

เมื่อ d คือ รัศมีเฟรสเนลโซนอันดับหนึ่ง
 λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ

ส่วนรัศมีเฟรสเนลโซนอันดับสูง(อันดับที่ n)จะหาได้ดังนี้

$$d_n = \sqrt{n \times d} \quad (2.30)$$

การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดอย่างกะทันหันที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะเกิดจากสาเหตุที่สัญญาณเกิดการหักเหจากความไม่สม่ำเสมอในเฟรสเนลโซนอันดับต่าง ๆ หลาย ๆ เส้นทางนั้นมารวมกัน ทำให้เกิดการรวมเฟส และต่างเฟส ทำให้ระดับสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็ว ความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นเกิดจากหลายสาเหตุ ซึ่งในตอนกลางวันจะเกิดที่ชั้น E ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งเรียกว่า Sporadic- E ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด อย่างกะทันหันที่เรียกว่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด อย่างกะทันหันแบบครึ่งคาบ (Quasi-periodic Scintillation) ส่วนในเวลากลางคืนความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นั้นจะเกิดขึ้นในชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะอยู่ที่ระยะความสูงตั้งแต่ 200-600 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการบอกพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลกของเครื่องรับจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลเป็นขั้นตอนตามรายละเอียดที่นำเสนอ ดังนี้

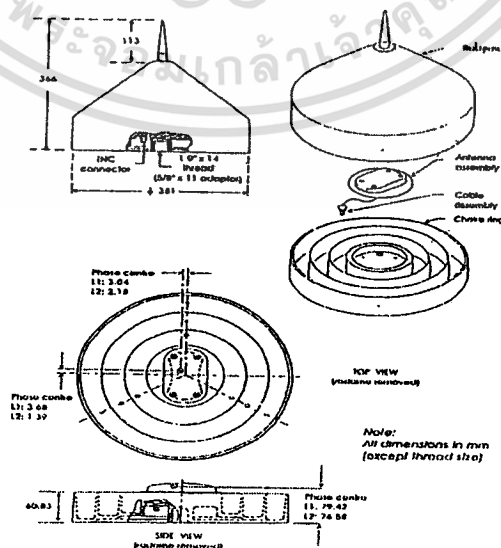
- 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอส ประกอบไปด้วย

3.1.1 เครื่องรับจีพีเอส (GPS Receiver) เป็นเครื่องรับจีพีเอส NovAtel Pro-Pak receiver คัดแปลง แบบความถี่เดียว (Single frequency : $L1 = 1.57542$ GHz) ซึ่งมีความถี่ในการ Sampling สัญญาณ 50 Hz

3.1.2 เสาอากาศรับสัญญาณจีพีเอส (GPS Antenna Model 503) เป็นเสาอากาศที่รับสัญญาณจีพีเอสได้ทั้งสัญญาณ L1 และ L2 มีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนติดตั้งภายในโคมครอบต่อกับขาตั้งสูงประมาณ 30 เซนติเมตร

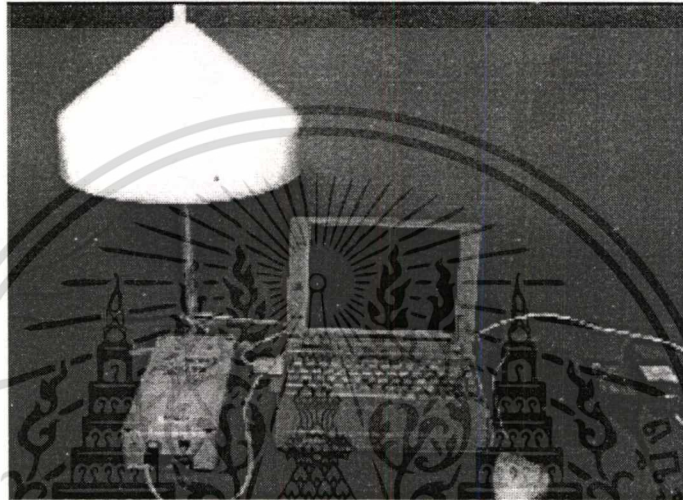


ภาพที่ 3.1 GPS Antenna

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เครื่องคอมพิวเตอร์ (PC) เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น P100 ใช้ระบบปฏิบัติการ LINUX และ run โปรแกรมควบคุมเครื่องรับจีทีเอส (LINUX L1 Ionosphere Scintillation Monitor : ISM)

3.1.4 เครื่องบันทึกข้อมูลสำรอง (Secondary Storage) Iomega Jaz Traveller และแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ Jaz disk ความจุ 1 กิกะไบต์



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในเก็บข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีทีเอส

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

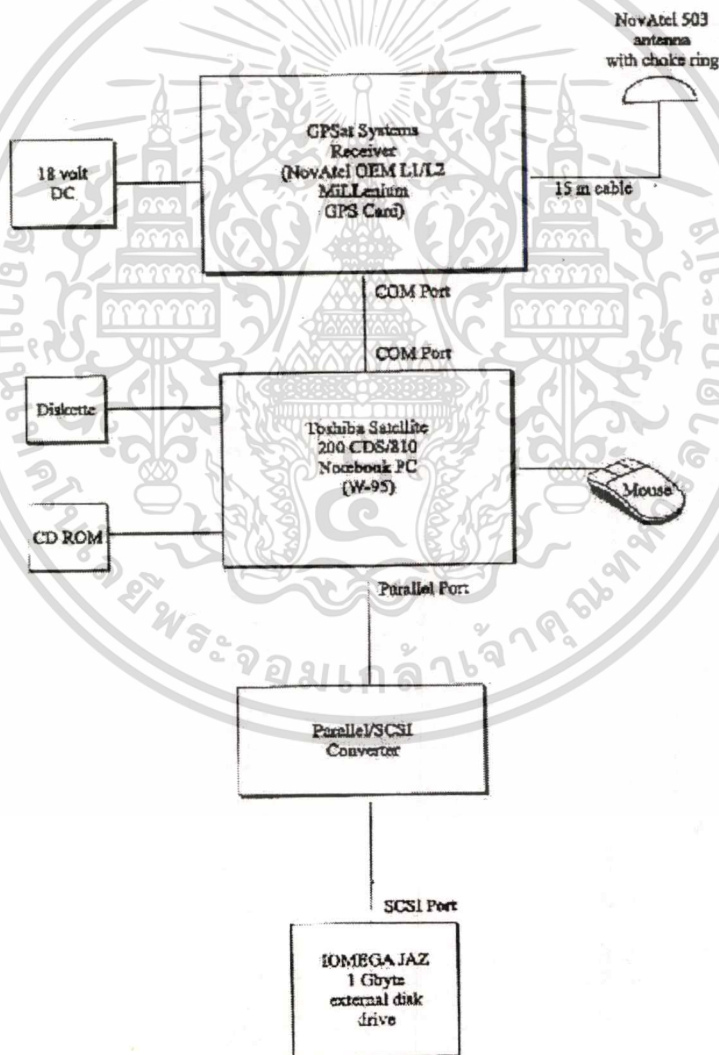
ในการศึกษาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีทีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำเอาข้อมูลในช่วงที่มีแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด คือในช่วงปี 2543 – 2546 มาทำการวิเคราะห์ จึงได้ทำการนำเอาข้อมูลที่ได้มีการเก็บรวบรวมไว้ก่อนหน้านี้ ในช่วงดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลที่น่ามานี้มีรายละเอียดในการการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนดังนี้

การเก็บรวบรวมข้อมูล โดยทำการติดตั้งสถานีเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ในบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางรอบทิศทางเป็นมุมสูงสูงเกินกว่า 15 องศา และไม่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม และทำการเก็บรวบรวมตลอด 24 ชั่วโมงเพื่อเก็บข้อมูล โดยโปรแกรมควบคุมเครื่องรับจีทีเอสบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ISM (Ionospheric Scintillation Monitor) แล้วประมวลผลเพื่อคำนวณหาตำแหน่ง และข้อมูลประกอบ ที่รับสัญญาณได้มาจากดาวเทียมจีทีเอส แสดงบนหน้าจอภาพของคอมพิวเตอร์ แล้วเก็บบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ Log file ในแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละวัน ลงใน Jaz disk ที่มีความจุ 1 Gb ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้ยาวนานเป็นเวลา 1 เดือนแล้วจึงทำการเปลี่ยน Jaz disk

ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ISM นี้จะทำการเก็บเป็นเวลาประมาณ 3 ปีแบ่งเป็น 2 ช่วงโดยเริ่มเก็บข้อมูลที่ ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ ในวันที่ 6 มิถุนายน 2543 ไปจนถึง วันที่ 1 พฤษภาคม 2544 จึงทำการย้ายสถานีไปที่ สถาบันราชภัฏเชียงราย อ.เมือง จ.เชียงราย และเก็บข้อมูล ต่อจนถึงวันที่ 6 มกราคม 2546 จึงหยุดการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้นี้ถือว่าอยู่ใน ช่วงที่มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุดในวงรอบ 11 ปีนี้



ภาพที่ 3.3 ภาพส่วนประกอบของระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องรวบรวมได้นี้แบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

1.) ISM-data (Ionospheric Scintillation Monitor - data) เป็นส่วนที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลก พิกัดของดาวเทียม และข้อมูลเกี่ยวกับ Amplitude Scintillation และ Phase Scintillation

2.) TEC-data (Total Electron content - data) เป็นส่วนที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลก ข้อมูลของสัญญาณ ความถี่ และปริมาณอิเล็กตรอนอิสระบนชั้นบรรยากาศ

3.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องรวบรวมมาได้นี้เป็นข้อมูลในภาวะที่มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุด และช่วงที่มีความแปรปรวนบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์กำลังลดลง ในการดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล ปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอส และเพื่อหาสมการเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

3.3.1 การเตรียมข้อมูล

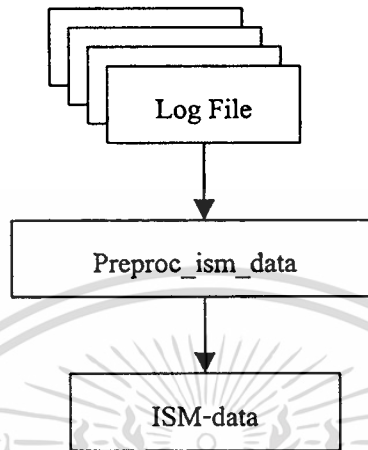
3.3.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของการบอกพิกัด

3.3.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัด กับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด โดยเลือกข้อมูลในช่วงวันที่มีค่าการกระจายตัวของการบอกพิกัดสูงมากๆ ที่เกิดจากผลกระทบจากความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์

3.3.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด โดยเลือกข้อมูลในช่วงวันที่มีค่าการกระจายตัวของการบอกพิกัดสูงมากๆ ที่เกิดจากผลกระทบจากความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์

3.3.5 การสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัด โดยใช้ปัจจัยปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำโดยเลือกข้อมูลในช่วงวัน และเวลาที่มีค่าการกระจายตัวของการบอกพิกัดสูงมากๆ ที่เกิดจากผลกระทบจากความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์

3.3.1 การเตรียมข้อมูล นำข้อมูลเฉพาะในส่วนของ ISM-data ที่เก็บรวบรวมได้มาในรูปแบบของ logfile ในแต่ละวันที่เก็บรวบรวมข้อมูลมาประมวลผล แปลงข้อมูลจากข้อมูลดิบ ให้เป็นข้อมูลที่มีโครงสร้างเป็นรายเดือนโดยโปรแกรม Preproc_ism_data.m ก่อนนำมาวิเคราะห์ข้อมูล



ภาพที่ 3.4 แสดงการประมวลผลเพื่อเตรียมข้อมูลดิบให้เป็นข้อมูลที่มีโครงสร้าง

โดยข้อมูลที่แปลงมาแล้วจะมีโครงสร้างดังต่อไปนี้

Name	Size	Bytes	Class
cts	30x11	30655936	struct array
dop	1x30	6588736	struct array
ism	30x31	37831560	struct array
pos	1x30	3135528	struct array

Grand total is 9567183 elements using 78211760 bytes

cts()

```

    prn: [1x1440 double]
  tracking_state: [1x1440 double]
    doppler: [1x1440 double]
      CN0: [1x1440 double]
    residual: [1x1440 double]
    lock_time: [1x1440 double]
  pseudorange: [1x1440 double]
    reject_code: [1x1440 double]
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dop()

```
gdop: [1x1440 double]
pdop: [1x1440 double]
htdop: [1x1440 double]
hdop: [1x1440 double]
tdop: [1x1440 double]
numsats: [1x1440 double]
sat_prn: [1440x12 double]
time: [1x1440 double]
```

ism()

```
prn: 1
azim: [1x249 double]
elev: [1x249 double]
CNO: [1x249 double]
S4: [1x249 double]
sig1: [1x249 double]
sig3: [1x249 double]
sig10: [1x249 double]
sig30: [1x249 double]
sig60: [1x249 double]
mean_cc_div: [1x249 double]
sig_cc_div: [1x249 double]
p: [1x249 double]
T: [1x249 double]
amp_K0: [1x249 double]
amp_K1: [1x249 double]
amp_K2: [1x249 double]
amp_K3: [1x249 double]
lock_time: [1x249 double]
channel_status: [1x249 double]
time: [1x249 double]
range: [1x249 double]
ratsat: [1x249 double]
ionsat: [1x249 double]
```

pos()

```
lat: [1x1440 double]
lon: [1x1440 double]
alt: [1x1440 double]
undulation: [1x1440 double]
datum_id: [1x1440 double]
lat_stdev: [1x1440 double]
lon_stdev: [1x1440 double]
alt_stdev: [1x1440 double]
sol_status: [1x1440 double]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่แปลงจากข้อมูลดิบจะอยู่ในรูปของแฟ้มข้อมูล ที่มีโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบ Array ของนาฬิกาในแต่ละวัน โดยเริ่มตั้งแต่ นาฬิกาที่ 1 ของวันจนถึงนาฬิกาที่ 1440 โดยเวลาที่ใช้ในการเก็บ บันทึกข้อมูลจะใช้เวลามาตรฐาน UT (Universal Time) ในแฟ้มข้อมูล ข้อมูลในแต่ละวันจะมีโครงสร้าง เหมือนกันทุกวันจนครบเดือน และตั้งชื่อแฟ้มข้อมูลตามเดือนและปีที่เก็บรวบรวมข้อมูล เช่น sep2001.mat หมายถึง แฟ้มข้อมูลที่เก็บข้อมูลในเดือน กันยายน ปี 2001

ข้อมูลในส่วนที่ 2 ข้อมูลของ TEC- data จะมีลักษณะการจัดเก็บเป็น Aray ของนาฬิกาของวัน เช่นเดียวกับ ISM-data ซึ่งเตรียมข้อมูลโดยการอ่านแฟ้มข้อมูลจาก โปรแกรม readTECdata.m ข้อมูล TEC-data ที่อ่านมาได้มีโครงสร้างของโค้ดดังนี้

```
tecdata( )
    lat: 19.9862286339185
    lon: 99.8465232333439
    L1code: [1x1440 double]
    L2code: [1x1440 double]
    L1phase: [1x1440 double]
    L2phase: [1x1440 double]
    elev: [1x1440 double]
    azim: [1x1440 double]
    cnoL1: [1x1440 double]
    cnoL2: [1x1440 double]
    yr: 2001
    mth: 9
    day: 25
    hour: 14
    min: 25
    prn: 1
```

3.3.2 วิเคราะห์การกระจายตัวของการบอกรบกวน นำข้อมูล แลตติจูด และลองจิจูด ของทุก ๆ นาฬิกาสร้างแผนภูมิเพื่อดูการกระจายตัว (Scatter) ของการบอกรบกวนที่คลาดเคลื่อนออกไปจากจุดที่ถูกต้องและหาค่าซึ่งเป็นตัวแทนของการกระจายตัวของการบอกรบกวนในวัน หรือช่วงเวลานั้นมีขั้นตอนดังนี้

- 1.) หาค่าเฉลี่ยของ แลตติจูด และลองจิจูดมาเป็นตัวแทนพิกัดตำแหน่ง
- 2.) หาระยะทางจากพิกัดเฉลี่ยในข้อ 1 มายังพิกัดที่อ่านได้ในแต่ละนาฬิกา จนครบ

ทุก ๆ นาฬิกาในหนึ่งวัน และเปลี่ยนระยะทางที่ได้ให้เป็นเมตรโดยใช้สูตร

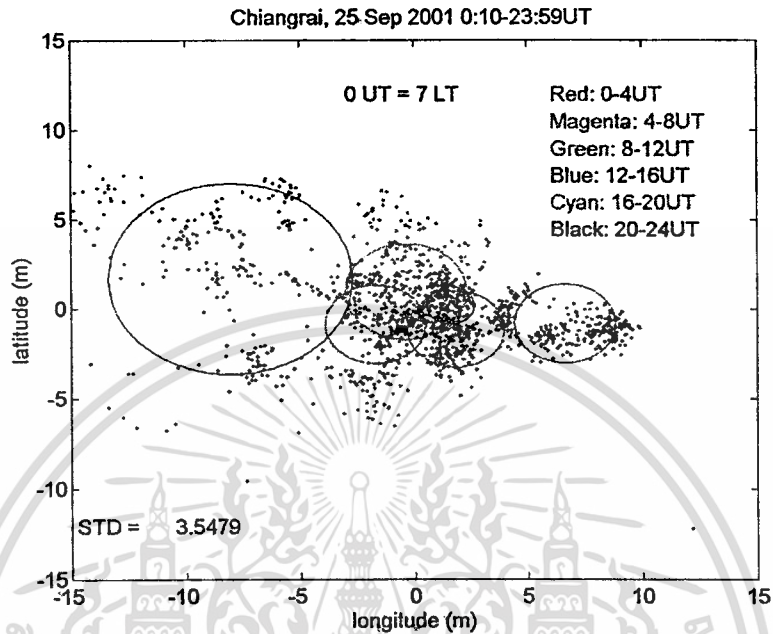
$$\text{lat_metres}_i = (\text{lat}_i - \text{averagelat}) \times 2 \times \pi \times 6378 \times 10^3 / 360 \quad (3.1)$$

$$\text{lon_metres}_i = (\text{lon}_i - \text{averagelon}) \times 2 \times \pi \times 6378 \times 10^3 / 360 \quad (3.2)$$

- 3.) หาค่า CEP หรือ ค่าร้อยละ 50 แรกของพิกัด โดยแบ่งข้อมูลพิกัดทั้งหมดจากข้อ 2 เป็นช่วงละ 2 ชั่วโมงแล้วสร้างวงกลมล้อมรอบพิกัดในช่วงนั้น ซึ่ง ค่าร้อยละ 50 แรกของพิกัดในแต่ละช่วงคือค่า มัชฌิมาน (median) ของช่วงเวลานั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) หาค่าการกระจายตัวออกมาจากจุดศูนย์กลาง ของพิกัดที่อ่านได้ในแต่ละนาทีซึ่งก็คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นตัวแทนของการกระจายตัวของพิกัด



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัด (Scatter)

จากแผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัด ทำให้ทราบวัน และช่วงเวลาที่มีการกระจายตัวของการบอกพิกัด และทำให้สามารถเลือกข้อมูลในวัน และเวลาที่มีการกระจายตัวของการบอกพิกัดมากที่สุดหรือน้อยที่สุด เป็นตัวแทนเพื่อ ไปวิเคราะห์ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำกับระยะทาง และความถี่ในการบอกพิกัดผิดพลาดตามแกนของเวลา

3.3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำซึ่ง ได้แก่ S4 Sig60 และ TEC กับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ตาม แลตติจูด ลองจิจูด และ Absolute Position Error เพื่อตรวจสอบการบอกพิกัดที่คลาดเคลื่อนเกิดจากปัจจัยที่ศึกษาจริง และดูรายละเอียดของปัจจัยในช่วงเวลาที่เกิดการบอกพิกัด มีขั้นตอนดังนี้

- 1.) สร้างแผนภูมิตามของ แลตติจูด ลองจิจูด และ Absolute Position Error ตามแกนของเวลา
- 2.) หาค่าเฉลี่ยของ S4 และ sig60 จากค่าเฉลี่ยทุกๆ ดวงที่นำมาใช้คำนวณหาพิกัด

ในอนาที่นั้น แล้วนำค่าเฉลี่ยของ S4 และ sig60 มาสร้างแผนภูมิตามแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) นำค่าเฉลี่ย ของค่า TEC ของดาวเทียมทุกดวงที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดในนาที นั้นมาสร้างแผนภูมิตามแกนเวลา และเนื่องจากค่า TEC ไม่มีข้อมูลอยู่ TEC-data แต่สามารถคำนวณหา ค่าTEC ได้จากค่า Pseudo - range L1code และ L2code และ ความถี่ของสัญญาณ จีพีเอสใช้ ที่เก็บบันทึก อยู่ในข้อมูล TEC-data ได้ดังนี้ (Lao Sheng Lin 1997 : 35)

$$\begin{aligned}
 TEC &= \frac{1}{40.3} \times \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right)^{-1} \times (p_2 - p_1) \\
 &= 9.5196 \times 10^{16} \times (p_2 - p_1) \quad [\text{el}/\text{m}^2] \\
 &= 9.5196 \times (p_2 - p_1) \quad [\text{TECU}] \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

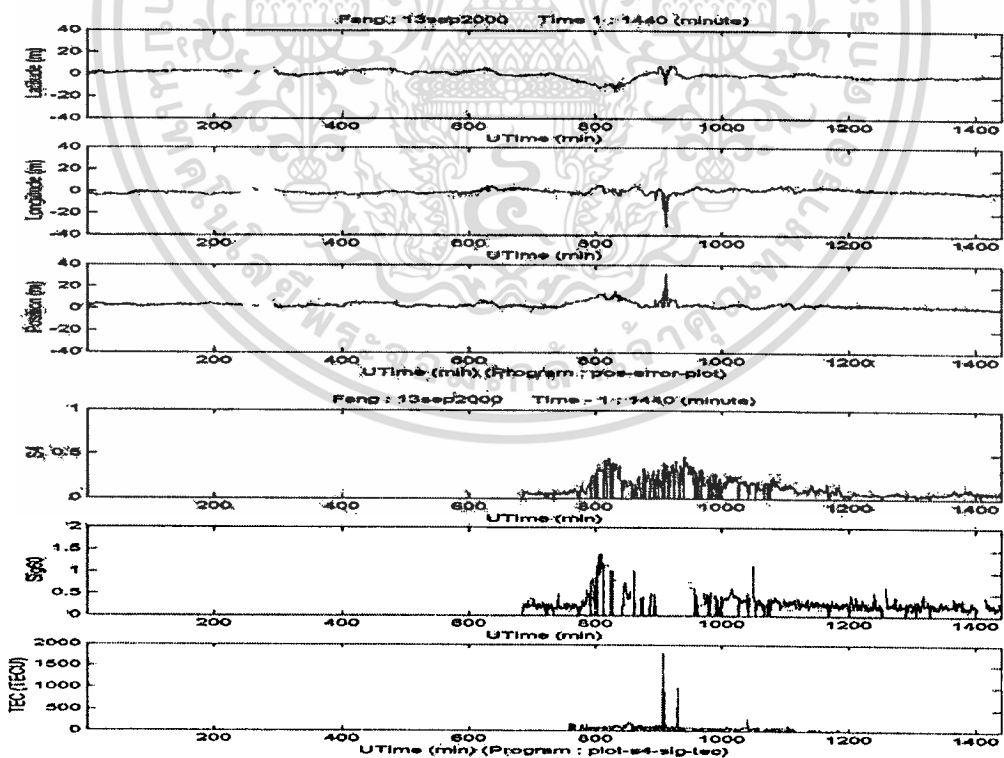
เมื่อ

f_1 = ความถี่ L1 = 1575.42 MHz

f_2 = ความถี่ L2 = 1227.60 MHz

p_1 = Pseudo - range 1

p_2 = Pseudo - range 2



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงการความสัมพันธ์ระหว่าง S4 Sig60 และ TEC กับความคลาดเคลื่อน ในการบอกพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะนำเอาค่า แลตติจูด ลองจิจูด และ Absolute Position error มาสร้างแผนภูมิเปรียบเทียบกับจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดตามแกนของเวลาเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงจำนวนดาวเทียมที่รับได้ ในขณะที่เกิดความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด

3.3.5 การสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัด ในการสร้างสมการนี้จะนำเอาข้อมูลของในช่วงวัน และเวลาที่เครื่องรับจีพีเอสมีการบอกพิกัดคลาดเคลื่อน เนื่องจากได้รับผลกระทบมาจากปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสมาวิเคราะห์ เนื่องมาจากในการคำนวณหาพิกัดแต่ละครั้งของเครื่องรับจะอาศัย พิกัดของดาวเทียมตามแกน x แกน y แกน z (Cartesian Coordinate) และระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับจีพีเอส ของดาวเทียมแต่ละดวง ตามสมการ

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = P \quad (3.4)$$

และเนื่องจาก P คือ ระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับจีพีเอส ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ดาวเทียมในระบบจีพีเอสยังไม่มีเทคโนโลยีที่จะสามารถวัดระยะทางมาถึงเครื่องรับได้จริงๆ แต่ระยะทางที่ได้มานี้ เกิดจากการคำนวณจาก ระยะเวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับจีพีเอสคูณกับความเร็วที่สัญญาณใช้เดินทาง ดังนั้นระยะทางที่คำนวณได้นี้จึงเรียกว่า Pseudorange (Pr)

$$Pr = C \times (t_i - t_0) \quad (3.5)$$

เมื่อ Pr = Pseudorange

$$C = \text{ความเร็วที่สัญญาณใช้เดินทางมีค่าเท่ากับความเร็วแสง} \\ = 299792458 \quad [\text{m/s}]$$

t_0 = เวลาที่ดาวเทียมเริ่มส่งสัญญาณ

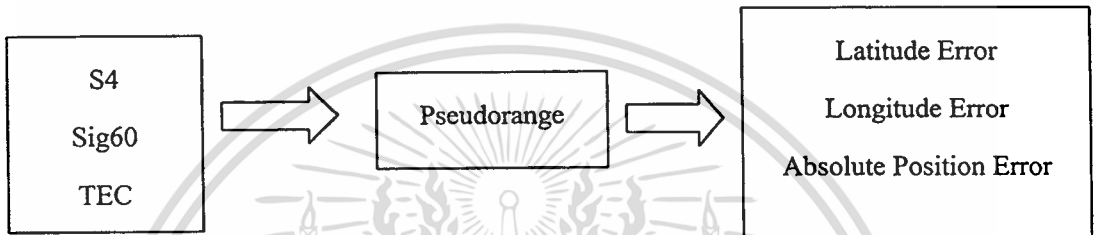
t_i = เวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงเครื่องรับจีพีเอส

