

การวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และผลกระทบต่อ

สัญญาณจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ บริเวณเขตละติจูดต่ำ

ANALYSIS OF IONOSPHERIC IRREGULARITY EFFECTS ON

MULTI-FREQUENCY GNSS OVER LOW-LATITUDE REGION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-D-018-117

ANALYSIS OF IONOSPHERIC IRREGULARITY EFFECTS ON  
MULTI-FREQUENCY GNSS OVER LOW-LATITUDE REGION



ACHARAPORN BUMRUNGKIT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-D-018-117



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และผลกระทบต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ บริเวณเขตละติจูดต่ำ

นักศึกษา นางสาวอัจฉราภรณ์ บำรุงกิจ

รหัสประจำตัว 58601022

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ. 2566

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ททรัพย์นิต

### บทคัดย่อ

ความแปรปรวนของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ก่อให้เกิดผลกระทบต่อการส่งข้อมูลของสัญญาณวิทยุที่ส่งข้อมูลผ่านชั้นดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณของระบบดาวเทียมนำทางโลกหรือระบบจีเอ็นเอสเอส ซึ่งปัจจุบันถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยส่งผลให้สัญญาณที่สถานีฐานรับได้เกิดความผันผวนทั้งแอมพลิจูดและเฟส เรียกว่าค่าซินทิลเลชัน (Scintillation) หรือในบางครั้งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสไม่สามารถรับสัญญาณได้ ซึ่งทำให้ระบบระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจีเอ็นเอสเอสเกิดความผิดพลาดขึ้น เหตุการณ์ความผิดปกตินี้เกิดขึ้นบ่อยบริเวณเหนือประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กหรือเขตละติจูดต่ำ เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล เพื่อให้เข้าใจผลกระทบของความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอสองประเด็นในการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล โดยในประเด็นแรกได้นำเสนอวิธีการศึกษาคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิล โดยการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้จำนวนสองลูก จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมชนิดสองความถี่ที่ถูกติดตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ ประเทศไทย จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล ในวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากสถานี KMIT และ STFD ในปี ค.ศ. 2015 มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 200 ถึง 1,200 กิโลเมตร ถัดมาได้ศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบช่วยนำร่องอากาศยานหรือระบบ

GBAS โดยผู้วิจัยได้ทำการจำลองเหตุการณ์ของการเกิดพลาสมาบับเบิลขึ้นจำนวนสองลูก ที่ค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลต่างกัน และคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสระบบจีพีเอสและโกลนาส ผลการจำลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของจำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจำนวนสองลูก เกิดจากระยะห่างของพลาสมาบับเบิลที่มีค่าประมาณ 700 กิโลเมตร ประเด็นที่สองที่น่าเสนอคือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลและการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันถูกนำเสนอโดยวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้โดยเครื่องมือเรดาร์ VHF ที่ถูกติดตั้งอยู่ ณ ประเทศอินโดนีเซีย และเปรียบเทียบกับเกิดการเกิดค่าซินทิลเลชันของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ที่ถูกติดตั้งอยู่ ณ โกโตะตะบัง (KTTB) ประเทศอินโดนีเซียบริเวณเดียวกับเรดาร์ VHF ได้แก่ระบบจีพีเอสและระบบกาลิเลโอที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์เส้นทางของสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากจุดตัดสัญญาณในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ความสูง 250, 350 และ 450 กิโลเมตร ร่วมกับคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้จากค่าพลังงานสะท้อนกลับของเรดาร์ VHF ที่สถานี EAR ซึ่ให้เห็นว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลก่อให้เกิดค่าซินทิลเลชันของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันหรือค่าดัชนี S4 จากความถี่ L1/E5a ได้รับผลกระทบจากซินทิลเลชันสูงกว่าความถี่ L1/E1 และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจากเรดาร์และค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a มีค่าสูงที่ความสูงของจุดตัดชั้นบรรยากาศระหว่าง 250 ถึง 350 กิโลเมตร ซึ่งเป็นชั้นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

**Thesis** Analysis of ionospheric irregularity effects on  
multi-frequency GNSS over low-latitude region

**Student** Ms. Acharaporn Bumrunakit

**Student ID.** 58601022

**Degree** Doctor of Engineering

**Program** Electrical Engineering

**Year** 2023

**Thesis Advisor** Prof. Dr. Pornchai Supnithi



### ABSTRACT

The transmission of radio wave signals that travelled over the ionosphere is impacted by the ionosphere's irregular electron density, especially the effects on global navigation satellite system or GNSS signals, which have been widely utilized in various application. The ionospheric disturbance can cause both amplitude and phase of the obtained GNSS signals to be rapidly fluctuated, or the GNSS receiver may not track the GNSS signals, leading to loss of lock. For this reason, the accuracy of GNSS-based aviation and navigation has decreased. This phenomenon frequently occurs over Thailand, which is located near the equatorial or low-latitude region, is called equatorial plasma bubble (EPB) phenomenon. In order to understand the ionospheric irregularity effects on multi-frequency GNSS signals, this thesis presents the analysis of EPB characterizations based on GNSS signals. The first objective is to estimate the separation distance between observed EPBs by analyzing the slant total electron content (STEC) which are retrieved from the dual-frequency GPS receivers. The receivers at King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang (KMIT station) and Stamford (STFD station) are located near Suvarnabhumi international airport, Thailand. To obtain the separation distance, the Haversine formula is utilized. The results are in

range of 200 to 1,200 kilometers, based on the data on ionospheric disturbance days on 2015 from KMIT and STFD stations. To assess the Ground-Based Augmentation System (GBAS) performance, the vertical positioning error or VPE is determined. In this work, we simulated double EPB occurrences and analyzed the impact on VPE for separation distance ranging from 200 to 1,200 kilometers. The GNSS data from global positioning system (GPS) and GLONASS system are used. The preliminary results show that the maximum number of average affected satellites by double EPB are caused by the separation distance around 700 kilometers. Finally, we determined the geometrical relationship between backscatter echoes associated with the EPB and the multi-constellation and multi-frequency (MC/MF) GNSS scintillations using data from the GPS and Galileo at L1/E1 and L5/E5a frequencies, respectively. The EPB structures obtained from the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) located in West Sumatra, Indonesia are compared with the GNSS scintillations at Kototabang (KITB station), Indonesia. The amplitude scintillation or S4 index is analyzed together with the EAR. The GNSS signal paths are analyzed based on the ionospheric pierce point (IPP) at 250, 350, and 450 kilometers in altitude. The results show that the EPB affects the MC/MF scintillations in the ionosphere. The S4 index on the L5/E5a signals is more vulnerable to scintillations than the L1/E1 signal. Furthermore, the high correlation coefficient between EAR backscatter echo power and S4 index on both L1/E1 and L5/E5a at the altitude between 250 to 350 km indicates that the EPB occurs in the bottom side of the ionosphere.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถถูกเขียนให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น มีบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้ ท่านแรกข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ ผู้ชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย มองภาพรวมและให้คำแนะนำงานในหลายๆ จุดที่ข้าพเจ้านึกไม่ถึง ทั้งยังชี้แนะการจัดระบบเวลาให้เหมาะสมในการใช้ชีวิตในการเป็นนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ยิ่งกว่านั้นยังมีความเข้าใจแก่นักศึกษา และมอบกำลังใจและข้อคิดให้แก่ข้าพเจ้าในวันที่ข้าพเจ้าหลงทางเสมอ

ขอขอบคุณคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ ทำให้ผู้เขียนได้มีความรู้และทักษะที่สามารถนำไปใช้ในการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทของข้าพเจ้าในระดับปริญญาตรี รวมทั้งขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยด้านการสื่อสารและสารสนเทศด้านอวกาศและชั้นบรรยากาศทุกคน ที่คอยร่วมทุกข์ ร่วมสุข และเป็นกำลังใจที่ดีให้กับข้าพเจ้ามาโดยตลอด ทั้งนี้ยังขอขอบคุณ ดร.สมใจ กลิ่นงาม ดร.ศราวุฒิ รุ่งเรืองวชิเอก และ ผศ.ดร.เวธิต ภาควิชาฟิสิกส์ ที่เป็นตัวอย่างที่ดีให้กับน้องๆ ช่วยแบ่งปันประสบการณ์และความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

นอกเหนือไปจากนั้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณ Dr. Susumu SAITO ผู้เป็นที่ปรึกษาในต่างประเทศ ให้คำแนะนำทางด้านในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือในขณะที่ข้าพเจ้าได้ทำวิจัยที่ Navigation Department ในหน่วยงาน Electronics Navigation Research Institute (ENRI) ประเทศญี่ปุ่น ขอขอบคุณข้อมูลเรดาร์ VHFจากสถานี Equatorial Atmosphere Radar (EAR) ภายใต้ความร่วมมือของสามหน่วยงานคือ Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) และมหาวิทยาลัยเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น และหน่วยงาน National Institute of Aeronautics and Space of Indonesia (LAPAN) ของประเทศอินโดนีเซีย และขอขอบคุณข้อมูลซินทิลเลชันจากสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากสถานี Kototabang ประเทศอินโดนีเซีย ขอขอบคุณ ดร.อภิเทพ แซ่ไค้ว พร้อมด้วยเจ้าหน้าที่จากมหาวิทยาลัยนานาชาติแอสแตมฟอร์ด ที่ให้ความร่วมมือในการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการประมวลผลงานวิจัย

ขอขอบคุณโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) ที่มอบทุนการศึกษาในการเรียนปริญญาเอกแก่ข้าพเจ้า (PHD/0024/2558) ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้เขียนผ่านทางโครงการ คปก. นี้ด้วย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา คุณพ่อประจวบและคุณแม่สมพร บำรุงกิจ และบุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้าทุกท่านซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ทั้งนี้หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับผิดไว้แต่เพียงผู้เดียวและยินดีรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่สนใจและเข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนา งานวิจัยต่อไปในอนาคต

อัจฉราภรณ์ บำรุงกิจ



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
ตารางคำย่อ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	5
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ระบบดาวเทียมนำทางโลก.....	7
2.2.1 การรับข้อมูลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส.....	11
2.2.2 การระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจีเอ็นเอสเอส.....	14
2.3 การคำนวณปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	21
2.4 ปรากฏการณ์ฟองพลาสมาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	25
2.5 ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	26

บทที่ 3 การคำนวณระยะห่างระหว่างพลาสมาบีม์ที่ตรวจจับได้	
ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	29
3.1 กล่าวนำ.....	29
3.2 การตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบีม์จากสัญญาณจีเอ็นเอสเอส .....	29
3.2.1 การคำนวณค่า ROTI เพื่อตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบีม์ .....	30
3.3 วิธีประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบีม์ที่ตรวจจับได้ที่นำเสนอ .....	31
3.3.1 ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบกึ่งกลาง.....	32
3.3.2 สูตรคำนวณระยะห่างฮาเวอร์ไซน์.....	33
3.4 ผลการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบีม์ที่ตรวจจับได้.....	35
3.5 การจำลองผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบีม์	
ต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS.....	45
3.5.1 การจำลองการเกิดค่าเกรเดียนต์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	
จากพลาสมาบีม์จำนวนสองลูก.....	46
3.5.2 การออกแบบการจำลองผลกระทบของระยะห่างระหว่างพลาสมาบีม์	
ต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS.....	48
3.5.3 ผลการจำลองผลกระทบของค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบีม์	
ต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS.....	50
บทที่ 4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบีม์ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน	
ในระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสบริเวณเขตละติจูดต่ำ โดยอาศัยเครื่องมือเรดาร์ VHF.....	55
4.1 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบีม์โดยอาศัยเรดาร์ VHF .....	55
4.2 ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นบริเวณเขตละติจูดต่ำ และเชื่อมโยงกับคุณลักษณะของ	
พลาสมาบีม์โดยอาศัยเครื่องมือเรดาร์ VHF .....	57
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบีม์และปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน.....	60
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ .....	60
4.3.2 ผลการตรวจพบปรากฏการณ์การรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุ	
บริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ .....	63
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบีม์โดยอาศัยเรดาร์ VHF.....	68

4.3.4 ผลการวิเคราะห์การเกิดพลาสมาบับเบิลที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี S4 .....	73
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	82
5.1 สรุปผล.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	83
เอกสารอ้างอิง .....	84
ประวัติผู้เขียน.....	91
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	91
ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ.....	92



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ประมาณค่าได้ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015.....	41
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกใช้ในการจำลอง.....	49
ตารางที่ 4.1 ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่มีค่าดัชนี S4 สูง ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 .....	61
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของวันที่นำมาวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในปี ค.ศ. 2019 [73] .....	73
ตารางที่ 4.3 จำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ณ เวลา 15.39 UTC ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019..	74
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR ที่แต่ละความสูงและค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a [73].....	78



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วงโคจรของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละระบบ .....	8
รูปที่ 2.2 วงโคจรของระบบดาวเทียมภูมิภาค .....	9
รูปที่ 2.3 ภาพรวมของภาครับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส [30] .....	11
รูปที่ 2.4 การรับส่งข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากวิธีโค้ด .....	13
รูปที่ 2.5 การรับข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากวิธีการวัดเฟสคลื่นพาห์ .....	14
รูปที่ 2.6 หลักการระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในระนาบ 2 มิติ .....	15
รูปที่ 2.7 หลักการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม GNSS .....	16
รูปที่ 2.8 การวางตัวของดาวเทียมที่ส่งผลต่อค่า DOP และความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง .....	19
รูปที่ 2.9 ทิศทางความหนาแน่นอิเล็กตรอนสุทธิในแนวเฉียง (STEC) .....	21
รูปที่ 2.10 ค่า STEC ที่คำนวณได้จากไฟล์โรเน็กซ์ .....	23
รูปที่ 2.11 ทิศทางของ STEC และ VTEC [50] .....	24
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างแผนที่ VTEC ในวันที่ 26 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2010 [51] .....	24
รูปที่ 2.13 การจำลองการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [54] ..	25
รูปที่ 2.14 แบบจำลองของรูปร่างพลาสมาบับเบิล .....	26
รูปที่ 2.15 ผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอส .....	27
รูปที่ 2.16 แผนที่แสดงบริเวณการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน [57] .....	27
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของค่า STEC ในวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ .....	30
รูปที่ 3.2 ผังงานแสดงการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล [61] .....	32
รูปที่ 3.3 การตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส .....	34
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานอ้างอิง KMIT และ STFD [61] .....	35
รูปที่ 3.5 ค่า STEC และ ROTI จากสถานี KMIT .....	36
รูปที่ 3.6 ค่า STEC ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 .....	37
รูปที่ 3.7 ค่า STEC ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 7 .....	37
รูปที่ 3.8 ค่า STEC และค่า ROTI จากดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 .....	38
รูปที่ 3.9 ค่า STEC จากสถานี KMIT (น้ำเงิน) และสถานี STFD (แดง) .....	39
รูปที่ 3.10 เส้นทางจุด IPP ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 .....	40
รูปที่ 3.11 ค่ามุมเงยของดาวเทียม ณ จุดที่ตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ .....	42
รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิล .....	43

รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล .....	43
รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล .....	45
รูปที่ 3.15 เหตุการณ์จำลองกำหนดช่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ .....	46
รูปที่ 3.16 เส้นทางของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสทั้งหมด 52 ดวง (ระบบจีพีเอสและโกลนาส) .....	50
รูปที่ 3.17 จำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่สถานี KMITL รับสัญญาณได้.....	51
รูปที่ 3.18 ภาพจำลองการกระจายตัวของจุด IPP .....	52
รูปที่ 3.19 ค่าเฉลี่ยของจำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูก.....	53
รูปที่ 3.20 จำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูก .....	53
รูปที่ 4.1 การสะท้อนของคลื่นเรดาร์ VHFเมื่อตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้.....	56
รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลจากเรดาร์ VHF .....	57
รูปที่ 4.3 เส้นทางของสัญญาณดาวเทียมในแนวเฉียงถูกฉายในแนวระนาบ ตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก [73].....	59
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเส้นทางดาวเทียมและเรดาร์บีมในแนวระนาบ [73].....	60
รูปที่ 4.5 ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอ.....	61
รูปที่ 4.6 ค่าดัชนี S4 ในวันที่ 8 มีนาคม และวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 .....	62
รูปที่ 4.7 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส Septentrio PolaRxS Pro [74].....	64
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งสถานีเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสและสถานีเรดาร์ EAR .....	64
รูปที่ 4.9 ค่าดัชนี S4 รายฤดูจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (จีพีเอสและกาลิเลโอ) จากสถานี KMIT....	65
รูปที่ 4.10 ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (จีพีเอสและกาลิเลโอ) จากสถานี KMIT .....	65
รูปที่ 4.11 ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (จีพีเอสและกาลิเลโอ) จากสถานี KTTB.....	66
รูปที่ 4.12 กราฟค่าการกระจายตัวแสดงแบบลอการิทึมของค่าดัชนี S4 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละวัน.....	67
รูปที่ 4.13 ค่าดัชนี S4 รายฤดูจากสถานี KMIT ของดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอ ที่ผ่านการกรองค่าเทรชโฮลด์ต่ำสุดจากความถี่ L1/E1 และความถี่ L5/E5a.....	68
รูปที่ 4.14 ค่าพลังงานสะท้อนกลับจากความสูงแตกต่างกันจากเรดาร์บีมที่ 1 .....	69
รูปที่ 4.15 ค่าพลังงานสะท้อนกลับแสดงในรูปแบบรูปตัดสองมิติ.....	70
รูปที่ 4.16 ภาพ KEOgram ของเรดาร์ VHF ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019.....	71
รูปที่ 4.17 ค่า RTI ทั้งหมด 16 บีมจากสถานีเรดาร์ EAR ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019.....	72
รูปที่ 4.18 เส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมแสดงร่วมกับพื้นที่พลังงานสะท้อนกลับ.....	75
รูปที่ 4.19 ค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเปรียบเทียบกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ.....	76
รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจากแต่ละความสูง .....	81

## ตารางคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม
BDS	BeiDou System
DOP	Dilution of precision
EAR	Equatorial Atmosphere Radar
ECEF	Earth-Center, Earth-Fixed
ENU	East-North-Up
EPB	Equatorial plasma bubble
ESA	European Space Agency
FOV	Field of view
GBAS	Ground-based augmentation system
GDOP	Geometrical dilution of precision
GEO	Geostationary orbit
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal dilution of precision
ICAO	International Civil Aviation Organization
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inclined Geosynchronous Satellite Orbit
IPP	Ionospheric pierce point
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
KMIT	King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang station
KTTB	Kototabang station
LT	Local Time

คำย่อ	คำเต็ม
MEO	Medium Earth Orbit
NavIC	Navigation Indian Constellation
PDOP	Position dilution of precision
QZSS	Quasi - Zenith Satellite System
RINEX	Receiver independent exchange format
ROTI	Rate of TEC Change index
RTI	Range time intensity
STEC	Slant Total Electron Content
STFD	Stamford station
TDOP	Time dilution of precision
TEC	Total Electron Content
TECU	TEC Unit
UTC	Universal Time Coordinated
VDOP	Vertical dilution of precision
VHF	Very high frequency
VPE	Vertical Position Error
VTEC	Vertical Total Electron Content

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

โลกของเราถูกห่อหุ้มด้วยชั้นบรรยากาศซึ่งเมื่อถูกแบ่งตามคุณสมบัติของก๊าซและอุณหภูมิสามารถแบ่งชั้นบรรยากาศเพื่อศึกษาได้ดังนี้ ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่มนุษย์สามารถอาศัยอยู่ได้ มีระยะความสูงตั้งแต่ผิวโลกถึงประมาณ 10 กิโลเมตร อุณหภูมิของบรรยากาศชั้นนี้จะค่อยๆ ลดลงแปรผกผันกับระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น และเป็นชั้นบรรยากาศที่มีอากาศหนาแน่น มีไอน้ำมาก มีการเคลื่อนที่ของอากาศทั้งแนวระดับและแนวตั้ง ทำให้เกิดลักษณะลม ฟ้าอากาศต่างๆ เช่น มีหมอก เมฆ ฝน ลม พายุ เป็นต้น จึงเป็นชั้นบรรยากาศชั้นที่มีความสำคัญทางอุตุนิยมวิทยา ถัดมาคือชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) มีความสูงประมาณ 10 ถึง 50 กิโลเมตรจากพื้นโลก เป็นชั้นที่มีไอน้ำเล็กน้อย ไม่มีเมฆ อากาศมีการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ จึงเหมาะแก่การเดินทางอวกาศ ซึ่งเครื่องบินพาณิชย์ทำการเดินทางอวกาศที่ความสูงระดับนี้ ก๊าซสำคัญในชั้นนี้ คือก๊าซโอโซน (Ozone) ซึ่งช่วยดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) จากดวงอาทิตย์ไว้บางส่วน โดยอุณหภูมิในชั้นนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้น ถัดมาคือชั้นมีโซสเฟียร์ (Mesosphere) มีความสูงจากพื้นดินประมาณ 50-80 กิโลเมตร มีอากาศเบาบางมาก อุณหภูมิลดลงแปรผกผันกับระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิลดลงถึง  $-120$  ถึง  $-140$  องศาเซลเซียส

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) มีความสูงตั้งแต่ 50 ถึงประมาณ 1,000 กิโลเมตร ไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่เกิดการแตกตัวของอนุภาคโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลากลางวันเมื่อดวงอาทิตย์ส่องแสงผ่านชั้นบรรยากาศดังกล่าว รังสีเอ็กซ์ตรีมอัลตราไวโอเล็ต (Extreme Ultraviolet, EUV) และรังสีเอ็กซ์ (X-rays) จากแสงอาทิตย์ทำให้อนุภาคแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนอิสระ (Free electrons and ions) เกิดเป็นชั้นของอิเล็กตรอนขึ้น โดยมีความหนาแน่นสูงสุดที่ความสูงประมาณ 300 ถึง 350 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ในยามที่ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วกันทั้งชั้นบรรยากาศ หรือเรียกว่าชั้นบรรยากาศสงบ (Quiet ionosphere) เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดการหน่วงเวลาของสัญญาณ เรียกว่าค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) ในทางกลับกันเมื่อปริมาณอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นบรรยากาศ หรือมีความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนเรียกว่าชั้นบรรยากาศมีความผิดปกติ (Disturbed ionospheric) ชั้นไอโอโนสเฟียร์อาจมีการดูดกลืนสัญญาณย่านความถี่สูง หรืออาจส่งผลให้เกิดการแพร่สัญญาณไปไกลกว่าที่ต้องการ ตลอดไปจนถึงการลดทอนคุณภาพของสัญญาณจากดาวเทียมนิวเจเนซิส (Global navigation satellite system, GNSS) เช่นดาวเทียมระบบจีพีเอส (Global positioning system, GPS) ระบบโกลนาส (GLONASS) และระบบกาลิเลโอ

(GALILEO) เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนนี้ยังเป็นสาเหตุการแกว่งทั้งแอมพลิจูดและเฟส (Amplitude and phase fluctuations) ของสัญญาณวิทยุ ซึ่งชั้นไอโอโนสเฟียร์มีความสำคัญต่อการสื่อสารวิทยุเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการสื่อสารและการนำทาง เป็นต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของความผิดปกติของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก (Equatorial regions) หรือเขตละติจูดต่ำ (Low-latitude regions) ซึ่งมักเกิดความผิดปกติของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ปรากฏการณ์หนึ่งที่พบได้บ่อยเรียกว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล (Equatorial plasma bubble, EPB) ซึ่งอิทธิพลของชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถส่งผลกระทบต่อดาวเทียมและการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุทั่วภูมิภาค โดยปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล มีจุดกำเนิดจากชั้นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Bottom-side of ionosphere) ที่ ความสูงประมาณ 150 ถึง 200 กิโลเมตร หลังจากนั้นขยายไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก (Magnetic field line) และเคลื่อนที่สูงขึ้นไปในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [1] โดยปรากฏการณ์นี้มักเกิดขึ้นหลังพระอาทิตย์ตกดิน

มีหลากหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาการตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล จากหลากหลายอุปกรณ์ เช่น กล้องถ่ายภาพท้องฟ้า (All-sky imager) [2] การตรวจจับพลาสมาบับเบิลโดยระบบเรดาร์ VHF (Very high frequency radar) [3] - [4] หรือการวิเคราะห์จากสัญญาณดาวเทียม [5] - [6] เป็นต้น ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีจุดเริ่มต้นจากบริเวณส่วนล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยที่ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลถูกพบได้บ่อยบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดิน ซึ่งปรากฏการณ์นี้นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีความไม่เสถียรของเรย์ลีห์-เทย์เลอร์ (Rayleigh-Taylor Instability) [7] - [8] โดยพลาสมาบับเบิลมีการขยายตัวไปตามการวางตัวของสนามแม่เหล็กโลก (Magnetic field lines) กล่าวคือวางตัวในแนวเหนือ - ใต้ (North-south direction) [9] - [10] มักมีการเคลื่อนที่จากทิศตะวันตกไปตะวันออก (Eastward direction) [11] และความกว้างหรือความใหญ่ของพลาสมาบับเบิล (EPB front width) มีค่าตั้งแต่สิบกิโลเมตรไปจนถึงหลายร้อยกิโลเมตร [12] โดยปกติแล้วพลาสมาบับเบิลสามารถก่อตัวและเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ลูกเดียว (Single EPB) ไปจนถึงเกิดขึ้นหลายลูก (Multiple EPB) ยกตัวอย่างเช่น จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ [13], [14] และ [15] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล จากผลการศึกษาพบที่มีการตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้หลายลูก ถัดมาในงานวิจัยของ [16] ได้ตรวจพบพลาสมาบับเบิลจำนวน 3 ลูก ในวันที่เกิดความแปรปรวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้พัฒนาระบบจำลองการประเมินประสิทธิภาพของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสขณะเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้น ถัดมาตัวอย่างของการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล

(Separation distance) ได้ถูกศึกษาโดย [17] และ [18] พบว่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล 2 ลูก ซึ่งถูกตรวจจับได้บริเวณเหนือทวีปอเมริกาใต้ มีค่าประมาณ 600 – 700 กิโลเมตร นอกจากนั้นงานของ [19] ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบช่วยนำร่องการลงจอดของอากาศยานหรือระบบจีบาส (Ground-based augmentation system, GBAS) บริเวณประเทศบราซิล ขณะเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้น ซึ่งหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพและความพร้อมใช้งานของระบบ GBAS คือ ค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล

เพื่อให้เข้าใจผลกระทบของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและความพร้อมใช้งานของระบบ GBAS การวิเคราะห์ค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลจึงเป็นตัวแปรที่จำเป็นต้องศึกษา ถึงแม้ว่ามีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล แต่อย่างไรก็ดีในการศึกษาค่าระยะห่างระหว่างปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลบริเวณเหนือประเทศไทย นั้นยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการศึกษาในเรื่องดังกล่าว ทั้งนี้ประเทศไทยได้วางแผนที่จะติดตั้งระบบ GBAS ณ ท่าอากาศยานนานาชาติสุวรรณภูมิจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อเป็นข้อมูลเชิงสถิติของชั้นบรรยากาศบริเวณสนามบินฯ [20] โดยการทำงานร่วมกันระหว่างองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation Organization, ICAO) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บริษัทวิทยุการบิน หน่วยงาน ENRI (Electronic Navigation Research Institute) และ สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย ญี่ปุ่น (Japan Civil Aviation Bureau, JCAB) ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น และการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลบริเวณประเทศไทยยังมีน้อยมาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ โดยวิเคราะห์จากค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ชั้นบรรยากาศแปรปรวนหรือเกิดความผิดปกติ

ความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้สามารถก่อให้เกิดการแกว่งของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณวิทยุอย่างกะทันหัน เรียกว่าปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน (Ionospheric scintillations) [21] ซึ่งในกรณีที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการใช้สัญญาณจีเอ็นเอสเอส เพื่อระบุตำแหน่ง กล่าวคือส่งผลให้เครื่องรับสัญญาณไม่สามารถรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสได้ในบางช่วงเวลา (Loss of lock) จากงานวิจัยของ [22], [23], [24] และ [25] เห็นได้ชัดว่าในงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอส โดยมุ่งสนใจศึกษาไปที่สัญญาณจีพีเอสความถี่แบนด์ L1 C/A เป็นส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ดีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอสระบบอื่นหรือแบนด์ความถี่อื่น เช่นสัญญาณจีพีเอส L5 หรือดาวเทียมระบบอื่น เช่น ระบบกาลิเลโอความถี่ E1 และ E5a เป็นต้น นั้นยังมีการศึกษาน้อยมาก ตัวอย่างเช่น [26] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันต่อสัญญาณ B1I ของระบบไปโต่ว จากผลการวิจัยพบว่าปรากฏการณ์ซินทิลเลชันส่งผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในการวัดระยะเทียม

มากกว่า 4 เมตร และความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งมีค่ามากกว่า 6 เมตร ถัดมาในงานวิจัยของ [27] ได้วิเคราะห์สถิติของการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันต่อดาวเทียมระบบจีพีเอสที่ความถี่ L1 และความถี่ใหม่คือ L2C และ L5 ดาวเทียมระบบโกลนาสที่ความถี่แบนด์ L1 และ L2 และดาวเทียมระบบกาลิเลโอที่ความถี่ E1 และ E5a บริเวณเอธิโอเปีย ซึ่งเป็นพื้นที่ในเขตละติจูดต่ำ และในงานวิจัยของ [28] ได้ศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันต่อสัญญาณจีพีเอสที่ความถี่ L2C และ L5 เปรียบเทียบกับ L1 ผลการวิจัยพบว่า สัญญาณจีพีเอสที่ความถี่ L2C และ L5 ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ซินทิลเลชันมากกว่าความถี่ L1 เนื่องจากค่าความยาวคลื่นที่มีค่ามากกว่า

แม้จะมีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันมาอย่างยาวนานแต่อย่างไรก็ดี ยังไม่มีการศึกษาหรือวิจัยในกรณีของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสหลายระบบและหลายความถี่ (Multi-constellation and multi-frequency GNSS) และเชื่อมโยงเข้ากับคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลในบริเวณเหนือพื้นที่ประเทศไทยและเขตละติจูดต่ำบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เพื่อให้เข้าใจคุณลักษณะของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลและค่าซินทิลเลชันมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์หัวข้อที่สอง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ว่าด้วยการนำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลและเชื่อมโยงกับการเกิดซินทิลเลชันของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส จากดาวเทียมระบบจีพีเอสที่ความถี่ L1 และ L5 และดาวเทียมระบบกาลิเลโอที่ความถี่ E1 และ E5a

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาคุณลักษณะของความผิดปกติของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นบริเวณเขตละติจูดต่ำหรือปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลและผลกระทบต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงถูกแบ่งออกเป็นสองหัวข้อตามวิธีการศึกษา ดังนี้

- 1) เพื่อนำเสนอวิธีการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล เมื่อสามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้มากกว่าหนึ่งลูก โดยอาศัยการวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และแสดงผลการศึกษาเบื้องต้นจากการจำลองผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS ขณะเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้นสองลูกในระยะห่างที่แตกต่างกัน
- 2) เพื่อนำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้จากเครื่องมือเรดาร์ VHF และเชื่อมโยงคุณลักษณะดังกล่าวกับการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบหลายความถี่

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

สำหรับในหัวข้อวิจัยแรกในวิทยานิพนธ์นี้ คือการวิเคราะห์และประมาณค่าระยะห่างระหว่างปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ ซึ่งคำนวณจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ติดตั้งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ ประเทศไทย จากสถานี KMIT ( $13.7278^{\circ}\text{N}$ ,  $100.7726^{\circ}\text{E}$ ) โดยเสาอากาศรับสัญญาณและเครื่องรับถูกติดตั้ง ณ ดาดฟ้าอาคารเรียนรวม 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศเหนือห่างจากสนามบินฯ ประมาณ 4 กิโลเมตร และสถานี STFD ( $13.7356^{\circ}\text{N}$ ,  $100.6612^{\circ}\text{E}$ ) ซึ่งติดตั้งเสาอากาศและเครื่องรับสัญญาณที่ดาดฟ้าอาคารเรียน ณ มหาวิทยาลัยนานาชาติแสตมฟอร์ด โดยอยู่ห่างจากสถานี KMIT ไปทางทิศตะวันตกประมาณ 12 กิโลเมตร ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์คือข้อมูลจากดาวเทียมระบบจีพีเอส ในช่วงปี ค.ศ. 2015 ในวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งในปี ค.ศ. 2015 เป็นปีที่อยู่ในช่วงวัฏจักรสุริยะระดับปานกลาง (Moderate solar activity) ของวัฏจักรสุริยะรอบที่ 24 การวิเคราะห์ข้อมูลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลแบบย้อนหลัง (Post processing) โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิเคราะห์และแสดงผล

ในส่วนของหัวข้อการวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลและเชื่อมโยงเข้ากับปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสบริเวณเขตละติจูดต่ำ โดยในการศึกษานี้สนใจศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันจากดาวเทียมระบบจีพีเอสและระบบกาลิเลโอ ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์ VHF และซินทิลเลชันจากสถานี Equatorial Atmosphere Radar (EAR) และสถานี Kototabang (KTTB) ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่เดียวกันในประเทศอินโดนีเซีย โดยรับข้อมูลและวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลจากค่าพลังงานสะท้อนกลับ (Echo power) ที่รับได้จากเรดาร์ VHF ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่สถานี EAR บริเวณสุมาตราฝั่งตะวันตก ประเทศอินโดนีเซีย และวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชันหรือค่าดัชนี S4 โดยได้รับข้อมูลค่าดัชนี S4 จากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิดหลายความถี่ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่สถานี KTTB ( $0.20^{\circ}\text{S}$ ,  $100.32^{\circ}\text{E}$ ) ซึ่งเป็นสถานที่บริเวณเดียวกับที่ติดตั้งเรดาร์ EAR โดยในการศึกษานี้วิเคราะห์ข้อมูลของค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสระบบจีพีเอสและระบบกาลิเลโอ ที่ความถี่ย่าน L1/E1 (1575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) และย่าน L5/E5a (1176.45 เมกะเฮิร์ตซ์) ตามลำดับ ใช้ข้อมูลของวันที่ EAR สามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้และค่าดัชนี S4 มีค่าสูงร่วมด้วย ในปี ค.ศ. 2018 ซึ่งนับเป็นจำนวนเหตุการณ์ทั้งหมด 22 เหตุการณ์ สำหรับหัวข้อวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมไพธอน (Python) ในการวิเคราะห์พร้อมทั้งแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากเรดาร์ EAR และค่าดัชนี S4 โดยการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลแบบย้อนหลังเช่นเดียวกับการศึกษาแรก

#### 1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท ดังนี้บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญในการศึกษาในวิทยานิพนธ์พร้อมกับทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ในส่วนของบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วยระบบดาวเทียมนำทางโลกหรือจีเอ็นเอสเอส การระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจีเอ็นเอสเอส พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ประกอบด้วยค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเกิดค่าหน่วงเวลาของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และหากปริมาณอิเล็กทรอนิกส์มีความไม่สม่ำเสมอทั่วกันทั้งบรรยากาศจะเป็นสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อไป พร้อมทั้งอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้โดยอาศัยการวิเคราะห์จากค่าปริมาณความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยการตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ และผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีเพื่อวิเคราะห์ค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลพร้อมทั้งแสดงตัวอย่างเบื้องต้นของการจำลองผลกระทบจากการเกิดพลาสมาบับเบิล 2 ลูกที่มีค่าระยะห่างที่แตกต่างกันต่อค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS ซึ่งเป็นระบบที่อาศัยข้อมูลจีเอ็นเอสเอสในการช่วยนำร่องอากาศยาน ถัดมาในบทที่ 4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลและเชื่อมโยงกับการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันของสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสบริเวณเขตละติจูดต่ำโดยอาศัยเครื่องมือเรดาร์ VHF จากข้อมูลเรดาร์จากสถานี EAR และข้อมูลค่าซินทิลเลชันจากสถานี KTTB ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ถูกติดตั้งอยู่ในพื้นที่ซึ่งเป็นบริเวณใกล้เคียงกันในประเทศอินโดนีเซีย และในบทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลการศึกษารายละเอียด และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและใช้ในการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบจีเอ็นเอสเอส ถัดมาคือหัวข้อเกี่ยวกับการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือค่า TEC (Total electron content) โดยคำนวณจากข้อมูลไฟล์รีเน็กซ์ (Receiver independent exchange format, RINEX) เนื่องจากค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ถัดมาคือหัวข้อของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิ้ลในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อันเนื่องมาจากความแปรปรวนของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศ และหัวข้อสุดท้ายกล่าวถึงปรากฏการณ์ซินทิลเลชันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และการคำนวณค่าซินทิลเลชันของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอสมีการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดและเฟสอย่างกะทันหัน จากมุมโพลาริเซชันของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากความผันผวนของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

#### 2.2 ระบบดาวเทียมนำทางโลก

ระบบดาวเทียมนำทางโลกหรือระบบจีเอ็นเอสเอส คือระบบนำร่องที่อาศัยข้อมูลการระบุตำแหน่งจากสัญญาณดาวเทียม ซึ่งประกอบไปด้วยดาวเทียมหลายระบบรวมกัน โดยระบบดาวเทียมเหล่านี้เป็นระบบที่ใช้ในการให้ข้อมูลพิกัดใดๆ บนผิวโลก โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณจากดาวเทียม เพื่อบันทึกและแสดงพิกัดตำแหน่ง ณ จุดที่อุปกรณ์รับสัญญาณตั้งอยู่ [29] รวมทั้งข้อมูลจีเอ็นเอสเอสยังสามารถใช้ในการเทียบมาตรฐานเวลา การสื่อสารดาวเทียม ศึกษาคุณสมบัติผิวโลก และศึกษาสภาพอวกาศ (Space weather) เป็นต้น สำหรับระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายได้แก่ ระบบดาวเทียมจีพีเอส (Global Positioning System, GPS) ซึ่งเป็นระบบดาวเทียมที่เก่าแก่ที่สุด เริ่มมีการใช้งานดาวเทียมจีพีเอสตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 และทั่วโลกสามารถใช้งานระบบจีพีเอสได้ ในปี ค.ศ. 1994 [30] ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ให้บริการ ระบบจีพีเอสประกอบด้วยดาวเทียม 32 ดวง ใน 6 ระนาบวงโคจร โดยโคจรในวงโคจรระดับกลาง (Medium Earth Orbit, MEO) มีความเอียงของวงโคจร 55 องศาและโคจรที่ความสูงประมาณ 20,200 กิโลเมตรจากพื้นโลก ระบบดาวเทียมกาลิเลโอ (GALILEO) สร้างขึ้นโดยสหภาพยุโรปผ่านองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency, ESA) ประกอบด้วยดาวเทียมในวงโคจร 30 ดวง (ให้บริการเต็มรูปแบบ 24 ดวงและสำรอง 6 ดวง) ใน 3 ระนาบวงโคจร โคจรที่ระดับความสูง

23,222 กิโลเมตรจากพื้นโลก ในวงโคจรระดับกลาง มีระนาบความเอียงเท่ากับ 56 องศา [31] ระบบดาวเทียมโกลนาส (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema, GLONASS) ซึ่งให้บริการโดยสหพันธรัฐรัสเซีย ระบบโกลนาสประกอบไปด้วยดาวเทียม 24 ดวง ใน 3 ระนาบวงโคจร โดยโคจรที่ความสูงประมาณ 19,100 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก [32] ระบบดาวเทียมไป่โต่ว (BeiDou, BDS) หรือ Compass ซึ่งเป็นของสาธารณรัฐประชาชนจีนประกอบด้วยดาวเทียม 35 ดวง โดยมีจำนวนทั้งหมด 27 ดวง โคจรในระดับกลางที่ความสูง 21,150 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก จำนวน 5 ดวง มีลักษณะการโคจรแบบวงโคจรค้างฟ้า (Geostationary orbit, GEO) และจำนวน 3 ดวง โคจรอยู่ในวงโคจรพ้องคาบโลก (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO) [33] โดยสามารถแสดงวงโคจรของระบบดาวเทียมต่างๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงโคจรของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละระบบ  
 (ก) ระบบจีพีเอส [34] (ข) ระบบโกลนาส [35]  
 (ค) ระบบกาลิเลโอ [36] (ง) ระบบไป่โต่ว [37]

นอกจากนี้ยังมีระบบดาวเทียมภูมิภาคของแต่ละประเทศ (Regional navigation satellite system) เช่นระบบดาวเทียม IRNSS หรือ NavIC (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS / Navigation Indian Constellation, NavIC) เป็นดาวเทียมเฉพาะภูมิภาคให้บริการโดยประเทศอินเดีย ประกอบด้วยดาวเทียมทั้งหมด 7 ดวง มีลักษณะการโคจรแบบค้างฟ้า 3 ดวง และวงโคจรแบบพ้องคาบโลก จำนวน 4 ดวง [38] ระบบดาวเทียม QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) ซึ่งเป็นของประเทศญี่ปุ่น [39] มีวงโคจรมีลักษณะคล้ายเลข 8 ประกอบด้วยชุดดาวเทียม 4 ดวง โคจรอยู่เหนือท้องฟ้าตรงตำแหน่งของประเทศญี่ปุ่น สามารถแสดงตัวอย่างการโคจรของระบบดาวเทียมภูมิภาคดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงโคจรของระบบดาวเทียมภูมิภาค  
(ก) ระบบ IRNSS หรือ NavIC [40] และ (ข) ระบบ QZSS [41]

ดังที่กล่าวไปในข้างต้นระบบจีเอ็นเอสเอสถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและประยุกต์ใช้ในการใช้งานต่างๆ เช่น การสำรวจที่ดิน การทำรังวัด (Surveying) การทำเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision agriculture) การติดตามยานพาหนะ (Vehicle Tracking) การเดินอากาศและการบิน (Air navigation and aviation) รวมไปถึงการศึกษาวิจัยเช่นการศึกษาคุณสมบัติของผิวโลก (Earth's surface properties) ศึกษาแผ่นเปลือกโลกและแผ่นดินไหว (Earth crust and earthquake) และการศึกษาเกี่ยวกับชั้นบรรยากาศต่างๆ ของโลก (Atmospheric research) แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วสัญญาณจีเอ็นเอสเอสและการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุความถี่สูง (High frequency, HF) มักจะได้รับผลกระทบจากชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นสื่อกลางการกระจายตัวของสัญญาณและการส่งข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนและไอออนอิสระอยู่เป็นจำนวนมากและความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความผันผวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก [9] สามารถยกตัวอย่างผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นเช่น การหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) การดูดกลืนคลื่นวิทยุ (Radio wave absorption) การรบกวนของสัญญาณ (Interference) และการเกิดการแกว่งทั้งแอมพลิจูดและเฟส (Ionospheric scintillation) [42] เป็นต้น ดังนั้นจึงควรศึกษาคุณลักษณะของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ที่สำคัญซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะและพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้

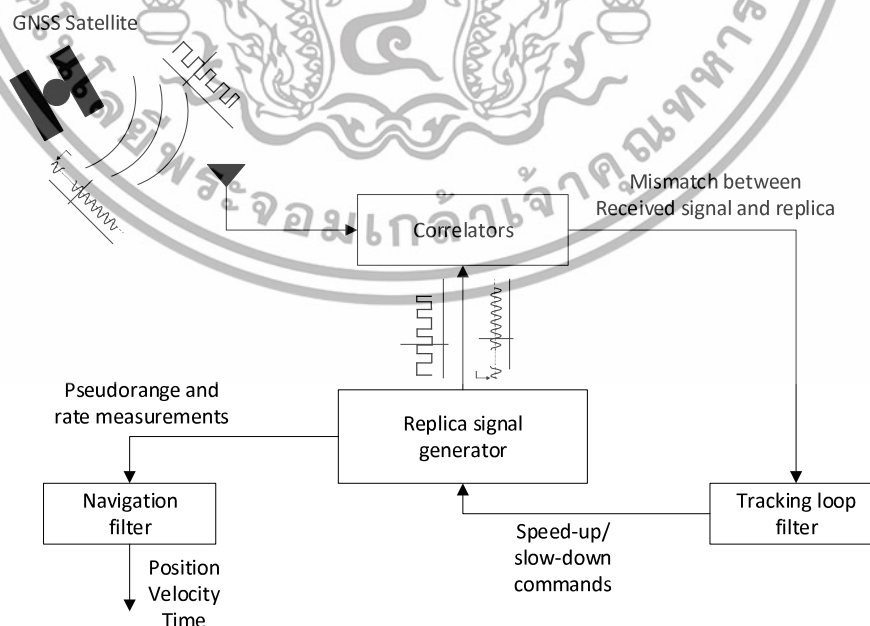
การทำงานของระบบจีเอ็นเอสเอสประกอบด้วยองค์ประกอบสามส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนของอวกาศ (Space segment) ส่วนของภาคพื้นดิน (Ground segment) และส่วนของผู้ใช้งาน (User segment) สำหรับส่วนของอวกาศประกอบไปด้วยกลุ่มดาวเทียมนำร่องในอวกาศ ทำหน้าที่แพร่คลื่นสัญญาณวิทยุมายังพื้นโลก ซึ่งสัญญาณวิทยุดังกล่าวจะมีข้อมูลนำร่อง โดยภายในตัวข้อมูลนั้นจะมีข้อมูลเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของดาวเทียมนำร่องในอวกาศ (Navigation message) ในส่วนของภาคพื้นดินทำหน้าที่ดูแลการทำงานของกลุ่มดาวเทียมนำร่องให้ดำเนินไปอย่างถูกต้อง รวมไปถึงคอยตรวจวัดตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียมนำร่องในอวกาศ และส่งค่าตำแหน่งดังกล่าวกลับไปยังดาวเทียมนำร่องเพื่อให้ข้อมูลที่ระบุตำแหน่งของดาวเทียมนำร่องทั้งกลุ่มมีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ตลอดเวลา และส่วนของผู้ใช้งาน เมื่อทำการรับสัญญาณคลื่นวิทยุจากดาวเทียมนำร่องที่ส่งออกมาโดยอุปกรณ์ที่รับสัญญาณอาจจะเป็นเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสหรือโทรศัพท์มือถือเคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์เหล่านี้สามารถรับสัญญาณได้ทั้งแบบความถี่เดียว (Single frequency) สองความถี่ (Dual frequency) และหลายความถี่ (Multiple frequency) ซึ่งข้อมูลที่ฝั่งผู้ใช้งานรับได้จะระบุตำแหน่งของดาวเทียมนำร่อง เมื่อกำนวณร่วมกับค่าระยะห่างระหว่างดาวเทียมนำร่องและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะได้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณหรือตำแหน่งของผู้ใช้งาน