สมการในการคำนวณหาพิกัดจึงเป็น

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = Pr \quad (3.6)$$

เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในภาวะที่มีความแปรปรวนทำให้สัญญาณมีการหมุนวน การหักเห การเลี้ยวเบน หรือเกิดการหน่วงเวลา ทำให้สัญญาณมาถึงเครื่องรับจีพีเอสช้ากว่าปกติ คือค่า t_p ที่ได้ผิดพลาด ทำให้ระยะทางที่คำนวณได้ หรือ Pseudorange เกิดการผิดพลาดเมื่อนำเอา Pseudorange นี้มาคำนวณหาพิกัดจึงได้พิกัดที่คลาดเคลื่อนออกไปจากความเป็นจริง

ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบ่งเป็น ความแปรปรวนทางแอมพลิจูด (Amplitude Scintillation) สามารถวัดได้จากค่า S4 ความแปรปรวนทางเฟส (Phase Scintillation) สามารถวัดได้จากค่า Sig60 และปริมาณของอิเล็กตรอนบนชั้นบรรยากาศสามารถวัดได้จาก TEC



ปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอส

การบอกตำแหน่งคลาดเคลื่อน

ภาพที่ 3.7 แสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ Pseudorange ซึ่งมีผลลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัดของจีพีเอส

ในการสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอสจึงเริ่มด้วยการนำเอาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำ มาสร้างเป็นฟังก์ชันเพื่อแก้ไขค่า Pseudorange

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = Pr + f(S4, Sig60, TEC) \quad (3.7)$$

Pseudorange ที่แก้ไขแล้วจะมีเคียงกับระยะทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับจีพีเอสจริงๆ มากที่สุดด้วยใช้วิธี Least-Squares ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมาในรูปแบบของ โปรแกรมเชิงเส้นสั้น โดยจะใช้ Multiple Regression Analysis เป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณ เพื่อหาค่า ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งฟังก์ชันที่ได้จะมีรูปแบบดังนี้

$$\hat{Range}_i = a_{1i}Pseudorange_i + a_{2i}S4 + a_{3i}Sig60 + a_{4i}TEC + Error_i \quad (3.8)$$

โดยมีขั้นตอนในการสร้างฟังก์ชันดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.) เลือกข้อมูลในวันและช่วงเวลาที่มีการบอกพิกัดคลาดเคลื่อน เนื่องมาจากปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอส นำมาคำนวณเพื่อหาค่า a_1, a_2, a_3, a_4 และ Err_i เพื่อสร้างฟังก์ชันสำหรับแก้ไขค่า Pseudorange ตามรูปแบบของสมการที่ 3.8
- 2.) นำข้อมูลของวันและเวลาที่มีการบอกพิกัดคลาดเคลื่อนในชั้นตอนที่ 1 มาคำนวณหาพิกัดตามแลตติจูด และลองจิจูดเองจาก Pseudorange ที่มาจากเพิ่มข้อมูล โดยไม่ต้องปรับแก้ค่าพิกัดที่คำนวณ ได้ออกมาเพื่อให้เป็นพิกัดแรกออกของเวลานั้นจริง ๆ
- 3.) สร้างแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพจเอสที่คำนวณได้จาก Pseudorange ที่แก้ไขด้วยฟังก์ชันที่สร้างมาได้ โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของพิกัดที่คำนวณได้จากข้อมูล และความแม่นยำกับพิกัดจริงที่คำนวณจาก Range จริง ๆ ที่คำนวณมาจากพิกัดจริง ณ ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องรับจีพีเอสกับตำแหน่งของดวงดาว



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ในการศึกษาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นขั้นตอนตามรายละเอียดที่นำเสนอดังต่อไปนี้

4.1 วิเคราะห์การกระจายตัวของการบอกพิกัด

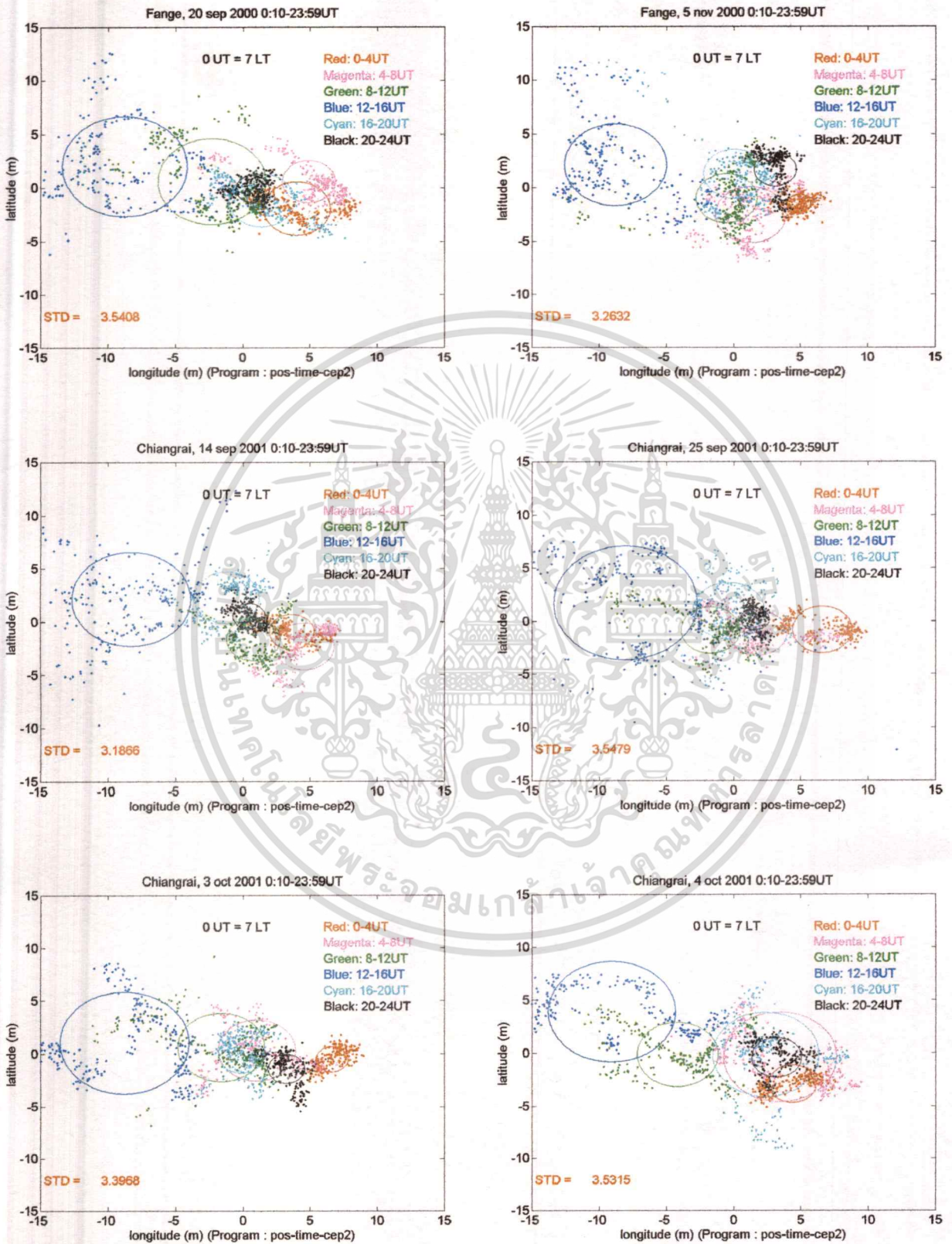
4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัด กับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด

4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด

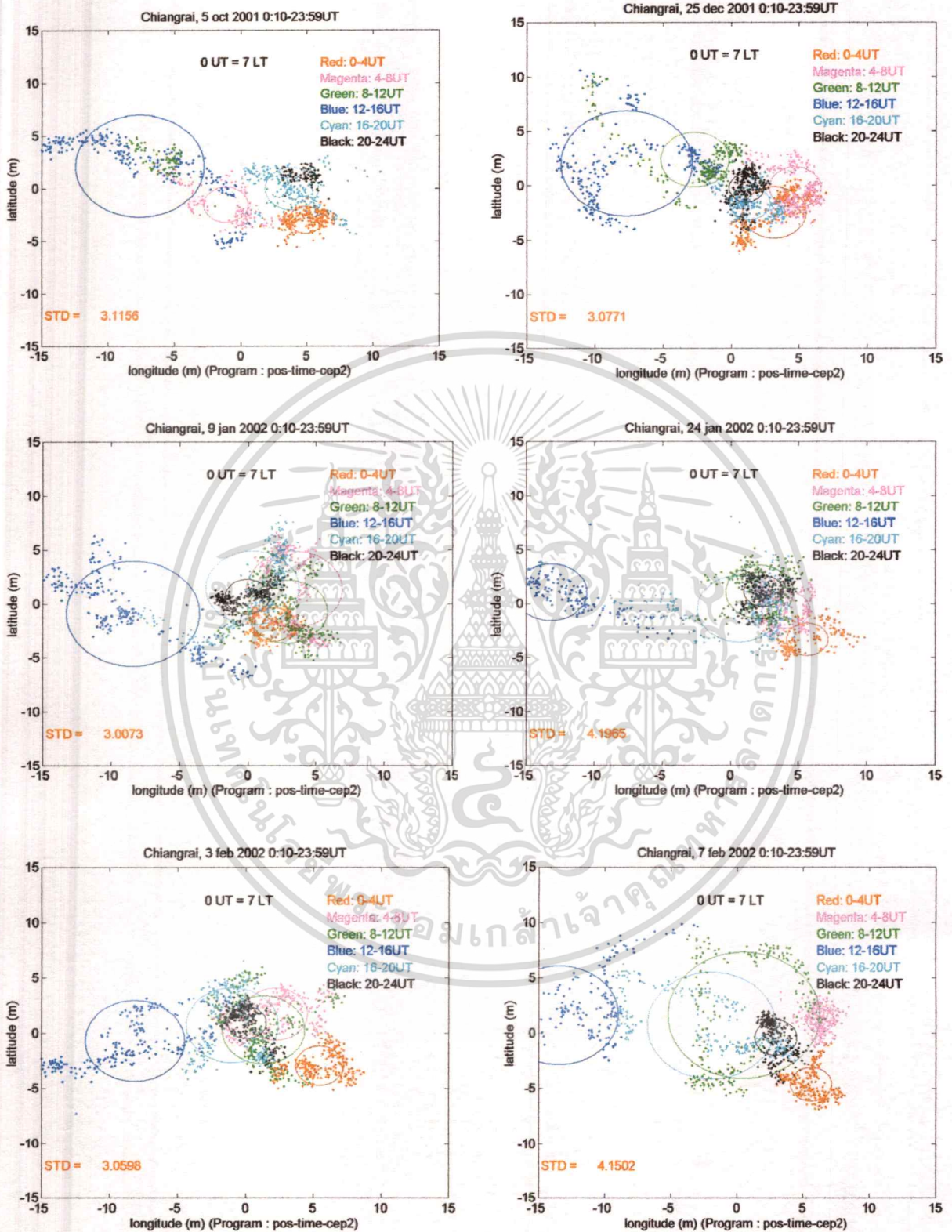
4.4 การสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัด

4.1 วิเคราะห์การกระจายตัวของการบอกพิกัด

นำข้อมูลที่อ่านเพิ่มข้อมูล ISM – data ทำการสร้างแผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัด (Scatter) ทุกวันในระยะเวลาที่เก็บข้อมูล ในวันที่มีค่าการกระจายของการบอกพิกัดมาก โดยพิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายตัว คือมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตั้งแต่ 3 ขึ้นไป และในวันที่มีค่าการกระจายของการบอกพิกัดน้อย คือมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 1 ซึ่งจะได้แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดดังต่อไปนี้

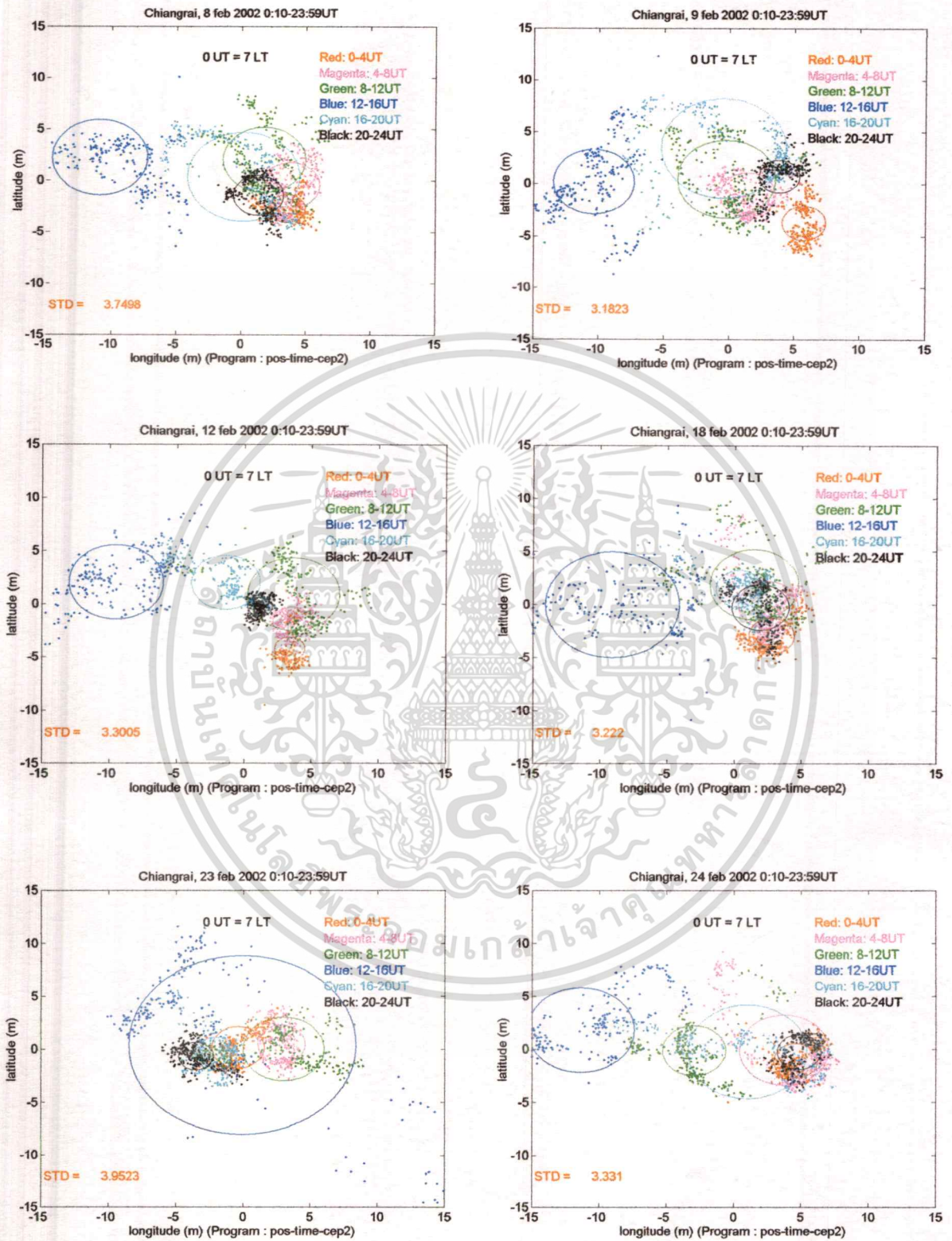


ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



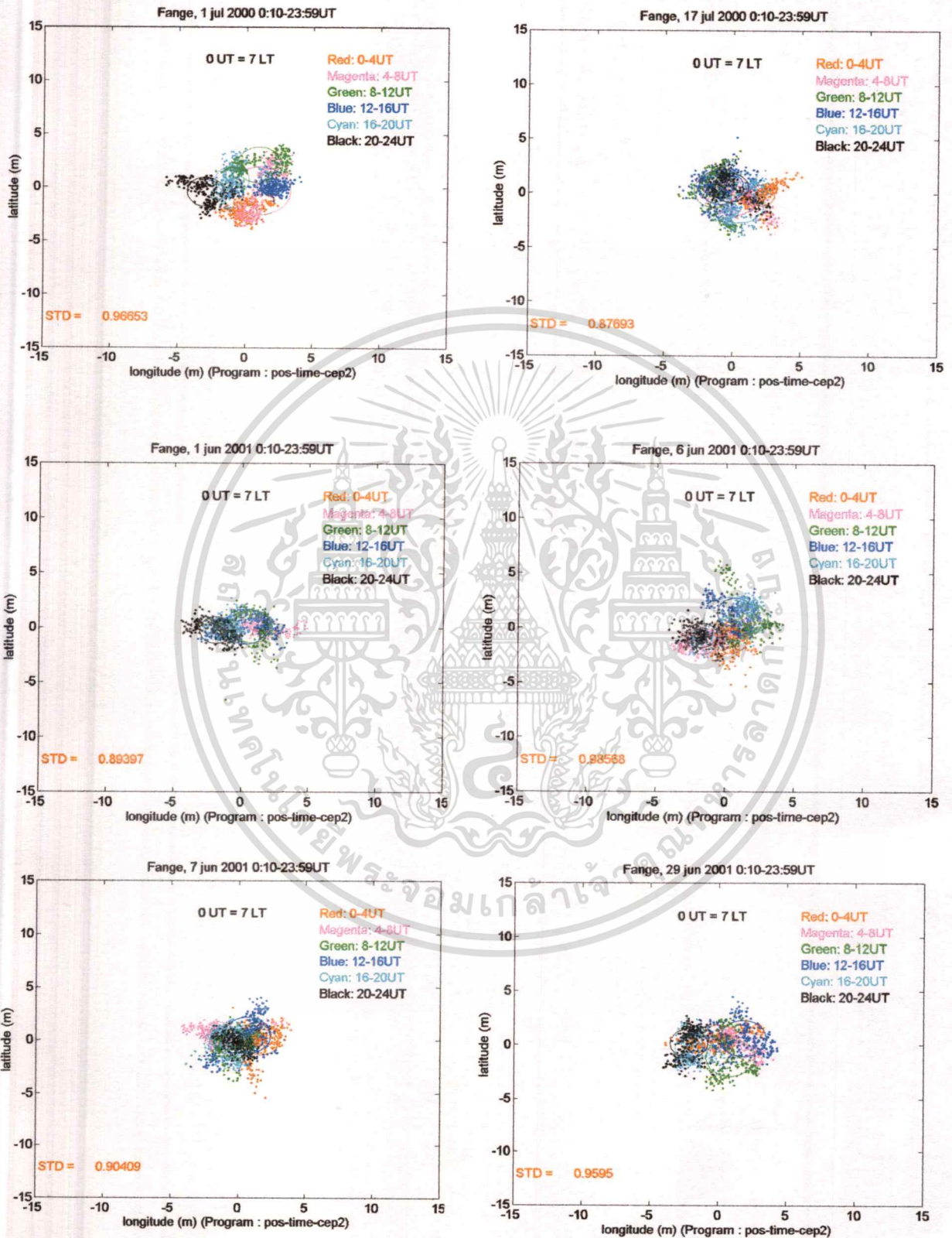
ภาพที่ 4.2 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

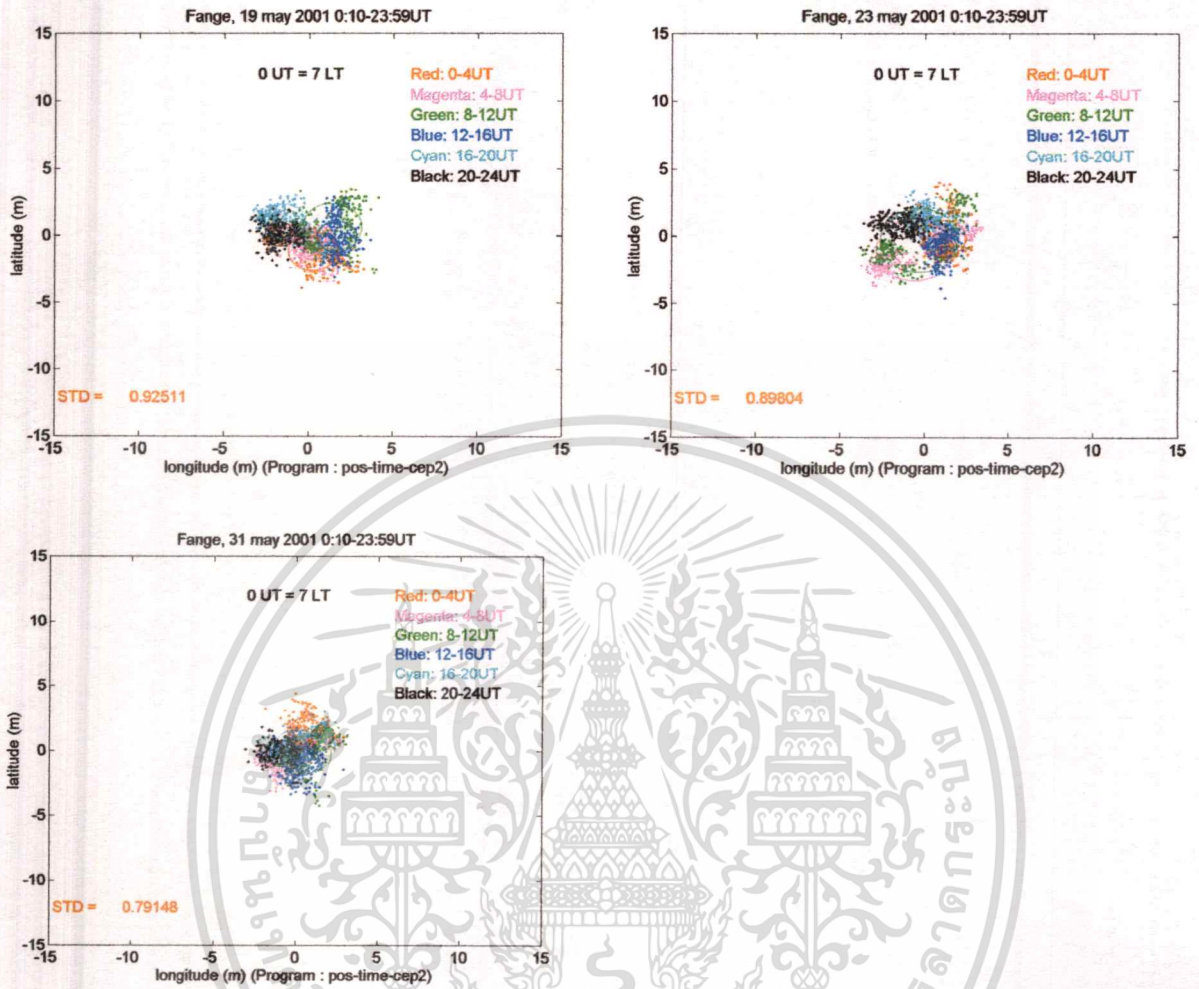


ภาพที่ 4.3 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกรักที่มียาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

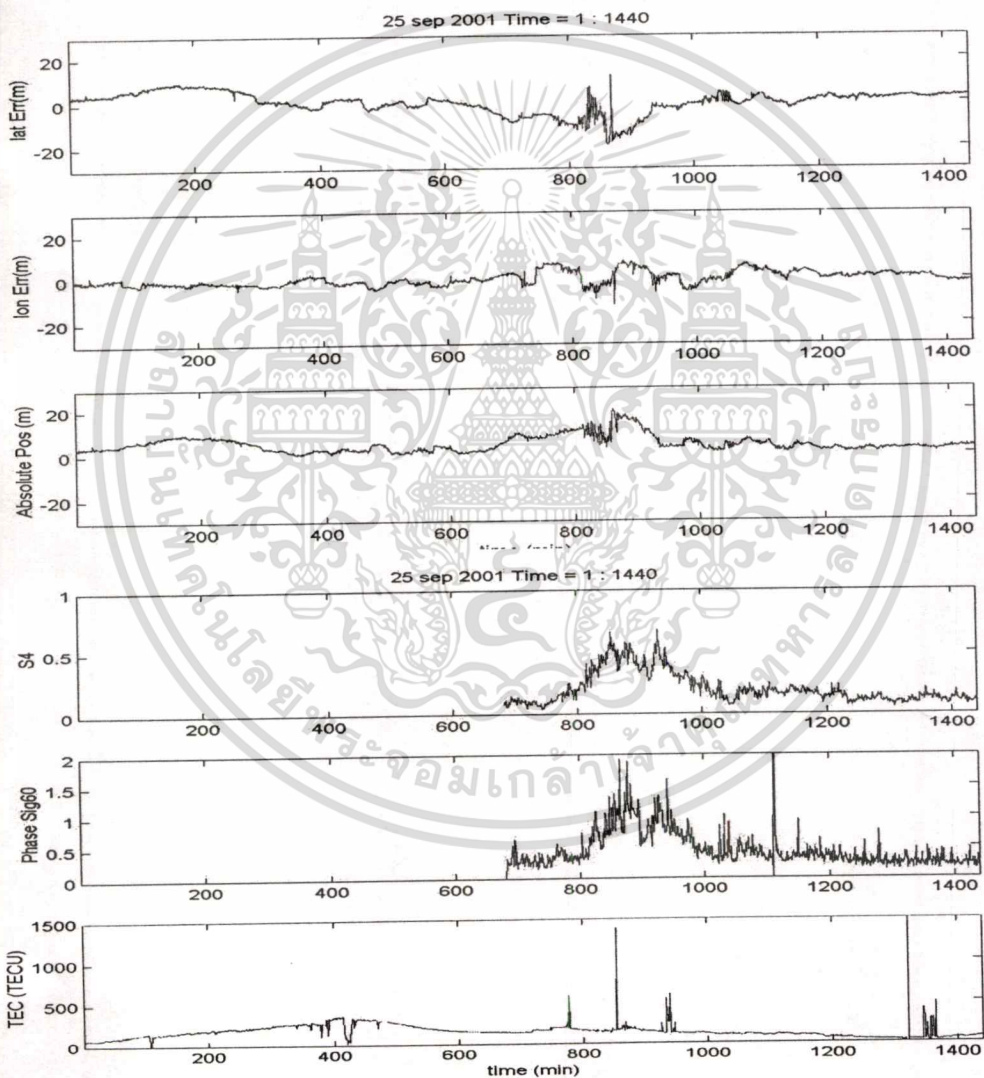


ภาพที่ 4.5 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของการบอกพิกัดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 1 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