### 2.2.1 การรับข้อมูลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส

ปัจจุบันมีเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (GNSS receiver) หลายประเภท เช่น เครื่องรับสัญญาณแบบความถี่เดี่ยว เครื่องรับแบบสองความถี่และเครื่องรับสัญญาณแบบหลายความถี่ เพื่อรองรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อธิบายเกี่ยวกับการรับข้อมูลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสโดยภาครับมีหลักการในการรับข้อมูลดังนี้ [30]

- 1) รับข้อมูลซึ่งเป็นสัญญาณวิทยุที่ถูกส่งออกมาจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส
- 2) จำแนกสัญญาณจากข้อมูลของดาวเทียมที่รับได้
- 3) วัดเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณและวัดค่า Doppler shift
- 4) ถอดรหัสข้อมูลการนำร่อง เพื่อคำนวณตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) และค่าพารามิเตอร์สัญญาณนาฬิกา (Clock) ของดาวเทียม
- 5) ประมาณค่าตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณ ความเร็วในการเคลื่อนที่หากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสมีการเคลื่อนที่ และเวลา โดยแสดงภาพรวมของภาครับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสได้ดังรูปที่ 2.3

การรับข้อมูลระยะทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับซึ่งเป็นการวัดช่วงเวลาที่สัญญาณจากดาวเทียมถูกส่งออกจากดาวเทียมและถูกรับที่ตัวรับสัญญาณ สามารถรับข้อมูลได้จากสองวิธีคือวิธีการวัดระยะทางเทียมจากวิธีโค้ด (Code pseudo-range measurement) และวิธีการวัดระยะทางเทียมจากเฟสคลื่นพาห้ (Carrier phase measurement) [30]



รูปที่ 2.3 ภาพรวมของภาครับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส [30]

1) ข้อมูลระยะทางเทียมโดยวิธีโค้ด (Code pseudo-range measurement)

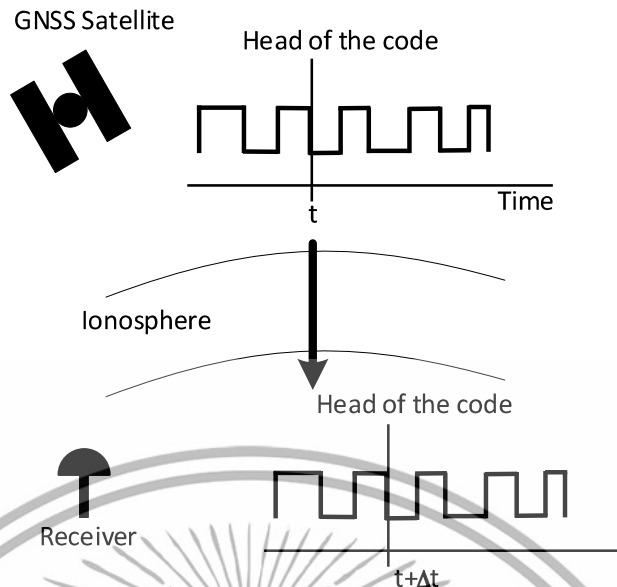
การวัดระยะทางเทียมโดยอาศัยวิธีโค้ด มีหลักการในการวัดระยะทางคือทางด้านฝั่งส่ง (Transmitter) หรือทางฝั่งของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสสร้างสัญญาณนาฬิกาและเข้ารหัสส่งมาพร้อมข้อมูลเรียกว่า C/A Code (Coarse/Acquisition Code) ในส่วนนั้นประกอบไปด้วยส่วนหัวของข้อมูล (Header) และข้อมูลจีเอ็นเอสเอสทางด้านฝั่งรับข้อมูล สร้างสัญญาณนาฬิกาเช่นเดียวกับทางฝั่งส่ง และภาครับทำการค้นหาข้อมูลที่ได้รับได้ว่าเป็นของดาวเทียมดวงใดโดยอาศัยเทคนิคการคำนวณค่าอัตสหสัมพันธ์ (Auto-correlation property) ของสัญญาณที่ได้รับได้ เมื่อได้รับข้อมูลจะทำการถอดรหัสข้อมูลและคำนวณค่าช่วงเวลาของข้อมูล ( $\Delta t$ ) ในทางอุดมคติ สามารถคำนวณค่าระยะทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากวิธีการดังกล่าวได้ดังสมการที่ (2.1) เมื่อ  $\rho$  คือค่าระยะทางเทียมที่คำนวณได้มีหน่วยเป็นเมตร

$$\rho = \Delta t \times c \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\Delta t$  คือค่าช่วงเวลาของข้อมูลเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางในหน่วยวินาที ( $\Delta t = t_r - t_s$ ) เมื่อ  $t_s$  และ  $t_r$  คือเวลาที่ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสส่งสัญญาณออกมาและเวลาที่เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสรับสัญญาณได้ตามลำดับ และ  $c$  คือค่าความเร็วในการเดินทางของแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 299,792,458 เมตรต่อวินาที ซึ่งค่าระยะทางเทียมนี้ประกอบไปด้วยค่าความผิดพลาดจากสัญญาณนาฬิกา (clock errors) ค่าความผิดพลาดจากสัญญาณนาฬิกาของวงจรในอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (receiver clock error) และค่าความผิดพลาดจากสัญญาณนาฬิกาของดาวเทียม (satellite clock error) เป็นต้น ในรูปที่ 2.4 แสดงภาพรวมของการส่งและรับข้อมูลจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสโดยอาศัยวิธีการวัดระยะทางเทียมจากวิธีโค้ด

สำหรับการวัดระยะทางเทียมจากวิธีโค้ด ในทางปฏิบัติค่าระยะทางเทียมที่เครื่องรับคำนวณได้นั้น ยังมีผลกระทบของค่าช่วงเวลาจากปัจจัยอื่นๆ เช่นค่าความผิดพลาดจากวงโคจรของดาวเทียม (Orbital error,  $e_{orbit}$ ) ค่าช่วงเวลาจากชั้นบรรยากาศ อื่นประกอบไปด้วยชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric delay,  $e_{iono}$ ) และชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Tropospheric delay,  $e_{tropo}$ ) และค่าช่วงเวลาจากสัญญาณรบกวนและการสะท้อนหลายทิศทาง (noise and multipath delay,  $\epsilon$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตร ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าระยะทางเทียมที่คำนวณได้จากวิธีโค้ดดังสมการที่ (2.2) เมื่อ  $s$  แทนหมายเลขดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละดวง

$$\rho^s = (c \times \Delta t) + e_{orbit}^s + e_{iono}^s + e_{tropo}^s + \epsilon \quad (2.2)$$



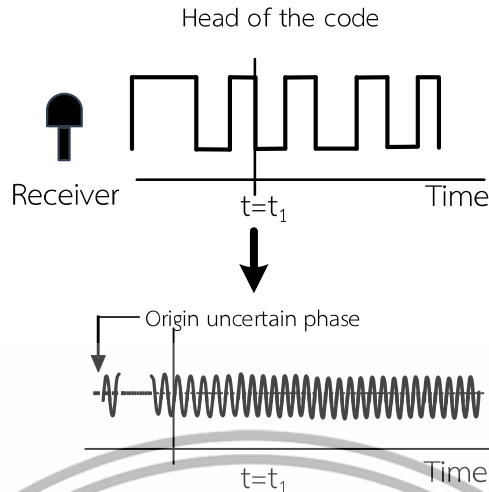
รูปที่ 2.4 การรับส่งข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากวิถีโคจร

2) ข้อมูลระยะทางเทียบจากเฟสคลื่นพาห์ (Carrier phase measurement)

การรับข้อมูลโดยอาศัยวิธีการวัดเฟสคลื่นพาห์ วิธีการคือในส่วนของภาครับจะสร้างสัญญาณมีคาบและคำนวณระยะทางในพจน์ของจำนวนคาบของสัญญาณที่สามารถรับได้ ซึ่งวิธีการนี้ตรวจจับสัญญาณจากวงจร delay lock loop และ phase lock loop [30] ดังสมการของการวัดระยะทางเทียบจากเฟสคลื่นพาห์ได้ดังสมการที่ (2.3) เมื่อ  $\Phi^s$  คือระยะทางที่วัดได้จากวิถีอาศัยเฟสคลื่นพาห์มีหน่วยเป็นเมตร  $\Delta\phi$  คือค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณที่เครื่องรับสร้างขึ้นและสัญญาณที่รับได้จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและ  $\lambda$  คือค่าความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นเมตร

$$\Phi^s = \Delta\phi \times \lambda \tag{2.3}$$

ในรูปที่ 2.5 แสดงการรับข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากเฟสคลื่นพาห์ ทางภาครับสร้างสัญญาณมีคาบขึ้น หลังจากได้รับข้อมูลจึงคำนวณระยะทางจากความต่างเฟสของสัญญาณมีคาบที่สร้างขึ้นเมื่อได้ค่าเฟสคลื่นพาห์ อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส จะใช้ข้อมูลเหล่านี้ร่วมกับข้อมูลเวลาและค่าตำแหน่งที่รับมาจากดาวเทียมดวงอื่นๆ เพื่อคำนวณหาตำแหน่งที่แม่นยำของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส



รูปที่ 2.5 การรับข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากวิธีการวัดเฟสคลื่นพาห้

ซึ่งการได้มาของข้อมูลจีเอ็นเอสเอสจากวิธีคำนวณโค้ดและเฟสคลื่นพาห้ พบว่าวิธีการวัดจากวิธีโค้ดนั้นข้อมูลที่ได้จะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนมากกว่าวิธีการวัดจากเฟสคลื่นพาห้ แต่ข้อมูลที่ได้จากวิธีการวัดเฟสคลื่นพาห้นั้นยังมีผลกระทบจากความกำกวมของเฟสเริ่มต้น (phase ambiguity) และการเกิดปรากฏการณ์ไซเคิลสลิป (cycle slip) แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากวิธีการวัดเฟสคลื่นพาห้จะมีความแม่นยำสูงกว่าวิธีการวัดจากโค้ดยกตัวอย่างสำหรับความถี่ L1 ซึ่งจะขอกล่าวถึงการใช้ข้อมูลจีเอ็นเอสเอส จากทั้งสองวิธีอีกครั้ง ในหัวข้อที่ 2.3

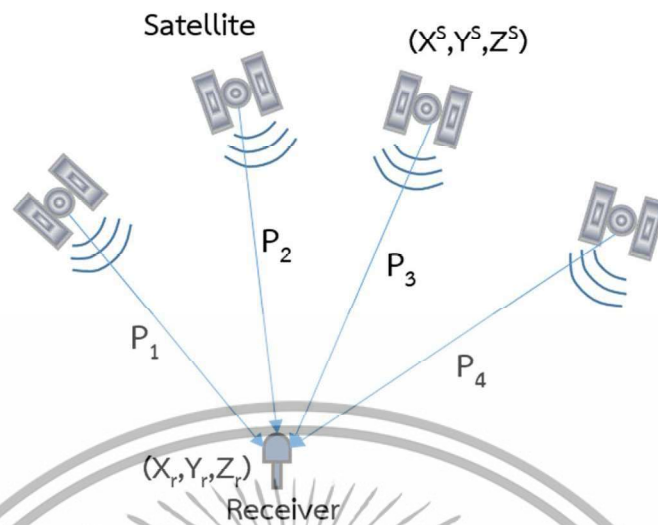
## 2.2.2 การระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจีเอ็นเอสเอส

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงหลักการในการระบุตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสโดยมีหลักการว่า เครื่องรับต้องสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 ดวง จึงจะสามารถนำข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสมาใช้งานในการระบุตำแหน่งเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสได้ โดยข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่รับได้นี้ประกอบไปด้วยข้อมูลที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและเวลาขณะส่งสัญญาณ เครื่องรับสัญญาณจะต้องประมวลผลความแตกต่างของเวลาในการรับสัญญาณเทียบกับเวลาจริง ณ ปัจจุบันเพื่อแปรเป็นระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียมแต่ละดวง ซึ่งได้ระบุมีตำแหน่งของตัวดาวเทียมเองมากับสัญญาณที่ถูกส่งมายังเครื่องรับ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการระบุตำแหน่งเครื่องรับด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสควรมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง เพื่อบอกตำแหน่งบนผิวโลก ซึ่งระยะห่างจากดาวเทียมทั้ง 3 กับเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแสดงดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้ความแม่นยำของการระบุตำแหน่งนั้นขึ้นอยู่กับการวางตัวของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละดวงที่อยู่บนน่านฟ้า กล่าวคือถ้าการกระจายตัวของดาวเทียมบนน่านฟ้า มีระยะห่างระหว่างดาวเทียมอยู่ห่างกันทั่วทั้งน่านฟ้า ค่าการระบุตำแหน่งที่ประมาณได้จะมีค่าแม่นยำกว่าการกระจายตัวของดาวเทียมที่วางตัวอยู่ใกล้กันบนน่านฟ้า และหากมีจำนวนดาวเทียมที่เครื่องรับ

สามารถรับสัญญาณได้เป็นจำนวนมาก ยิ่งส่งผลให้คำนวณตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้น ทั้งนี้ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศอันประกอบไปด้วยประจุไฟฟ้า ความชื้น อุณหภูมิ และความหนาแน่นของอากาศที่แปรปรวนตลอดเวลา สัญญาณเมื่อตกกระทบกับวัตถุต่างๆ จะเกิดการหักเหทำให้สัญญาณที่รับได้มีกำลังอ่อนลง และสิ่งแวดล้อมในบริเวณรับสัญญาณเช่น มีการบดบังจากอาคาร ก่อสร้าง หรือต้นไม้ จะมีผลต่อค่าความถูกต้องของความแม่นยำ เนื่องจากสัญญาณจากดาวเทียมมีการหักเหและสะท้อนหลายทิศทางส่งผลให้ค่าที่คำนวณได้จากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสมีความคลาดเคลื่อน ในการระบุตำแหน่งของเครื่องรับโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละดวงสามารถแสดงตัวอย่างระยะทางระหว่างดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในรูปแบบที่ 2.7



รูปที่ 2.6 หลักการระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในระนาบ 2 มิติ



รูปที่ 2.7 หลักการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม GNSS

จากรูปที่ 2.7 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ทราบค่าตำแหน่ง  $(X^s, Y^s, Z^s)$  ในขณะเดียวกันนั้นที่พื้นดินมีเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ยังไม่ทราบค่าตำแหน่งของเครื่องรับที่แน่ชัด  $(X_r, Y_r, Z_r, dt)$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการเพื่อคำนวณหาระยะทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสได้ดังสมการที่ (2.4)

$$P^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} + c(dt_r - dt^s) \quad (2.4)$$

โดย  $P^s$  คือค่าระยะทางเทียมระหว่างดาวเทียมดวงที่  $s$  และเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในหน่วยเมตร สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้รับค่าระยะทางเทียมจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากไฟล์โรเน็กซ์ และค่า  $(X^s, Y^s, Z^s)$  และ  $(X_r, Y_r, Z_r)$  คือตำแหน่งของดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในพิกัด WGS-84 ตามลำดับมีหน่วยเป็นเมตร ค่า  $dt^s$  และ  $dt_r$  คือค่าสัญญาณนาฬิกาของดาวเทียมและเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสตามลำดับมีหน่วยเป็นนาโนวินาที จากสมการที่ (2.4) มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 4 ตัวคือพิกัดตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสได้แก่  $X_r, Y_r, Z_r$  และ  $dt$  ดังนั้นเพื่อแก้สมการหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจึงต้องอาศัยสมการอย่างน้อย 4 สมการ กล่าวคือต้องใช้ข้อมูลจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง [43] ได้ใช้ระเบียบวิธี นิวตัน - แรปสัน (Newton-Raphson method) ในการวนซ้ำเพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าโดยอ้างอิงจากสมการที่ (2.5)

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) ในการประมาณค่าตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส เริ่มต้นโดยกำหนดให้ค่าพิกัดของเครื่องรับอ้างอิงมีค่าเริ่มต้นที่ตำแหน่ง  $(X_0, Y_0, Z_0)$  และทำการอัปเดตค่าจากการวนซ้ำด้วยระเบียบวิธีนิวตัน - แรปสัน ดังสมการที่ (2.6)

$$f(X_1, Y_1, Z_1) = f(X_0 + \Delta X, Y_0 + \Delta Y, Z_0 + \Delta Z) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) เมื่อกำหนดให้การอัปเดตค่า  $X_1 = X_0 + \Delta X$ ,  $Y_1 = Y_0 + \Delta Y$  และ  $Z_1 = Z_0 + \Delta Z$  คือพิกัดของเครื่องรับสัญญาณที่ถูกอัปเดตค่าหลังจากการประมาณค่าได้ในแต่ละการวนซ้ำ หลังจากนั้นทำการแทนค่าตัวแปรด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series expansion) ดังสมการที่ (2.7) หลังจากนั้น ทำการจัดรูปแบบตัวแปรใหม่ให้เป็นดังสมการที่ (2.8)

$$f(X_1, Y_1, Z_1) \approx f(X_0, Y_0, Z_0) + \frac{\partial f(X_0, Y_0, Z_0)}{\partial X_0} \Delta X + \frac{\partial f(X_0, Y_0, Z_0)}{\partial Y_0} \Delta Y + \frac{\partial f(X_0, Y_0, Z_0)}{\partial Z_0} \Delta Z \quad (2.7)$$

$$f(X_1, Y_1, Z_1) = \rho_0 - \frac{X^s - X_0}{\rho_0} \Delta X - \frac{Y^s - Y_0}{\rho_0} \Delta Y - \frac{Z^s - Z_0}{\rho_0} \Delta Z \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้  $\rho_0$  คือค่าระยะทางจริงระหว่างดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสและเครื่องรับสัญญาณ จะได้ดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10)

$$f(X_0, Y_0, Z_0) = \rho_0 = \sqrt{(X^s - X_0)^2 + (Y^s - Y_0)^2 + (Z^s - Z_0)^2} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial f(X_0, Y_0, Z_0)}{\partial X_0} = -\frac{X^s - X_0}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial f(X_0, Y_0, Z_0)}{\partial Y_0} = -\frac{Y^s - Y_0}{\rho_0} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial f(X_0, Y_0, Z_0)}{\partial Z_0} = -\frac{Z^s - Z_0}{\rho_0}$$

จากสมการที่ (2.8) หากใช้ข้อมูลของดาวเทียม 4 ดวงในการประมาณค่าตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะได้สมการของระยะทางเทียมดังสมการที่ (2.11)

$$\begin{aligned}
P_1 &= \rho_0^1 - \frac{X^1 - X_0}{\rho_0^1} \Delta X - \frac{Y^1 - Y_0}{\rho_0^1} \Delta Y - \frac{Z^1 - Z_0}{\rho_0^1} \Delta Z + c(dt - dT^1) \\
P_2 &= \rho_0^2 - \frac{X^2 - X_0}{\rho_0^2} \Delta X - \frac{Y^2 - Y_0}{\rho_0^2} \Delta Y - \frac{Z^2 - Z_0}{\rho_0^2} \Delta Z + c(dt - dT^2) \\
P_3 &= \rho_0^3 - \frac{X^3 - X_0}{\rho_0^3} \Delta X - \frac{Y^3 - Y_0}{\rho_0^3} \Delta Y - \frac{Z^3 - Z_0}{\rho_0^3} \Delta Z + c(dt - dT^3) \\
P_4 &= \rho_0^4 - \frac{X^4 - X_0}{\rho_0^4} \Delta X - \frac{Y^4 - Y_0}{\rho_0^4} \Delta Y - \frac{Z^4 - Z_0}{\rho_0^4} \Delta Z + c(dt - dT^4)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

จากสมการที่ (2.11) ทำการย้ายข้างตัวแปรที่ไม่ทราบค่าให้อยู่ข้างเดียวกัน จะได้เป็นไปดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{aligned}
P_1 + cdT^1 - \rho_0^1 &= -\frac{X^1 - X_0}{\rho_0^1} \Delta X - \frac{Y^1 - Y_0}{\rho_0^1} \Delta Y - \frac{Z^1 - Z_0}{\rho_0^1} \Delta Z + cdt \\
P_2 + cdT^2 - \rho_0^2 &= -\frac{X^2 - X_0}{\rho_0^2} \Delta X - \frac{Y^2 - Y_0}{\rho_0^2} \Delta Y - \frac{Z^2 - Z_0}{\rho_0^2} \Delta Z + cdt \\
P_3 + cdT^3 - \rho_0^3 &= -\frac{X^3 - X_0}{\rho_0^3} \Delta X - \frac{Y^3 - Y_0}{\rho_0^3} \Delta Y - \frac{Z^3 - Z_0}{\rho_0^3} \Delta Z + cdt \\
P_4 + cdT^4 - \rho_0^4 &= -\frac{X^4 - X_0}{\rho_0^4} \Delta X - \frac{Y^4 - Y_0}{\rho_0^4} \Delta Y - \frac{Z^4 - Z_0}{\rho_0^4} \Delta Z + cdt
\end{aligned} \tag{2.12}$$

ในการประมาณค่าพิกัดของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสโดยใช้สมการประมาณค่าของตำแหน่งในรูปแบบของเมทริกซ์ แสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{2.13}$$

เมื่อเวกเตอร์  $\mathbf{b}$  คือค่าความต่างระยะทางเทียบกับค่าระยะทางจริง  $\mathbf{A}$  คือเมทริกซ์ที่มีขนาด  $N \times 4$  ซึ่งเป็นเมทริกซ์ของค่าตำแหน่งของดาวเทียม เมื่อ  $N$  คือจำนวนดาวเทียมที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสได้ ณ ขณะนั้น ( $N = 1, 2, 3, \dots, N$ ) และเวลา  $dt$  คือค่าสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเมื่อใช้หลักการกำลังสองที่น้อยที่สุดหรือ Least square method [44] ในการหาค่าเวกเตอร์  $\mathbf{x}$  ดังสมการที่ (2.14) และจะได้ค่าเวกเตอร์  $\mathbf{x}$  ดังสมการที่ (2.15)

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{b} - \mathbf{Ax})^T \mathbf{A} &= \mathbf{0}^T \\
 \mathbf{A}^T (\mathbf{b} - \mathbf{Ax}) &= \mathbf{0} \\
 \mathbf{A}^T \mathbf{b} - \mathbf{A}^T \mathbf{Ax} &= \mathbf{0} \\
 \mathbf{A}^T \mathbf{Ax} &= \mathbf{A}^T \mathbf{b}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \\
 \underline{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ dt \end{bmatrix}_{4 \times 1}
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

เมื่อ  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  และ  $dt$  คือค่าปรับแก้ของตำแหน่งเครื่องรับที่ได้จากวิธีกำลังสอยน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่าตำแหน่งอ้างอิงที่ถูกกำหนดไว้ให้มีค่าเท่ากับ  $(X_0, Y_0, Z_0)$  ซึ่งในแต่ละรอบของการวนซ้ำจะให้ค่าตำแหน่งเครื่องรับที่ลู่เข้าใกล้เคียงตำแหน่งที่ตั้งจริงมากที่สุด

อีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส คือการวางตัวหรือการกระจายตัวของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสบนน่านฟ้า ขณะที่เครื่องรับสัญญาณสามารถรับได้ ณ เวลานั้นๆ ซึ่งเรียกว่าค่าความเจือจางของความแม่นยำ (Dilution of precision, DOP) ในการระบุตำแหน่งจากการกระจายตัวของดาวเทียม การกระจายตำแหน่งของดาวเทียมที่ปรากฏบนท้องฟ้าทั้งหมด มีผลต่อค่าความถูกต้องที่วัดได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การวางตัวของดาวเทียมที่ส่งผลต่อค่า DOP และความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง

(ก) ความแม่นยำสูง (ข) ความแม่นยำต่ำ

จากรูปที่ 2.8 การวางตัวของดาวเทียมที่กระจายอยู่บนท้องฟ้าที่มีการกระจายตัวมากหรือห่างกันมาก ดังรูปที่ 2.8 (ก) จะให้ค่าการระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากกว่าการกระจายตัวของดาวเทียมที่มีการกระจายตัวน้อยกว่าดังรูปที่ 2.8 (ข) ในการคำนวณหาตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

โดยการหาค่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสสามารถอธิบายได้ด้วยเมทริกซ์ความแปรปรวนของความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในพิกัด WGS-84 โดยสามารถคำนวณเมทริกซ์  $\mathbf{H}$  [30] จากการประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\mathbf{H}_{4 \times 4} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad (2.16)$$

เมื่อค่า  $\sigma_x^2 = H_{11}$ ,  $\sigma_y^2 = H_{22}$ ,  $\sigma_z^2 = H_{33}$  และ  $\sigma_{dt}^2 = H_{44}$  โดยที่  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_z^2$  คือความแปรปรวนของความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแกน  $X, Y, Z$  ตามลำดับ และ  $\sigma_{dt}^2$  คือค่าความแปรปรวนของของสัญญาณนาฬิกาจากเมทริกซ์  $\mathbf{H}$  ค่าของ DOP ถูกอธิบายในพจน์ต่างๆ ที่สัมพันธ์กับสัญญาณที่ได้จากการกระจายตัวของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเพื่อกำหนดตำแหน่งของเครื่องรับได้แก่

- 1) PDOP (Position dilution of precision) คือค่าบ่งชี้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งสามมิติ (Three dimensional, 3-D)
- 2) HDOP (Horizontal dilution of precision) คือค่าบ่งชี้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในแนวราบหรือแนวละติจูด (Latitude) และลองจิจูด (Longitude)
- 3) VDOP (Vertical dilution of precision) คือค่าบ่งชี้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งแนวตั้งหรือความสูง (height)
- 4) TDOP (Time dilution of precision) คือค่าบ่งชี้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งอันเนื่องมาจากเวลาที่ได้รับจากสัญญาณดาวเทียม (time)
- 5) GDOP (Geometrical dilution of precision) คือค่าความเ็จจางของความแม่นยำในการระบุตำแหน่งอันเนื่องมาจากการวางตัวของดาวเทียมบนท้องฟ้าโดยรวม

สามารถคำนวณหาค่าเหล่านี้ได้จากเมทริกซ์ของ  $\mathbf{H}$  ได้ดังสมการที่ (2.17) สำหรับค่า PDOP สมการที่ (2.18) สำหรับค่า HDOP สมการที่ (2.19) สำหรับค่า VDOP สมการที่ (2.20) สำหรับค่า TDOP และสมการที่ (2.21) สำหรับค่า GDOP [30]

$$PDOP = \sqrt{H_{11} + H_{22} + H_{33}} \quad (2.17)$$

$$HDOP = \sqrt{H_{11} + H_{22}} \quad (2.18)$$

$$VDOP = \sqrt{H_{33}} \quad (2.19)$$

$$TDOP = \sqrt{H_{44}} \quad (2.20)$$

$$GDOP = \sqrt{H_{11} + H_{22} + H_{33} + H_{44}} \quad (2.21)$$

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่า DOP ในรูปแบบต่างๆ ได้ดังสมการที่ (2.22) และสมการที่ (2.23) ตามลำดับ

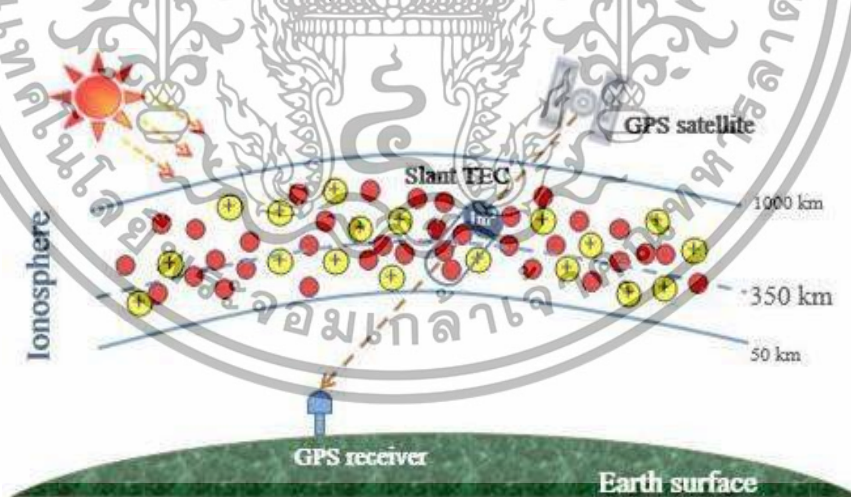
$$(PDOP)^2 = (HDOP)^2 + (VDOP)^2 \quad (2.22)$$

$$(GDOP)^2 = (PDOP)^2 + (TDOP)^2 \quad (2.23)$$

สำหรับพารามิเตอร์ที่นิยมนำมาพิจารณาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือค่า GDOP ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของดาวเทียมที่ปรากฏบนท้องฟ้า และส่งสัญญาณให้กับเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสหากค่า DOP มีค่ามากจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งมากขึ้น

### 2.3 การคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีปริมาณอิเล็กตรอนและไอออนอิสระ อยู่ในปริมาณมากกว่าชั้นบรรยากาศอื่นๆ [9] ซึ่งค่าปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Total electron content, TEC) สามารถประมาณได้จากพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางเมตร มีหน่วยคือ TECU (TEC unit) ในการศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถศึกษาได้จากพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในชั้นบรรยากาศ นั่นก็คือปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนสุทธิหรือค่า TEC ดังรูปที่ 2.9 แสดงค่า TEC ที่ความสูงประมาณ 350 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลกที่คำนวณได้ในแนวระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในแนวเฉียง (Slant path) หรือตามแนวเส้นสายตา (Line-of-sight path) ระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ซึ่งเรียกค่าปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนสุทธิในแนวเฉียงนี้ว่า STEC (Slant total electron content)



รูปที่ 2.9 ทิศทางความหนาแน่นอิเล็กตรอนสุทธิในแนวเฉียง (STEC)

สำหรับการวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาศัยการคำนวณค่า STEC ในหน่วย TECU เมื่อ 1 TECU มีค่าเท่ากับ  $10^{16}$  อิเล็กตรอน/ตารางเมตร โดยอาศัยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิดสองความถี่ ในรูปแบบของไฟล์โรเน็กซ์ชนิด 2.11

โดยทั่วไปค่าดังกล่าวสามารถคำนวณด้วยสูตรทั่วไป ได้ดังสมการที่ (2.24) คือการอินทิเกรตปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแนวระหว่งดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ [45]

$$TEC = \int_s N_e ds \quad (2.24)$$

โดย  $TEC$  คือค่าปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนสุทธิในหน่วย TECU ซึ่งค่าความหนาแน่นของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนแทนด้วย  $N_e$  ในหน่วยอิเล็กตรอน/ลูกบาศก์เมตร และระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณและดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสคือ  $s$  ในหน่วยเมตร

ในการประมาณค่า  $STEC$  เพื่อใช้ในการศึกษานี้ ใช้ข้อมูลจากไฟล์โรเน็กซ์ที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสสองความถี่ (Observation file) เมื่อเครื่องรับสัญญาณรับข้อมูลจากดาวเทียม ซึ่งเป็นข้อมูลไบนารี ข้อมูลดังกล่าวจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของไฟล์โรเน็กซ์คือไฟล์ Observation และ Navigation ซึ่งจากข้อมูล Observation จะได้ค่าระยะทางเทียมระหว่างเครื่องรับและดาวเทียมแต่ละดวงในแต่ละเวลา ซึ่งจะให้ค่าจากวิธีการวัดสองแบบคือการวัดโดยอาศัยระยะทางเทียมวิธีโค้ด (Code pseudo-range measurement) และการวัดโดยอาศัยเฟสของคลื่นพาห์ (Carrier phase measurement) [46], [47], [48] ส่วนไฟล์ Navigation จะให้ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณพิกัดของดาวเทียมแต่ละดวง จากข้อมูลไฟล์โรเน็กซ์นี้สามารถคำนวณค่า  $STEC$  ได้ ดังสมการที่ (2.25) และ (2.26) เมื่อค่า  $STEC_p$  และ  $STEC_L$  คือค่า  $STEC$  ที่คำนวณได้จากวิธีการวัดระยะทางเทียมระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสด้วยวิธีการคำนวณจากโค้ด และวิธีการวัดจากการอาศัยเฟสคลื่นพาห์ ตามลำดับ

$$STEC_p = K(P_2 - P_1) \quad (2.25)$$

$$STEC_L = K(L_1 - L_2) \quad (2.26)$$

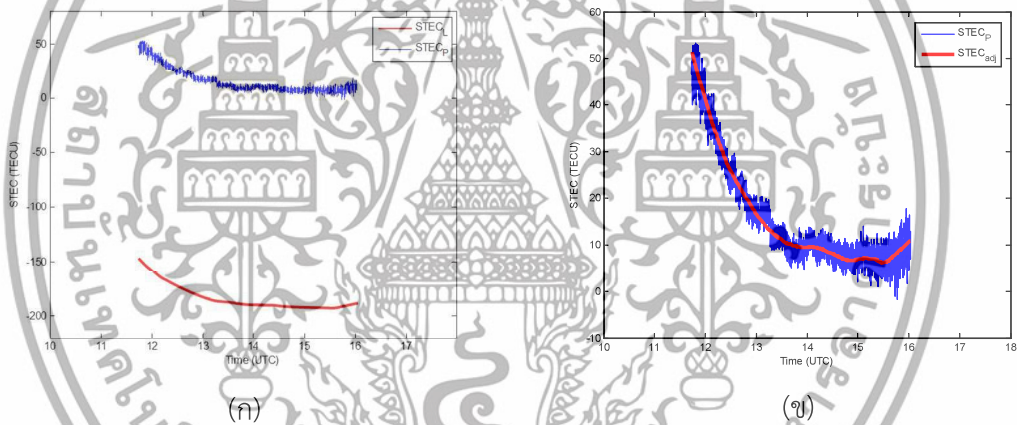
เมื่อค่า  $P_1, P_2$  และ  $L_1, L_2$  คือค่าระยะทางเทียมโดยใช้วิธีการวัดจากการคำนวณจากโค้ด และวิธีการวัดโดยอาศัยเฟสคลื่นพาห์จากความถี่  $L$  แบนด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $L_1$  (1575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) และ  $L_2$  (1227.60 เมกะเฮิร์ตซ์) ตามลำดับ มีหน่วยเป็นเมตร และค่า  $K$  เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $9.52 \text{ (m}^{-1} \text{ TECU)}$  สำหรับค่า  $STEC$  ในหน่วย TECU โดยค่า  $STEC_p$  ที่คำนวณได้จากค่าระยะทางเทียมวิธีโค้ดได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนมากกว่าการคำนวณจากวิธีการวัดเฟสคลื่นพาห์ แต่อย่างไรก็ดีค่า  $STEC_L$  ที่คำนวณได้นั้นมีผลกระทบจาก ค่าความกำกวมของเฟสเริ่มต้น (Initial phase ambiguity) ส่งผลให้ค่า  $STEC_L$  ที่คำนวณได้อยู่ในระดับที่ไม่ถูกต้อง แม้จะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนน้อยกว่า  $STEC_p$  ดังนั้นค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ที่ถูกนำมาวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นค่า  $STEC$  ซึ่งคำนวณมาจาก  $STEC_L$  ที่ถูกปรับระดับ (Adjusted) ค่าเฉลี่ยให้อยู่ในระดับเดียวกับค่าเฉลี่ยของ  $STEC_p$  ซึ่งต่อไปนี้ถูกเรียกว่าเรียกว่า  $STEC_{adj}$  ดังสมการที่ (2.27)

โดยสามารถแสดงค่า  $STEC_{adj}$  เปรียบเทียบกับค่า  $STEC_p$  ได้ดังรูปที่ 2.10 แต่อย่างไรก็ดีค่า  $STEC$  ที่วิทยานิพนธ์นี้นำมาประมวลผลนั้นยังคงหลงเหลือผลรวมของค่าไบอัสจากดาวเทียม ( $b_s$ ) และไบอัสจากวงจรในเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ( $b_r$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.28)

$$STEC_{adj} = STEC_L + \overline{(STEC_p - STEC_L)}_{arc} \quad (2.27)$$

$$STEC = STEC_{adj} + b_r + b_s \quad (2.28)$$

สำหรับการประมวลค่า  $STEC$  ที่กล่าวมาข้างต้น ถูกนำมาวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมา บับเบิลแล้ว นอกเหนือไปกว่านั้นค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินั้นยังสามารถนำมาแสดงผลในรูปแบบของแผนที่ [47] ซึ่งจะเรียกว่าแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC map) โดยค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ถูกนำมาแสดงเป็นแผนที่นั้นคือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง ในการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง (Vertical total electron content, VTEC) สามารถคำนวณได้จากค่า  $STEC$  โดยการคูณกับค่า Slant factor เข้าไปที่ค่า  $STEC$  ได้ดังสมการที่ (2.29)



รูปที่ 2.10 ค่า  $STEC$  ที่คำนวณได้จากไฟล์โรเน็กซ์

(ก)  $STEC_p$  (สีน้ำเงิน) และ  $STEC_L$  (สีแดง) ก่อนทำการปรับระดับ (ข)  $STEC_p$  (สีน้ำเงิน) และ  $STEC_L$  (สีแดง) หลังทำการปรับระดับของค่า  $STEC$

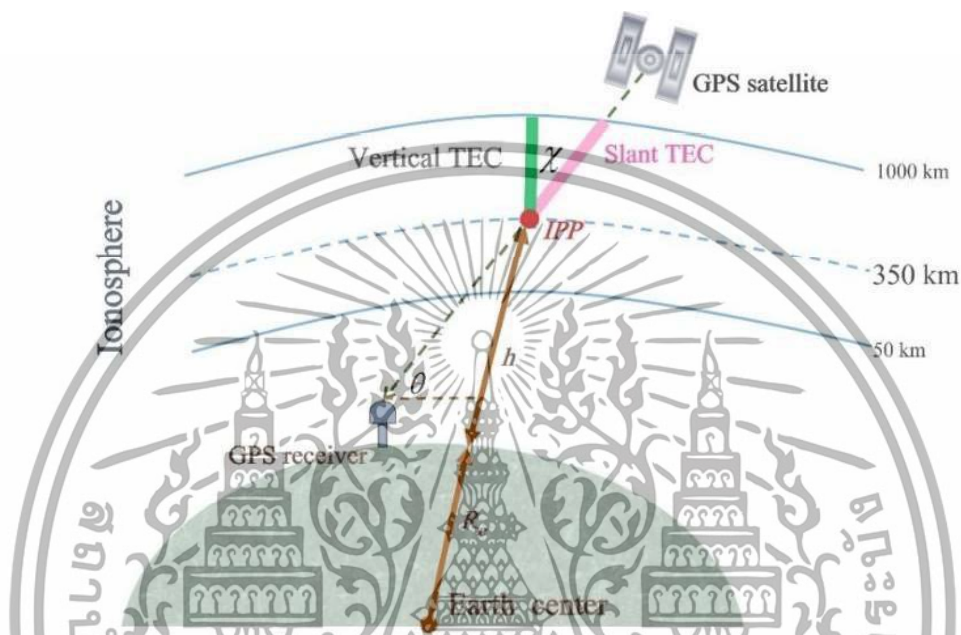
$$VTEC = STEC \cdot \cos \chi \quad (2.29)$$

โดยที่ค่า  $\cos \chi$  มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.30)

$$\cos \chi = \sqrt{1 - \left( \frac{R_e}{R_e + h} \cos \theta_N \right)^2} \quad (2.30)$$

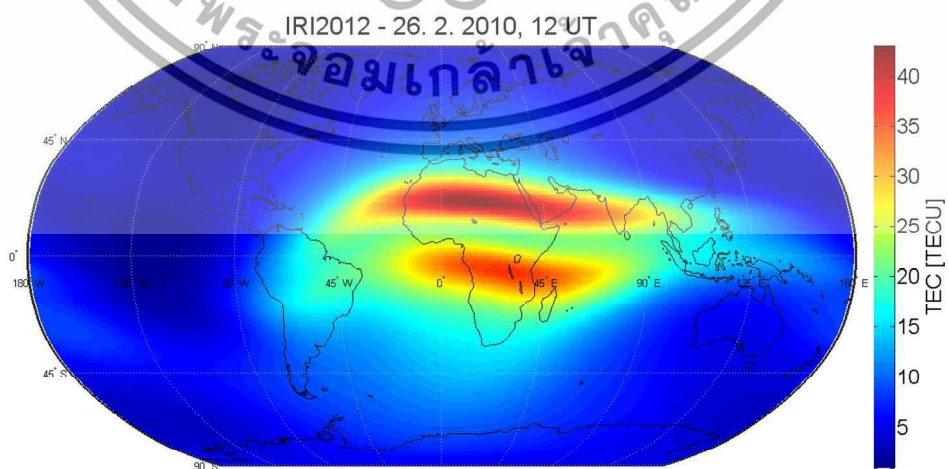
เมื่อค่า  $R_e$  คือค่ารัศมีของโลกซึ่งมีค่าเท่ากับ 6,378.137 กิโลเมตร  $h$  คือค่าความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เมื่อวัดจากพื้นโลกมายังจุดที่สัญญาณตัดผ่านชั้นบรรยากาศที่ความ

สูงอ้างอิง และ  $\theta_N$  คือค่ามุมเงยของดาวเทียมดวงที่  $N$  ในรูปที่ 2.11 แสดงค่าทิศทางของค่า STEC ซึ่งแทนด้วยเส้นสีชมพู และทิศทางของค่า VTEC ซึ่งแทนด้วยเส้นสีเขียว โดยมีจุดตัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือจุด IPP (Ionospheric piece point) เป็นจุดอ้างอิงที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอสเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ความสูงอ้างอิง โดยในรูปที่ 2.11 ค่าความสูงอ้างอิงคือ 350 กิโลเมตร [49]



รูปที่ 2.11 ทิศทางของ STEC และ VTEC [50]

แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิถูกแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยแถบสีที่แตกต่างกันแสดงถึงค่า VTEC ที่แตกต่างกันในหน่วย TECU ซึ่งจะแสดงค่าตั้งแต่ 0 TECU ในบริเวณสีน้ำเงินและมีค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึง 45 TECU บริเวณสีแดง ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างแผนที่ VTEC ในวันที่ 26 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2010 [51]

## 2.4 ปรากฏการณ์ฟองพลาสมาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

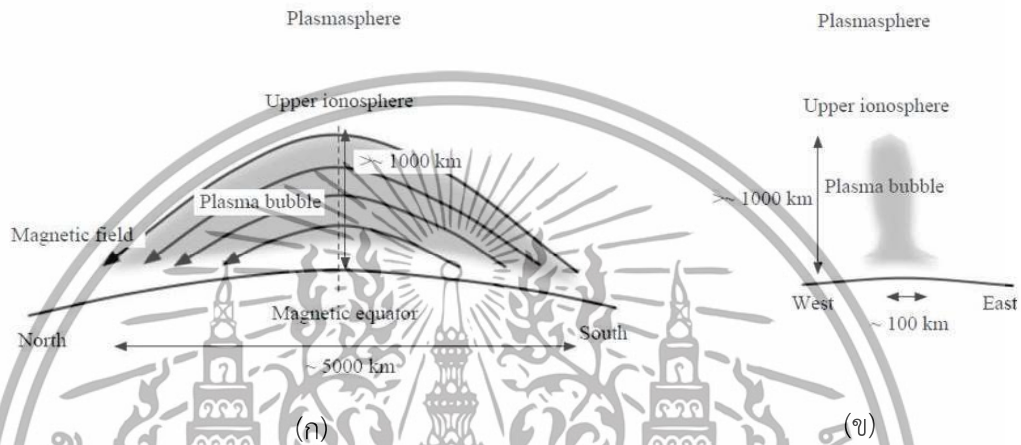
ปรากฏการณ์ฟองพลาสมาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล คือปรากฏการณ์ที่ปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไม่สม่ำเสมอในแต่ละจุดส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่างกันมาก [52] – [53] ซึ่งในบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อยกว่าปกติเรียกว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล โดยบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนน้อยกว่าจะเกิดขึ้นจากชั้นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และค่อยๆ ขยายตัวขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ชั้นบน ดังรูปที่ 2.13 แสดงการจำลองการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล ในเวลากลางคืนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กที่ความสูงของชั้นบรรยากาศประมาณ 200 – 1,200 กิโลเมตร สีแดงแทนบริเวณที่มีปริมาณอิเล็กตรอนหนาแน่น สีเขียวแทนบริเวณที่มีปริมาณอิเล็กตรอนเบาบาง ปรากฏการณ์นี้มักเกิดขึ้นหลังจากพระอาทิตย์ตก บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกหรือบริเวณละติจูดต่ำ



รูปที่ 2.13 การจำลองการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [54]

จากรูปที่ 2.13 พบว่าพื้นที่สีเขียวคือบริเวณที่มีความหนาแน่นของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำ และพื้นที่สีแดงคือบริเวณที่มีความหนาแน่นของปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง จะเห็นว่ามีปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำเกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ซึ่งมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงค่อยๆ ขยายตัวสูงขึ้นรูปร่างคล้ายกับลูกโป่ง จึงเรียกลักษณะดังกล่าวว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล ส่งผลให้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ส่งผ่านบริเวณดังกล่าวเกิดการหน่วงเวลาของสัญญาณที่ไม่เท่ากันในช่วงบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันออกไป และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและเฟสของสัญญาณอย่างกะทันหันซึ่งเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน