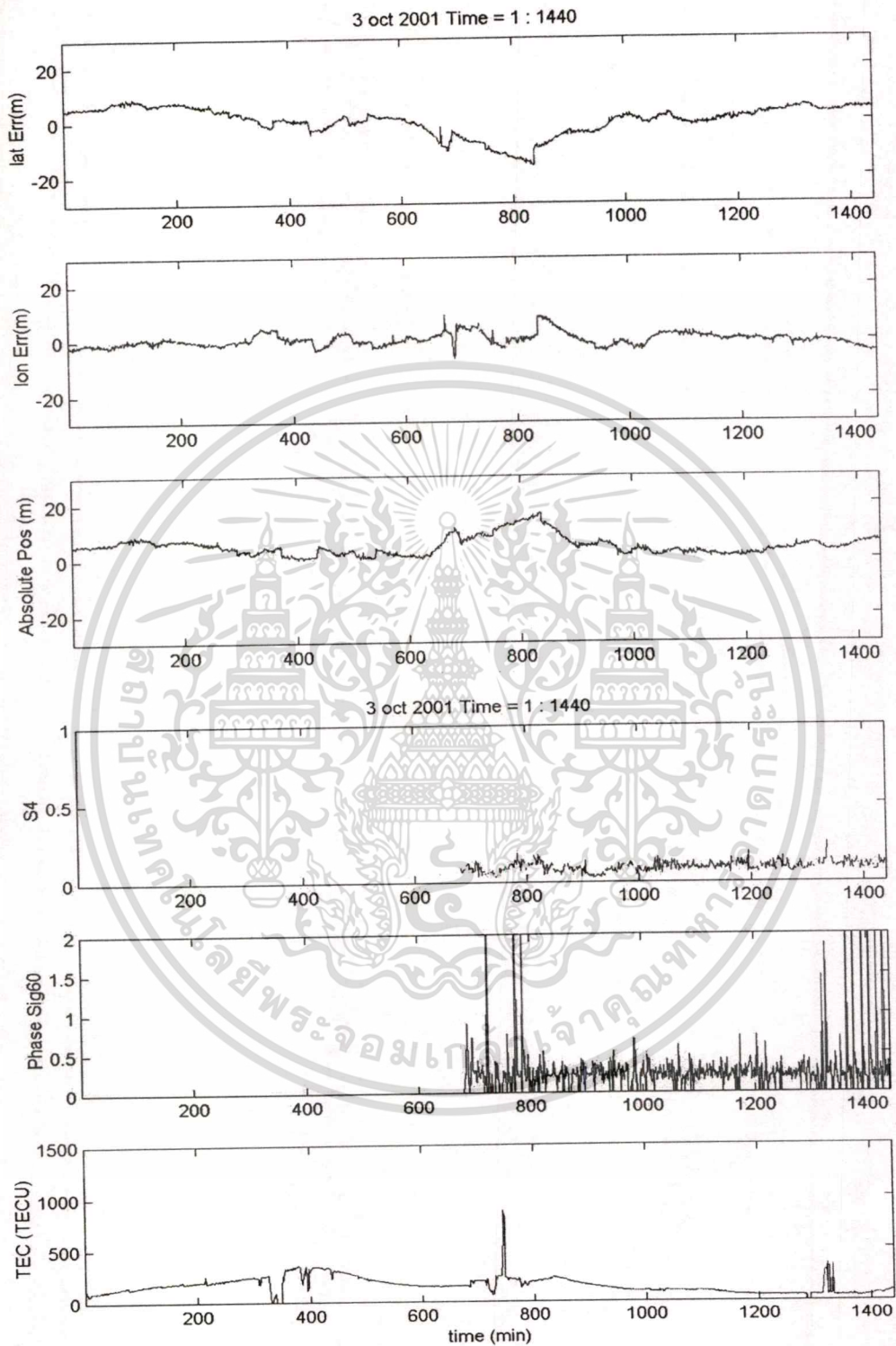
4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัด กับ ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด

นำข้อมูลที่อ่านเพิ่มข้อมูล ISM – data ที่มีการกระจายตัวของ การบอกพิกัด (Scatter) โดยเลือกในวันที่มีค่าการกระจายของการบอกพิกัดมาก และในวันที่มีค่าการกระจายของการบอกพิกัดน้อย มาสร้างแผนภูมิเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอสกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ได้แผนภูมิดังต่อไปนี้



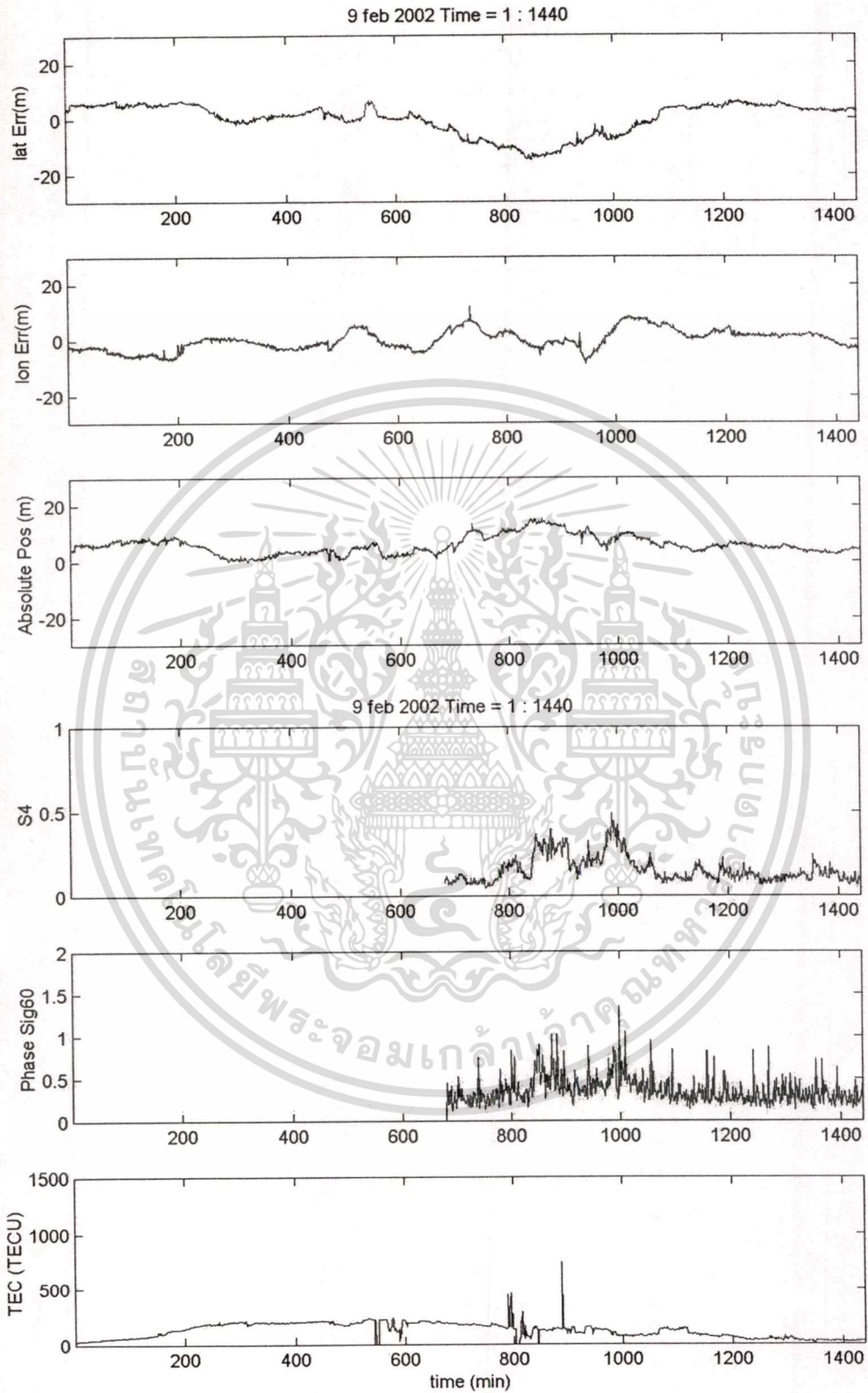
ภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 25 กันยายน 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ
ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 3 ตุลาคม 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

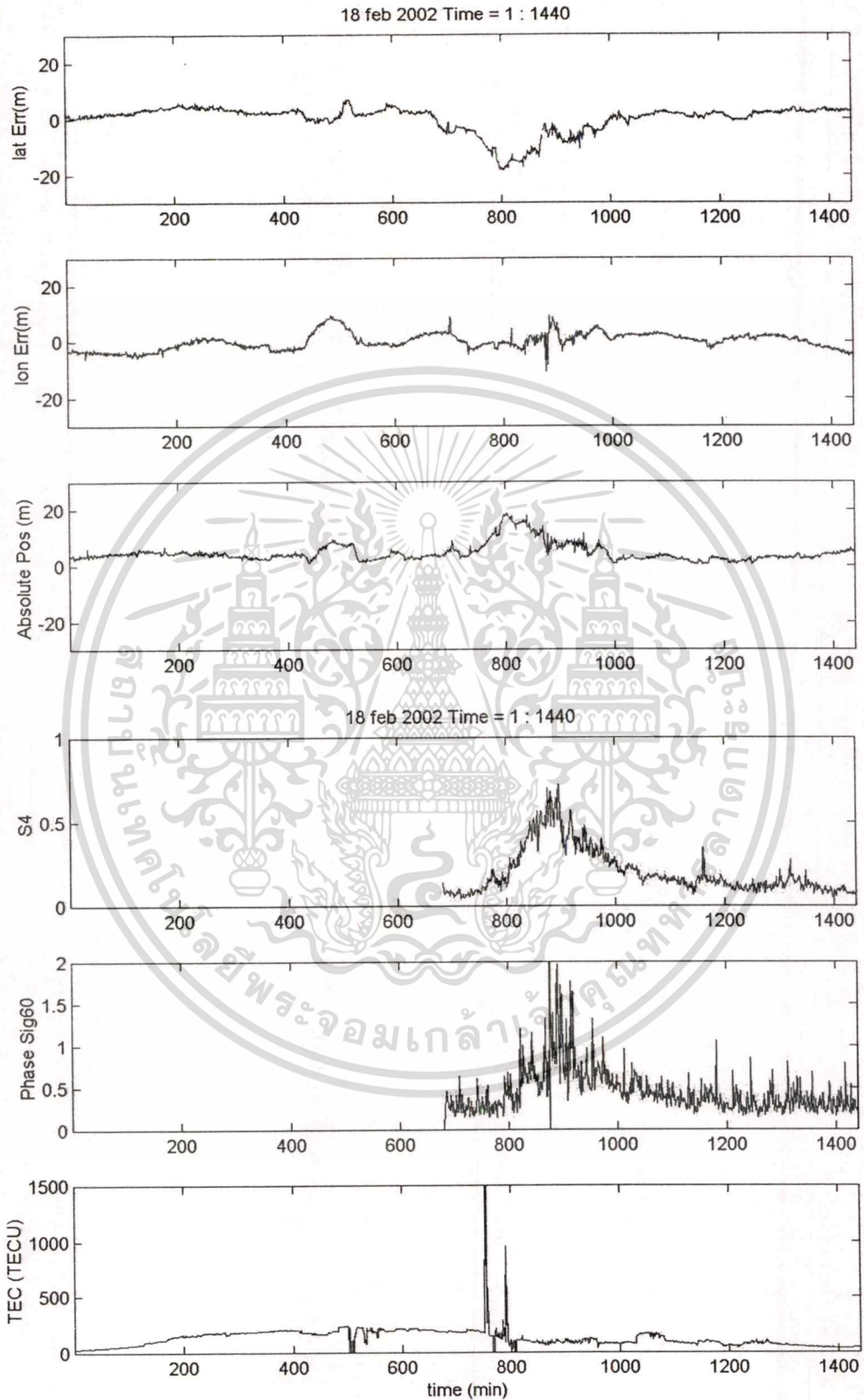


ภาพที่ 4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ

ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

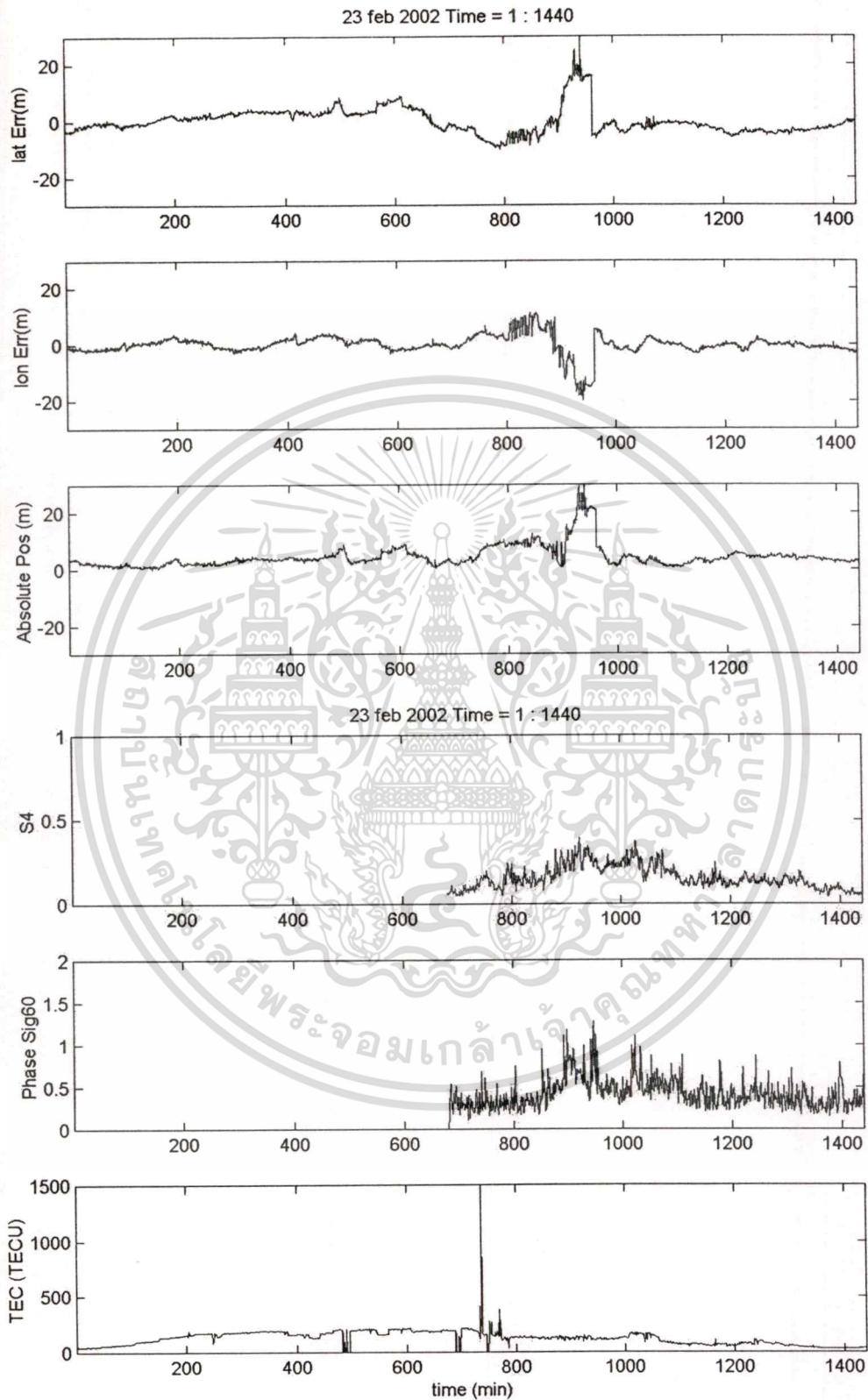


ภาพที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ

ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545

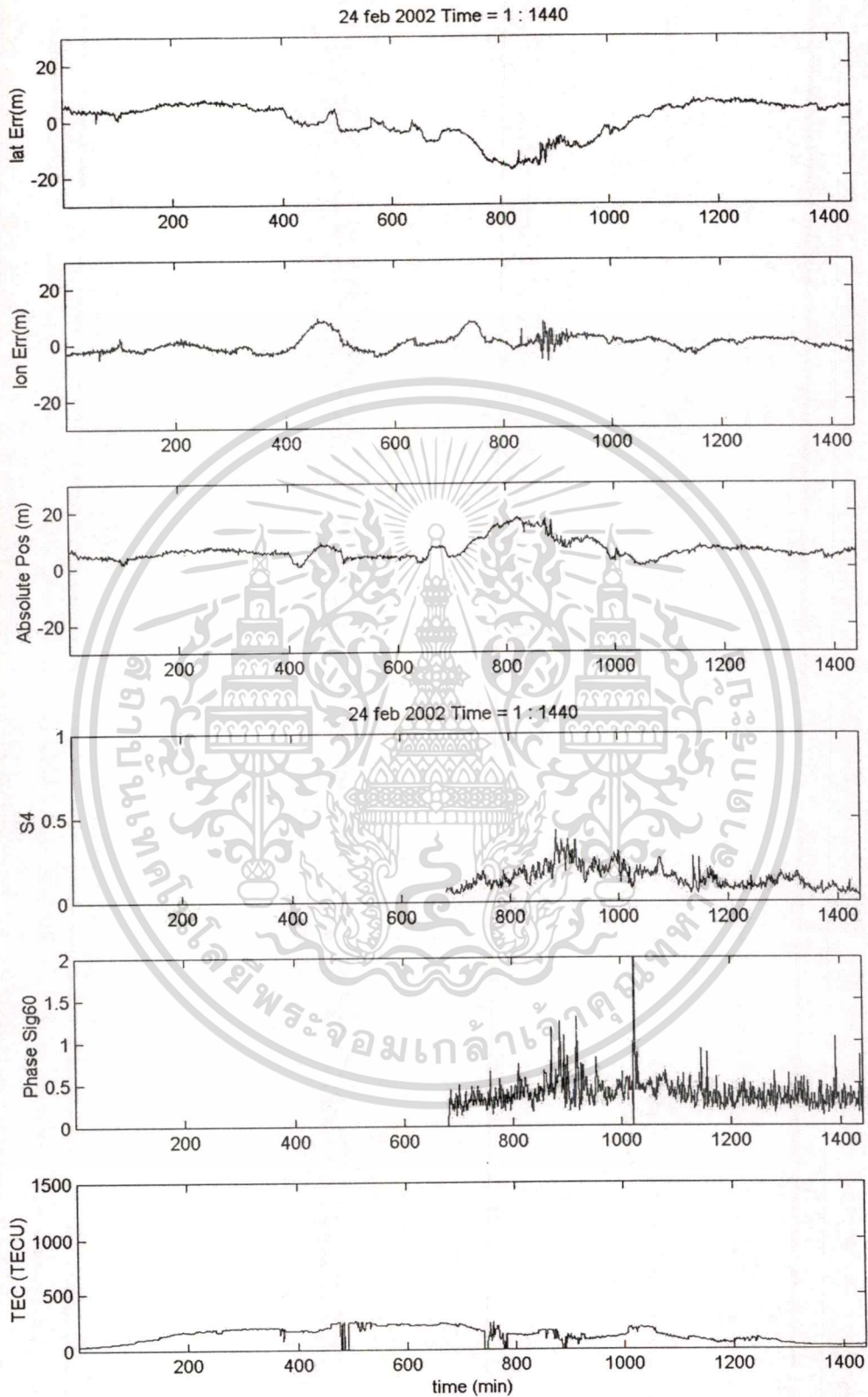
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ

ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



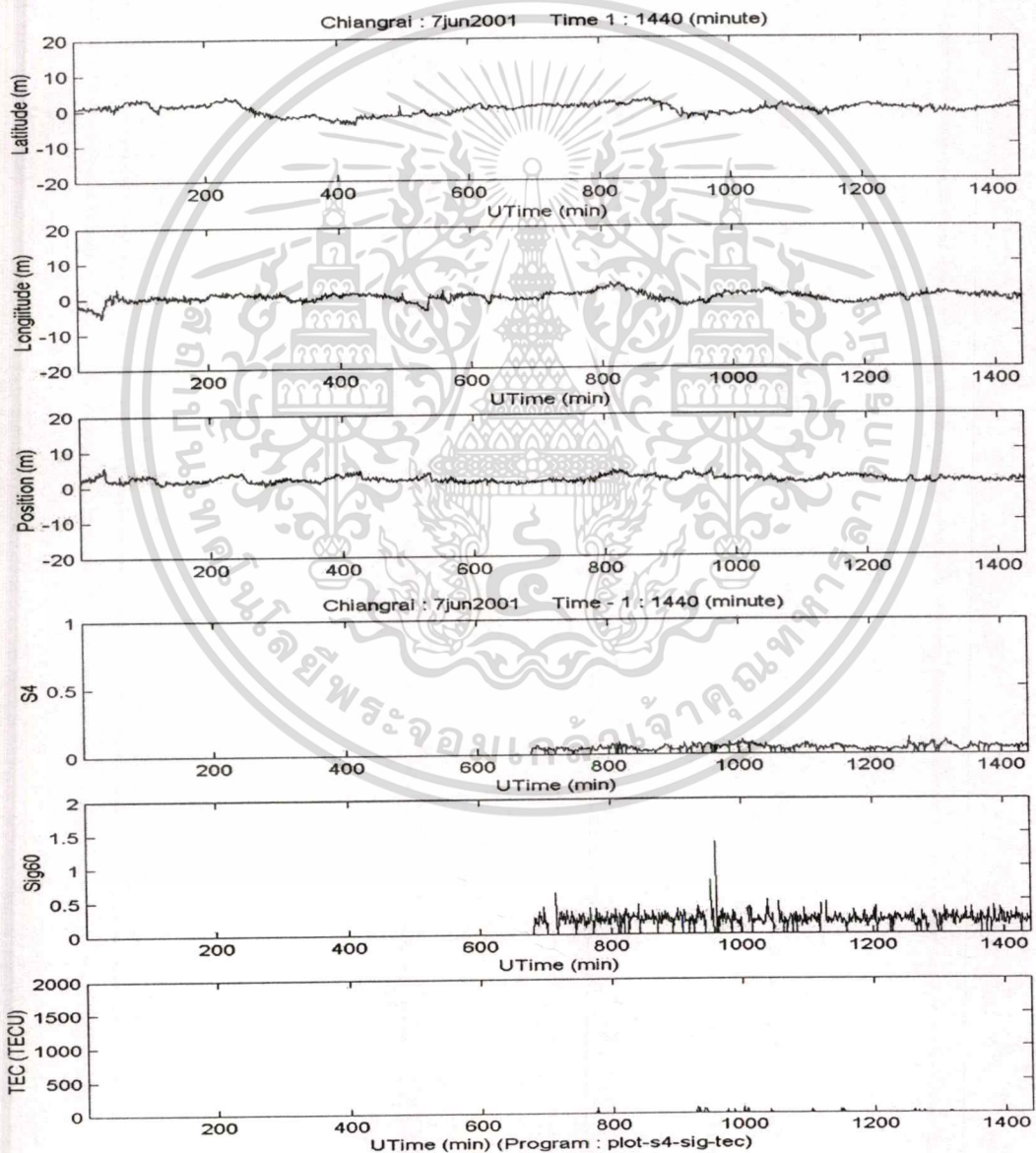
ภาพที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ

ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของเครื่องรับจีพีเอสในสถานะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด สังเกตได้ว่าเส้นของแผนภูมิที่แสดงถึงระยะทางที่คลาดเคลื่อนออกจากตำแหน่งจริงทาง ละติจูด ลองจิจูด และ Absolute position error จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงในช่วงเวลาหน้าที่ 800 ไปจนถึง 1000 ของวันซึ่งเป็นเวลาที่ตรงกับที่ค่า S4 Sig60 และ TEC ขึ้น สูงที่สุด ซึ่งเมื่อเทียบแผนภูมิกับในวันที่เกิดความคลาดเคลื่อนในการบอกระยะทางน้อย พบว่า ค่า S4 Sig60 และ TEC มีค่าน้อยด้วยเช่นกันในช่วงเวลาที่ตรงกันดังเช่น ในแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 7 มิถุนายน 2544



ภาพที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสกับ

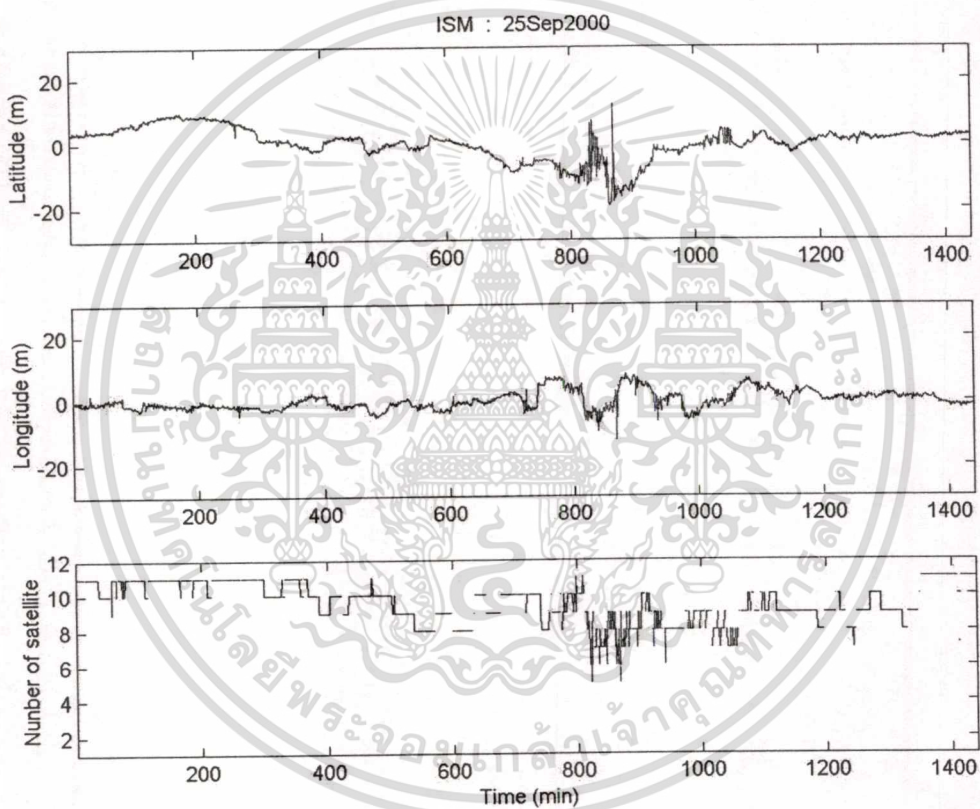
ความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 7 มิถุนายน 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