จากการศึกษาของ [55] ได้พัฒนาแบบจำลองรูปร่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในสามมิติว่าพลาสมาบับเบิ้ลมีลักษณะเป็นท่อสามมิติวางตัวในแนวเหนือ – ใต้ พาดผ่านไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก มีความยาวประมาณ 5,000 กิโลเมตร ดังรูปที่ 2.14 (ก) เมื่อมองแบบจำลองในแนวตะวันออก-ตะวันตกในรูปที่ 2.14 (ข) พลาสมาบับเบิ้ลจะมีความกว้างประมาณ 100 กิโลเมตร มีความสูงประมาณ 1,000 กิโลเมตร



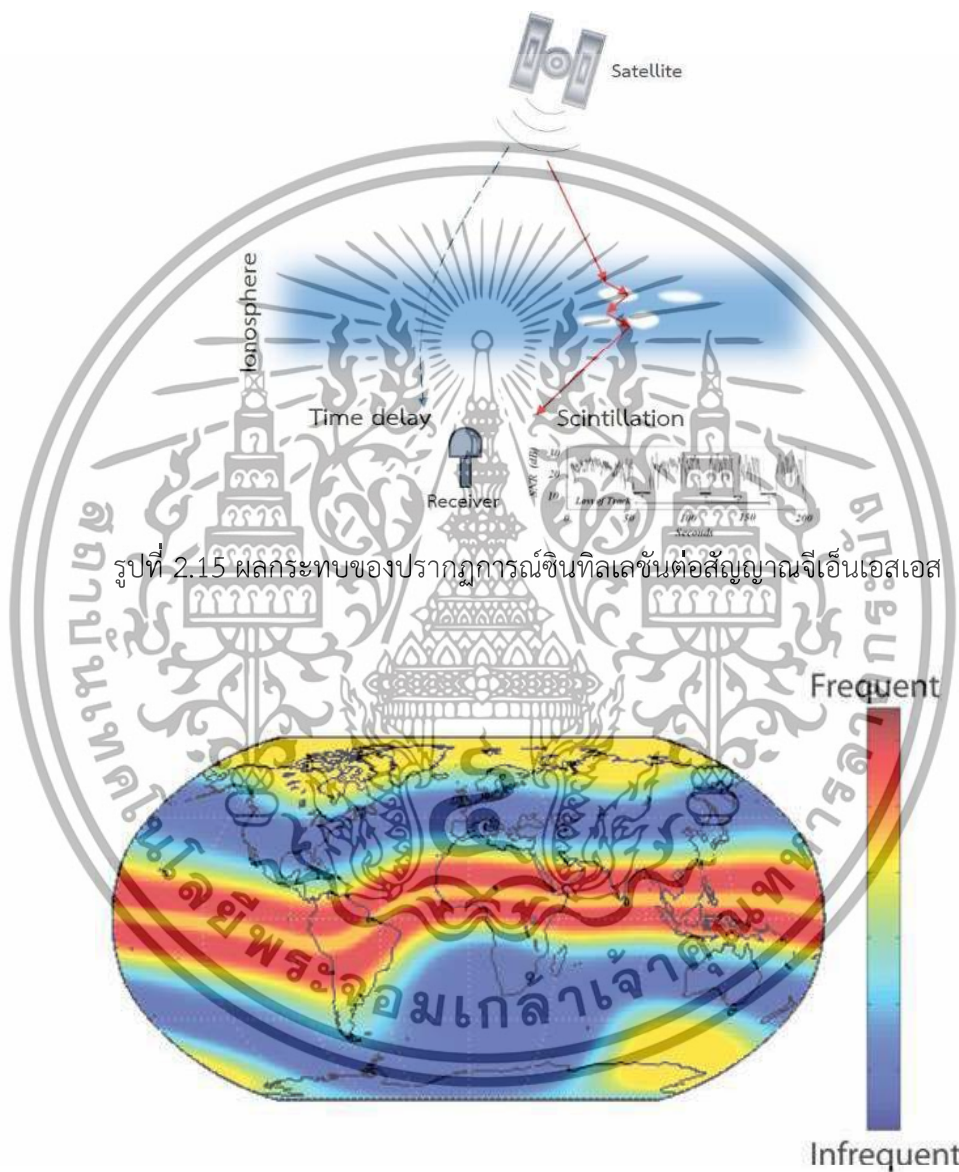
รูปที่ 2.14 แบบจำลองของรูปร่างพลาสมาบับเบิ้ล (ก) ทิศทางเหนือ-ใต้ (ข) ทิศทางตะวันออก-ตะวันตก [55]

เมื่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิ้ลทำให้เกิดการหน่วงเวลาของข้อมูลที่รับได้ในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ซึ่งผลกระทบของปรากฏการณ์นี้และการศึกษาการเกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.5 ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เมื่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดความผิดปกติอาจส่งผลให้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสอย่างกะทันหัน [56] ซึ่งกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกะทันหันอย่างรุนแรง อาจส่งผลให้เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสไม่สามารถรับข้อมูลได้ ทำให้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสอาจขาดหายได้ในช่วงเวลาดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยเส้นสีแดงแทนการเดินทางของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแนวการส่งสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน ในทางกลับกันเส้นประแทนการเดินทางของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีปริมาณอิเล็กตรอนสม่ำเสมอส่งผลให้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสถูกหน่วงเวลาจากปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay)

แผนที่แสดงบริเวณการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน (Ionospheric scintillation map) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 บริเวณสีแดงเป็นบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นบ่อย อันมีสาเหตุมาจากปริมาณอิเล็กตรอนที่มีความผันผวนไปตามแนวของเส้นศูนย์สูตรทางแม่เหล็ก (Magnetic equator) ส่งผลให้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิผันผวน เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและเฟสอย่างกระทันหัน



รูปที่ 2.15 ผลกระทบของปรากฏการณ์ซินทิลเลชันต่อสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

รูปที่ 2.16 แผนที่แสดงบริเวณการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน [57]

ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ชี้วัดการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันคือแอมพลิจูดซินทิลเลชันหรือค่าดัชนี  $S_4$  โดยคำนวณจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation) ของค่าความเข้มของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสหรือ  $SI$  (Signal intensity amplitude) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.31)

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}} \quad (2.31)$$

โดยที่สัญลักษณ์  $\langle \bullet \rangle$  คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงเวลาที่สนใจ ซึ่งรูปแบบโดยทั่วไปของ  $SI$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.32)

$$SI = \frac{NBP - WBP}{(NBP - WBP)_{lpf}} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $NBP$  และ  $WBP$  คือกำลังของแถบความถี่แคบ (Narrow Bandwidth Power) และกำลังของแถบความถี่กว้าง (Wide Bandwidth Power) ตามลำดับ [58] และ  $lpf$  คือตัวกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter)



### บทที่ 3

## การคำนวณระยะห่างระหว่างพลาสติกบับเบิลที่ตรวจจับได้ ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

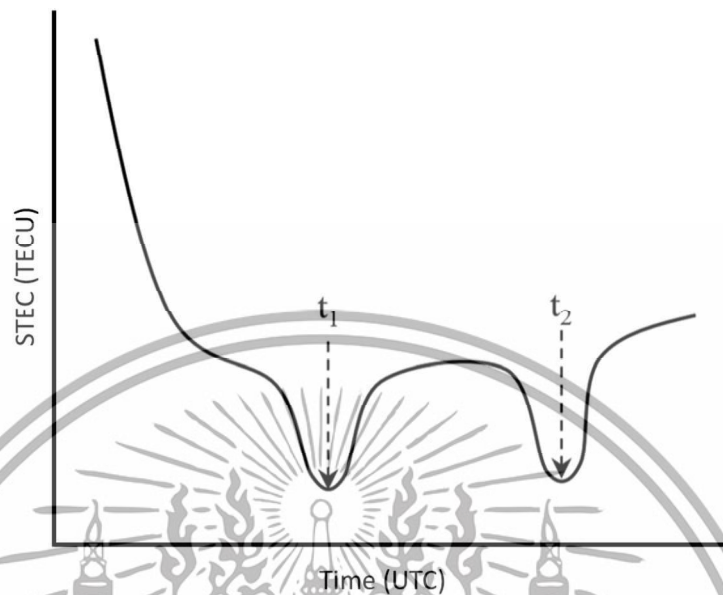
### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสติกบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้จากสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ซึ่งพารามิเตอร์นี้มีประโยชน์ต่อการจำลองสถานการณ์ของผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลต่อค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS โดยทำการวิเคราะห์ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า STEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือค่า ROTI (Rate of TEC Change index) เพื่อตรวจจับการเกิดปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลและวิเคราะห์จำนวนพลาสติกบับเบิลที่ตรวจจับได้ หลังจากนั้นจึงประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสติกบับเบิล โดยหัวข้อนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสติกบับเบิลที่ตรวจจับได้จากการคำนวณระยะทางฮาเวอรี่ไซน์ร่วมกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสติกบับเบิลที่เดินทางจากสถานีอ้างอิง KMIT ไปยังสถานีอ้างอิง STFD โดยข้อมูลที่ถูกนำมาประมวลผลคือข้อมูลจากดาวเทียมระบบจีพีเอสจากเครื่องรับสัญญาณชนิดสองความถี่ ในวันที่สามารถตรวจจับปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลได้ในปี 2015 จากสถานี KMIT และ STFD พร้อมกัน

### 3.2 การตรวจจับปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลจากสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

ปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลสามารถถูกตรวจจับได้จากการสังเกตการลดลงอย่างรวดเร็วของค่า STEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของพลาสติกบับเบิลคือบริเวณที่ STEC ภายในพลาสติกบับเบิลมีความหนาแน่นน้อยกว่าภายนอกพลาสติกบับเบิลเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นเมื่อคำนวณค่า STEC จากสัญญาณดาวเทียมที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศที่เกิดปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลจะส่งผลให้สัญญาณดาวเทียมเกิดการแกว่งอย่างกะทันหัน (rapid fluctuation) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงคำนวณค่า STEC ที่รับได้จากข้อมูลของสัญญาณดาวเทียมระบบจีพีเอสเพื่อตรวจสอบการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิล หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า STEC ที่คำนวณได้เพื่อตรวจจับและวิเคราะห์จำนวนของพลาสติกบับเบิล โดยในรูปที่ 3.1 แสดงภาพจำลองของค่า STEC เมื่อสัญญาณดาวเทียมส่งข้อมูลผ่านชั้นบรรยากาศช่วงที่เกิดปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิล โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล และแกนตั้งคือค่า STEC ในหน่วย TECU ซึ่งคำนวณจากสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ดาวเทียมดวงหนึ่ง ส่งข้อมูลผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะเกิดปรากฏการณ์พลาสติกบับเบิลจำนวน 2 ลูก ที่เวลา  $t_1$  และ เวลา

$t_2$  ตามลำดับ โดยสังเกตได้จากเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของค่า STEC และเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เกิดเป็นหลุมของค่า STEC (STEC Depletion)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของค่า STEC ในวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์  
คำนวณจากดาวเทียม 1 ดวง

### 3.2.1 การคำนวณค่า ROTI เพื่อตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า STEC หรือค่า ROTI (Rate of TEC change index) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล โดยค่า ROTI มีหน่วยเป็น TECU/min สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1) มีค่า  $\overline{ROTI}$  คือค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า STEC ในช่วงเวลาที่สนใจ และค่า  $ROTI(i)$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า STEC ระหว่างตำแหน่งเวลาที่  $i+1$  และ  $i$  โดยสามารถคำนวณค่า  $ROTI(i)$  ได้ดังสมการที่ (3.2)

$$ROTI = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ROTI(i) - \overline{ROTI})^2} \quad (3.1)$$

$$ROTI(i) = STEC(i+1) - STEC(i) \quad (3.2)$$

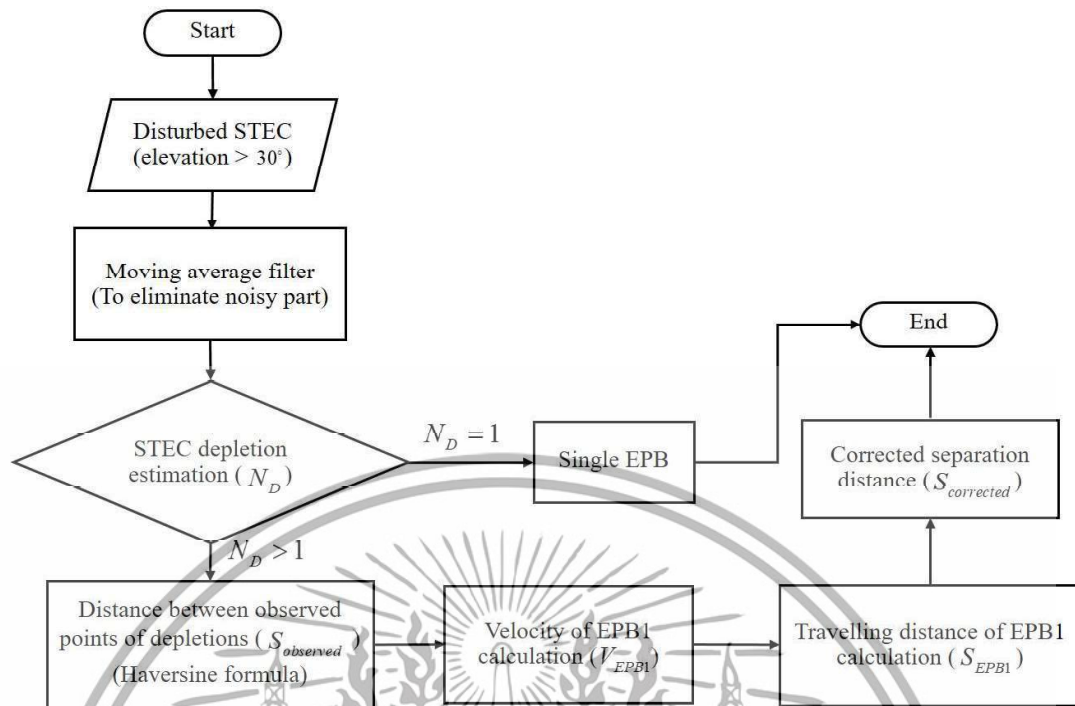
เมื่อ  $n$  คือช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่า ROTI มีหน่วยเป็นนาทีโดยในวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้  $n = 5$  นาที [59] ในการคำนวณค่า ROTI โดยค่า ROTI ที่ถูกคำนวณได้จากดาวเทียมแต่ละดวงในวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะถูกนำมาวิเคราะห์จำนวนลูกของการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อไป

### 3.3 วิธีประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ที่นำเสนอ

การประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ มีขั้นตอนตามผังงาน (Flowchart) ดังแสดงใน

รูปที่ 3.2 โดยอาศัยข้อมูล STEC ของดาวเทียมแต่ละดวงที่สถานีอ้างอิง KMIT และ STFD รับข้อมูลได้ โดยวิเคราะห์จากค่า STEC ที่มีค่ามุมเงย (Elevation cut-off) มากกว่า 30 องศา ( $\theta > 30^\circ$ ) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการสะท้อนหลายทิศทาง (Multipath) ถัดมาจึงวิเคราะห์ข้อมูล STEC จากดาวเทียมดวงที่ได้รับความผิดปกติจากพลาสมาบับเบิลโดยการคำนวณค่า ROTI ของดาวเทียมทีละ 1 ดวง หลังจากนั้นนำข้อมูลของค่า STEC ที่เกิดความผิดปกติ ผ่านตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบกึ่งกลาง (Centered moving average filter) เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน หลังจากนั้นจึงตรวจจับจำนวนพลาสมาบับเบิล (Number of depletion,  $N_D$ ) จากข้อมูล STEC ที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน หากจำนวนพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้มีมากกว่า 1 ลูกจึงทำการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลต่อไป ตัวอย่างเช่น เมื่อคำนวณค่า STEC และ ROTI ของดาวเทียมดวงที่  $i$  แล้ว พบว่าดาวเทียมดวงที่  $i$  ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจึงทำการวิเคราะห์จำนวนการเกิดหลุมของค่า STEC หากพบว่าจำนวนของพลาสมาบับเบิลที่ส่งผลกระทบต่อดาวเทียมดวงที่  $i$  คือ 1 ลูกหรือ  $N_D = 1$  ระบบจะไม่ประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลและทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียมดวงถัดไปที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล

เมื่อตรวจพบจำนวนหลุมของ STEC ที่มีจำนวนมากกว่า 1 ลูกหรือ  $N_D > 1$  ระบบจะทำการประมาณค่าระยะห่างระหว่างจุดที่ตรวจจับหลุมของค่า STEC ได้ ( $S_{observed}$ ) โดยอาศัยการคำนวณระยะทางจากสมการฮาเวอร์ไซน์ ซึ่งจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป หลังจากนั้นจึงคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้ลูกแรก ( $V_{EPB1}$ ) [60] เพื่อนำค่าดังกล่าวไปประมาณเป็นค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้ต่อไป



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันแสดงการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล [61]

### 3.3.1 ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบกึ่งกลาง

ความผิดปกติของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลส่งผลให้ค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมดวงที่เคลื่อนที่ผ่านปรากฏการณ์ดังกล่าวมีความผันผวน [62] สำหรับค่า STEC ที่คำนวณได้ในวันที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลถูกนำมาวิเคราะห์ โดยค่าดังกล่าวถูกนำไปผ่านตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average filter) เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบกึ่งกลาง สำหรับค่า STEC ที่ผ่านตัวกรองแล้วสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.3)

$$STEC_t = \frac{1}{w} \sum_{i=-k}^k STEC_{t+i} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $STEC_t$  คือค่า STEC ที่ผ่านตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่  $w$  คือความกว้างของหน้าต่างตัวกรอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 15 นาที ( $w = 2k + 1$ ) และ  $t$  คือเวลาอ้างอิงมีหน่วยเป็นวินาที

### 3.3.2 สูตรคำนวณระยะห่างฮาเวอร์ไซน์

สูตรคำนวณระยะห่างฮาเวอร์ไซน์ (Haversine Formula) ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณระยะห่างระหว่างจุดสองจุดเหนือพื้นที่มีลักษณะเป็นทรงกลมหรือพื้นผิวโค้งเช่นผิวโลก โดยทราบละติจูดและลองจิจูดของจุดทั้งสองนั้นอยู่แล้ว เช่นการคำนวณระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่อยู่ในชั้นบรรยากาศเหนือพื้นโลก ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถคำนวณได้จากระยะห่างระหว่างจุดตัดชั้นบรรยากาศหรือจุด IPP (Ionospheric pierce point) ใดๆ ยกตัวอย่างเช่นเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากการคำนวณค่า STEC จากสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแล้วพบว่าสามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลลูกแรก (*EPB1*) และพลาสมาบับเบิลลูกที่สอง (*EPB2*) ได้นั้น เราจะเริ่มการคำนวณระยะห่างระหว่าง *EPB1* และ *EPB2* จากตำแหน่งที่ตรวจจับพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูกนี้ได้ ซึ่งเรียกระยะทางนี้ว่า  $S_{observed}$

สำหรับการคำนวณจากระยะทางของจุด IPP ที่ห่างกันในแนวลองจิจูดของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิล โดยระยะทางระหว่างจุด IPP นี้คำนวณโดยอาศัยสมการฮาเวอร์ไซน์ [63] สำหรับการจำแนกจุด IPP ที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิล สามารถกระทำได้โดยวิเคราะห์จากจุดเวลาที่หลุมของค่า STEC เกิดขึ้นอย่างกระทันหัน ยกตัวอย่างเช่นที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นจึงคำนวณพิกัด (ค่าละติจูดและลองจิจูด) ณ จุด IPP นั้น

ในงานวิจัยนี้คำนวณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลโดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมที่เคลื่อนที่ในทิศทางเหนือ-ใต้เท่านั้น เนื่องจากโดยปกติพลาสมาบับเบิลจะเคลื่อนที่ในทิศตะวันตก-ตะวันออก เพื่อให้ระบบสามารถตรวจจับได้ว่าหลุมของค่า STEC ที่ตรวจจับได้เกิดจากพลาสมาบับเบิลคนละลูกกัน ซึ่งพารามิเตอร์  $S_{observed}$  ถูกคำนวณโดยมีหน่วยเป็นกิโลเมตร สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.4) เมื่อ  $R_E$  คือค่าเฉลี่ยของรัศมีโลกมีค่าประมาณ 6,371 กิโลเมตร และค่า  $C$  มีหน่วยเป็นกิโลเมตร ถูกกำหนดให้คำนวณดังสมการที่ (3.5) [63]

$$S_{observed} = R_E \times C \quad (3.4)$$

$$C = 2 \times \tan^{-1} 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) ค่า  $a$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.6)

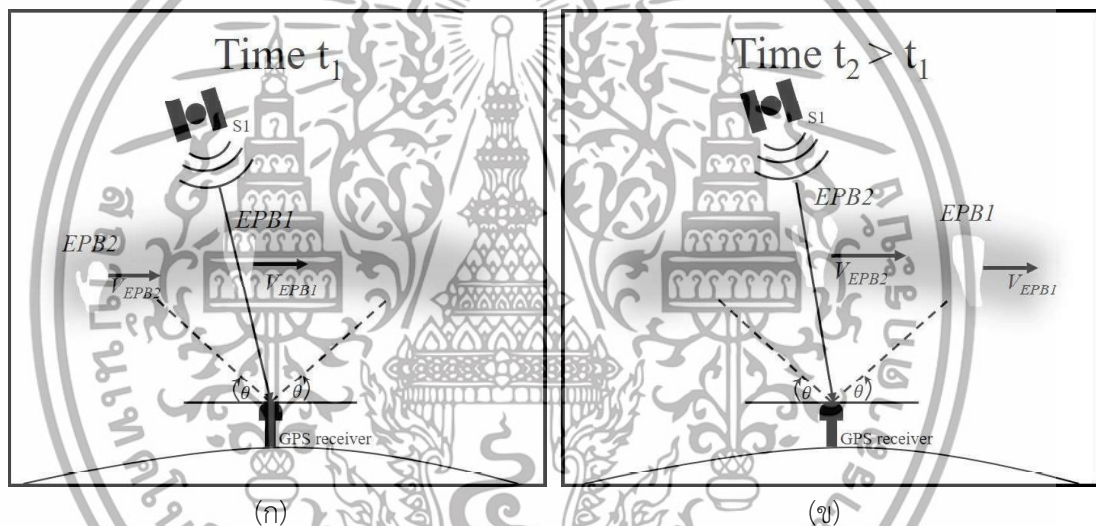
$$a = \sin^2\left(\frac{lat_1 - lat_2}{2}\right) + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \times \sin^2\left(\frac{lon_1 - lon_2}{2}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อค่า  $(lon_1, lat_1)$  และ  $(lon_2, lat_2)$  คือค่าพิกัดตำแหน่งของจุด IPP ณ เวลาที่ตรวจจับ *EPB1* และ *EPB2* ได้ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ตามลำดับ ในกรณีนี้ระยะห่างระหว่างจุด IPP ที่ถูกตรวจจับ

ได้ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  จะถูกเรียกว่าค่า  $S_{observed}$  ซึ่งถูกคำนวณได้จากค่าระยะห่างของจุด IPP ในแนวลองจิจูด (Longitudinal IPP) เท่านั้น

ในรูปที่ 3.3 แสดงจากมุมมองด้านข้าง (Side view) ของการตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจำนวน 2 ลูก จากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสด้วยเสาอากาศรับข้อมูลของดาวเทียมดวงที่  $S1$  โดยพลาสมาบับเบิลลูกที่หนึ่งหรือ  $EPB1$  ถูกตรวจจับได้ ณ เวลา  $t_1$  และถูกคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่หรือค่า  $V_{EPB1}$  (เมตร/วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) โดยค่าความเร็วของพลาสมาบับเบิลคำนวณจากการเคลื่อนที่ผ่านสถานีอ้างอิง KMIT และ STFD [60] เมื่อเวลาผ่านไป  $EPB2$  ถูกตรวจจับได้จากข้อมูลของดาวเทียมดวงเดียวกัน ณ เวลา  $t_2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) หลังจากนั้นจึงทำการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล 2 ลูกที่ตรวจจับได้ ใน

รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานอ้างอิง KMIT และ STFD



รูปที่ 3.3 การตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส

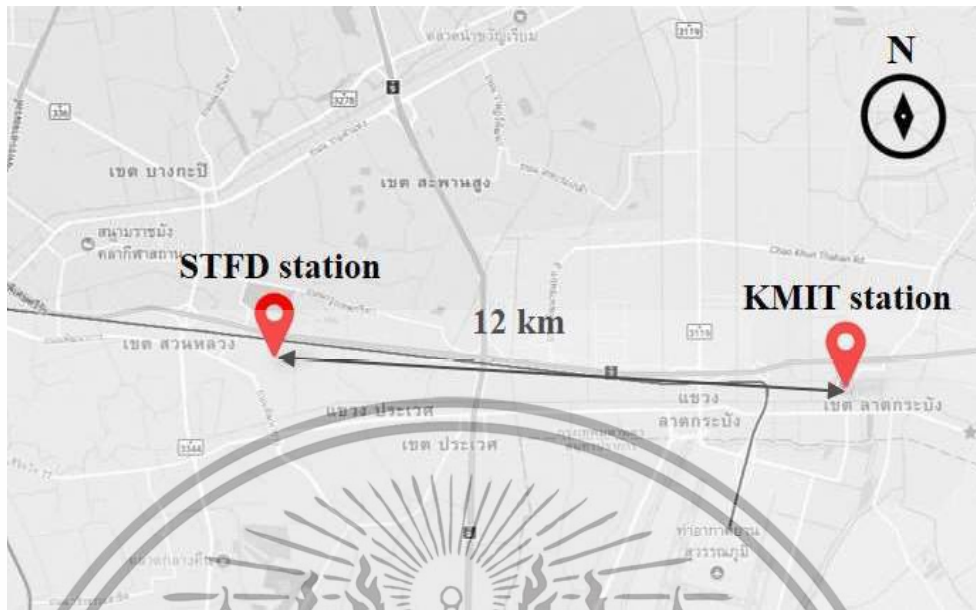
(ก) ตัวอย่างของ  $EPB1$  ถูกตรวจจับได้ ณ เวลา  $t_1$

(ข) ตัวอย่างของ  $EPB2$  ถูกตรวจจับได้ ณ เวลา  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ) [61]

ถัดมาในการคำนวณระยะทางในการเดินทางของ  $EPB1$  หรือ  $S_{EPB1}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.7) เมื่อ  $\Delta t$  คือระยะเวลาที่พลาสมาบับเบิลลูกที่หนึ่งใช้ในการเดินทางผ่านสถานีอ้างอิงหนึ่ง ไปยังอีกสถานีหนึ่ง ( $\Delta t = t_1 - t_2$ ) สุดท้ายนี้สามารถคำนวณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลหรือ  $S_{corrected}$  ได้ดังสมการที่ (3.8) โดยค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่คำนวณได้มีหน่วยเป็นกิโลเมตร

$$S_{EPB1} = V_{EPB1} \times \Delta t \quad (3.7)$$

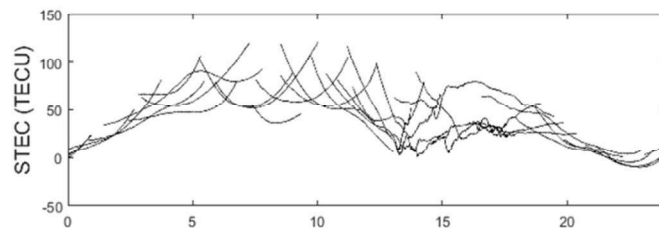
$$S_{corrected} = S_{EPB1} - S_{observed} \quad (3.8)$$



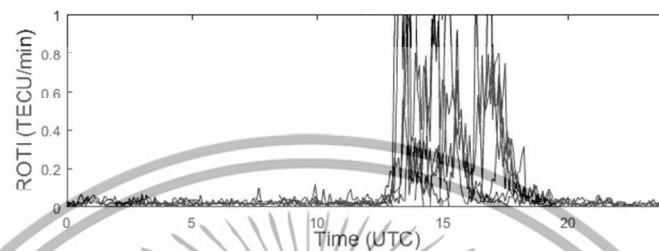
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานอ้างอิง KMIT และ STFD [61]

### 3.4 ผลการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้

ในหัวข้อนี้แสดงผลการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลจากข้อมูลจีเอ็นเอสเอส ในวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี ค.ศ. 2015 โดยรูปที่ 3.5 (ก) แสดงค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมจีพีเอสทุกดวงที่สถานี KMIT รับสัญญาณได้ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 และรูปที่ 3.5 (ข) แสดงค่า ROTI ที่คำนวณจากค่า STEC ของดาวเทียมแต่ละดวงในวันเดียวกัน มีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล (UTC) ซึ่งมีค่าช้ากว่าเวลาไทย (LT) 7 ชั่วโมง ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าว ตั้งแต่ 13.00 – 18.00 UTC หรือตรงกับ 20.00 – 01.00 ตามเวลาท้องถิ่นของประเทศไทย เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลส่งผลให้ค่าอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศ เกิดความผันผวนอย่างชัดเจน และเมื่อคำนวณค่า ROTI พบว่าค่า ROTI ในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าสูงกว่าช่วงเวลาอื่นๆ



(ก)



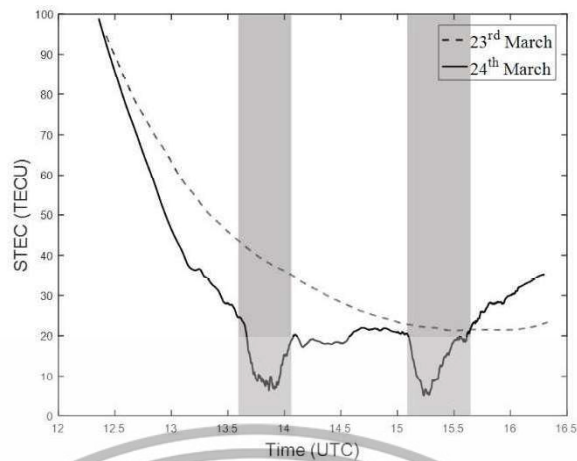
(ข)

### รูปที่ 3.5 ค่า STEC และ ROTI จากสถานี KMIT

ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 โดยแต่ละเส้นแสดงถึงข้อมูลที่มาจาดาวเทียมแต่ละดวง [61]

จากรูปที่ 3.5 พบว่ามีดาวเทียม 10 ดวง ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลในช่วงเวลาดังกล่าว ได้แก่ดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 1, 4, 6, 7, 10, 11, 17, 20, 28 และ 30 ซึ่งเป็นดาวเทียมที่มีมุมเงยมากกว่า 30 องศา เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของสัญญาณรบกวนและการสะท้อนหลายทิศทาง ถัดมาในรูปที่ 3.6 แสดงค่าตัวอย่างของค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมดวงที่ 30 โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล ในวันที่ 23 และ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 เพื่อเปรียบเทียบค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมดวงเดียวกัน ในวันที่ไม่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลนั้นคือวันที่ 23 มีนาคม และวันที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลคือวันที่ 24 มีนาคม โดยพื้นที่แรเงาสีเทาในรูปดังกล่าวแสดงถึงช่วงระยะเวลาที่สัญญาณดาวเทียมส่งข้อมูลผ่านหลุมของค่า STEC ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015

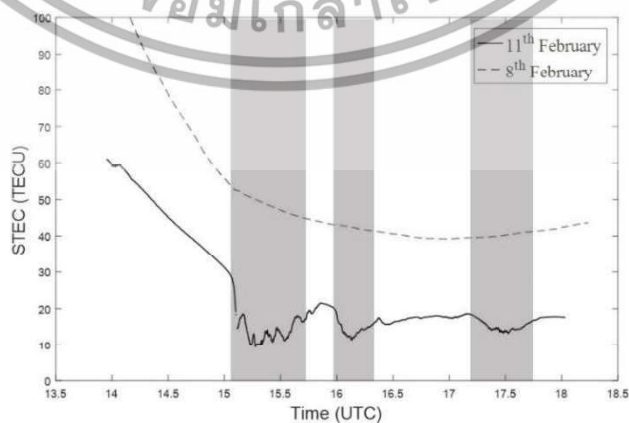
จากรูปที่ 3.6 เห็นได้ชัดว่าค่า STEC ที่คำนวณจากดาวเทียมดวงที่ 30 ในวันที่ 23 มีนาคม ค.ศ. 2015 ดังแสดงเป็นเส้นประ มีค่าเรียบกว่าค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมดวงเดียวกันในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 ดังแสดงเป็นเส้นทึบ ซึ่งการลดลงอย่างรวดเร็วของค่า STEC เกิดขึ้นอย่างชัดเจน 2 ครั้ง ที่เวลาประมาณ 13.35 – 14.05 UTC และ 15.10 – 15.40 UTC ตามลำดับ สามารถเห็นได้ชัดเจนในพื้นที่สีเหลี่ยมสีเทาที่แรเงาในรูปดังกล่าว



รูปที่ 3.6 ค่า STEC ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30

ในวันที่ 23 มีนาคม (เส้นประ) และวันที่ 24 มีนาคม (เส้นทึบ) ค.ศ. 2015 จากสถานี KMIT [61]

นอกเหนือไปจากการตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้สองลูก สามารถแสดงตัวอย่างของการตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 3 ลูกดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากรูปดังกล่าวได้แสดงการเปรียบเทียบค่า STEC ที่คำนวณได้จากข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 7 ในวันที่ 8 กุมภาพันธ์ (เส้นประ) และวันที่ 11 กุมภาพันธ์ (เส้นทึบ) ค.ศ. 2015 ที่สถานี KMIT รับสัญญาณได้ โดยพื้นที่แรเงาสีเทาแสดงถึงหลุมของค่า STEC ในวันที่ 11 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2015 มีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล ซึ่งค่า STEC ที่ถูกแสดงในเส้นประ คือค่า STEC ที่คำนวณได้ในวันที่ดาวเทียมส่งข้อมูลผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ปกติ หรือไม่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล และเส้นทึบแสดงค่า STEC จากดาวเทียมดวงเดียวกันที่คำนวณได้ในวันที่ดาวเทียมส่งข้อมูลผ่านช่วงที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากรูปดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นหลุมของค่า STEC อย่างชัดเจนในช่วงเวลา 15.05 – 15.50 และ 16.00 – 16.25 และ 17.20 – 17.45 UTC ตามลำดับ โดยถูกแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในพื้นที่สี่เหลี่ยมสีเทาที่แรเงา



รูปที่ 3.7 ค่า STEC ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 7

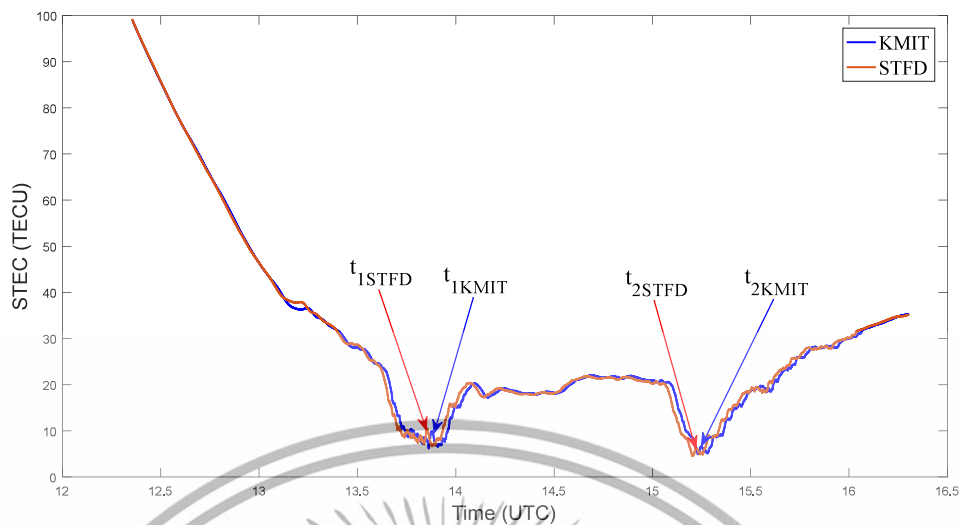
ในวันที่ 8 (เส้นประ) และวันที่ 11 กุมภาพันธ์ (เส้นทึบ) ค.ศ. 2015 จากสถานี KMIT [61]

ในรูปที่ 3.8 แสดงค่า STEC และค่า ROTI ที่คำนวณจากดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 ในวันที่ 23 และ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 เพื่อแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการตรวจจับการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจากการคำนวณค่า ROTI กล่าวคือค่า STEC ในวันที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล และวันที่ไม่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลได้ถูกนำมาแสดงคู่กันอีกครั้งพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่า ROTI ของดาวเทียมดวงที่ 30 จากทั้ง 2 วัน คือค่า STEC ในวันที่ 24 มีนาคม ในรูปที่ 3.8 (ก) แสดงเปรียบเทียบกับค่า ROTI ในวันเดียวกันในรูปที่ 3.8 (ข) และค่า STEC จากดาวเทียมดวงเดียวกัน ในวันที่ 23 มีนาคมในรูปที่ 3.8 (ค) แสดงเปรียบเทียบกับค่า ROTI ในรูปที่ 3.8 (ง) จากสถานี KMIT โดยในรูปที่ 3.8 นี้ค่า ROTI ที่คำนวณจาก STEC ในวันที่ 24 มีนาคม มีค่าความผันผวนสูงอย่างชัดเจนในช่วงเวลา 13.35 - 14.05 และ 15.10 - 15.40 UTC เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ROTI ที่คำนวณจากค่า STEC ในวันที่ 23 มีนาคม ค.ศ. 2015



รูปที่ 3.8 ค่า STEC และค่า ROTI จากดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 ในวันที่ 23 และ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 [61]

ถัดมาในการแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิล และการคำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของ EPB1 วิเคราะห์ได้จากค่า STEC ของดาวเทียมดวงเดียวกันที่สถานี STFD และ KMIT รับผิดชอบในรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 จากสถานี KMIT (น้ำเงิน) และสถานี STFD (แดง) ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015

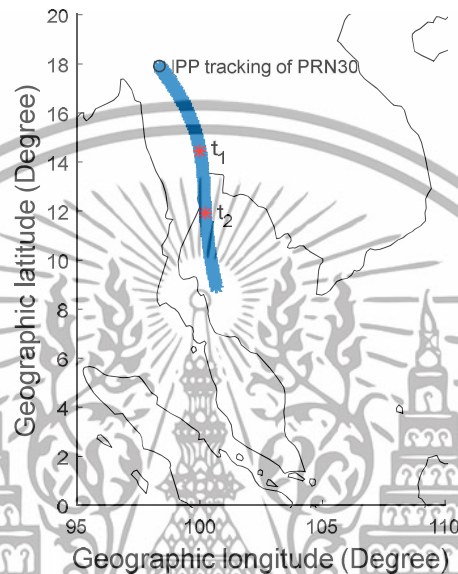


รูปที่ 3.9 ค่า STEC จากสถานี KMIT (น้ำเงิน) และสถานี STFD (แดง) ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30 ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 [61]

จากรูปที่ 3.9 แสดงค่า STEC ที่คำนวณได้จากดาวเทียมดวงที่ 30 โดยเส้นสีน้ำเงินคำนวณจากสถานี KMIT และสีแดงคำนวณจากสถานี STFD มีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล จากลูกศรในรูปชี้ไปที่ตัวอย่างบริเวณ ณ ตำแหน่งเวลา  $t_{1STFD}$  และ  $t_{1KMIT}$  ซึ่งเป็นตัวอย่างของตำแหน่งเวลาที่หลุมของค่า STEC ที่หนึ่ง หรือ EPB1 ถูกตรวจจับได้จากสถานี STFD และ KMIT ที่เวลา  $t_{1STFD}$  และ  $t_{1KMIT}$  ตามลำดับ สำหรับตำแหน่งเวลา  $t_{2STFD}$  และ  $t_{2KMIT}$  คือตำแหน่งเวลาที่หลุมของค่า STEC ที่สอง หรือ EPB2 ถูกตรวจจับได้โดยสถานี STFD และ KMIT ตามลำดับ โดยจากรูปดังกล่าวสามารถสังเกตได้ว่าสถานี STFD ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของสถานี KMIT ตรวจจับหลุมของค่า STEC ได้ก่อนสถานี KMIT โดยสังเกตได้จากค่าตำแหน่งเวลา  $t_{1STFD}$  ตรวจจับพลาสมาบับเบิลลูกที่หนึ่งได้ก่อนตำแหน่งเวลา  $t_{1KMIT}$  และในเวลาต่อมา ที่ตำแหน่งเวลา  $t_{2STFD}$  ตรวจจับพลาสมาบับเบิลลูกที่สองได้ก่อน  $t_{2KMIT}$  เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้เคลื่อนที่ในแนวตะวันออก - ตะวันตก ดังนั้นสถานี STFD ซึ่งอยู่ในทิศตะวันตกของสถานี KMIT จึงตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ก่อนดังแสดงในรูปที่ 3.9

ในการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้ ถูกอธิบายจากการคำนวณเส้นทางการเดินทางของดาวเทียม ร่วมกับช่วงเวลาที่ระบบตรวจจับหลุมของค่า STEC ได้ โดยในรูปที่ 3.10 แสดงเส้นทางการเดินทางของดาวเทียมดวงที่ 30 (Satellite travelling trace) โดยการพล็อตจุด IPP ของสัญญาณดาวเทียมดวงดังกล่าวในแต่ละเวลาจนเกิดเป็นเส้นทางการเดินทางของดาวเทียม ณ ขณะที่สถานี KMIT รับสัญญาณจากดาวเทียมดวงที่ 30 ได้ โดยเส้นที่หนาสีน้ำเงินคือเส้นทางการเดินทางของดาวเทียมดวงที่ 30 แสดงบนแผนที่ประเทศไทยที่มีแกนนอนคือค่าลองจิจูด และแกนตั้งคือค่าละติจูดในทางภูมิศาสตร์ มีหน่วยเป็นดีกรี สำหรับวงกลมโปร่งสีดำในรูปที่ 3.10

แสดงจุดเริ่มต้นของจุด IPP ของดาวเทียมดวงที่ 30 จะเห็นว่าจุด IPP ของดาวเทียมเดินทางจากทิศเหนือลงไปยังทิศใต้ (Southward direction) และจุดดาวสีแดงบนเส้นทึบแสดงค่า  $t_{1KMIT}$  และ  $t_{2KMIT}$  ที่สถานี KMIT ตรวจจับหลุมของค่า STEC ได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเทียมดวงที่ 30 ค่าเวลา  $t_{1KMIT}$  และ  $t_{2KMIT}$  นี้มีค่าตรงกับวินาทีที่ 49,957 และ 55,019 ของวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 เส้นทางจุด IPP ของดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 30  
คำนวณจากสถานี KMIT (เส้นทึบสีน้ำเงิน) ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015  
โดยเครื่องหมายดาวสีแดงแสดงถึงตำแหน่งของ EPB  
ที่ตรวจจับได้ ณ เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ตามลำดับ [61]

ค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ประมาณค่าได้ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015 โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียมดวงอื่นๆ ที่ส่งข้อมูลผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้น แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งพบว่าดาวเทียมทั้งหมด 10 ดวงที่ส่งข้อมูลผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขณะเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลคือดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 1, 4, 6, 7, 10, 11, 17, 20, 28 และ 30 จากจำนวนดาวเทียม 10 ดวง ที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลนี้ มี 5 ดวงที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลจำนวนหนึ่งลูก กล่าวคือระบบตรวจจับหลุมของค่า STEC จำนวน 1 หลุม ( $N_D = 1$ ) โดยดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลหนึ่งลูกคือดาวเทียมดวงที่ 1, 7, 10, 11 และ 20 สำหรับดาวเทียมดวงที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูก หรือหลุมของค่า STEC ถูกตรวจจับได้ 2 หลุม ( $N_D = 2$ ) คือดาวเทียมดวงที่ 4, 6, 28 และ 30 ส่วนดาวเทียมดวงที่ 17 นั้นมีเส้นทางการเดินทางจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะยังไม่นำข้อมูลจากดาวเทียมดวงที่ 17 มาวิเคราะห์ค่าระยะห่าง

ระหว่างพลาสมาบับเบิล เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลซึ่งโดยปกติแล้วพลาสมาบับเบิลมักจะเคลื่อนที่ในแนวตะวันตก - ตะวันออก ในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียมดวงที่เคลื่อนที่ในแนวเหนือ - ใต้ เพื่อยืนยันได้ว่าระหว่างเส้นทางของดาวเทียมที่เคลื่อนที่จะได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลคนละลูกกัน จึงก่อให้เกิดหลุมของค่าขึ้นในเวลาที่แตกต่างกัน กล่าวคือทิศทางของจุด IPP ของดาวเทียมจะอยู่ในลักษณะทำมุมกับทิศทางของพลาสมาบับเบิลแบบกึ่งมุมฉาก (Semi-orthogonal)

สำหรับข้อมูลจากดาวเทียมที่ตรวจพบหลุมของค่า STEC มากกว่า 2 หลุม หรือ  $N_D > 2$  ผู้วิจัยต้องทำการตรวจสอบด้วยตนเองอีกครั้งจากการวิเคราะห์ค่า ROTI เพื่อยืนยันว่าหลุมของค่า STEC ที่ตรวจจับได้ เป็นผลมาจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลหลายลูก หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของค่า STEC จากพลาสมาบับเบิลหนึ่งลูก

ตารางที่ 3.1 ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ประมาณค่าได้ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2015