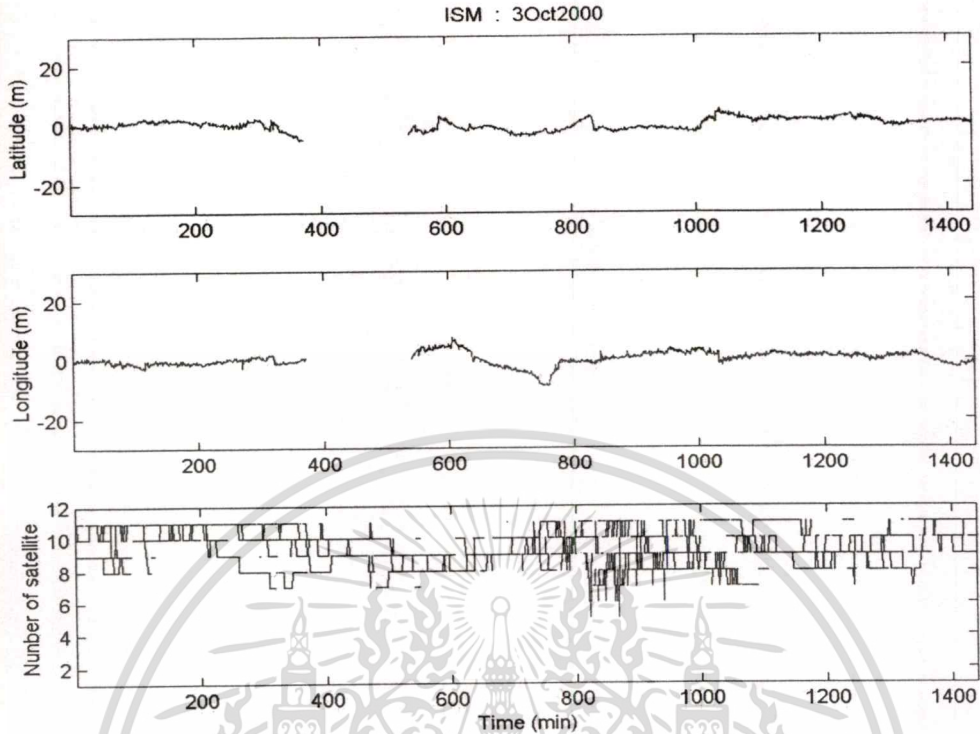
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์สัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด

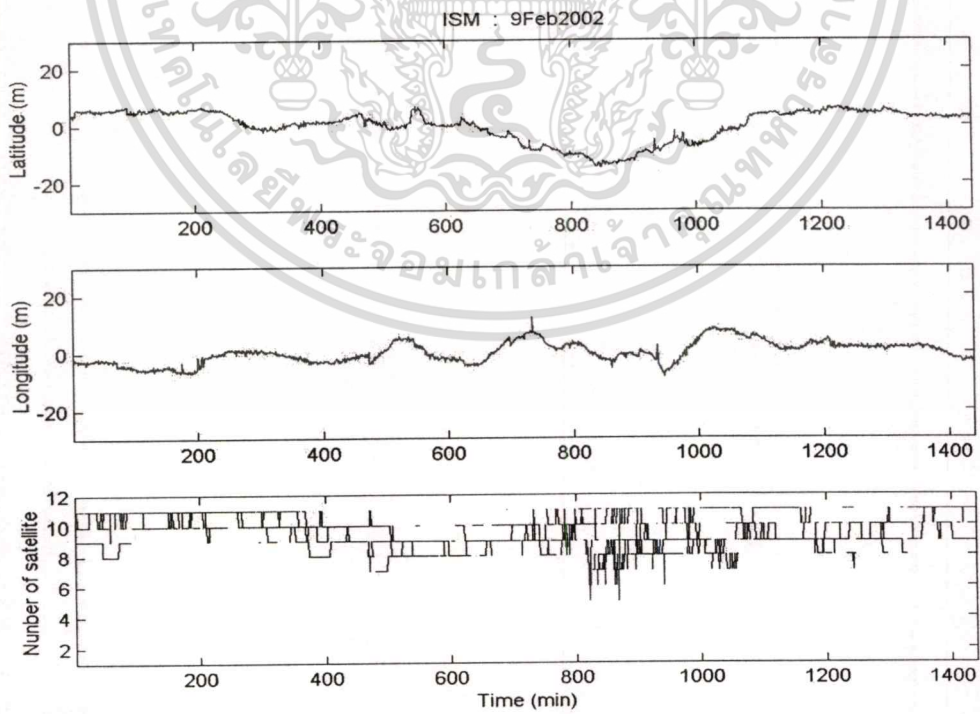
นำข้อมูลที่อ่านเพิ่มข้อมูล ISM – data ที่มีการกระจายตัวของการบอกพิกัด (Scatter) ในวันที่มีค่าการกระจายของการบอกพิกัดมาก และในวันมีค่าการกระจายของการบอกพิกัดน้อย มาสร้างแผนภูมิเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัดจะได้แผนภูมิดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 25 กันยายน 2544

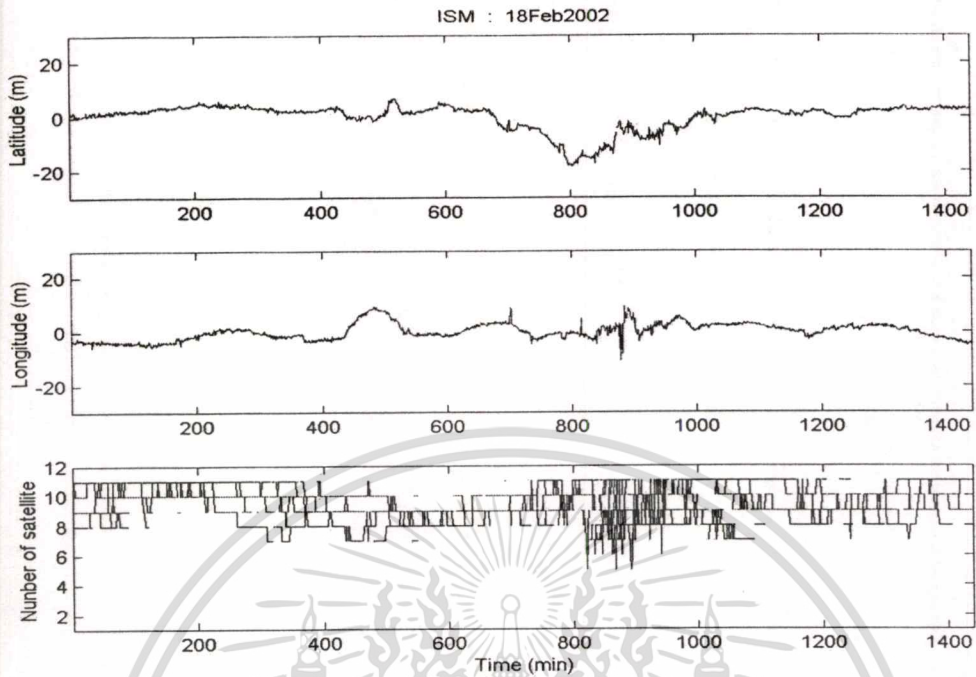


ภาพที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 3 ตุลาคม 2544

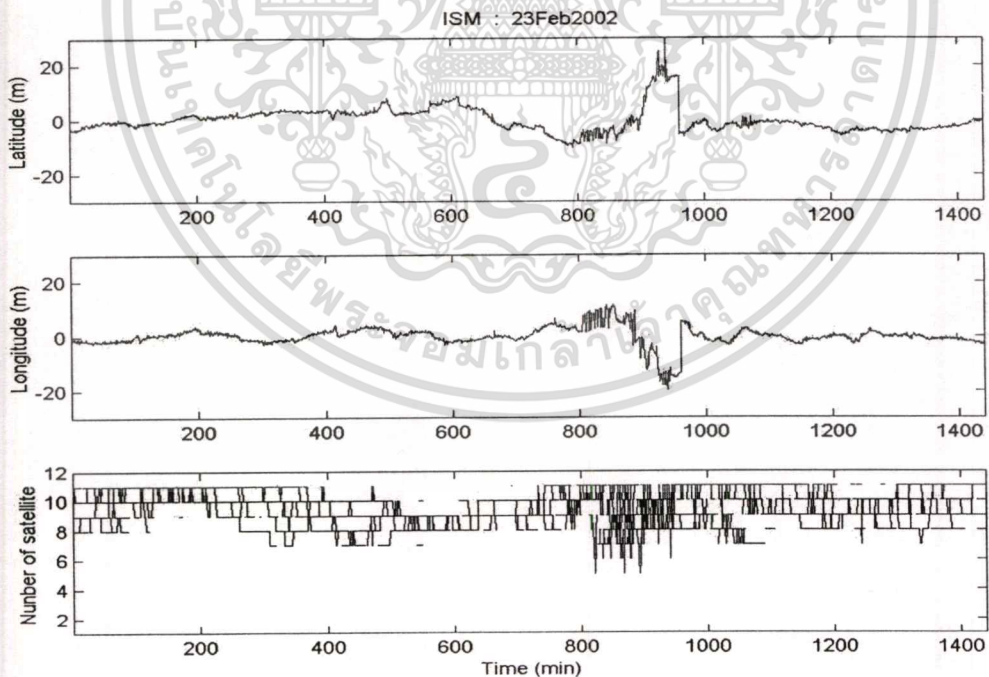


ภาพที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2545
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

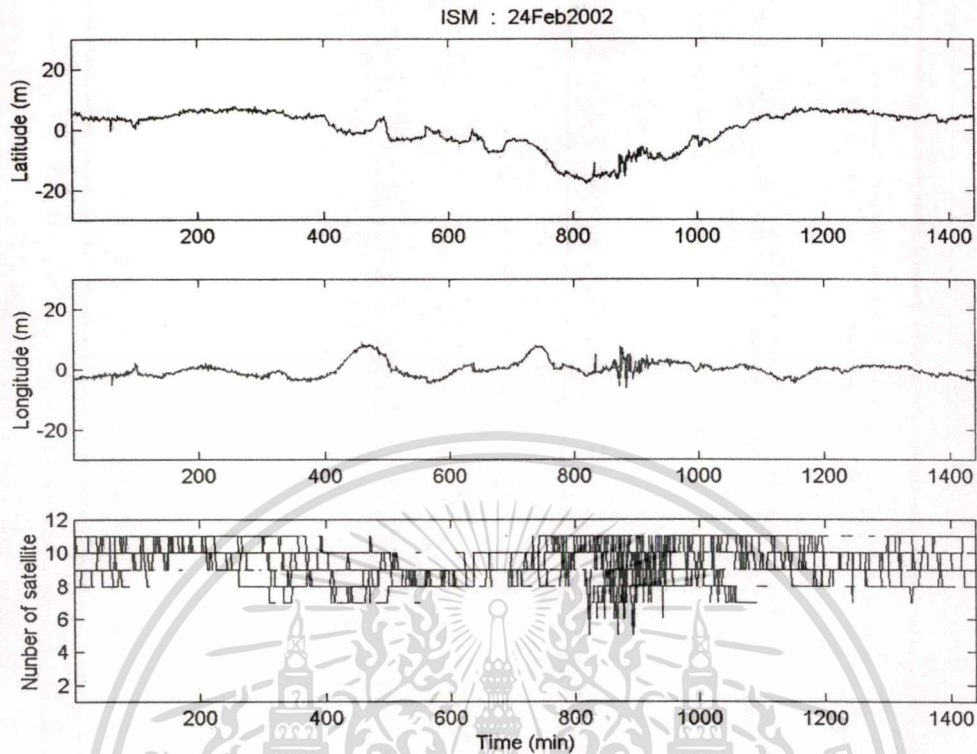


ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545



ภาพที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้คำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัด ของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545

จากแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดกับความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอสในสถานะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด สังเกตได้ว่าเส้นของแผนภูมิที่แสดงถึง จำนวนของดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัด ในช่วงเวลาที่ได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด คือ ในช่วงเวลานาทีที่ 800 ไปจนถึง นาทีที่ 1000 ของข้อมูลในแต่ละวันที่คัดเลือกมาใช้ในการวิเคราะห์จะไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้น ๆ และเป็นเวลาเดียวกันกับที่เกิดความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัดเกิดขึ้นสูงที่สุด ซึ่งเมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่นที่มีความคลาดเคลื่อนในการบอกพิกัดน้อยจะมีความคงที่ของชุดของดาวเทียมที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดในช่วงเวลานาน หลายนาที

4.4 การสร้างสมการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัด

นำข้อมูล ค่า S4 Sig60 และ TEC ที่อ่านจาก เพิ่มข้อมูล ISM – data และ TEC – data มาแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอส ในการสร้างฟังก์ชันของปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสเพื่อใช้ในการแก้ไขค่า Pseudorange ให้มีความถูกต้องมากที่สุดก่อนที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาพิกัด ในลักษณะสมการเชิงเส้นตามสมการ

$$\hat{Range}_i = a_{1i}Pseudorange_i + a_{2i}S4 + a_{3i}Sig60 + a_{4i}TEC + Error_i \quad r_i \quad (4.1)$$

เมื่อ $Range_i$ = ระยะทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับจีพีเอสจริงของดาวเทียมแต่ละดวง

$Pseudorange_i$ = ระยะทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับจีพีเอสที่ได้จากการคำนวณ

a_{1i} = สัมประสิทธิ์ของ Pseudorange

a_{2i} = สัมประสิทธิ์ของ S4

a_{3i} = สัมประสิทธิ์ของ Sig60

a_{4i} = สัมประสิทธิ์ของ TEC

$Error_i$ = ความผิดพลาดอื่นๆ

เมื่อแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในสมการเชิงเส้นได้ผลดังนี้

ดาวเทียมหมายเลข 1

$$Range_1 = Pseudorange_1 + (-1653.041)S4_1 + (5471.375)sig60_1 + (-34.526)TEC_1 - 332.409 \quad (4.2)$$

ดาวเทียมหมายเลข 2

$$Range_2 = Psuedorange_2 + (-713.306) S4_2 + (92.030)sig60_2 + (-3.718)TEC_2 - 4308.050 \quad (4.3)$$

ดาวเทียมหมายเลข 3

$$Range_3 = (0.999)Pseudorange_3 + (16123.972)S4_3 + (3318.474)sig60_3 + (48.397)TEC_3 - 8881.651 \quad (4.4)$$

ดาวเทียมหมายเลข 4

$$Range_4 = Psuedorange_4 + (-3585.352)S4_4 + (828.539)sig60_4 + (-4.947)TEC_4 - 3212.969 \quad (4.5)$$

ดาวเทียมหมายเลข 5

$$Range_5 = Psuedorange_5 + (-1968.456)S4_5 + (-723.009)sig60_5 + (-8.239)TEC_5 - 2145.306 \quad (4.6)$$

ดาวเทียมหมายเลข 6

$$Range_6 = Psuedorange_6 + (-16845.537)S4_6 + (-573.807)sig60_6 + (-21.287)TEC_6 - 6093.518 \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาวเทียมหมายเลข 7

$$\text{Range}_7 = \text{Psuedorange}_7 + (-307.261)S4_7 + (-62.555)\text{sig}60_7 + (-0.886)\text{TEC}_7 - 4485.305 \quad (4.8)$$

ดาวเทียมหมายเลข 8

$$\text{Range}_8 = \text{Psuedorange}_8 + (62.749)S4_8 + (139.791)\text{sig}60_8 + (1.877)\text{TEC}_8 - 4703.100 \quad (4.9)$$

ดาวเทียมหมายเลข 9

$$\text{Range}_9 = \text{Psuedorange}_9 + (-771.628)S4_9 + (-133.031)\text{sig}60_9 + (0.317)\text{TEC}_9 - 6244.042 \quad (4.10)$$

ดาวเทียมหมายเลข 10

$$\text{Range}_{10} = \text{Psuedorange}_{10} + (-5052.093)S4_{10} + (1364.764)\text{sig}60_{10} + (10.844)\text{TEC}_{10} - 4180.630 \quad (4.11)$$

ดาวเทียมหมายเลข 11

$$\text{Range}_{11} = \text{Psuedorange}_{11} + (1957.715)S4_{11} + (-515.699)\text{sig}60_{11} + (20.522)\text{TEC} - 6093.518 \quad (4.12)$$

ดาวเทียมหมายเลข 12

$$\text{Range}_{12} = \text{Psuedorange}_{12} + (-57.019)S4_{12} + (446.090)\text{sig}60_{12} + (2.734)\text{tec}_{12} - 4792.797 \quad (4.13)$$

ดาวเทียมหมายเลข 15

$$\text{Range}_{15} = (0.993)\text{Psuedorange}_{15} + (15585.403)S4_{15} + (-2122.759)\text{sig}60_{15} + (-3.458)\text{TEC}_{15} + 49745.538 \quad (4.14)$$

ดาวเทียมหมายเลข 17

$$\text{Range}_{17} = (1.02)\text{Psuedorange}_{17} + (-31765.630)S4_{17} + (-2805.190)\text{sig}60_{17} + (-9.960)\text{TEC}_{17} - 12033.247 \quad (4.15)$$

ดาวเทียมหมายเลข 18

$$\text{Range}_{18} = (0.999)\text{Psuedorange}_{18} + (2568.500)S4_{18} + (-1635.813)\text{sig}60_{18} + (-13.862)\text{TEC}_{18} + 3323.252 \quad (4.16)$$

ดาวเทียมหมายเลข 20

$$\text{Range}_{20} = \text{Psuedorange}_{20} + (43.9416)S4_{20} + (155.644)\text{sig}60_{20} + (5.246)\text{TEC}_{20} - 4453.642 \quad (4.17)$$

ดาวเทียมหมายเลข 22

$$\text{Range}_{22} = \text{Psuedorange}_{22} + (-1722.486)S4_{22} + (1947.985)\text{sig}60_{22} + (1.052)\text{TEC}_{22} - 8836.091 \quad (4.18)$$

ดาวเทียมหมายเลข 23

$$\text{Range}_{23} = \text{Psuedorange}_{23} + (7336.447)S4_{23} + (498.434)\text{sig}60_{23} + (20.600)\text{TEC}_{23} - 4029.604 \quad (4.19)$$

ดาวเทียมหมายเลข 24

$$\text{Range}_{24} = \text{Psuedorange}_{24} + (2518.205)S4_{24} + (-669.387)\text{sig}60_{24} + (-2.564)\text{TEC}_{24} - 3800.619 \quad (4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดาวเทียมหมายเลข 25

$$\text{Range}_{24} = (1.001)\text{Pseudorange}_{24} + (11608.657)S_{4_{25}} + (6942.875)\text{sig}60_{25} + (42.248)\text{TEC}_{25} - 22115.179 \quad (4.21)$$

ดาวเทียมหมายเลข 26

$$\text{Range}_{26} = \text{Pseudorange}_{26} + (4898.189)S_{4_{26}} + (2183.926)\text{sig}60_{26} + (15.255)\text{TEC}_{26} - 4785.952 \quad (4.22)$$

ดาวเทียมหมายเลข 27

$$\text{Range}_{27} = \text{Pseudorange}_{27} + (-3007.614)S_{4_{27}} + (-73.984)\text{sig}60_{27} + (-5.349)\text{TEC}_{27} - 2415.206 \quad (4.23)$$

ดาวเทียมหมายเลข 28

$$\text{Range}_{28} = \text{Pseudorange}_{28} + (1078.533)S_{4_{28}} + (-166.401)\text{sig}60_{28} + (-13.716)\text{TEC}_{28} - 4833.945 \quad (4.24)$$

ดาวเทียมหมายเลข 30

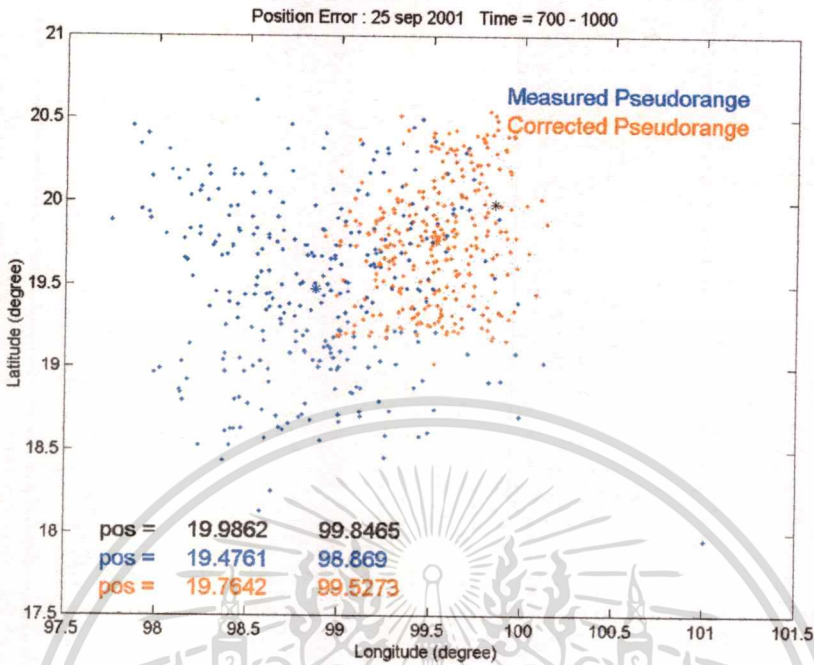
$$\text{Range}_{30} = \text{Pseudorange}_{30} + (-5899.287)S_{4_{30}} + (409.982)\text{sig}60_{30} + (-3.362)\text{TEC}_{30} - 5121.714 \quad (4.25)$$

ดาวเทียมหมายเลข 31

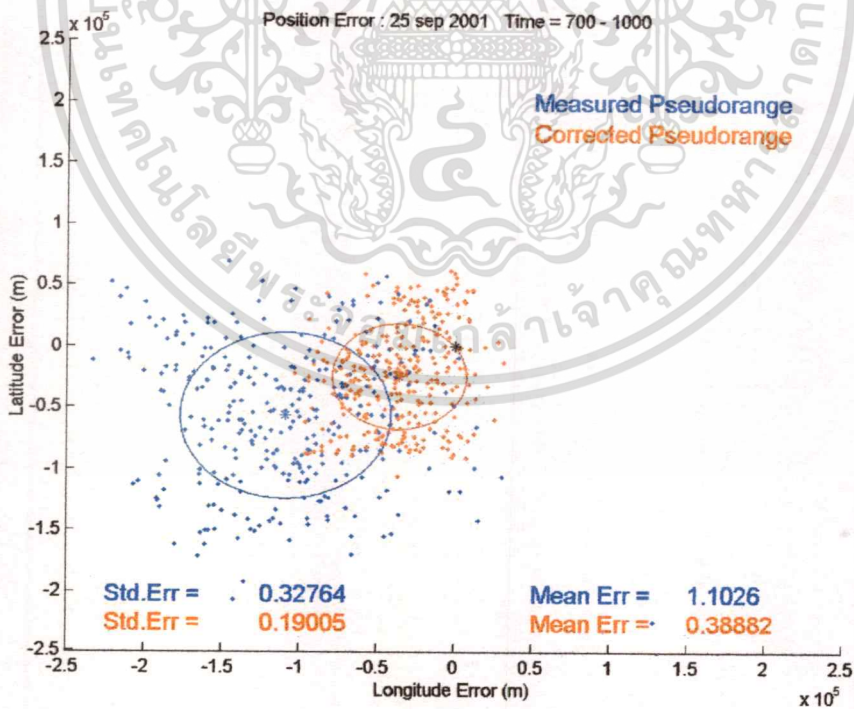
$$\text{Range}_{31} = (1.001)\text{Pseudorange}_{31} + (-2320.154)S_{4_{31}} + (-249.535)\text{sig}60_{31} + (-17.669)\text{TEC}_{31} - 3003.711 \quad (4.26)$$

จากนั้นนำเอาตำแหน่งของดาวเทียม และระยะทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับจีพีเอส หรือ Pseudorange ที่ถูกเก็บบันทึกมาแก้สมการเพื่อหาพิกัดเอง โดยใช้วิธีการ Least-Square ที่เสนอไว้โดย Bancorfit พิกัดที่คำนวณได้เองนี้ไม่มีการเฉลี่ยค่า หรือใช้วิธีการคัดเลือกข้อมูลเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกพิกัดใด ๆ ทั้งสิ้น พิกัดที่คำนวณได้เองนี้เรียกว่าพิกัดแรกออก ซึ่งจะมีลักษณะการบอกพิกัดกระจายตัวอยู่รอบ ๆ หรือใกล้เคียงกับพิกัดจริงที่อ่านได้จากเครื่องรับจีพีเอส และนำเอาข้อมูล ตำแหน่งของดาวเทียม และระยะทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับจีพีเอสชุดเดิมแต่ผ่านการแก้ไขค่าระยะทางตามสมการในรูปแบบของฟังก์ชันของปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสที่นำเสนอไว้ในสมการที่ 4.1 แล้วคำนวณหาพิกัดเองอีกครั้งด้วย Pseudorange ใหม่ และนำพิกัดที่ได้มาสร้างแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบกันได้ดังนี้