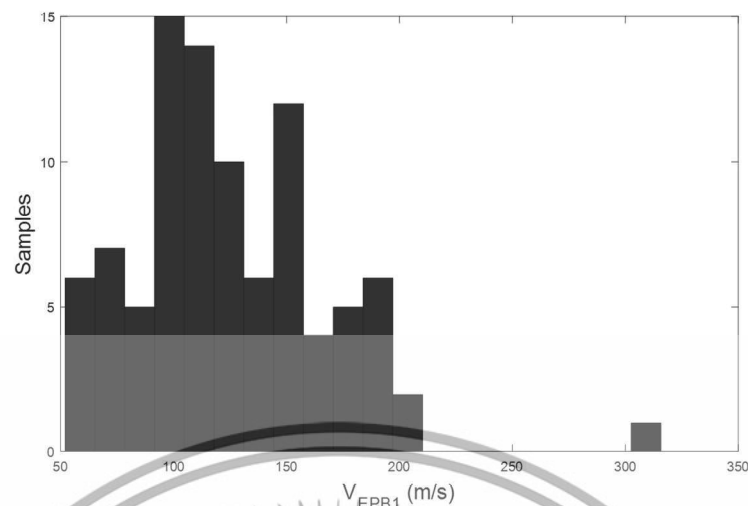
ลำดับที่	เลขดาวเทียม ที่ได้รับผลกระทบ	$N_D$ (ลูก)	$V_{EPB1}$ (เมตร/วินาที)	$S_{corrected}$ (กิโลเมตร)
1	1	1		
2	4	2	153.84	548.75
3	6	2	74.70	158.48
4	7	1		
5	10	1		
6	11	1		
7	17 (W-E)	-	-	-
8	20	1		
9	28	2	64.52	353.32
10	30	2	142.86	697.84

จากตารางที่ 3.1 สังเกตเห็นว่าค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิล  $V_{EPB1}$  ที่คำนวณได้จากดาวเทียมจีพีเอสแต่ละดวงมีค่าที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากตำแหน่งและทิศทางในการเคลื่อนที่ของจุด IPP ของดาวเทียมแต่ละดวงขณะที่ตรวจจับ EPB1 ได้ ดังนั้นในการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล ( $S_{corrected}$ ) จึงมีค่าแตกต่างกัน

ในรูปที่ 3.11 แสดงค่ามุมเงยของดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิ้ลจากข้อมูลในวันที่เกิดความผิดปกติ โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล จากรูปดังกล่าวสังเกตเห็นได้ว่าดาวเทียมจีพีเอสส่งสัญญาณผ่านช่วงที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิ้ลในช่วงเวลาตั้งแต่ 13.00 – 19.00 UTC แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิ้ลสามารถส่งผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมในมุมเงยที่หลากหลายตั้งแต่ 30 องศาจนถึง 87 องศา และสำหรับการคำนวณค่า  $V_{EPBI}$  ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยไม่ได้พิจารณามุมเอียงของพลาสมาบับเบิ้ล (EPB tilt angles) ซึ่งหากพิจารณามุมเอียงจากการวางตัวของพลาสมาบับเบิ้ลต้องใช้ข้อมูลเพิ่มเติมจากสองถึงสามสถานีตั้งงานวิจัยของ [64] และ [65] โดยแสดงการกระจายตัวของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิ้ลที่คำนวณจากดาวเทียมจีพีเอส ที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิ้ลในปี ค.ศ. 2015 ในรูปที่ 3.12

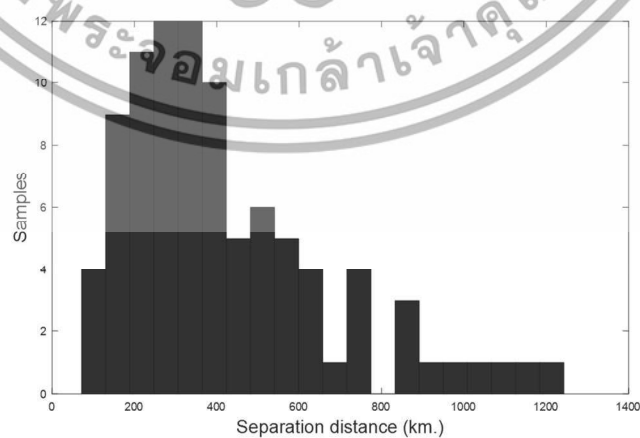


รูปที่ 3.11 ค่ามุมเงยของดาวเทียม ณ จุดที่ตรวจจับพลาสมาบับเบิ้ลได้จากสถานี KMIT ในปี ค.ศ. 2015 [61]



รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสติกแบบเบิ้ล  
คำนวณจากดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสติกแบบเบิ้ลที่ถูกตรวจจับได้ในปี ค.ศ. 2015 [61]

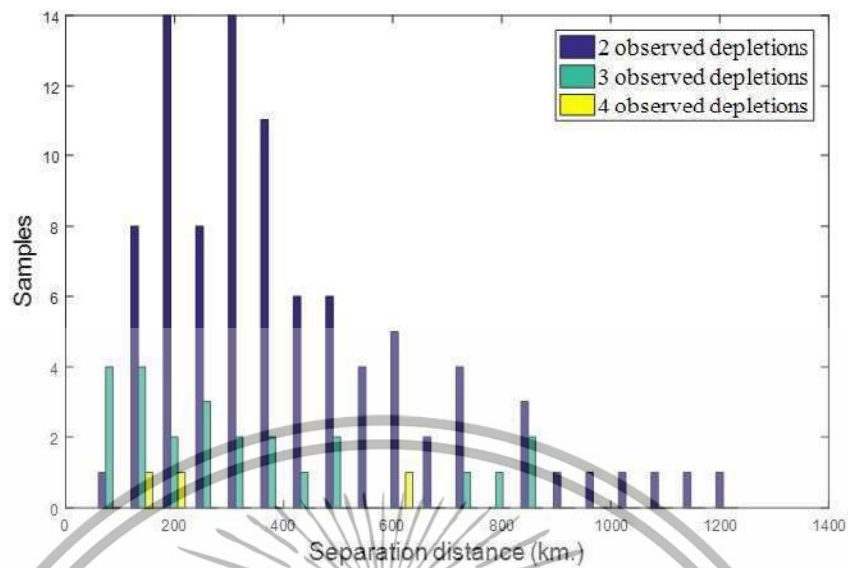
จากรูปที่ 3.12 ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสติกแบบเบิ้ลลูกที่หนึ่งที่ถูกตรวจจับได้ ( $V_{EPB1}$ ) ในหน่วยเมตร/วินาที ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่นี้คำนวณโดยอาศัยข้อมูลจีพีเอสจากสถานี KMIT และ STFD ในวันที่เกิดความผิดปกติขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี ค.ศ. 2015 จากการกระจายตัวของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของ EPB1 พบว่าค่า  $V_{EPB1}$  มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 50 – 200 เมตร/วินาที โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 125 เมตร/วินาที สำหรับค่าระยะห่างของพลาสติกแบบเบิ้ลที่ประมาณค่าได้จากวิธีที่น่าเสนอ ถูกแสดงในรูปที่ 3.13 โดยมีแกนนอนคือค่าระยะห่างระหว่างพลาสติกแบบเบิ้ลในหน่วยกิโลเมตร โดยอาศัยข้อมูลอ้างอิงจากสถานี KMIT เป็นหลัก ในปีค.ศ. 2015 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าระยะห่างระหว่างพลาสติกแบบเบิ้ลสองลูกที่ประมาณได้ มีค่าอยู่ในช่วง 100 – 1200 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างพลาสติกแบบเบิ้ลคือ 423.20 กิโลเมตร



รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสติกแบบเบิ้ล  
ในวันที่เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี ค.ศ. 2015 [61]

สำหรับกรณีที่ระบบสามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 3 ลูก ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.7 การคำนวณระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลลูกที่ 2 และ 3 จะถูกคำนวณหลังจากการตรวจสอบข้อมูลแล้วว่าเกิดหลุมของค่า STEC จากพลาสมาบับเบิล 3 ลูกจริง ซึ่งการตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้มากกว่า 2 ลูก ดังที่แสดงในผลการทดลองนั้นถือได้ว่าเป็นเรื่องที่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่นงานวิจัยของ [17] ที่นำเสนอเกี่ยวกับ large-scale wave structure (LSWS) ที่เกิดขึ้นที่ชั้นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Bottom-side of ionosphere) ซึ่งสามารถเชื่อมโยงได้กับปรากฏการณ์การเกิดพลาสมาบับเบิลขึ้นมากกว่าหนึ่งลูก

สำหรับในรูปที่ 3.14 แสดงค่าการกระจายตัวจากการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลในวันที่เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี 2015 โดยสีที่แตกต่างกันแสดงถึงจำนวนของหลุมของค่า STEC ที่ตรวจจับได้ และระยะห่างของพลาสมาบับเบิลแต่ละลูก ซึ่งกราฟแท่งสีน้ำเงินแสดงค่าการกระจายตัวของระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลลูกที่หนึ่งและลูกที่สอง ในกรณีที่ตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 2 ลูก กราฟแท่งสีเขียวแสดงค่าการกระจายตัวของระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลลูกที่สองและลูกที่สาม ในกรณีที่ตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 3 ลูก และกราฟแท่งสีเหลืองแสดงค่าการกระจายตัวของระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลลูกที่สามและลูกที่สี่ ในกรณีที่ตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 4 ลูก ซึ่งค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่งานวิจัยนี้ประมาณได้นั้น นอกจากเป็นข้อมูลเชิงสถิติของคุณลักษณะของความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกตรวจจับได้เหนือบริเวณประเทศไทย บริเวณใกล้เคียงกับสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิแล้ว ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวยังถูกนำมาใช้ในการจำลองการคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในระบบ GBAS เช่นงานวิจัยของ [19], [66] และ [67] ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้อาศัยการจำลองผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลต่อขอบเขตการป้องกันการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS แต่ยังไม่ได้นำพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ ในกรณีที่ระบบ GBAS ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลมากกว่า 1 ลูก เพื่อการจำลองที่มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยตัวอย่างผลการศึกษาเบื้องต้นของการจำลองผลกระทบจากค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่มีค่าแตกต่างกันต่อความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS จะถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 3.5



รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล ในวันที่เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี ค.ศ. 2015 [61]

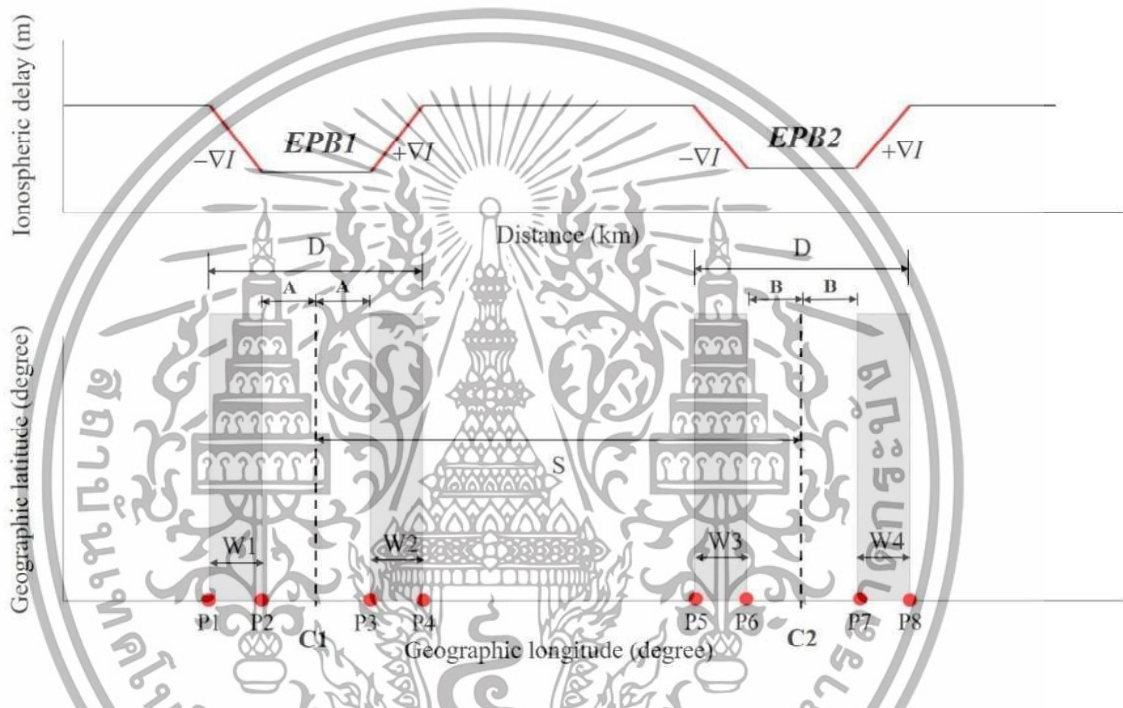
### 3.5 การจำลองผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS

ในหัวข้อนี้แสดงผลการศึกษาเบื้องต้นของผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS โดยในการจำลองกำหนดให้เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้นจำนวน 2 ลูก และวิเคราะห์ผลกระทบต่อการระบุตำแหน่งในแนวตั้ง (Vertical Position Error, VPE) ของระบบ GBAS โดยคำนวณข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสระบบจีพีเอสและระบบโกลนาส ซึ่งข้อมูลที่ถูกใช้ในการจำลองถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรก คือข้อมูลเกี่ยวกับความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ionospheric anomaly parameters) เช่น ค่าเกรเดียนต์หน่วงเวลา ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของความผิดปกติที่ตรวจจับได้หรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิล ค่าความกว้างของพลาสมาบับเบิล และค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อก่อนหน้า ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลส่วนแรกของการจำลอง

สำหรับข้อมูลการจำลองส่วนที่สอง คือข้อมูลเกี่ยวกับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสซึ่งประกอบด้วยข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมจีพีเอสและโกลนาส ซึ่งเป็นไฟล์ชนิด sp3 สามารถดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ IGS (International GNSS service) [68] สำหรับการออกแบบการจำลองเพื่อประเมินผลกระทบของพลาสมาบับเบิล 2 ลูกต่อค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS โดยผลการศึกษาเบื้องต้นนี้ใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019

### 3.5.1 การจำลองการเกิดค่าเกรเดียนต์หน่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากพลาสมาบับเบิลจำนวนสองลูก

คุณลักษณะของแบบจำลองค่าหน่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งโดยปกติแล้วค่า STEC ภายในพลาสมาบับเบิลจะมีค่าน้อยกว่าด้านนอก ส่งผลให้ค่าหน่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในพลาสมาบับเบิลมีค่าน้อยกว่าภายนอกพลาสมาบับเบิล



รูปที่ 3.15 เหตุการณ์จำลองค่าหน่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เมื่อได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูกที่วางตัวห่างกันในระยะ  $S$  กิโลเมตร [69]

จากรูปที่ 3.15 ได้จำลองสถานการณ์ที่ระบบตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลขึ้นสองลูกพร้อมกัน ที่บริเวณความสูง 350 กิโลเมตรเหนือจากพื้นโลก จากรูปสังเกตเห็นว่าพลาสมาบับเบิลแต่ละลูกก่อให้เกิดผนังของพลาสมาบับเบิล 2 ด้าน (EPB walls) ซึ่งแต่ละด้านของผนังพลาสมาบับเบิลก่อให้เกิดค่าเกรเดียนต์ขึ้น ( $\pm VI$ ) [70] ดังนั้นพลาสมาบับเบิลสองลูกจึงก่อให้เกิดผนังพลาสมาบับเบิลทั้งหมด 4 ด้าน หรือก่อให้เกิดค่าเกรเดียนต์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จำนวน 4 ค่า

ในการจำลองผลกระทบของพลาสมาบับเบิลสองลูกต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS จะพิจารณาจากตำแหน่งการวางตัวของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ร่วมกับตำแหน่งการวางตัวของผนังพลาสมาบับเบิลที่ก่อให้เกิดค่าเกรเดียนต์ ซึ่งตำแหน่งการวางตัวของพลาสมาบับเบิลและค่าเกรเดียนต์ที่ผนังของพลาสมาบับเบิล จากเหตุการณ์จำลองการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิล

จำนวนสองลูก ที่เกิดขึ้นตามแนวของเส้นสนามแม่เหล็กโลก กล่าวคือพลาสมาบับเบิลวางตัวในแนวเหนือ - ใต้ และเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันตก - ตะวันออก โดยในการศึกษานี้ไม่ได้จำลองในส่วนของความเอียงของพลาสมาบับเบิล

สำหรับการจำลองผลกระทบทำได้โดยกำหนดให้พลาสมาบับเบิลทั้ง 2 ลูกมีค่าความกว้าง (EPB width) เท่ากับ  $D$  กิโลเมตร พลาสมาบับเบิลหนึ่งลูก ประกอบด้วยผนัง 2 ด้าน ซึ่งผนังแต่ละด้านมีความกว้างของผนังมีค่าเท่ากับ  $W$  กิโลเมตร โดยจากรูปที่ 3.15 ความกว้างของผนังพลาสมาบับเบิลที่ 1 ถึง 4 ถูกแสดงด้วยค่า  $W1, W2, W3$  และ  $W4$  จากด้านซ้ายไปขวาตามลำดับ แสดงให้เห็นเป็นกรอบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสีเทา ในการจำลองนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้ค่า  $D$  มีค่าเท่ากับ  $2W < D < S$  กิโลเมตร โดยตั้งสมมติฐานว่าค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลถูกวัดจากจุดกึ่งกลางของ  $EPB1$  และ  $EPB2$  ซึ่งแทนค่าระยะห่างของพลาสมาบับเบิลด้วยพารามิเตอร์  $S$  มีหน่วยเป็นกิโลเมตร และจุดสีแดงที่ตำแหน่ง  $P1$  ถึง  $P8$  ในรูปที่ 3.15 แสดงถึงตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดของกล่องสี่เหลี่ยมสีเทา หรือแสดงตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการเกิดค่าเกรเดียนต์แต่ละค่า โดยมีหน่วยเป็นดีกรีลองจิจูด ซึ่งสามารถแสดงค่าตำแหน่งของแต่ละจุดที่ใช้ในการจำลองผลกระทบต่อระบบ GBAS ได้ดังสมการที่ (3.9)

$$\begin{aligned} P1 &= C1 - A - W, & P5 &= C2 - B - W, \\ P2 &= C1 - A, & P6 &= C2 - B, \\ P3 &= C1 + A, & P7 &= C2 + B, \\ P4 &= C1 + A + W, & P8 &= C2 + B + W \end{aligned} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) จุดตำแหน่งที่แสดงถึงจุดเริ่มต้นของการเกิดค่าเกรเดียนต์ที่ 1 ถึง 4 คือจุด  $P1, P3, P5$  และ  $P7$  และจุดตำแหน่งที่แสดงจุดสิ้นสุดของค่าเกรเดียนต์ที่ 1 ถึง 4 คือจุด  $P2, P4, P6$  และ  $P8$  ตามลำดับ ตำแหน่งกึ่งกลางของ  $EPB1$  และ  $EPB2$  ถูกแสดงในหน่วยดีกรีลองจิจูด ในที่นี้ถูกแทนด้วย  $C1$  และ  $C2$  โดยในการจำลองกำหนดให้ค่า  $C1$  เป็นตำแหน่งคงที่ ณ ตำแหน่งที่ 90 องศา ลองจิจูด ดังนั้นตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ  $EPB2$  หรือค่า  $C2$  จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูก ( $S$ ) โดยสามารถเขียนสมการแสดงค่าตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ  $EPB2$  ได้ดังสมการที่ (3.10)

$$C2 = C1 + S \quad (3.10)$$

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างตำแหน่งขอบของค่าเกรเดียนต์และจุดกึ่งกลางของพลาสมาบับเบิลมีค่าเท่ากันทั้งสองลูก กล่าวคือในการจำลองกำหนดให้  $A = B = \frac{D}{2} - W$  เมื่อ  $A$  และ  $B$  คือระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของพลาสมาบับเบิล ไปยังจุดขอบด้านในของแท่งสี่เหลี่ยมสีเทาของ  $EPB1$  และ  $EPB2$  ตามลำดับมีหน่วยเป็นกิโลเมตร ค่า  $D$  คือความกว้างของ

พลาสมาบับเบิลแต่ละลูก ซึ่งในการจำลองนี้ได้กำหนดให้พลาสมาบับเบิลทั้ง 2 ลูกมีความกว้างเท่ากัน ในหน่วยกิโลเมตร และค่า  $W$  คือความกว้างผนังของพลาสมาบับเบิลหรือความกว้างของค่าเกรเดียนต์ มีหน่วยเป็นกิโลเมตรเช่นกัน

ถัดมาในการวิเคราะห์จำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลสองลูกที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ถูกวิเคราะห์จากตำแหน่งของจุด IPP ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ณ เวลานั้นๆ เทียบกับบริเวณตำแหน่งที่เกิดค่าเกรเดียนต์ทั้ง 4 จุด (ตำแหน่งของกล่องสี่เหลี่ยมสีเทาในรูปที่ 3.15) หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS ต่อไป

### 3.5.2 การออกแบบการจำลองผลกระทบของระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS

ในการจำลองผลกระทบของพลาสมาบับเบิลสองลูก และการเกิดค่าเกรเดียนต์ช่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตลอดจนส่งผลไปถึงความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS ปัจจัยที่ใช้ในการจำลองถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรกคือค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และส่วนที่สองคือส่วนของพารามิเตอร์ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส สำหรับพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่นำมาเป็นปัจจัยนั้น ประกอบด้วยค่าเกรเดียนต์ช่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 500 มิลลิเมตร/กิโลเมตร ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิลถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 40 ถึง 250 เมตร/วินาที และค่าความกว้างของค่าเกรเดียนต์ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 25 กิโลเมตร ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวที่ถูกกล่าวถึงนี้เป็นพารามิเตอร์ในแบบจำลองความเสี่ยงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric threat model parameters) และเนื่องจากในบทนี้เป็น การจำลองผลกระทบของปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลสองลูกที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS จึงมีพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูกในการจำลองด้วย ซึ่งช่วงของค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลนี้ถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 1200 กิโลเมตร [61]

สำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในการจำลองนี้ ประกอบไปด้วยข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (GNSS ephemeris files) ในรูปแบบไฟล์ sp3 เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งของจุดที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอสตัดผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากดาวเทียมแต่ละดวงมายังสถานีฐานอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่ในพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรทางแม่เหล็ก คือสถานีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย (KMITL) โดยมีพิกัดภูมิศาสตร์ที่

13.7278°N, 100.7726°E ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองผลกระทบของพลาสมาบับเบิลต่อระบบดาวเทียมจีพีเอสและระบบโกลนาส