จากข้อมูลของวันที่ 25 กันยายน 2544

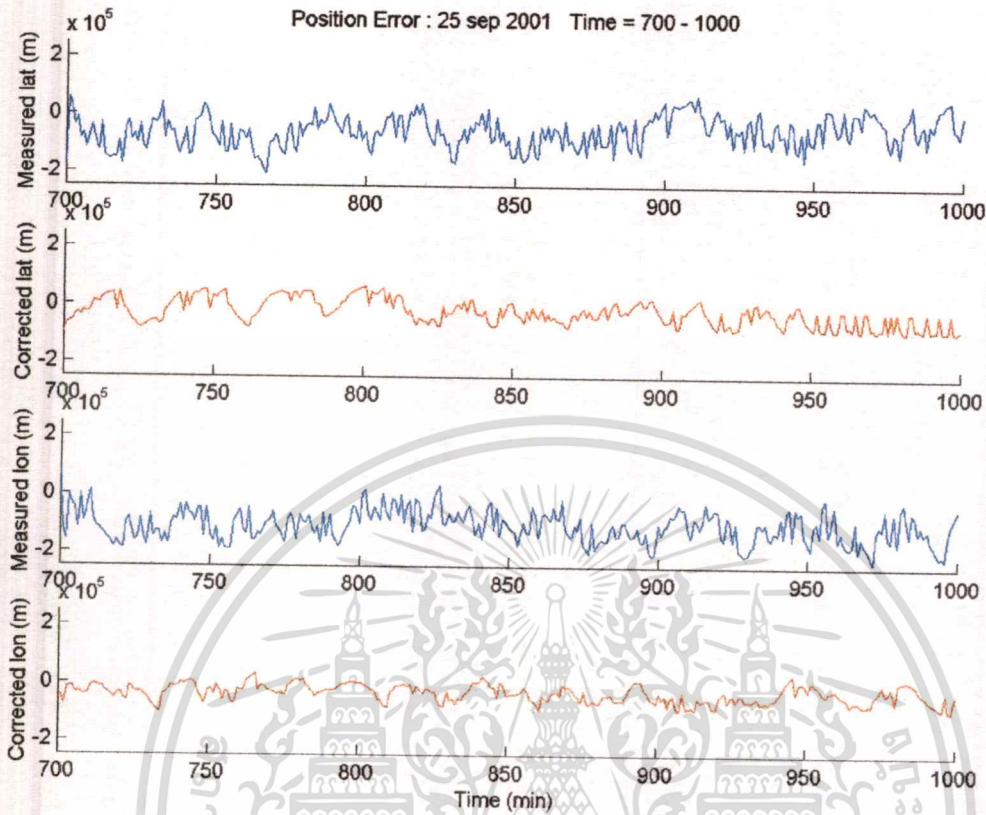


ภาพที่ 4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 25 กันยายน 2544



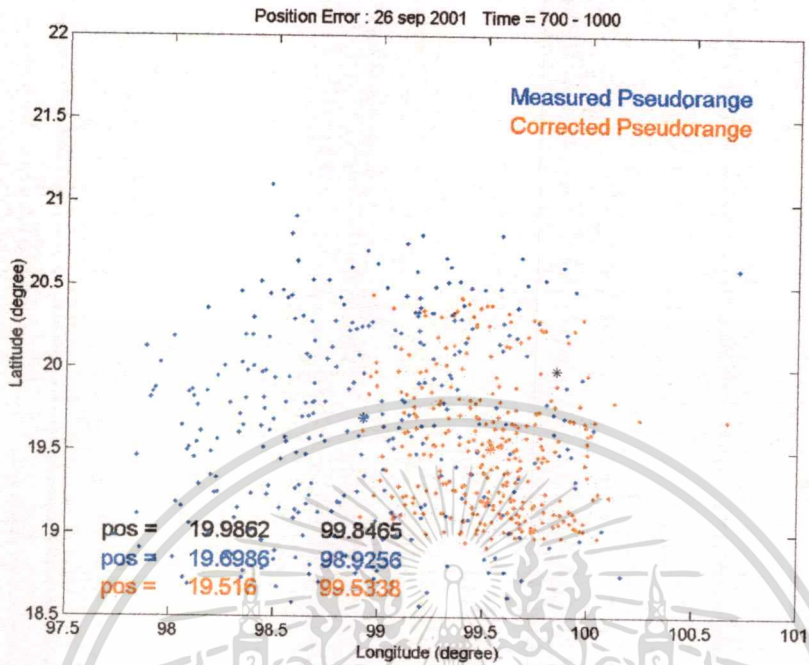
ภาพที่ 4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดจริงของพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 25 กันยายน 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

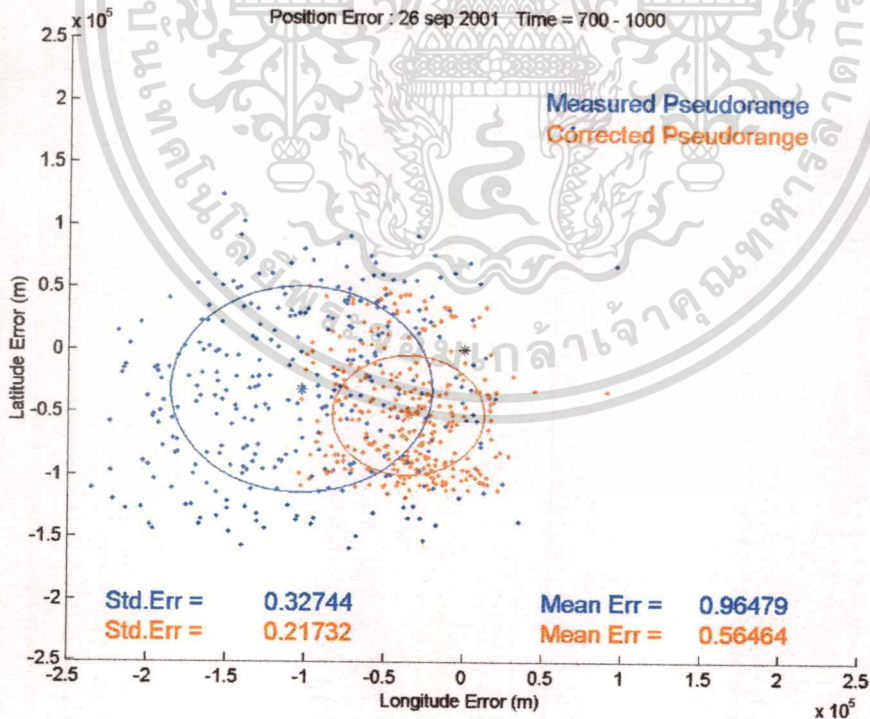


ภาพที่ 4.21 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนของเวลา ของวันที่ 25 กันยายน 2544

จากข้อมูลของวันที่ 26 กันยายน 2544

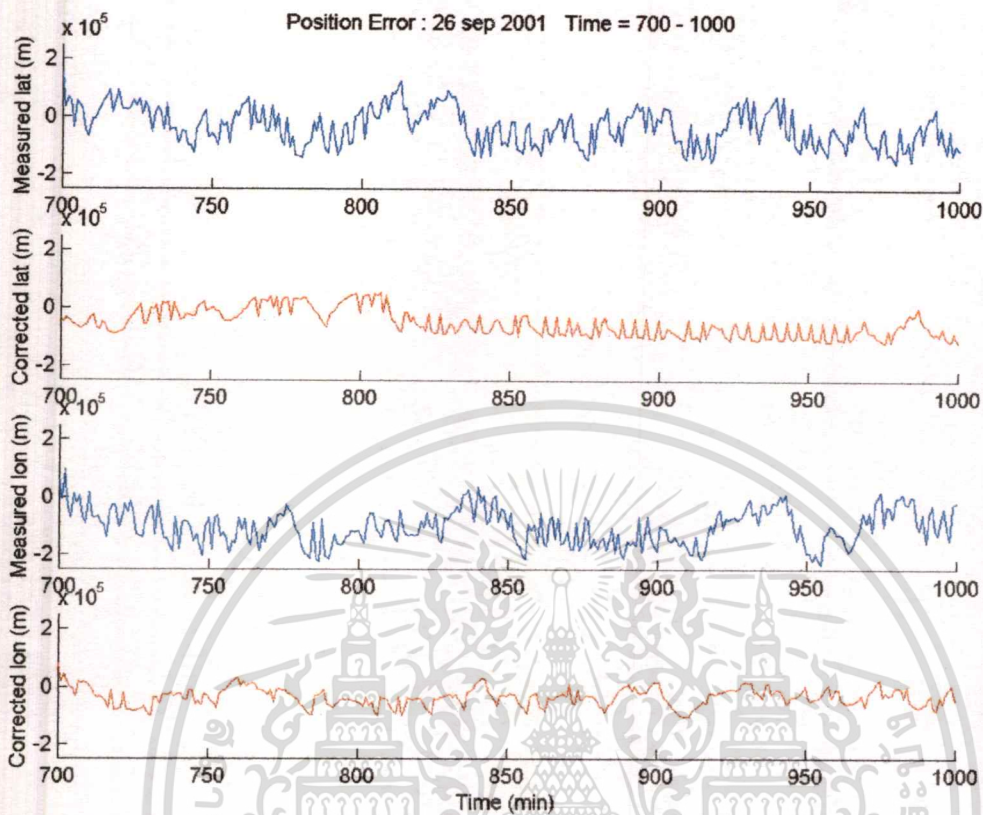


ภาพที่ 4.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 26 กันยายน 2544



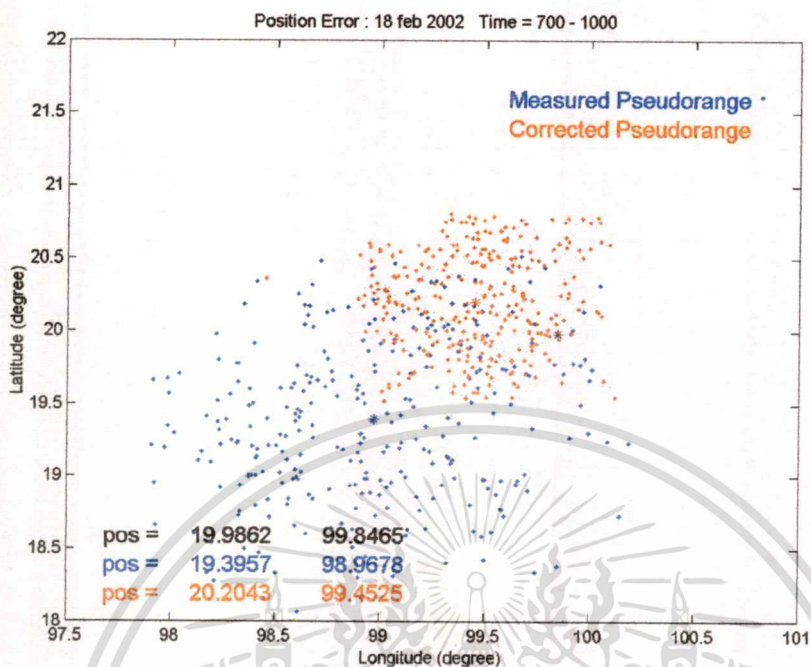
ภาพที่ 4.23 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดจริงของพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 26 กันยายน 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

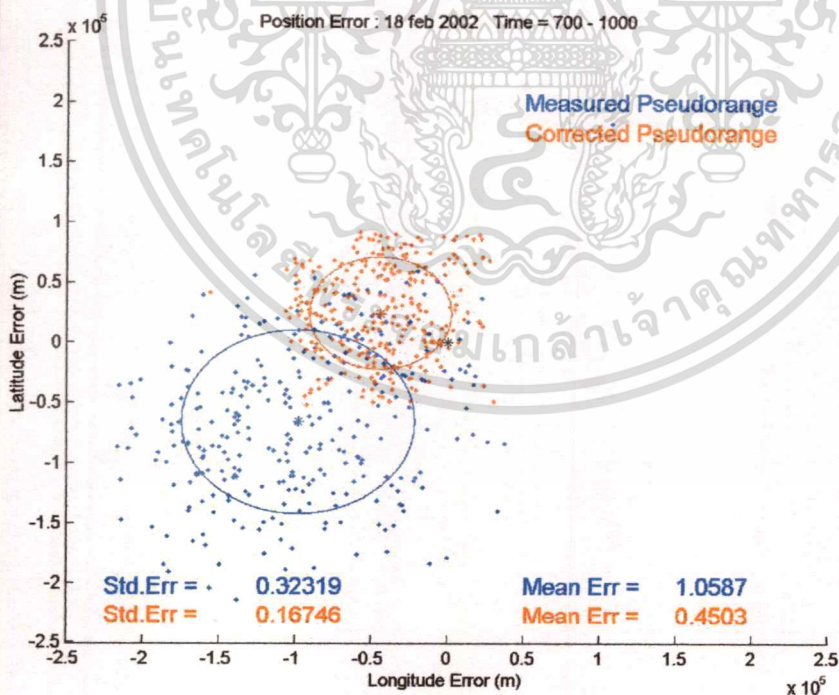


ภาพที่ 4.24 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนของเวลา ของวันที่ 26 กันยายน 2544

จากข้อมูลของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545

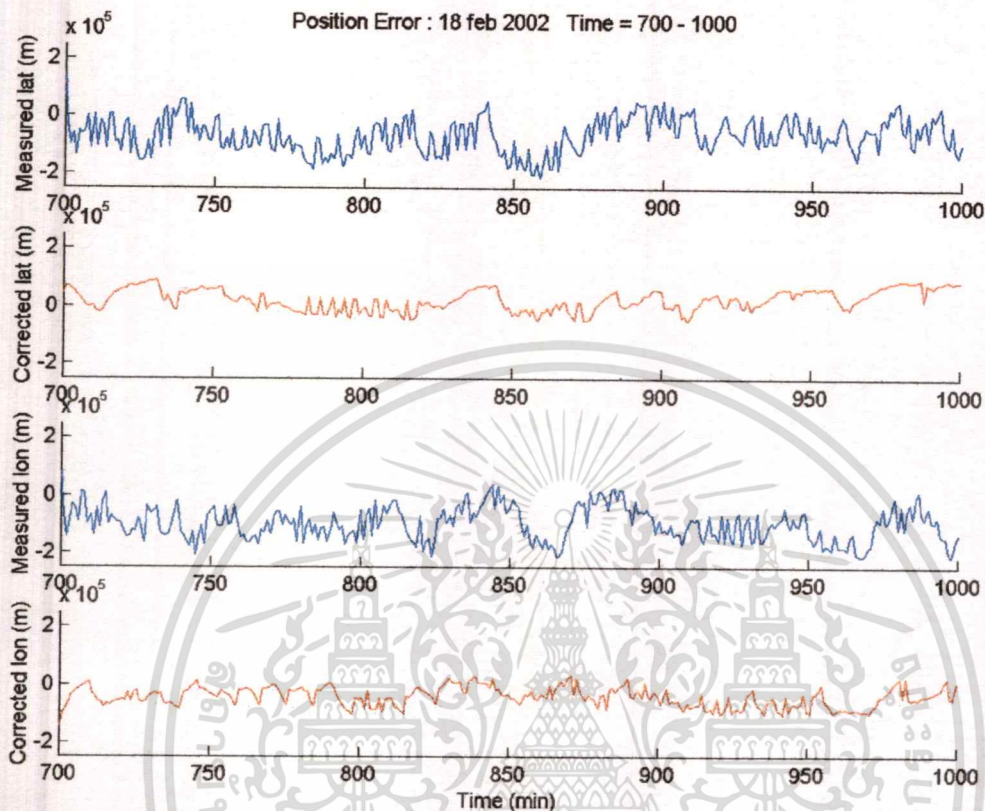


ภาพที่ 4.25 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 254



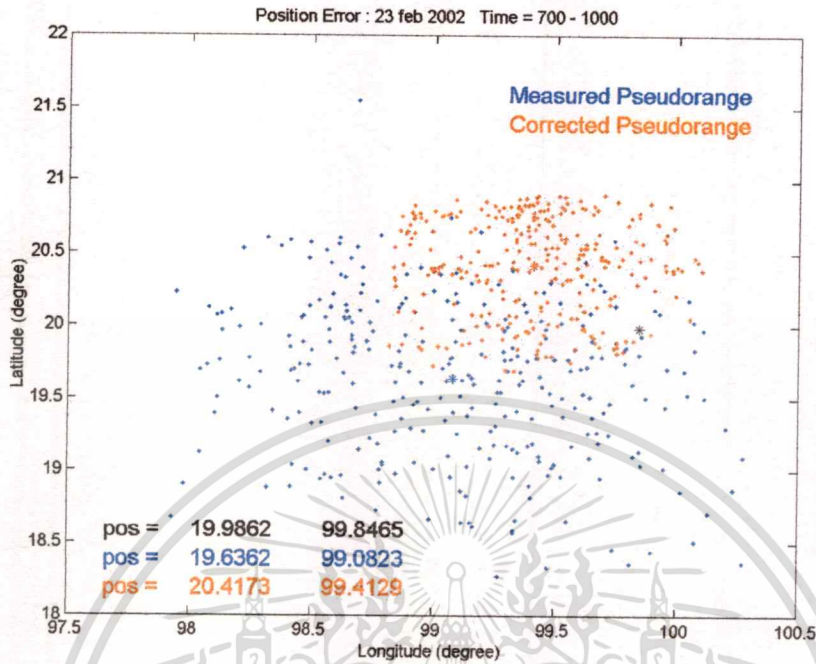
ภาพที่ 4.26 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดจริงของพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

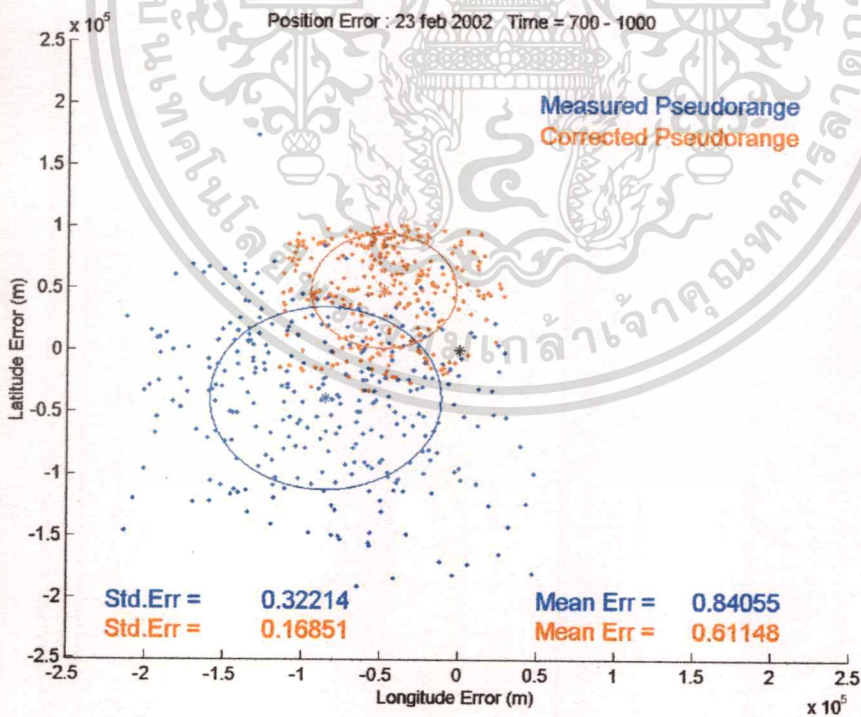


ภาพที่ 4.27 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนของเวลา ของวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2545

จากข้อมูลของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545

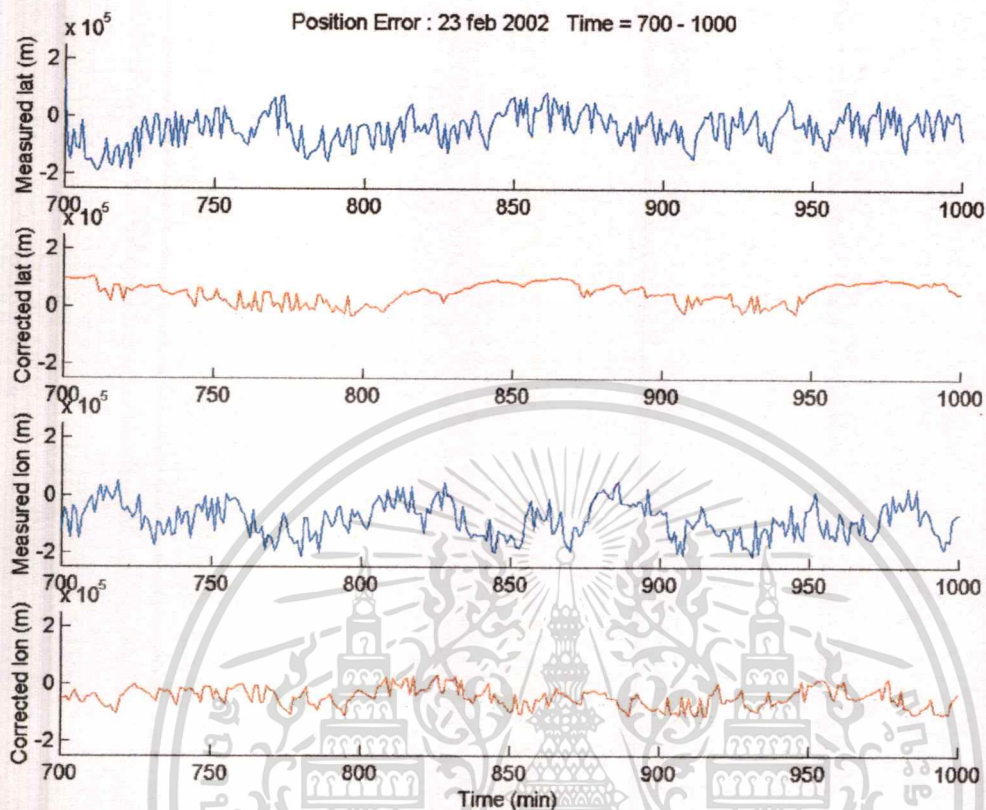


ภาพที่ 4.28 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545



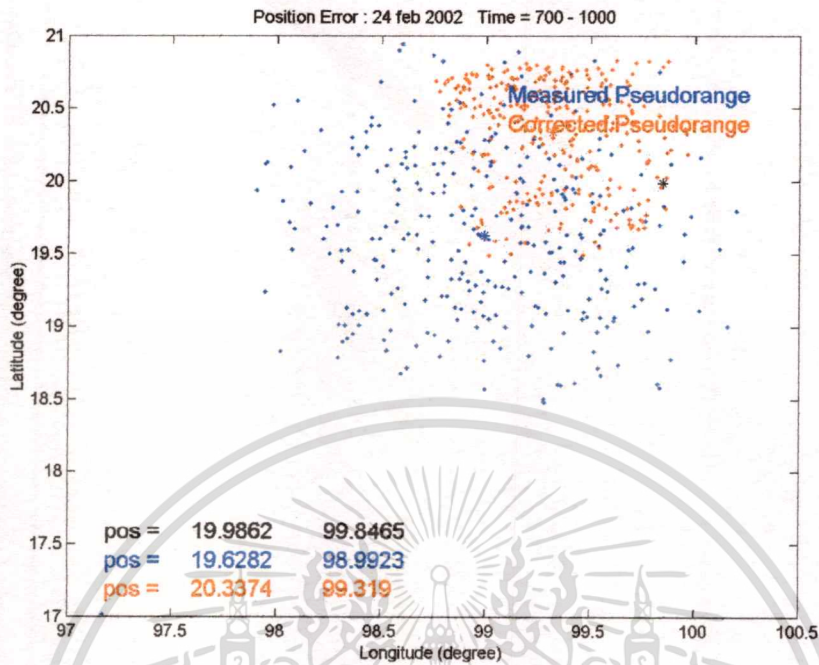
ภาพที่ 4.29 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดจริงของพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

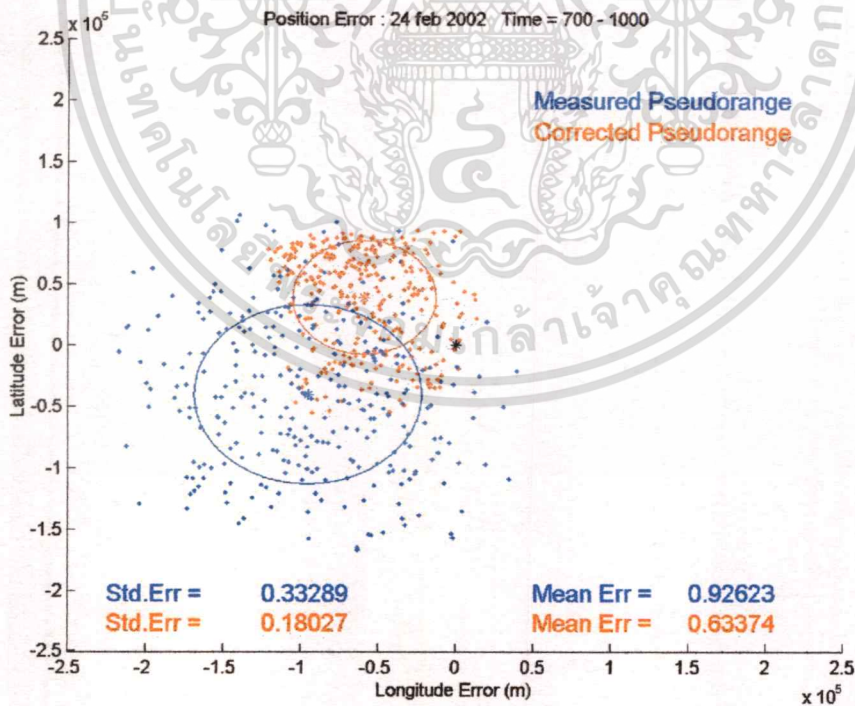


ภาพที่ 4.30 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนของเวลา ของวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2545

จากข้อมูลของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545

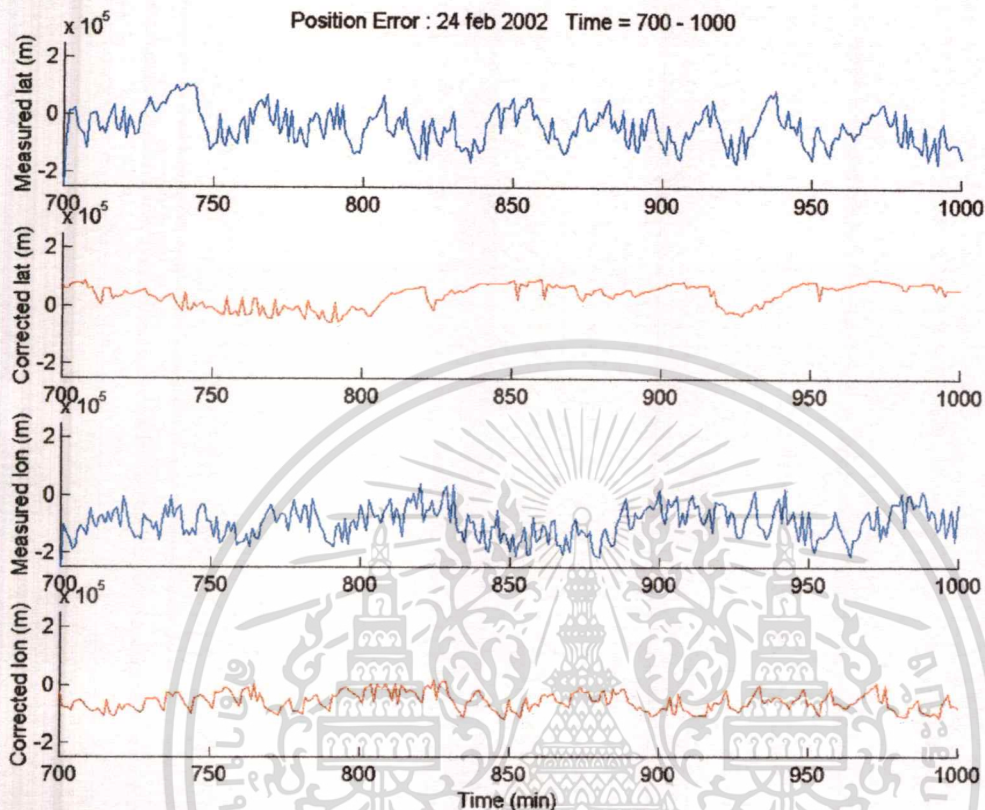


ภาพที่ 4.31 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณจาก Pseudorange กับที่คำนวณจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545



ภาพที่ 4.32 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการกระจายและการเข้าใกล้พิกัดจริงของพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบพิกัดแรกออกที่คำนวณ จาก Pseudorange กับที่คำนวณ จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขตามแกนของเวลา ของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2545

จากแผนภูมิที่สร้างมาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างพิกัดที่คำนวณมาจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขแล้วกับ พิกัดที่คำนวณมาจาก Pseudorange ที่ไม่ได้รับการแก้ไข ในช่วงเวลาที่รับผลกระทบจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากที่สุด พบว่า พิกัดที่คำนวณมาจาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขแล้ว มีพิกัดที่เฉลี่ยจากทุกจุดของพิกัดมีระยะทางเข้าใกล้พิกัดจริงที่เครื่องจีพีเอสคำนวณได้ มากกว่า พิกัดที่คำนวณได้จาก Pseudorange ที่อ่านมาจากเพิ่มข้อมูลโดยตรง โดยที่ไม่ได้ผ่านการแก้ไขให้มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวของพิกัดแรกออกที่คำนวณได้จาก Pseudorange ที่ได้รับการแก้ไขแล้วน้อยกว่าการกระจายตัวของพิกัดแรกออกที่คำนวณได้จาก Pseudorange ที่อ่านมาจากเพิ่มข้อมูลโดยตรง โดยที่ไม่ได้ผ่านการแก้ไขให้มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ได้ทำการศึกษาและประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมไว้ในช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุด โดยจะขอเสนอผลของการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนภูมิผลจากข้อมูลการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอส และค่าของปัจจัยที่ส่งผลลดทอนความแม่นยำในการบอกพิกัดของเครื่องรับจีพีเอส ในการศึกษาปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุดพบว่า

1.) ในวันที่มีการกระจายของพิกัดสูง โดยใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดที่เครื่องรับจีพีเอสอ่านได้ในแต่ละนาทีเป็นตัวชี้วัด พบว่าการกระจายตัวของการบอกพิกัดสูงจะอยู่ในช่วงที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุดในรอบปีที่มีปีละ 2 ช่วงคือในเดือนเมษายน และเดือนกันยายน หรือเป็นช่วงปีที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศสูงเนื่องมาจากปรากฏการณ์จุดดับมากที่สุดจากดวงอาทิตย์

2.) พิกัดที่อ่านออกมาได้จากเครื่องรับจะมีการกระจายตัว และเมื่อแบ่งเวลาออกเป็นช่วงช่วงละ 4 ชั่วโมง พบว่าจะมีช่วงเวลา 12-16 UT ที่มีการกระจายตัวของการบอกพิกัดสูงจะเป็นช่วงเวลาเดียวกันเหมือนกัน ทุกๆ วัน

3.) ช่วงเวลาที่มีการกระจายตัวสูงจะเป็นเวลาเดียวกันกับที่ มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ซึ่งจะทำให้ค่าขึ้น S4, Sig60 และ TEC มีค่าสูงด้วยในเวลาเดียวกันดังนั้นปัจจัยเหล่านี้สามารถที่จะบ่งชี้ไปถึงสภาพความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในขณะนั้นได้

4.) เมื่อวิเคราะห์ช่วงเวลาที่มีการกระจายตัวของพิกัดที่อ่านมาได้สูง เป็นเวลาเดียวกับในช่วงเวลานั้นมีการเปลี่ยนแปลงของชุดดาวเทียมที่รับมาคำนวณหาพิกัดอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากสัญญาณที่รับมาจากดาวเทียมไม่คงที่พอที่เครื่องรับจีพีเอสจะรับสัญญาณเข้ามาใช้ในการคำนวณหาพิกัด ดังนั้นพิกัดที่อ่านได้ในช่วงเวลานั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนสูง

5.) เมื่อนำเอาค่าของปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสมาสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อนำเอาฟังก์ชันนี้ไปใช้ในการคำนวณหาพิกัด จะได้พิกัดแรกออกที่มีการกระจายตัวของพิกัดน้อยกว่าที่ไม่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชัน และค่าเฉลี่ยของพิกัดแรกออกมีระยะใกล้กับพิกัดจริงมากกว่าค่าเฉลี่ยของพิกัดที่ไม่ได้แก้ไขค่า โดยฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมานี้จะอยู่ในลักษณะของดาวเทียม ซึ่งเป็นดาวเทียมที่โคจรผ่านมาและใช้ในการคำนวณหาพิกัดในเวลาดังกล่าว

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ในภาวะที่มีความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุดในรอบ 11 ปีอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์จุดดับบนดวงอาทิตย์มากที่สุด ทำให้สัญญาณจากดาวเทียมที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ลงมามีความผิดพลาด ผลกระทบนี้ส่งผลมาถึงความแม่นยำในการบอกพิกัดของจีพีเอส เนื่องจากระบบต้องอาศัยสัญญาณจากดาวเทียมที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาใช้ในการคำนวณหาพิกัด

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าพิกัดที่บอกโดยเครื่องรับจีพีเอสจะมีการกระจายตัวในบริเวณใกล้เคียงกันซึ่งสามารถให้ความถูกต้องในระดับหนึ่งของเครื่องรับจีพีเอสประเภทความถี่เดียว และการกระจายตัวของพิกัดที่อ่านออกมาได้จะเป็นวงกว้างมากขึ้นเมื่อ สัญญาณจีพีเอสที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และจากข้อมูลที่มีอยู่พบว่าผลกระทบนี้จะเกิดมากในเวลาช่วงที่ 12 UT–16UT (เวลา Universal Time) ของวัน หรือก่อนหน้าเล็กน้อย หรือเกิดต่อเนื่องยาวนานไปจนหมดวัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าถ้าหากมีการใช้งาน จีพีเอสในช่วงเวลานี้ จึงมีความเป็นไปได้ว่าพิกัดที่อ่านออกมาได้จะมีความคลาดเคลื่อนไปจากพิกัดจริง และความคลาดเคลื่อนจะมีมากขึ้นในช่วงที่เกิดความแปรปรวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์สูงสุด คือในช่วงครบรอบ 11 ปีของการเกิดจุดดับบนดวงอาทิตย์ขั้นสูงสุด หรือในช่วงที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศมากที่สุดในรอบปีทั้ง 2 ช่วง ที่เรียกว่า Equinox คือ ในช่วงเดือน เมษายน และกันยายนของทุกๆ ปี หรือในช่วงเวลาช่วงที่ 12UT – 16UT ของแต่ละวัน

เมื่อทราบช่วงเวลาเครื่องจีพีเอสจะบอกพิกัดผิดพลาด และเมื่อวิเคราะห์จากความถี่พบว่า การบอกพิกัดผิดพลาด จะมีของช่วงเวลาตรงหรือใกล้เคียงกันทุก ๆ วัน โดยมีปริมาณความคลาดเคลื่อนของความผิดพลาดในการบอกพิกัดขึ้นอยู่กับช่วง Equinox ของปี หรือตรงกับรอบปีที่มีจุดดับบนดวงอาทิตย์ขั้นสูงสุดเมื่อศึกษาในรายละเอียดของเวลาที่เกิดการบอกพิกัดผิดพลาดพบว่า จะมีการบอกพิกัดผิดพลาดมากที่สุดประมาณในนาฬิกาที่ 800 – 1000 (เวลา UT) ของวันของทุกๆ วัน

เพื่อต้องการหาสาเหตุของการบอกพิกัดผิดพลาดในช่วงนาฬิกาที่ 800 – 1000 ของทุกๆ วันจึงทำการศึกษาจากปัจจัยที่เชื่อว่าเป็นปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสได้แก่ S4 Sig60 และ TEC พบว่าในช่วงเวลานั้นเป็นช่วงเวลาที่มี S4 Sig60 และ TEC มีค่ามากที่สุดในช่วงเวลานั้นเช่นกัน และมี

รูปแบบซ้ำกันเหมือนกันทุกๆ วันปริมาณความมากขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ปรากฏการณ์ต่างๆ จึงเป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าการบอกรบกวนที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากปัจจัยเหล่านี้

เมื่อทำการวิเคราะห์จำนวนความเทียมที่ เครื่องรับจีพีเอส ที่รับสัญญาณได้ และลอคสัญญาณ แล้วนำสัญญาณมาใช้ในการคำนวณหาพิกัด ในภาวะปกติเครื่องรับจีพีเอสจะรับสัญญาณจากดาวเทียม และลอคสัญญาณที่นิ่ง และคำนวณพิกัดจากสัญญาณดาวเทียมในจุดนั้นเป็นเวลาหลายนาที ทำให้พิกัดที่ได้ออกมามีความแม่นยำมากขึ้น แต่เมื่อวิเคราะห์จำนวนความเทียมในช่วงที่เกิดการผิดพลาด พบว่า ปริมาณของความเทียมที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมในจุดเดียวกันได้ต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ เนื่องจากสัญญาณของดาวเทียมเหล่านั้นถูกรบกวน หรือมีการเปลี่ยนแปลง จน ไม่มีความคงที่พอที่เครื่องรับจีพีเอสจะรับสัญญาณ ได้นั้นซึ่งการรบกวนนั้นสามารถวัดได้จาก S4 และ Sig60

เนื่องจากในการคำนวณหาพิกัดของเครื่องรับจีพีเอส สิ่งที่มีความสำคัญต่อความแม่นยำในการแก้สมการเพื่อคำนวณหาพิกัด คือพิกัดของดาวเทียม ในระบบจีพีเอส และระยะทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับจีพีเอส ซึ่งปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในการบอกรบกวน ได้แก่ S4 Sig60 และ TEC จะส่งผลกระทบไปที่ระยะทางจากดาวเทียมมายังเครื่องรับจีพีเอส หรือ Pseudorange ทำให้ได้ค่าระยะทางที่ผิดพลาดไปจากความเป็นจริง และเมื่อนำค่า ระยะทาง ที่ผิดพลาดนี้ไปแก้สมการ ของเครื่องรับจีพีเอสจะทำให้ได้พิกัดที่ผิดพลาดออกมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาวะที่มีการความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุดจากการวิเคราะห์พบว่า หาก Pseudorange มีความผิดพลาดมากเท่าใด พิกัดที่คำนวณออกมาได้จะมีระยะทางออกห่างจากพิกัดจริงมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการแก้ไขความผิดพลาดในการบอกรบกวนของเครื่องรับจีพีเอส อันเนื่องมาจากสภาวะความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สูงสุด ที่ออกมาในรูปของค่า S4 หรือความแปรปรวนทางแอมพลิจูด(Amplitude Scintillation) Sig60 (60 second – Phase sigma) หรือความแปรปรวนทางเฟส (Phase Scintillation) และปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้การคำนวณหา Pseudorange การแก้ไขค่า Pseudorange ให้มีความถูกต้องหรือใกล้เคียงค่าระยะทางจริงๆ จึงทำโดยการหาฟังก์ชัน ของ S4, sig60 และ TEC ในเบื้องต้นสร้างฟังก์ชันในรูปแบบของสมการเส้นตรง

$$\text{Range}_i = \text{Pseudorange}_i + a_{1i}(S4) + a_{2i}(\text{Sig60}) + a_{3i}(\text{TEC}) + \text{Error}_i \quad (5.1)$$

เมื่อนำ range ที่คำนวณได้จากฟังก์ชันของ S4, sig60 และ TEC ไปคำนวณหาพิกัดแทนการนำเอา Pseudo-range ที่เครื่องรับจีพีเอสคำนวณได้ ทำให้ได้พิกัดแรกออกมามีการกระจายตัวโดยวัดจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งน้อยกว่า และมีค่าเฉลี่ยจากพิกัดทั้งหมดเข้าใกล้พิกัดจริงมากกว่า ของพิกัดที่

คำนวณออกมาจาก Pseudorange ที่ไม่มีการแก้ไข โดยฟังก์ชันที่เตรียมไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลงานวิจัยไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล และนำค่าของปัจจัยที่ลดทอนความแม่นยำของจีพีเอสในภาวะที่มีความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศสูงสุด เป็นข้อมูลในช่วงปี 2543 – 2546 เท่านั้น ดังนั้น ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมาจึงเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมกับในช่วงเวลานั้นเท่านั้น เพื่อให้ฟังก์ชันใช้งานได้ทั่วไปและทุก ๆ สถานที่จึงควร ใช้ข้อมูลในขณะ Run-Time มาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างฟังก์ชันขึ้นใหม่โดยใช้วิธีเดียวกันทุก ๆ ช่วงที่มีการใช้งานเครื่องรับจีพีเอส โดยใช้ข้อมูลที่ผ่านมาก่อนหน้าเวลานั้น เพื่อให้ได้ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับพื้นที่ ที่ใช้งานเครื่องรับจีพีเอส

5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

- 1) การวิจัยครั้งนี้เครื่องมือที่ใช้เป็นเครื่องจีพีเอสแบบความถี่เดียวซึ่งมีความแม่นยำในการบอกพิกัดอยู่ในระดับที่พอใช้งานได้ หรือเหมาะสมสำหรับงานทั่วไป จึงเห็นควรว่าจะมีการนำวิธีการเดียวกันนี้ ไปทดลองใช้กับเครื่องรับจีพีเอสที่มีความแม่นยำสูงกว่าให้มีความแม่นยำสูงขึ้นอีก
- 2) ฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ค่า Pseudorange ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ใช้ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นซึ่งเป็นการทำให้ Pseudorange มีค่าใกล้เคียงกับ Range ที่ถูกต้องมากที่สุดเท่านั้น หากต้องการความแม่นยำในการคำนวณหาพิกัดของเครื่องรับจีพีเอสขึ้นอีกในการทำการศึกษารั้งต่อไป จึงเห็นควรว่าน่าจะมีการนำเอาฟังก์ชันในรูปแบบสมการอื่นๆ เข้ามาพิจารณาเพื่อแก้ค่าของ Pseudorange มีค่าใกล้เคียงกับ Range ที่ถูกต้องมากที่สุดมากกว่าฟังก์ชันในรูปแบบของสมการเชิงเส้น

บรรณานุกรม

- กาญจน์ เหล่าพิพัฒนา. 2540. การศึกษาปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้
สัญญาณดาวเทียม GPS. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- คณะกรรมการบัญญัติศัพท์เทคโนโลยี ราชบัณฑิตยสถาน. 2544. ศัพท์บัญญัติเทคโนโลยี
สารสนเทศ, การประชุมครั้งที่ 5/2541 1 พฤษภาคม 2541. [Online]. Available :
thaiarc.tu.ac.th/host/thaiarc/it/9805.htm.
- รูปนันทน์ นิลรัตน์ และ วิเชียร เนียมอ่อน. 2544. การกำหนดตำแหน่งบนพื้นพิภพ (Global
Positioning System : GPS), ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์. [Online]. Available : www.rs.psu.ac.th/gps/gps.htm.
- ท้องฟ้าจำลองกรุงเทพ. 2543. พายุสุริยะ ปี ค.ศ. 2000. กรุงเทพฯ : ศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อการศึกษา
กรมการศึกษานอกโรงเรียน. เอกสารอัดสำเนา.
- ธีรวัฒน์ อินทรไพโรจน์. 2540. การนำระบบบอกพิกัดด้วยดาวเทียมมาใช้ในการแสดงตำแหน่ง
บนแผนที่ด้วยระบบคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิชัย ขันดีพร้อมผล. 2536. การปรับแก้โครงข่าย GPS และผลกระทบระหว่างค่าสหสัมพันธ์
ระหว่างเส้นฐาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจบัณฑิต
วิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิมุตติ วสะหลาย. 2543. เรื่องจริงของพายุสุริยะ. สมาคมดาราศาสตร์ไทย. [Online]. Available :
<http://thaiastro.nectec.or.th/library/slrstorm.html>.
- อรอนงค์ เพชรนิ่ม. 2542. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศ
ไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรที่มีผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียม.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- A. J. Vandereendonck and Quyen Hua. 2001. **Measuring Ionospheric Effects from GPS Signals.**
Proceeding of the International Beacon Satellite Symposium June 4-6 2001. [CD-ROM].
The institute for Scientific Research Boston College Chesnut Hill, Massachusetts USA :
Patricia H. Doherty.

- Anderson, D. N. 1999. **Forecasting the Probability for Scintillation Activity Using Unique Ground-Base Sensor**. Ionospheric Effect Symposium.
- Alison Brown. et. al. 2001. **GPS Ionospheric Scintillation Measurements Using a Beam Steering Antenna Array For Improved Signal / Noise**. NAVSYS Corporation. [Online]. Available : www.navsys.com/papers/9806002.pdf.
- Bancroft S. 1985. "An algebraic solution of the GPS equation", **IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System** . 21, 1985.
- Boonsap Witchayangkoon. 2000. **Elements of GPS Precise Point Position**. Doctor of Philosophy (in Spatial Information Science and Engineering) The Graduate School, The University of Maine.
- David H. Hathaway. 2000. **Coronal Mass Ejection**. [Online]. Available : <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/cmes.htm>.
- David H. Hathaway. 2000. **The Solar Corona**. [Online]. Available : <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/corona.htm>.
- K.M.Groves. et. al. 2000. **A Comparison of GPS Performance in a Scintillation Environment at Ascension Island**. Space Vehicles Directorate, Air Force Research Laboratory, Hanscom AFB, MA. [Online]. Available : www.navsys.com/papers/0009005.pdf.
- Natural Resources Canada. 1995. **GPS Positioning Guide**. 3th ed. Ottawa : Natural Resources Canada.
- NovAtel Inc. 1999. **MiLlEnium GPSCard Software Vwersion 4.501 Command Descriptions Manual Rev 1**. Customer Service Dept, Alberta : Canada.
- R.M. Thomas. et. al., 2001. **Some Effect of Solar Maximum Equatorial Scintillation on a GPS Network in South East Asia**. Proceeding of the International Beacon Satellite Symposium June 4-6 2001. [CD-ROM]. The institute for Scientific Research Boston College Chesnut Hill, Massachusetts USA : Patricia H. Doherty.
- W. Phlawadana. et. al. 2001. **Effects Of Ionospheric Scintillation On GPS Accuracy**. [Online]. Available : www.apmcsta.org/doc/W.Phlawadana.doc.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาตามที่ยืม

ภาคผนวก ข บทความที่ตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%-----/pos_time_cep2/-----
%To Floor (PS data position and 50% of CEP Classify by time interval
%Author: Acting Sub Lt. Ekkapnon Mingkhwan
%Date : 10-12-00
% : 25-04-02 Ekkapnon M. Check Nan before process

%-----
site = 'Fang';

year = 2001;
month = 'sep';
day = 19;
day = 0;
while (day <= 0)
    fprintf('\n Enter the day at which to end processing')
    inp = input(' > ', 's');
    day = str2num(inp);
    if length(day) == 0 & day > 31
        day = 0;
    end
end
month = '';
while (length(month) <= 0)
    fprintf('\n Enter the month at which to end processing')
    month = input(' > ', 's');
    if length(month) == 0
        month = '';
    end
end

prn = 8;
elev_mask = 25;
start_time = 1; % start time for position plot (minutes)
end_time = 1439; % end time

os_type = get_os;

%
% load data
%
if strcmp(os_type, 'unix')
    command = ['load /data/gps1/ism-matdata/' lower(site) '/' lower(month)
    ...
        num2str(year) '.mat'];
elseif strcmp(os_type, 'dos')
    command = ['load c:\gps\ism-matdata\' lower(site) \'\' lower(month)' ...
        num2str(year) '.mat'];
end
eval(command)

do position plots for selected time interval

figure(1)
start_hour = floor(start_time./60);
start_min = (start_time./60 - start_hour) .* 60;
start_min = floor(start_min);
end_hour = floor(end_time./60);
end_min = (end_time./60 - end_hour) .* 60;

```

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end_min = floor(end_min);
lat = pos(day).lat(start_time:end_time);
lon = pos(day).lon(start_time:end_time);
%lat = pos(day).lat(1:1439);
lon = pos(day).lon(1:1439);

index = find(isfinite(lat));
mean_lat = mean(lat(index));
mean_lon = mean(lon(index));
index2 = find(isnan(lat)); %were there any positions not reported?

%----- find distance-----
for i = 1 : 1439
    cep_dist(i) = sqrt((lat(i)-mean_lat)^2+(lon(i)- mean_lon)^2);
end
med_dist = std(cep_dist(index));
%-----r-----
count1 = 0;
sumlat1=0;
sumlon1 = 0;
for i = 1 : 240
    if ~isnan(lat(i))
        count1 = count1 + 1;
        sumlat1 = sumlat1 + lat(i);
        sumlon1 = sumlon1 + lon(i);
    end
end
meanlat1 = sumlat1/count1;
meanlon1 = sumlon1/count1;
for i = 1 : 240
    if ~isnan(lat(i))
        cep_dist1(i) = sqrt((lat(i)-meanlat1)^2+(lon(i)- meanlon1)^2);
    else
        cep_dist1(i)= 0;
    end
end
med_dist1 = median(cep_dist1(1:240));
%-----m-----
count2 = 0;
sumlat2=0;
sumlon2 = 0;
for i = 241 : 480
    if ~isnan(lat(i))
        count2 = count2 + 1;
        sumlat2 = sumlat2 + lat(i);
        sumlon2 = sumlon2 + lon(i);
    end
end
meanlat2 = sumlat2/count2;
meanlon2 = sumlon2/count2;
for i = 241 : 480
    if ~isnan(lat(i))
        cep_dist2(i) = sqrt((lat(i)-meanlat2)^2+(lon(i)- meanlon2)^2);
    else
        cep_dist2(i)= 0;
    end
end
med_dist2 = median(cep_dist2(241:480));
%-----g-----
count3 = 0;
sumlat3=0;

```

```

sumlon3 = 0;
for i = 481 : 720
    if ~isnan(lat(i))
        count3 = count3 + 1;
        sumlat3 = sumlat3 + lat(i);
        sumlon3 = sumlon3 + lon(i);
    end
end
meanlat3 = sumlat3/count3;
meanlon3 = sumlon3/count3;
for i = 481 : 720
    if ~isnan(lat(i))
        cep_dist3(i) = sqrt((lat(i)-meanlat3)^2+(lon(i)- meanlon3)^2);
    else
        cep_dist3(i)= 0;
    end
end
med_dist3 = median(cep_dist3(481 : 720));
%-----B-----
count4 = 0;
sumlat4=0;
sumlon4 = 0;
for i = 721 : 960
    if ~isnan(lat(i))
        count4 = count4 + 1;
        sumlat4 = sumlat4 + lat(i);
        sumlon4 = sumlon4 + lon(i);
    end
end
meanlat4 = sumlat4/count4;
meanlon4 = sumlon4/count4;
for i = 721 : 960
    if ~isnan(lat(i))
        cep_dist4(i) = sqrt((lat(i)-meanlat4)^2+(lon(i)- meanlon4)^2);
    else
        cep_dist4(i)= 0;
    end
end
med_dist4 = median(cep_dist4(721 : 960));
%-----C-----
count5 = 0;
sumlat5=0;
sumlon5 = 0;
for i = 961 : 1200
    if ~isnan(lat(i))
        count5 = count5 + 1;
        sumlat5 = sumlat5 + lat(i);
        sumlon5 = sumlon5 + lon(i);
    end
end
meanlat5 = sumlat5/count5;
meanlon5 = sumlon5/count5;
for i = 961 : 1200
    if ~isnan(lat(i))
        cep_dist5(i) = sqrt((lat(i)-meanlat5)^2+(lon(i)- meanlon5)^2);
    else
        cep_dist5(i)= 0;
    end
end
med_dist5 = median(cep_dist5(961 : 1200));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%-----pla-----
count6 = 0;
sumlat6=0;
sumlon6 = 0;
for i = 1201 : 1439
    if ~isnan(lat(i))
        count6 = count6 + 1;
        sumlat6 = sumlat6 + lat(i);
        sumlon6 = sumlon6 + lon(i);
    end
end
meanlat6 = sumlat6/count6;
meanlon6 = sumlon6/count6;
for i = 1201 : 1439
    if ~isnan(lat(i))
        cep_dist6(i) = sqrt((lat(i)-meanlat6)^2+(lon(i)- meanlon6)^2);
    else
        cep_dist6(i)= 0;
    end
end
med_dist6 = median(cep_dist6(1201 : 1439));

%-----
lat_metres = (pos(day).lat - mean_lat) * pi* 2 * 6378e3 / 360;
lon_metres = (pos(day).lon - mean_lon) * pi *2 * 6378e3 / 360;

% degree convert to metres
med_dist_metres = med_dist * pi *2 * 6378e3 / 360;
med_dist_metres1 = med_dist1 * pi *2 * 6378e3 / 360;
med_dist_metres2 = med_dist2 * pi *2 * 6378e3 / 360;
med_dist_metres3 = med_dist3 * pi *2 * 6378e3 / 360;
med_dist_metres4 = med_dist4 * pi *2 * 6378e3 / 360;
med_dist_metres5 = med_dist5 * pi *2 * 6378e3 / 360;
med_dist_metres6 = med_dist6 * pi *2 * 6378e3 / 360;
%plot lines
%plot(lat_metres(start_time:end_time),lon_metres(start_time:end_time));
%hold on
%plot points
%h =
plot(lat_metres(start_time:end_time),lon_metres(start_time:end_time),'.r
');
%hold off
%colorbar

%plot variation of POS throughout the day in 4 hour blocks using colours
in
%order red, yellow, green, cyan, blue, black

h = plot(lat_metres(1:240),lon_metres(1:240),'.r');
hold on
h = plot(lat_metres(241:480),lon_metres(241:480),'.m');
h = plot(lat_metres(481:720),lon_metres(481:720),'.g');
h = plot(lat_metres(721:960),lon_metres(721:960),'.b');
h = plot(lat_metres(961:1200),lon_metres(961:1200),'.c');
h = plot(lat_metres(1201:1439),lon_metres(1201:1439),'.k');

%plot circle distance metres;

lonl = (meanlonl- mean_lon)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
latl = (meanlatl- mean_lat)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมการขนส่งทางบก ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

cir(med_dist_metres1,lat1,lon1,'r');

lon2 = (meanlon2- mean_lon)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
lat2 = (meanlat2- mean_lat)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
cir(med_dist_metres2,lat2,lon2,'m');

lon3 = (meanlon3- mean_lon)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
lat3 = (meanlat3- mean_lat)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
cir(med_dist_metres3,lat3,lon3,'g');

lon4 = (meanlon4- mean_lon)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
lat4 = (meanlat4- mean_lat)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
cir(med_dist_metres4,lat4,lon4,'b');

lon5 = (meanlon5- mean_lon)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
lat5 = (meanlat5- mean_lat)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
cir(med_dist_metres5,lat5,lon5,'c');

lon6 = (meanlon6- mean_lon)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
lat6 = (meanlat6- mean_lat)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
cir(med_dist_metres6,lat6,lon6,'k');
hold off

ylabel('latitude (m)', 'FontSize', 14)
xlabel('longitude (m) (Program : pos-time-cep2)', 'FontSize', 14)
axis([-15,15,-15,15])
%set (h, 'MarkerSize', 15)
site = 'Chiangrai';
%site = 'Fange';

set (gca, 'FontSize', 14) % gca = get current axes
title([site ' ', ' num2str(day) ' ' month ' ' num2str(year) ' ' ...
num2str(start_hour) ':' num2str(start_min) '0-' ...
num2str(end_hour) ':' num2str(end_min) 'UT' ])
text(0.7,0.9,'Red: 0-4UT','units','normalized','FontSize',14, 'color',
'r')
text(0.7,0.85,'Magenta: 4-
8UT','units','normalized','FontSize',14,'color','m')
text(0.7,0.8,'Green: 8-
12UT','units','normalized','FontSize',14,'color','g')
text(0.7,0.75,'Blue: 12-
16UT','units','normalized','FontSize',14,'color','b')
text(0.7,0.7,'Cyan: 16-20UT','units','normalized','FontSize',14,
'color','c')
text(0.7,0.65,'Black: 20-
24UT','units','normalized','FontSize',14,'color','k')
text(0.4,0.9,'0 UT = 7 LT','units','normalized','FontSize',14)
text(0.0,0.1,' STD = ', 'units','normalized','FontSize',14, 'color', 'r')
text(0.15,0.1,num2str(med_dist_metres),'units','normalized','FontSize',1
4, 'color', 'r')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

                prxyzr(sv,4) = pr;
            end
        end
    end
end
%3. fix pseudorange-----
    cr= 0;

    if isempty(prntime)
        continue
    end
    if isnan(ism(day,prn(sv)).latsat(prntime)) | isempty(ism
(day,prn(sv)).latsat(prntime))
        continue;
    end
    if isnan(ism(day,prn(sv)).lonsat(prntime)) | isempty(ism
(day,prn(sv)).lonsat(prntime))
        continue;
    end
    if isnan(ism(day,prn(sv)).range(prntime)) | isempty(ism
(day,prn(sv)).range(prntime))
        continue;
    end
    pseudor = (tecddata(prn(sv)).L2code(min) - tecdata(prn
(sv)).L1code(min));
    tec = 9.5196 * pseudor;

    pseudorange = ism(day,prn(sv)).range(prntime);
    s4 = ism(day,prn(sv)).S4(prntime);
    sig60 = ism(day,prn(sv)).sig60(prntime);
    if prn(sv)==1
        cr = pseudorange + (-1653.041*s4) + (5471.375*sig60)
+ (-34.526*tec) - 332.409;
    end
    if prn(sv)==2
        cr =(pseudorange) + (-713.306*s4) + (92.030*sig60) +
(-3.718*tec) - 4308.050;
    end
    if prn(sv)==3
        cr = (pseudorange*0.999) + (16123.972*s4) +
(3318.474*sig60) + (48.397*tec) - 8881.651;
    end
    if prn(sv)==4
        cr = (pseudorange) + (-3585.352*s4) +
(828.539*sig60) + (-4.947*tec) - 3212.969;
    end
    if prn(sv)==5
        cr = (pseudorange) + (-1968.456*s4) + (-
723.009*sig60) + (-8.239*tec) - 2145.306;
    end
    if prn(sv)==6
        cr = (pseudorange) + (-16845.537*s4) + (-
573.807*sig60) + (-21.287*tec) - 6093.518;
    end
    if prn(sv)==7
        cr = (pseudorange) + (-307.261*s4) + (-62.555*sig60)
+ (-0.886*tec) - 4485.305;
    end
    if prn(sv)==8

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        cr = (pseudorange) + (62.749*s4) + (139.791*sig60) +
(1.877*tec) - 4703.100;
        end
        if prn(sv)==9
            cr = (pseudorange) + (-771.628*s4) + (-133.031*sig60)
+ (0.317*tec) - 6244.042;
        end
        if prn(sv)==10
            cr = (pseudorange) + (-5052.093*s4) +
(1364.764*sig60) + (10.844*tec) - 4180.630;
        end
        if prn(sv)==11
            cr = (pseudorange) + (1957.715*s4) + (-
515.699*sig60) + (20.522*tec) - 6093.518;
        end
        if prn(sv)==13
            cr = (pseudorange) + (-57.019*s4) + (446.090*sig60)
+ (2.734*tec) - 4792.797;
        end
        if prn(sv)==15
            cr = (pseudorange*0.993) + (15585.403*s4) + (-
2122.759*sig60) + (-3.458*tec) + 49745.538;
        end
        if prn(sv)==17
            cr = (pseudorange*1.02) + (-31765.630*s4) + (-
2805.190*sig60) + (-9.960*tec) - 12033.247;
        end
        if prn(sv)==18
            cr = (pseudorange*0.999) + (2568.500*s4) + (-
1635.813*sig60) + (-13.862*tec) + 3323.252;
        end
        if prn(sv)==20
            cr = (pseudorange) + (43.9416*s4) + (155.644*sig60) +
(5.246*tec) - 4453.642;
        end
        if prn(sv)==22
            cr = (pseudorange) + (-1722.486*s4) +
(1947.985*sig60) + (1.052*tec) - 8836.091;
        end
        if prn(sv)==23
            cr = (pseudorange) + (7336.447*s4) + (498.434*sig60)
+ (20.600*tec) - 4029.604;
        end
        if prn(sv)==24
            cr = (pseudorange) + (2518.205*s4) + (-669.387*sig60)
+ (-2.564*tec) - 3800.619;
        end
        if prn(sv)==25
            cr = (pseudorange*1.001) + (11608.657*s4) +
(6942.875*sig60) + (42.248*tec)-22115.179;
        end
        if prn(sv)==26
            cr = (pseudorange) + (4898.189*s4) + (2183.926*sig60)
+ (15.255*tec)-4785.952;
        end
        if prn(sv)==27
            cr = (pseudorange) + (-3007.614*s4) + (-73.984*sig60)
+ (-5.349*tec)-2415.206;
        end
        if prn(sv)==28

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        cr = (pseudorange) + (1078.533*s4) + (-166.401*sig60)
+ (-13.716*tec)-4833.945;
    end
    if prn(sv)==30
        cr = (pseudorange) + (-5899.287*s4) + (409.982*sig60)
+ (-3.362*tec)-5121.714;
    end
    if prn(sv)==31
        cr = (pseudorange*1.001) + (-2320.154*s4) + (-
249.535*sig60) + (-17.669*tec)-3003.711;

    end

%-----check complete data-----
if isfinite(cx)& ~isempty(cx)
    if isfinite(cy)&~isempty(cy)
        if isfinite(cz)&~isempty(cz)
            if isfinite(cr)&~isempty(cr)
                fixxyzr(sv,1) = cx;
                fixxyzr(sv,2) = cy;
                fixxyzr(sv,3) = cz;
                dif_pr_r = pr-r;
                dif_cr_r = cr-r;
                %fixxyzr(sv,4) = cr;
                if abs(dif_cr_r) < abs(dif_pr_r)
                    fixxyzr(sv,4) = cr;
                else
                    fixxyzr(sv,4) = pr;
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
end
%-----
end
end
p = bancroft(xyzr);
[lat(min) lon(min) alt(min)] = A2deg(p(1),p(2),p(3));
[xlat xlon xalt] = A2deg(p(1),p(2),p(3));
%-----
-
prp = bancroft(prxyzr);
%[prlat(min) prlon(min) pralt(min)] = A2deg(prp(1),prp(2),prp
(3));
[plat(min) plon(min) palt(min)] = A2deg(prp(1),prp(2),prp(3));

-----moving av-----
% rin>start+moving
mprlat = mean(prlat(min-(moving):min));
mprlon = mean(prlon(min-(moving):min));
sprlat(min) = mprlat+10;
prlon(min) = mprlon+5;
%end;

-----
fixp = bancroft(fixxyzr);
er = fixp(4);

[flat(min) flon(min) falt(min)] = A2deg(fixp(1),fixp(2),fixp(3));
[fixlat fixlon fixalt] = A2deg(fixp(1),fixp(2),fixp(3));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i = min == start
    fixlat(min) = flat;
    fixlon(min) = flon;
    -----moving av-----
    if min>start+(moving)
        * mfixlat = mean(fixlat(min-(moving):min));
        % mfixlon = mean(fixlon(min-(moving):min));
        %fixlat(min) = mfixlat+10;
        %fixlon(min) = mfixlon+5;
    end;
    -----
    plot(plon(min),prlat(min),'.');
    plot(fixlon(min),fixlat(min),'r.');
```

end

figure(3)

```

%plot(lon(min),lat(min),'k*');
plot(99.8465141532968,19.9862017279684,'k*')
hold on
```

moving = 10

```

for i = start : stop
    cf = 0;
    tf = 0;
    for j = 1 : moving
        if i+j > stop
            tf = tf + 0;
        else
            if ~isnan(plat(i+j))
                tf = tf + plat(i+j);
                cf = cf + 1;
            end
        end
    end
    mf = tf/cf;
    cb = 0;
    tb = 0;
    for k = 1 : moving
        if i+j < start
            tb = tb + 0;
        else
            if ~isnan(plat(i-k))
                tb = tb + plat(i-k);
                cb = cb + 1;
            end
        end
    end
    mb = tb / cb;
    prlat(i) = (mf + mb) / 2;
    %-----lon-----
    cf = 0;
    tf = 0;
    for j = 1 : moving
        if i+j > stop
            tf = tf + 0;
        else
            if ~isnan(plon(i+j))
                tf = tf + plon(i+j);
                cf = cf + 1;
            end
        end
    end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end
mf = tf/cf;

cb = 0;
tb = 0;
for k = 1 : moving
    if i+j < start
        tb = tb + 0;
    else
        if ~isnan(plon(i-k))
            tb = tb + plon(i-k);
            cb = cb + 1;
        end
    end
end
mb = tb / cb;
prlon(i) = (mf + mb) / 2;
figure(3)
plot(lon(min), lat(min), 'k*');
plot(99.846 4 532968, 19.9862017279684, 'k*')
hold on
plot(prlon(i), prlat(i), '.');
%-----collected-----
moving = moving+2;
cf = 0;
tf = 0;
for j = 1 : moving
    if i+j > stop
        tf = tf + 0;
    else
        if ~isnan(flat(i+j))
            tf = tf + flat(i+j);
            cf = cf + 1;
        end
    end
end
mf = tf/cf;
cb = 0;
tb = 0;
for k = 1 : moving
    if i+j < start
        tb = tb + 0;
    else
        if ~isnan(flat(i-k))
            tb = tb + flat(i-k);
            cb = cb + 1;
        end
    end
end
mb = tb / cb;
fixlat(i) = (mf + mb) / 2;
%-----lon-----
cf = 0;
tf = 0;
for j = 1 : moving
    if i+j > stop
        tf = tf + 0;
    else
        if ~isnan(flom(i+j))
            tf = tf + flom(i+j);
            cf = cf + 1;
        end
    end
end
mf = tf/cf;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้แก่สถาบันการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        cf = cf + 1;
    end
end
mf = tf/cf;

cb = 0;
tb = 0;
for k = 1 : moving
    if i+j < start
        tb = tb + 0;
    else
        if ~isnan(flon(i-k))
            tb = tb + flon(i-k);
            cb = cb + 1;
        end
    end
end
mb = tb / cb;
fixlon(i) = (mf + mb) / 2;
figure(3)
%plot(lon(min), lat(min), 'k*');
%plot(99.8465141532968, 19.9862017279684, 'k*')
hold on
plot(fixlon(i), fixlat(i), 'r.');
```

end

```

%find mean
tprlat = 0;
tprlon = 0;
countprlat = 0;
countprlon = 0;

tfixlat = 0;
tfixlon = 0;
countfixlat = 0;
countfixlon = 0;

for i = start:stop
    if isfinite(prlat(i))
        tprlat = tprlat + prlat(i);
        countprlat = countprlat + 1;
    end;
    if isfinite(prlon(i))
        tprlon = tprlon + prlon(i);
        countprlon = countprlon + 1;
    end;
    if isfinite(fixlat(i))
        tfixlat = tfixlat + fixlat(i);
        countfixlat = countfixlat + 1;
    end;
    if isfinite(fixlon(i))
        tfixlon = tfixlon + fixlon(i);
        countfixlon = countfixlon + 1;
    end;
end;
mprlat = tprlat/countprlat;
mprlon = tprlon/countprlon;
mfixlat = tfixlat/countfixlat;
mfixlon = tfixlon/countfixlon;
```

เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

figure(3)
plot(mean(prlon(start:stop)),mean(prlat(start:stop)),'*');
plot(mean(fixlon(start:stop)),mean(fixlat(start:stop)),'r*');
hold on
xlabel('longitude (degree)');
Ylabel('latitude (degree)');
title([' Error Position ',num2str(day),month,' Time = ',num2str(start),'
- ',num2str(stop)]);
text(0.6,0.9,'Raw Pseudorange','units','normalized','FontSize',14,
'color', 'b')
text(0.6,0.85,'Collected
Pseudorange','units','normalized','FontSize',14,'color','r')
text(0.05,0.1,'pos = ','units','normalized','FontSize',14, 'color', 'b')
text(0.17,0.1,num2str(mprlat),'units','normalized','FontSize',14,
'color', 'b')
text(0.35,0.1,num2str(mprlon),'units','normalized','FontSize',14,
'color', 'b')
text(0.05,0.05,'pos = ','units','normalized','FontSize',14, 'color',
'r')
text(0.17,0.05,num2str(mfixlat),'units','normalized','FontSize',14,
'color', 'r')
text(0.35,0.05,num2str(mfixlon),'units','normalized','FontSize',14,
'color', 'r')

```

```

axis([20,180,-50,100]);
hold off
%-----

```

```

figure(4)
hold on;
tprlat = 0;
tprlon = 0;
countprlat = 0;
countprlon = 0;

tfixlat = 0;
tfixlon = 0;
countfixlat = 0;
countfixlon = 0;

```

```

for i = start:stop
    if isfinite(prlat(i))
        tprlat = tprlat + prlat(i);
        countprlat = countprlat + 1;
    end;
    if isfinite(prlon(i))
        tprlon = tprlon + prlon(i);
        countprlon = countprlon + 1;
    end;
    if isfinite(fixlat(i))
        tfixlat = tfixlat + fixlat(i);
        countfixlat = countfixlat + 1;
    end;
    if isfinite(fixlon(i))
        tfixlon = tfixlon + fixlon(i);
        countfixlon = countfixlon + 1;
    end;
end;

```

mprlat = tprlat/countprlat; งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mprlon = tprlon/countprlon;
mfixlat = tfixlat/countfixlat;
mfixlon = tfixlon/countfixlon;

for i =start: stop
    prlat_metres(i) = (prlat(i) - 19.986201279684) * pi* 2 * 6378e3 /
360;
    prlon_metres(i) = (prlon(i) - 99.8465141532968) * pi *2 * 6378e3 /
360;
    plot(prlon_metres(i),prlat_metres(i),'.');

    fixlat_metres(i) = (fixlat(i) - 19.986201279684) * pi* 2 * 6378e3 /
360;
    fixlon_metres(i) = (fixlon(i) - 99.8465141532968) * pi *2 * 6378e3 /
360;
    plot(fixlon_metres(i),fixlat_metres(i),'r.');
```



```

    ceprr_dist(i) = sqrt((prlat(i)-mprlat)^2 + (prlon(i)- mprlon)^2);
    cepfix_dist(i) = sqrt((fixlat(i)-mfixlat)^2 + (fixlon(i)-
mfixlon)^2);
end;

prstd = std(ceprr_dist(start:stop));
fixstd = std(cepfix_dist(start:stop));

medpr_dist = median(ceprr_dist(start:stop));
medfix_dist = median(cepfix_dist(start:stop));
% degree convert to metres
medpr_dist_metres = medpr_dist * pi *2 * 6378e3 / 360;
medfix_dist_metres = medfix_dist * pi *2 * 6378e3 / 360;

difprlon = (mprlat - 19.986201279684)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
difprlat = (mprlon - 99.8465141532968)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;

diffixlon = (mfixlat - 19.986201279684)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;
diffixlat = (mfixlon - 99.8465141532968)* pi* 2 * 6378e3 / 360 ;

cir(medpr_dist_metres, difprlat, difprlon,'b')
cir(medfix_dist_metres, diffixlat, diffixlon,'r')
```

```

rpr = sqrt((mprlat - 19.986201279684)^2 + (mprlon -
99.8465141532968)^2);
rfix = sqrt((mfixlat - 19.986201279684)^2 + (mfixlon -
99.8465141532968)^2);

plot(mean(prlon_metres(start:stop)),mean(prlat_metres(start:stop)),'*');
plot(mean(fixlon_metres(start:stop)),mean(fixlat_metres(start:stop)),'r*
');
plot(99.8465141532968,19.986201279684,'k*');
axis([-10e6,10e6,-10e6,10e6]);

xlabel('longitude Error (m)');
ylabel('latitude Error (m)');
title([' Error Position ',num2str(day),month,' Time = ',num2str(start),'
-',num2str(stop)]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

text(0.6,0.9,'Raw Pseudorange','units','normalized','FontSize',14,
'color','b')
text(0.6,0.85,'Collected
Pseudorange','units','normalized','FontSize',14,'color','r')
text(0.05,0.1,'std.Err = ','units','normalized','FontSize',14, 'color',
'b')
text(0.05,0.05,'std.Err = ','units','normalized','FontSize',14, 'color',
'r')
text(0.25,0.1,num2str(prstd),'units','normalized','FontSize',14,
'color','b')
text(0.25,0.05,num2str(fixstd),'units','normalized','FontSize',14,
'color','r')
text(0.6,0.1,'Mean Err = ','units','normalized','FontSize',14, 'color',
'b')
text(0.6,0.05,'Mean Err = ','units','normalized','FontSize',14, 'color',
'r')
text(0.8,0.1,num2str(rpr),'units','normalized','FontSize',14, 'color',
'b')
text(0.8,0.05,num2str(rfix),'units','normalized','FontSize',14, 'color',
'r')

```

```

-----
lo = -150;
hi = 150;
figure(5)
subplot(4,1,1)
hold on;
plot(prlat)
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Raw latitude (degree)');
title([' Error Position ',num2str(day),month,' Time = ',num2str(start),'
- ',num2str(stop)]);

subplot(4,1,2)
hold on;
plot(fixlat,'r')
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Collected latitude (degree)');

subplot(4,1,3)
hold on;
plot(prlon)
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Raw longitude (degree)');

subplot(4,1,4)
hold on;
plot(fixlon,'r')
axis([start,stop,lo,hi]);
xlabel('min');
Ylabel('Collected longitude (degree)');

```

```

-----
lo = -10e6;
hi = 10e6;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

figure(6)
subplot(4,1,1)
hold on;
plot(prlat_metres)
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Raw Pseudorange lat (m)');
title([num2str(day),month,' Position from Pseudorange - fixPseudorange
Time = ',num2str(start),' - ',num2str(stop)]);

subplot(4,1,2)
hold on;
plot(fixlat_metres,'r')
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Collected lat (m)');

subplot(4,1,3)
hold on;
plot(prlon_metres)
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Raw Pseudorange lon (m)');

subplot(4,1,4)
hold on;
plot(fixlon_metres,'r')
axis([start,stop,lo,hi]);
Ylabel('Collected lon (m)');
Xlabel('min')

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function position = bancroft(B_pass)
% Bancroft: Calculation of preliminary coordinates
% for a GPS receiver based on pseudoranges
% to 4 or more satellites. The ECEF
% coordinates (see function e_r_corr)
% are the first three elements of
% each row of B. The fourth element of each
% row of B contains the observed pseudorange.
% Each row pertains to one satellite.
% The pseudorange in the first row of B is
% used to discriminate between the two
% positionable solutions.

%Reference: Bancroft, S. (1985) An Algebraic Solution
% of the GPS Equations, IEEE Trans. Aerosp.
% and Elec. Systems, AES-21, 56--59

% position(1) = X
% position(2) = Y
% position(3) = Z
% position(4) = c*dt

%Kai Borre 04-30-95, improved by C.C. Goad 11-24-96
%Copyright (c) by Kai Borre
%$Revision: 1.0 $ $Date: 1997/09/26 $

% Test values to use in debugging
%B_pass = [ -11716227.778 -10118754.628 21741083.973 22163882.029;
% -12082643.974 -20428242.179 11741374.154 21492579.823;
% 14373286.650 -10448439.349 19596404.858 21492492.771;
% 10278432.244 -21116508.618 -12689101.970 25284588.982];
% Solution: 595025.053 -4856501.221 4078329.981

% Test values to use in debugging
%B_pass = [14177509.188 -18814750.650 12243944.449 21119263.116;
% 15097198.146 -4636098.555 21326705.426 22527063.486;
% 23460341.997 -9433577.991 8174873.599 23674159.379;
% -8206498.071 -18217989.839 17605227.065 20951643.862;
% 1399135.830 -17563786.820 19705534.862 20155386.649;
% 6995655.459 -23537808.269 -9927906.485 24222112.972];
% Solution: 596902.683 -4847843.316 4088216.740

v_light = 299792458;
position = zeros(4,1);
%position = [-2345.22277441834
% -1880.4350391084
% 1248.89118154328
% 7001
% ];
lastposition = position;

%position = [-2344.72127437876
% -1880.03235561273
% 1249.98674367405
% 0
% ];
%position = [-2344

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%           1249
%           0
%           |;
for iter = 1:6
    %iter = 0;
    %while iter<=6
        iter = iter +1;
        B = B_pass;
        [m,n] = size(B);
        for i = 1:m
            x = B(i,1);
            y = B(i,2);
            if iter == 1
                %traveltime = 0.072;
                traveltime = position(4)/v_light;
            else
                z = B(i,3);
                rho = (x-position(1))^2+(y-position(2))^2+(z-position(3))^2;
                traveltime = sqrt(rho)/v_light;
            end
            angle = traveltime*7.292115147e-5;
            cosa = cos(angle);
            sina = sin(angle);
            B(i,1) = cosa*x + sina*y;
            B(i,2) = -sina*x + cosa*y;
        end; % i-loop

        if m > 4
            BBB = inv(B'*B)*B';
        else
            BBB = inv(B);
        end
        e = ones(m,1);
        alpha = zeros(m,1);
        for i = 1:m
            alpha(i) = lorentz(B(i,:)',B(i,:)')/2;
        end
        BBBe = BBB*e;
        BBBalpha = BBB*alpha;
        a = lorentz(BBBe,BBBe);
        b = lorentz(BBBe,BBBalpha)-1;
        c = lorentz(BBBalpha,BBBalpha);
        root = sqrt(b*b-a*c);
        r(1) = (-b-root)/a;
        r(2) = (-b+root)/a;
        possible_pos = zeros(4,2);
        for i = 1:2
            possible_pos(:,i) = r(i)*BBBe+BBBalpha;
            possible_pos(4,i) = -possible_pos(4,i);
        end
        for j =1:m
            for i = 1:2
                c_dt = possible_pos(4,i);
                calc = norm(B(j,1:3)' -possible_pos(1:3,i))+c_dt;
                omc = B(j,4)-calc;
                abs_omc(i) = abs(omc);
            end
        end
    end; % j-loop

```

เอกสารนี้ discrimination between roots ใช้วงเล็บนอกใช้วงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equatorial Scintillation on GPS during Solar Maximum

R M Thomas (1), M A Cervera (1), Pian Totarong (2) and Ekkapol Mingkwun (2)

(1) Defence Science and Technology Organisation, Edinburgh, South Australia
(e-mail: dick.thomas@dsto.defence.gov.au)

(2) Military Research and Development Centre, Bangkok, Thailand

ABSTRACT. In order to monitor the effect of equatorial scintillation on GPS receiver performance during the current solar cycle maximum centred on the year 2000, a network of 6 GPS Ionospheric Scintillation Monitors (ISM) was set up in the South East Asia/Oceania region by DSTO. Data collection commenced in late 1997 for many stations, and in 2000 for Thailand, first at Fang then later at Chiang Rai. In addition to measurement of amplitude scintillation index S4 and phase scintillation index sigma-phi, positional data have also been monitored and display significant degradation in the presence of scintillation, more so since the removal of SA (Selective Availability) in May 2000. In this paper we address the issue of positional errors, the single station performance of GPS link availability, and the validation of the scintillation modelling code WBMOD with particular reference to the stations Fang/Chiang Rai and Vanimo.

1. INTRODUCTION

The performance of GPS receivers in the equatorial region is potentially compromised by amplitude and phase scintillations imposed on the satellite signals by ionospheric irregularities [1]. At equatorial latitudes, such irregularities reach a peak in occurrence after sunset and during periods of high solar cycle activity [2]. There is also a seasonal variation, with peaks in activity in the Australian/Asian longitude sector appearing around the equinoxes, in March and September. With the exception of the work of Fang and Liu [3], there has been a relative lack of statistical data on the occurrence of irregularities in this geographical region.

The formation of the irregularities is attributed to the Rayleigh-Taylor Instability [4] in which a perturbation, forming on the bottom-side of the ionospheric F2 layer, is amplified at the magnetic dip equator to produce an upward moving bubble of depleted ionisation which breaks down into a spectrum of smaller irregularities mapping down magnetic field lines towards the north and south Appletan anomaly crests at around 12 to 15 degrees magnetic latitude [5]. The resulting irregularities are most intense at the anomaly crests and are characterized by a spectrum of scale sizes that constitutes a random diffraction screen to any signals passing through it. Consequently, scintillations in amplitude and phase may be imposed on the signals from orbiting satellites such as those of the GPS with the result that the signal tracking loops of a navigation receiver, depending on its design, may be stressed to the point of producing a degraded position solution, or at worst no solution.

Owing to the potentially serious consequences of scintillation on GPS receiver performance, it is desirable to have the ability to model scintillation occurrence. WBMOD is such a code [6], although its predictions should be regarded more as monthly median predictions. WBMOD does not claim to provide scintillation forecasts on hourly or daily time scales. Nevertheless, WBMOD is useful and it is worthwhile to have it validated in our own region by comparing its predicted scintillation occurrence with our measured ISM data, suitably averaged.

2. RECEIVER NETWORK CONFIGURATION

The network has been described by Thomas et al [7]. The stations are located at Marak Parak (Malaysia), Parepare (Indonesia), Pontianak (Indonesia), Darwin (Australia), Vanimo (Papua New Guinea) and Fang, later Chiang Rai (Thailand).

Marak Parak, possessing a dip latitude of -3.8 degrees, may be considered a magnetic equator site, whereas Pontianak (dip -18.8 degrees), Parepare (-26.2 degrees) and Vanimo (-21.6 degrees) lie more or less under the southern anomaly crest, Fang/Chiang Rai (+26 degrees) is under the northern anomaly crest and Darwin (-40.5 degrees) is pole-ward of the southern anomaly. At a minimum elevation of 15 degrees and an altitude of 400km the network monitors a wide area, spanning about 60 degrees of longitude and 50 degrees of latitude. A map of the station locations is shown in Figure 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

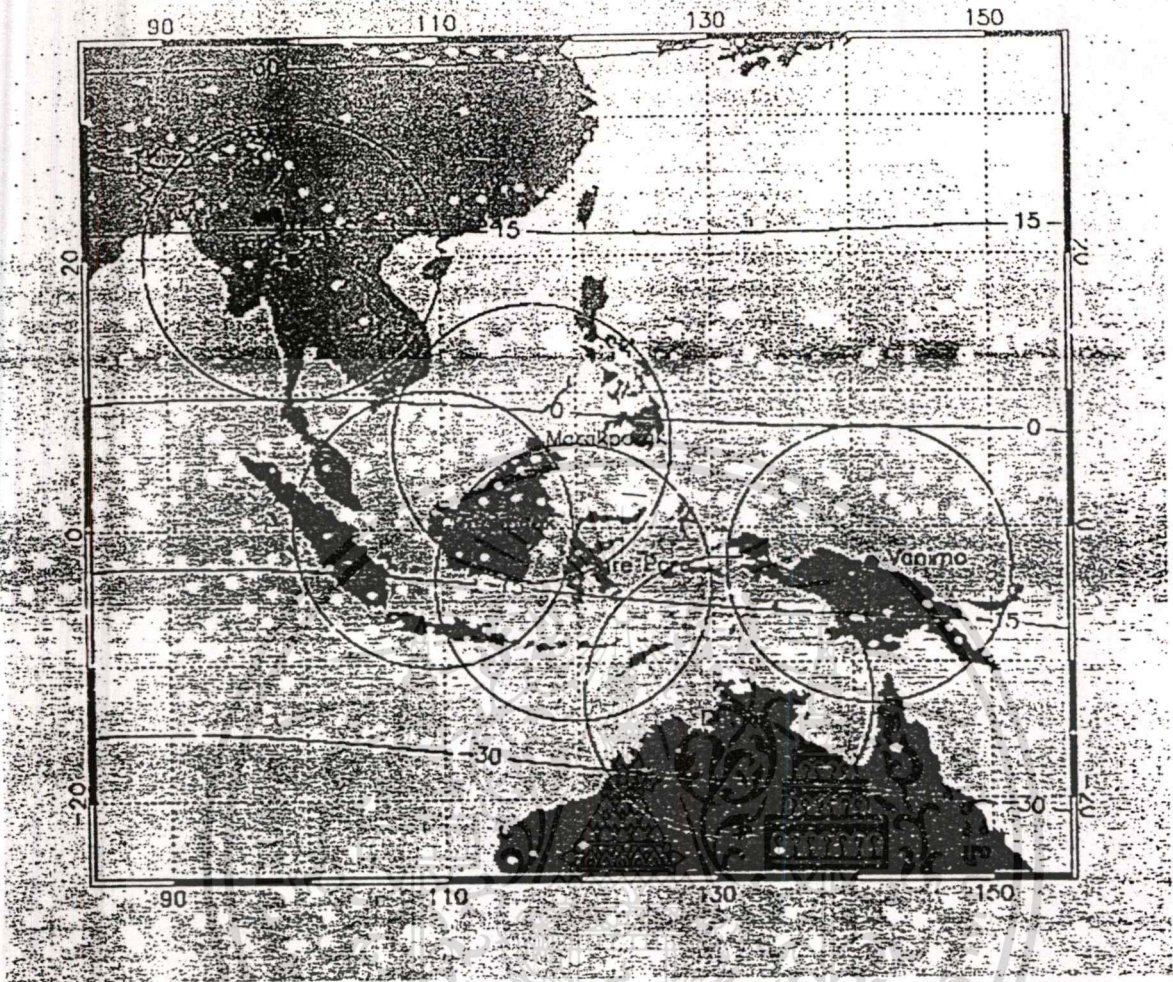


Figure 1. Locations of GPS receiver network stations with coverage circles of radius 1140 km (elevation 15°, altitude 400 km), magnetic dip equator and lines of magnetic latitude for 15° north and south.

3. EQUIPMENT

The six ISMs are described in detail by Van Dierendonck et al [8, 9], comprising a NovAtel 11-channel single frequency (L1=1.57542 GHz) C/A (Coarse Acquisition) code receiver fitted with an oven-controlled crystal oscillator for low phase noise performance. This narrow correlator receiver has a relatively wide phase-lock-loop noise bandwidth of 15 Hz, and should track through severe phase scintillation. The received signals are sampled at a rate of 50 Hz under computer control which provides processed data every minute, saved to an external 1 Gbyte removable disk which is changed approximately monthly for post-processing. The ISM provides a number of processed scintillation parameters, as well as position and Dilution of Precision data. Phase scintillation is monitored through the standard deviation σ_ϕ and the power spectral density of de-trended carrier phase from each satellite. For further analysis, we use the measured σ_ϕ averaged over a 60 second period. Amplitude scintillation is monitored through the S4 index, which is the normalised standard deviation of the de-trended received signal power. This parameter is made available both in raw form or as a corrected S4, for which the effects of ambient noise have been removed. We work with the corrected value of S4 in subsequent analysis of our recorded data. In the absence of scintillation and multipath, corrected S4 values should lie below 0.05. In scintillation conditions, values from 0.05 up to 1.0 may be obtained. But we note that measurement of S4 using this system becomes subject to some uncertainty due to stressing of the receiver tracking loops at the highest scintillation levels, when S4 values exceed about 0.7. Data gathering for the ISMs commenced at Parepare, Pontianak and Marak Parak in December 1997, Darwin in June 1998, Vanimo in August 1999 and Fang in June 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. EFFECT OF SCINTILLATION ON MULTIPLE GPS SATELLITE LINKS

It is of considerable interest to investigate the robustness of the GPS navigation solution under scintillation. Links to at least 4 satellites are required in order for a receiver to provide an unaided navigation solution, since the receiver must solve for 4 "unknowns", namely the user's location in the 3 spatial dimensions, plus the user's clock bias with respect to system time [10]. If the links used to calculate the receiver position are sufficiently stressed by scintillation, some degradation of the position solution could be expected. In a more extreme scintillation environment, if the number of simultaneous links falls below 4, the system will fail, at least until the necessary links are re-acquired. We have examined Vanimo ISM data from 18 April 2000, a night of strong scintillation, applying an elevation mask of 15 degrees, and an S4 threshold level of 0.6, in order to compute the percentage of links (or satellites) for which this S4 threshold was simultaneously exceeded for each one minute interval during the scintillation episode. The results are shown in Figure 2. For April 2000 the monthly average sunspot number was 125.3, and the yearly average sunspot number was 120.7.

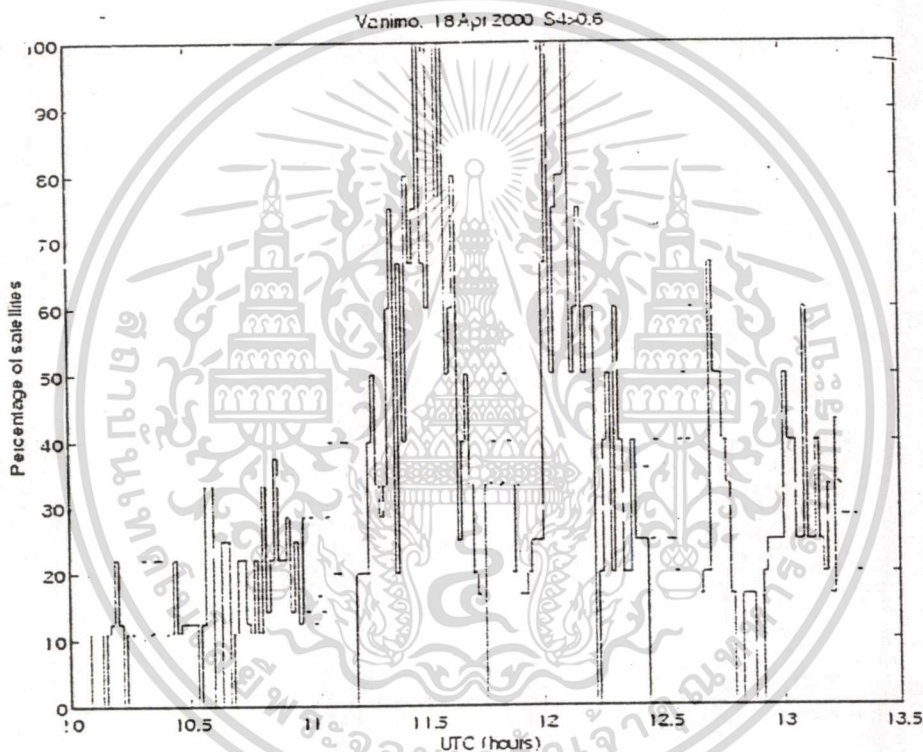


Figure 2. The percentage of available satellites, above the mask elevation of 15 deg, which during scintillation experienced S4 levels in excess of 0.6, for the Vanimo station on 18 April 2000 (LT equals UT + 10 hours)

It is evident that on this night a high percentage of satellites suffered scintillation at S4 levels in excess of 0.6. For a total of 6 minutes within the interval from approximately 11:30 to 12:05UT, 100% of satellites were affected. We know that system integrity was maintained despite repeated loss of lock on the worst affected satellites. Nevertheless we suspect that system performance approached marginal limits during these times.

6. EFFECT OF SCINTILLATION ON POSITION SOLUTION

It is reasonable to assume that if the satellite links that are being used by the receiver to compute its position are sufficiently stressed, then the position accuracy may become degraded. Also, loss of lock on some satellite links may possibly lead to an increased DOP (Dilution of Precision) due to a consequent sub-optimal geometric distribution of available satellites over the sky, thus contributing to degraded positional accuracy. Various parameters are in common use to characterize horizontal accuracy. CEP (Circular Error Probable) is a median

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

measure which specifies the radius of the circle, centred on the station true position, which contains 50% of all measurements in the horizontal scatter plot. Alternatively, R95 is the radius of the circle, centred on the true position, which contains 95% of all points in the horizontal scatter plot.

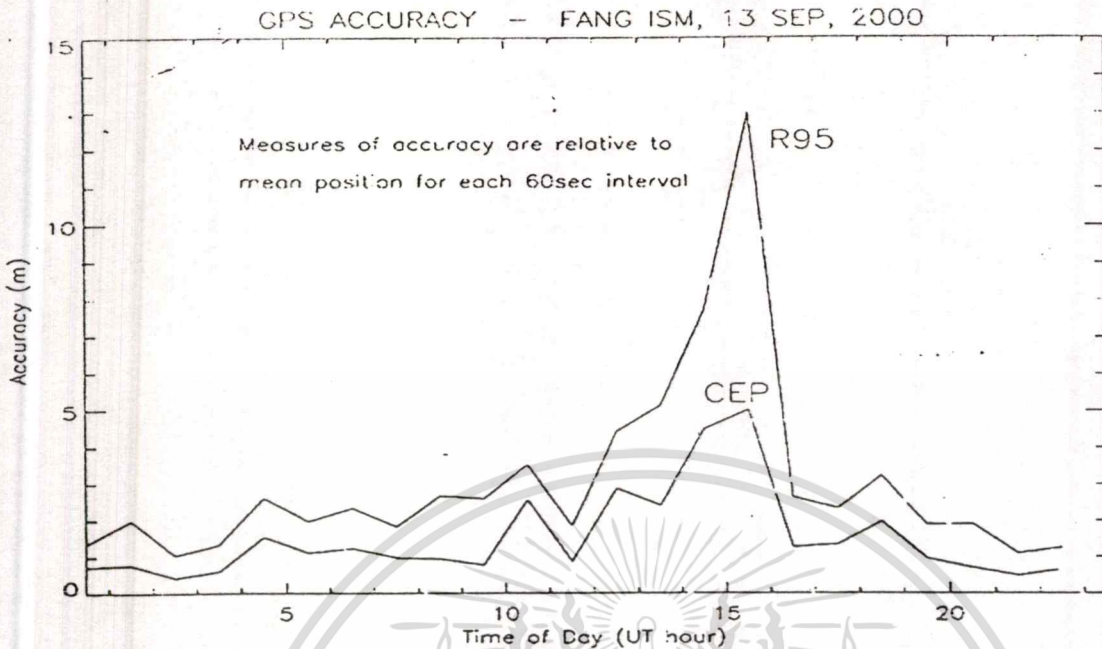


Fig 3. Variation of modified CEP and R95 (metres) in 1 hour intervals on 13 Sep 2000 at Fang; strong scintillation occurred between about 14 and 17UT (LT equals UT + 7 hours)

We have examined the effect of scintillation on position accuracy by dividing ISM data into 1 hour intervals (each containing 60 position measurements) and determining CEP and R95, in this case modified by being calculated with reference not to the true position but to the mean position for the relevant 1 hour interval. This approach isolates scintillation effects from those effects which may arise from any incomplete correction by the ionospheric delay model. Fig 3 shows an example result, in this case from the Fang ISM on 13 Sep 2000. Strong scintillation occurred between 14 and 17UT (about 21 and 24LT) with lock being lost on several occasions for some links and with GDOP rising from about 3 to about 7. There are significant increases evident in both CEP and R95 at this time, demonstrating that accuracy can indeed be compromised by scintillation. Individual horizontal position solutions have been observed to be in error by as much as 30 metres during some scintillation events. It is interesting to reflect that prior to May 2000, this behaviour would have been largely masked by the effect of Selective Availability which would have limited CEP to a minimum value of about 80m for this receiver. After removal of Selective Availability, CEP values of about a metre are commonplace for single frequency receivers under benign scintillation conditions (for example, Figure 3 before 10UT).

7. VALIDATION OF WBMOD

WBMOD is a climatological model which provides predictions of the statistical average "envelope" of scintillation activity and ionospheric irregularities as a function of radio frequency, day of year, time of day, ionospheric latitude and longitude, sunspot number and magnetic activity. It is unable to reproduce the observed spatial, temporal and night-to-night variations in scintillation activity and so any validation should be performed by using the ISM data on a monthly statistical basis. Preliminary work has been reported in [11].

The results of our comparison for Fang during the year 2000 are shown in Figure 4 below as the percentage of time that the scintillation index S4 exceeds 0.3 (top) and 0.6 (bottom) as a function of time of day and month of year. The equipment was commissioned only in June and therefore we have data only for the second half of the year. Later data from the years 2001 and 2002 remain to be analysed. The main feature in both the measured and predicted data is the peak of activity during the September equinox. Comparison of the measured data with the WBMOD prediction shows that enhanced activity actually extends in time beyond midnight whereas WBMOD predicts a much shorter duration. In addition, at the stronger scintillation level ($S4 > 0.6$), WBMOD over-predicts the peak level of activity by about a factor of 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

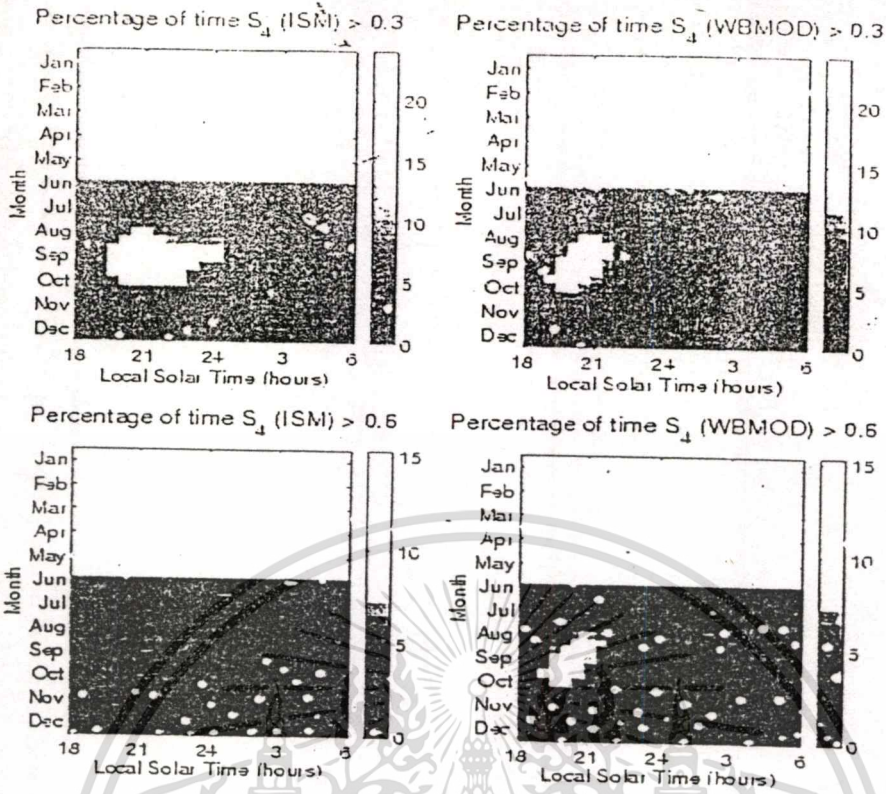


Figure 4. Percentage of time that S_4 exceeds 0.3 (weak scintillation, top) and 0.6 (moderate to strong scintillation, bottom) as a function of time and season at Fang, Thailand. The left panel displays the measured ISM data, the right panel the WBMOD predictions.

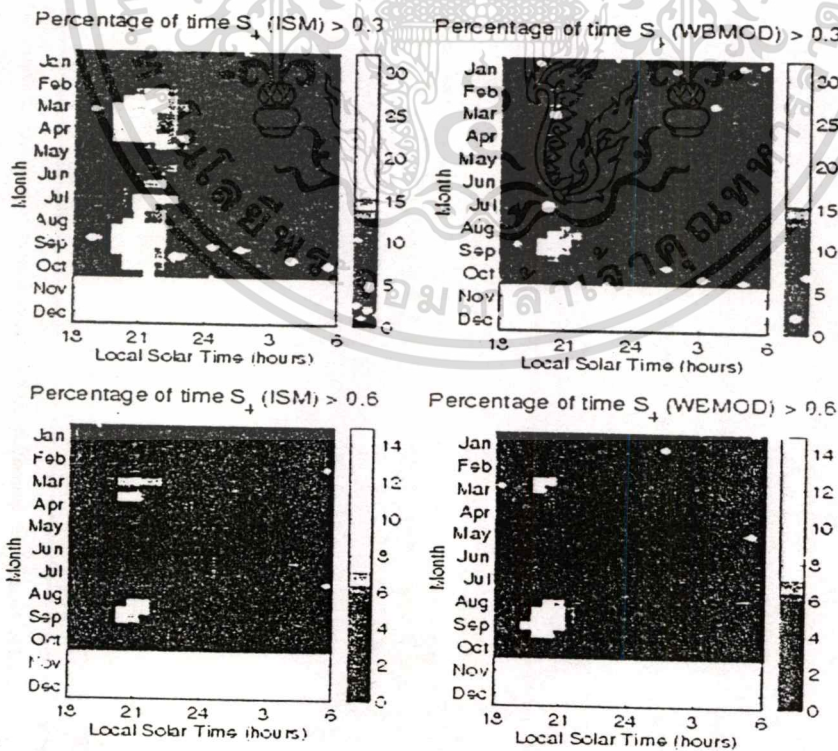


Figure 5. Percentage of time that S_4 exceeds 0.3 (weak scintillation, top) and 0.6 (moderate to strong scintillation, bottom) as a function of time and season at Vanimo, PNG. The left panel displays the measured ISM data, the right panel the WBMOD predictions.

The corresponding data for the southern anomaly crest site of Vanimo, east of Fang by about 42 degrees in longitude, is shown in Figure 5. WBMOD appears to provide better over-all agreement than at Fang, although it under-estimates the level of weak scintillation and slightly over-estimates the stronger scintillation level. We are unsure why WBMOD performance differs between Fang and Vanimo, but the longitude separation may be relevant. In addition, Fang is in the northern hemisphere whereas Vanimo is in the southern hemisphere. It is not shown to best advantage in Figures 4 and 5 but we have observed in other data that away from the equinoxes, scintillation activity is stronger during the winter solstice season than the summer solstice. For Fang the winter solstice is in December whilst for Vanimo it is in June.

Although the scope of this paper does not permit a close examination of the data from Marak Parak on the geomagnetic equator, we have found there that WBMOD seriously under-estimates the scintillation activity level. Thus, another problem with WBMOD is that it predicts a much deeper modulation with latitude than actually occurs. The activity minimum at the magnetic equator between the anomaly crests, while real, is more filled in than WBMOD would suggest.

8. CONCLUSIONS

We have provided some results from the early part of the current maximum period of sunspot cycle activity that show the effect of scintillation on navigation by GPS for one type of single frequency C/A code GPS receiver. It is shown that a high percentage of satellite links can be simultaneously affected under some circumstances, and that positional accuracy can be degraded with individual positions sometimes being in error by 30 metres and R95 values as high as 15 metres. Although it was not shown here we are also aware of many occasions on which receivers lost lock during scintillation events. We hope to examine this problem in greater detail as more data from the remainder of the solar maximum period become available from our various stations.

In comparing the predictions of WBMOD with measurements from our ISM network, we conclude that WBMOD tends to over-predict at the anomaly crests and under-predict at the magnetic equator, and that it predicts decay of scintillation too early in the night by about 2 hours. ISM data from Fang/Chiang Rai situated under the northern hemisphere anomaly crest and Vanimo under the southern anomaly crest show comparable high levels of scintillation activity during the equinoxes. At the solstices, activity is much reduced but at different levels for the different solstices. That is, for both sites activity is very low during the respective summer solstices (December for Vanimo, June for Fang/Chiang Rai) and more elevated during the winter solstices (June for Vanimo, December for Fang/Chiang Rai).

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Mr Martin Ziegler, Mr Dallas Stow and Dr Hugh Barkley for their support of the project in Thailand. We acknowledge the efforts of IPS Radio and Space Services Australia for maintaining the Vanimo station and the hospitality of the Rajhabat Institute for hosting and maintaining the Chiang Rai station. We also thank our various collaborators in LAPAN (Indonesia), STRIDE (Malaysia) and AFRL (USA).

BIBLIOGRAPHY

- [1] Kelley M. C., D. Kotsikopoulos, T. Beach, and D. Hysell, Simultaneous Global Positioning System and radar observations of equatorial spread F at Kwajalein, *J. Geophys. Res.*, 101, 2333-2341, 1996.
- [2] Davies K., *Ionospheric Radio*. Peregrinus, London, 1990.
- [3] Fang D. J., and C. H. Liu, A Morphological Study of Gigahertz Equatorial Scintillations in the Asian Region, *Radio Sci.*, 18(2), pages 241-252, 1983.
- [4] Kelley M. C., *The Earth's Ionosphere*, Academic Press, San Diego, 1989.
- [5] Aarons J., Global Morphology of Ionospheric Scintillations, *Proc IEEE*, 70, 360-378, 1982.
- [6] Secan J A, Bussey R M, Fremouw E J, Basu Sa, An improved model of equatorial scintillation, *Radio Science*, 30, 607-617, 1995
- [7] Thomas R M, Cervera M A, Eftaxiadis K, Manurung S L, Sarmoko Saroso, Effendy, Ghaffar Ramli A, Wan Salwa W H, Hasan R, Dalimin M N, Groves K M and Wang Y J, *Radio Science*, 36, 6, 1545-1557, 2001
- [8] Van Dierendonck A. J., J. Klobuchar, Q. Hua, Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code receivers, *Proc. ION GPS-93*, 1333-1342, 1993.
- [9] Van Dierendonck A. J., Q. Hua, P. Fenton and J. Klobuchar, Commercial ionospheric scintillation monitoring receiver development and test results, *Proc. 52nd annual meeting of the Inst of Navigation*, 573-582, 1996.
- [10] Ackroyd N. and R. Lorimer, *Global Navigation - a GPS User's Guide*, chapter 1, Lloyd's of London Press. 1990.
- [11] Cervera M A, Thomas R M, Groves K M, Ramli A G, and Effendy, Validation of WBMOD in the South East Asian region, *Radio Science*. 36, 6, 1559-1571, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	เรีอตรี เอกพล มิ่งขวัญ
วัน เดือน ปี เกิด	1 กรกฎาคม 2517
สถานที่เกิด	เขตพญาไท กรุงเทพฯ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	341/17 ซอยวัดจันทร์ใน เขตบางคอแหลม กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต วิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการศึกษาวิทยาศาสตร์ (คอมพิวเตอร์) สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้