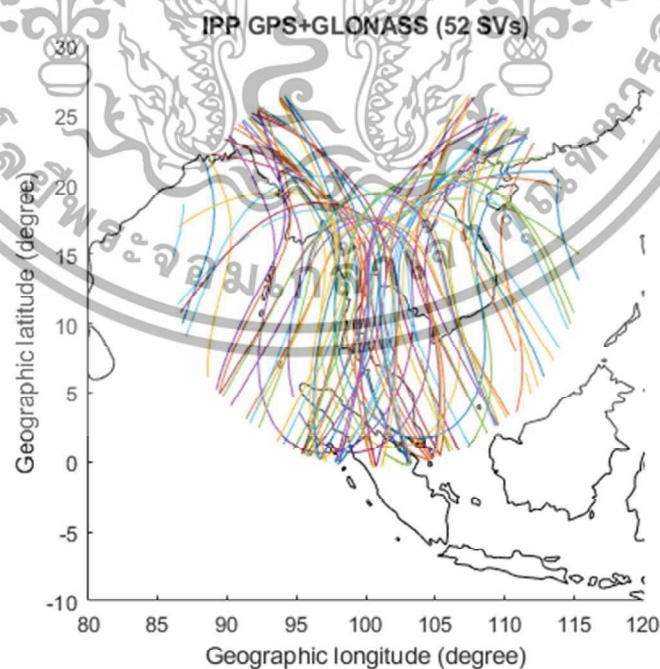
ถัดมาในการจำลองนี้กำหนดให้พลาสมาบับเบิลสองลูกก่อให้เกิดค่าเกรเดียนต์ 4 ค่า และส่งผลกระทบต่อจุด IPP ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส แบบสุ่มตามตำแหน่งการวางตัวของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากไฟล์ sp3 หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์จำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูกในแต่ละเวลา แล้วจึงคำนวณค่าความผิดพลาดเชิงระยะทาง (Ionospheric range error) และค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ GBAS เมื่อดาวเทียมได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลสองลูกที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยตำแหน่งของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับมาจากเว็บไซต์ของ IGS นั้น ให้ค่าตำแหน่งของดาวเทียมทุกๆ 15 นาที ดังนั้นจึงมีการใช้การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation) เพื่อประมาณค่าตำแหน่งของดาวเทียมทุกๆ 1 นาที สำหรับการประเมินผลกระทบของค่าเกรเดียนต์นี้ ใช้ข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียมจีพีเอสซึ่งมาดาวเทียมทั้งหมด 31 ดวงและระบบโกลนาสซึ่งมีดาวเทียม 21 ดวง ร่วมกัน โดยพิจารณาดาวเทียมที่มีค่ามุมเงยมากกว่า 5 องศา ( $\theta > 5^\circ$ ) ช่วงเวลาที่ใช้ในการจำลองคือ 12 ชั่วโมงในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกที่เวลา 19.00 – 6.46 ตามเวลาไทย (เข้าวันถัดไป) หรือ 12.00 – 23.46 ตามเวลาสากล ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลมักเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเขตละติจูดต่ำ ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกกำหนดเพื่อใช้ในการจำลอง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	ความหมาย
$\nabla I$	$\pm 500$ มม. /กม.	เกรเดียนต์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
$W$	25 - 250 กม.	ความกว้างของเกรเดียนต์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เพิ่มค่าครึ่งละ 25 กิโลเมตร ต่อรอบการวนซ้ำ)
$C1$	90 องศาองจุด	ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ EPB1
$S$	100 - 1200 กม.	ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล (เพิ่มค่าครึ่งละ 50 กิโลเมตร ต่อรอบการวนซ้ำ)

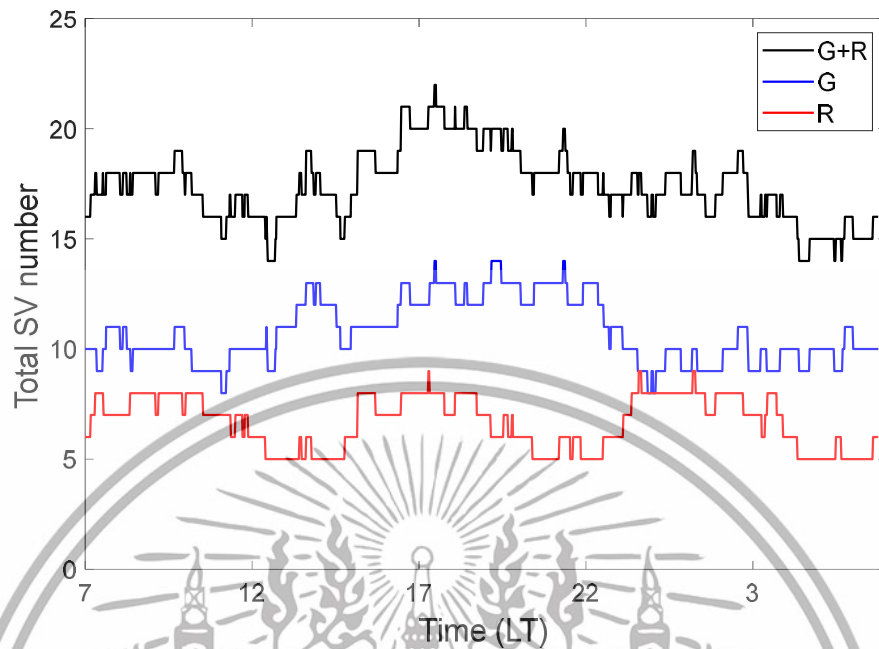
### 3.5.3 ผลการจำลองผลกระทบของค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิ้ลต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS

ในหัวข้อนี้แสดงผลการจำลองผลกระทบของค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิ้ลต่อค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS โดยในรูปที่ 3.16 แสดงเส้นทางของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสทั้งหมดที่สถานีฐานอ้างอิง KMIT รับสัญญาณได้ ประกอบไปด้วยระบบจีพีเอสและโกลนาสที่มีค่ามุมเงยมากกว่า 5 องศา ระหว่างช่วงเวลา 19.00 – 6.46 ตามเวลาประเทศไทย ในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019 แสดงบนแผนที่ประเทศไทยมีแกนนอนและแกนตั้งของภาพคือค่าลองจิจูดและละติจูดหน่วยเป็นดีกรี จากการจำลองได้กำหนดจุดวางตำแหน่งของพลาสมาบับเบิ้ลลูกที่หนึ่ง โดยให้มีจุดกึ่งกลางของ EPB1 ตามที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นหัวข้อคือ 90 องศาลองจิจูด หลังจากนั้นจึงวางตำแหน่งของพลาสมาบับเบิ้ลลูกที่สอง ที่มีจุดกึ่งกลางของ EPB2 ห่างจาก EPB1 โดยมีค่าตั้งแต่ 100 – 1200 กิโลเมตร โดยการจำลองนี้จะเพิ่มค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิ้ลครั้งละ 50 กิโลเมตรต่อรอบการวนซ้ำ หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์จำนวนดาวของเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิ้ลทั้งสองลูก และรูปที่ 3.17 แสดงจำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่สถานี KMITL รับสัญญาณได้ในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019 โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาท้องถิ่นตั้งแต่ 7.00 – 6.46 (ของวันถัดไป) หรือเทียบเท่ากับ 0.00 – 23.46 ตามเวลาสากล โดยเส้นสีแดงแทนจำนวนดาวเทียมระบบโกลนาส เส้นสีน้ำเงินแทนจำนวนดาวเทียมในระบบจีพีเอส และเส้นสีดำแทนจำนวนดาวเทียมทั้งสองระบบที่สถานี KMITL รับได้ในแต่ละเวลา



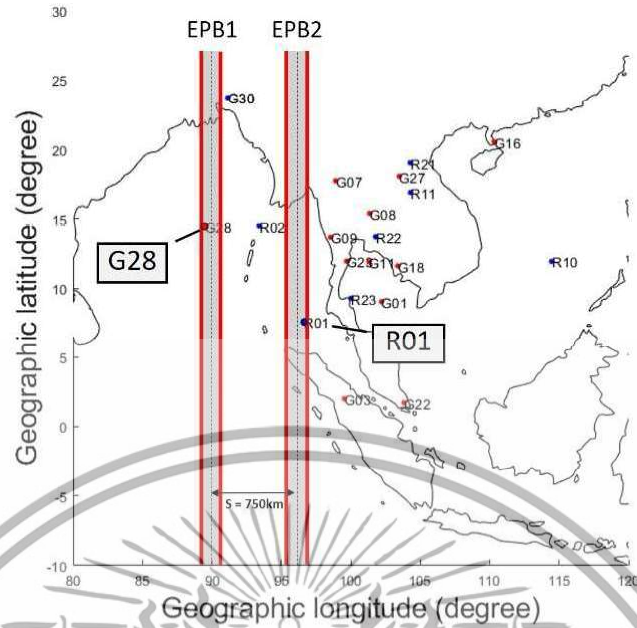
รูปที่ 3.16 เส้นทางของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสทั้งหมด 52 ดวง (ระบบจีพีเอสและโกลนาส)

จากข้อมูลในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019 ที่สถานี KMIT รับสัญญาณได้



รูปที่ 3.17 จำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่สถานี KMITL รับสัญญาณได้  
ในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019

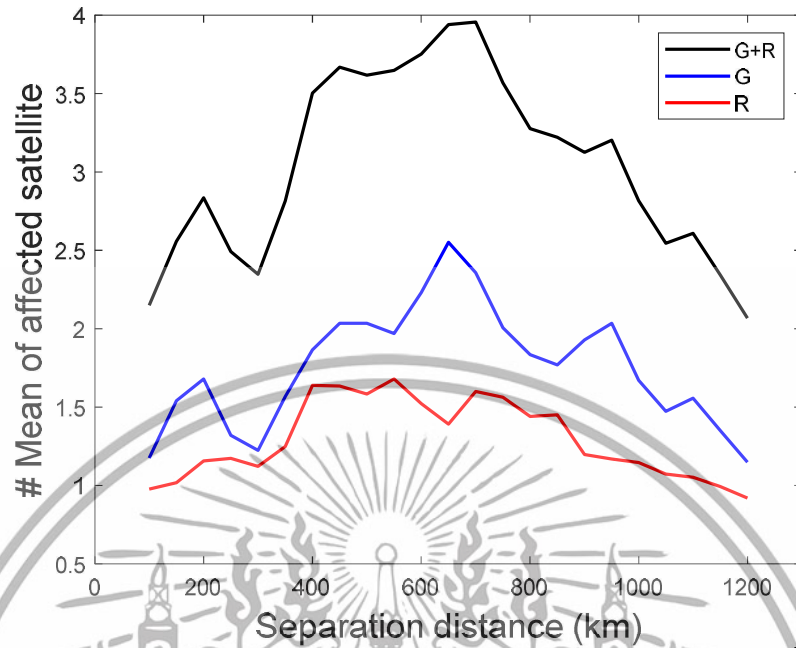
ตำแหน่งจุด IPP ของดาวเทียมแต่ละดวงถูกพิจารณาพร้อมกับพื้นที่ของผนังพลาสมาบับเบิล ณ เวลาหนึ่งๆ กล่าวคือสามารถนับจำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลได้ เมื่อจุด IPP ของดาวเทียมอยู่ในบริเวณของพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูก ณ ขณะส่งสัญญาณมายังเครื่องรับ หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ โดยสามารถแสดงภาพจำลองการกระจายตัวของจุด IPP ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ร่วมกับ *EPB1* และ *EPB2* ได้ดังรูปที่ 3.18 โดยจุดกึ่งกลางของ *EPB1* ถูกวางอยู่ที่ลองจิจูดที่ 90 องศา มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของ *EPB2* เท่ากับ 750 กิโลเมตร ( $S = 750$  กิโลเมตร) และมีดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจำนวน 2 ดวงได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูก คือดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 28 ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลลูกที่หนึ่ง และดาวเทียมโกลนาสดวงที่ 1 ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลลูกที่สอง ส่วนดาวเทียมดวงอื่นๆ ที่สถานีฐาน KMITL รับได้นั้น ไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลแต่อย่างใด



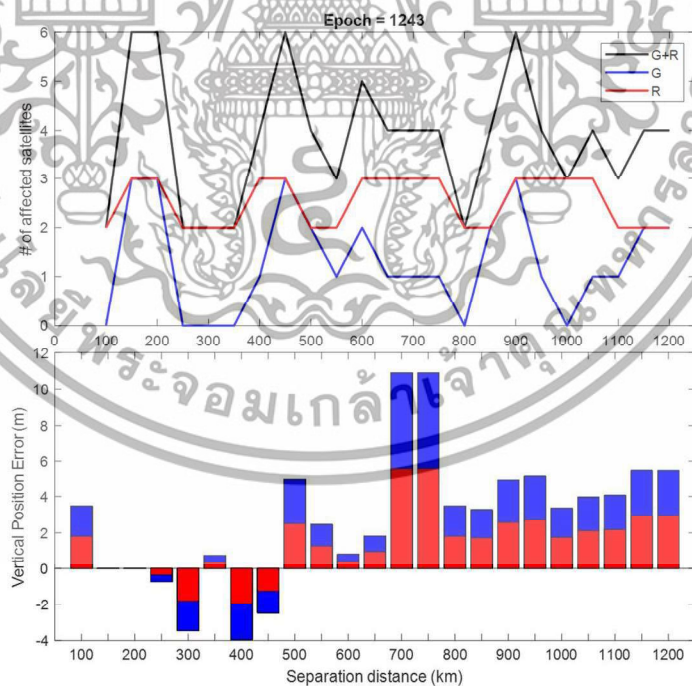
รูปที่ 3.18 ภาพจำลองการกระจายตัวของจุด IPP ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสร่วมกับการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลสองลูก ณ เวลาหนึ่ง ในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019

จากรูปที่ 3.18 แสดงเป็นภาพมุมมองจากด้านบน (Top view) สังเกตเห็นจุดสีแดงและสีน้ำเงิน ซึ่งแสดงถึงจุด IPP ของดาวเทียมระบบจีพีเอสโดยมีตัวอักษร “G” นำหน้าเลขดาวเทียมและดาวเทียมระบบโกลนาสโดยมีตัวอักษร “R” นำหน้าเลขดาวเทียม ตามลำดับ และแท่งสีเหลี่ยมสีเทา 2 แท่งในรูปแสดงถึงตำแหน่งของพลาสมาบับเบิลลูกที่หนึ่งและลูกที่สองที่วางตัวในแนวเหนือ - ใต้ โดย EPB1 และเส้นสีแดงในแนวตั้งทั้ง 4 เส้นแทนผนังของพลาสมาบับเบิลทั้งสองลูก

ในรูปที่ 3.19 แสดงค่าเฉลี่ยของจำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลสองลูกในแกนตั้ง และมีแกนนอนคือระยะห่างของพลาสมาบับเบิลตั้งแต่ 100 ถึง 1200 กิโลเมตร โดยเส้นสีแดงแทนจำนวนดาวเทียมระบบโกลนาส เส้นสีน้ำเงินแทนจำนวนดาวเทียมในระบบจีพีเอสและเส้นสีดำแทนจำนวนดาวเทียมทั้งสองระบบที่สถานี KMITL รับผิดชอบในแต่ละเวลา จากรูปดังกล่าวเห็นได้ว่าจำนวนของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูก ที่ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลมีค่าอยู่ในช่วง 300 ถึง 800 กิโลเมตร สำหรับค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS ที่คำนวณจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส จากตัวอย่างซึ่งคือผลการจำลองเบื้องต้นจากหนึ่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.20 โดยในรูปที่ 3.20 (บน) แสดงจำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูกเมื่อระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลมีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 1200 กิโลเมตร และรูปที่ 3.20 (ล่าง) แสดงค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS ณ นาทีที่ 1243 หรือเท่ากับเวลา 20.43 UTC ในวันที่ 18 มกราคม ค.ศ. 2019



รูปที่ 3.19 ค่าเฉลี่ยของจำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูก  
ที่มีระยะห่างตั้งแต่ 100 ถึง 1200 กิโลเมตร



รูปที่ 3.20 จำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลสองลูก  
และค่าความผิดพลาดการระบุตำแหน่งในแนวตั้ง ในนาฬิกาที่ 1243  
หรือเท่ากับเวลา 20.43 ตามเวลาสากล

สำหรับการจำลองผลกระทบของความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS นั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจำลอง โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับทิศทางของรันเวย์ (Runway direction) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของสถานีฐานของระบบ GBAS ที่สัมพันธ์กับค่าเทรซโฮลต์ของรันเวย์ หรือพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวางตัวของพลาสมาบับเบิล (EPBs tilt angles) ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ประโยชน์จากการเฝ้าสังเกตทั้งจากสถานีฐานและอากาศยาน เช่น วิธีการดั้งเดิม CCD (code-carrier divergence monitor) หรือการเฝ้าสังเกตค่าเกรเดียนต์ หนึ่งเวลาเชิงระยะทางก็มีความสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ GBAS บริเวณประเทศไทยเช่นกัน



## บทที่ 4

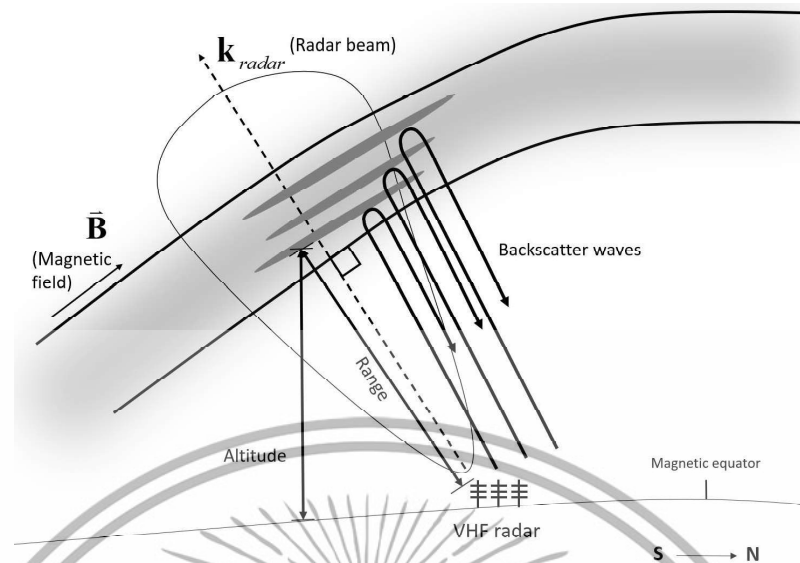
# การวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ ซินทิลเลชันในระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสบริเวณเขตละติจูดต่ำ โดยอาศัยเครื่องมือเรดาร์ VHF

### 4.1 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลโดยอาศัยเรดาร์ VHF

การตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากอุปกรณ์เรดาร์ VHF สามารถแสดงให้เห็นคุณลักษณะและรูปร่างของพลาสมาบับเบิลได้ชัดเจน โดยหลักการคือเสาอากาศจะปล่อยคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงมากหรือ VHF (Very high frequency) ซึ่งมักใช้ความถี่ในช่วง 30 – 50 เมกะเฮิรตซ์ ออกมาในทิศทางที่กำหนดเพื่อให้สะท้อนกับเส้นสนามแม่เหล็กโลก หลังจากนั้นวัดความเข้มข้นของพลังงานที่กระจัดกระจายกลับ (backscatter) มายังเครื่องรับสัญญาณ เนื่องจากพลาสมาบับเบิลเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และขยายตามแนวเส้นสนามแม่เหล็กโลก ดังนั้นทิศทางของลำคลื่นจากเรดาร์ (Radar beam) ที่ถูกส่งออกไปสะท้อนกับสนามแม่เหล็กจะต้องทำมุมฉากกัน เพื่อให้ได้รับพลังงานกระจายกลับ ดังสมการที่ (4.1)

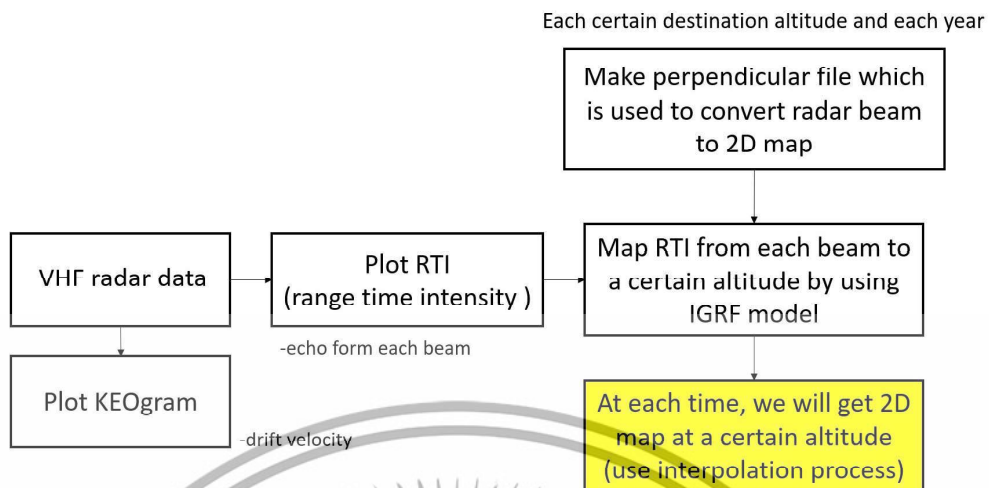
$$\mathbf{k}_{\text{radar}} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\mathbf{k}_{\text{radar}}$  คือเวกเตอร์ของลำคลื่นเรดาร์และ  $\mathbf{B}$  คือเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กโลก สัญญาณเรดาร์ที่รับได้จะต้องมีเฟสที่ตรงกันตามหลักการของ coherent backscatter radar สัญญาณที่สะท้อนกลับมาเมื่อตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้จะมีค่าพลังงานกระจายกลับสูง โดยค่าความยาวคลื่นของความผิดปกติที่สะท้อนกลับมาจะมีค่าเป็นสองเท่าของความยาวคลื่นของเรดาร์ VHF ( $2\lambda_{\text{irregularity}} = \lambda_{\text{radar}}$ ) คลื่นวิทยุที่ส่งมาจากเรดาร์จะสะท้อนกับความผิดปกติของชั้นบรรยากาศที่เกิดจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยค่าพลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ (Echoes power) สามารถบ่งชี้โดยตรงว่าสอดคล้องกับการเกิดพลาสมาบับเบิล ซึ่งจุดที่สะท้อนกลับมานั้นจะได้ค่าระยะทางการสะท้อน (Range) ในแนวลำคลื่นของเรดาร์ และความสูงจากจุดที่สะท้อนในแนวตั้ง (Altitude) โดยสามารถอธิบายหลักการสะท้อนของเรดาร์ VHF เมื่อตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ดังรูปที่ 4.1 เมื่อสังเกตคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมาร่วมกับค่าพลังงานสะท้อนกลับทำให้สามารถตรวจสอบ ขนาด ตำแหน่ง และความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิลได้



รูปที่ 4.1 การสะท้อนของคลื่นเรดาร์ VHF เมื่อตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลโดยอาศัยข้อมูลของเรดาร์ VHF จากสถานีที่ตั้งอยู่ที่ประเทศอินโดนีเซีย ( $0.20^{\circ}\text{S}$ ,  $100.32^{\circ}\text{E}$ ) ข้อมูลเรดาร์ VHF ที่รับได้ จะถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบสองมิติหรือ 2-D fan plot ซึ่งสามารถพล็อตได้จากค่าพลังงานการกระจายกลับที่แต่ละระยะทางของลำคลื่นเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาเมื่อตรวจพบพลาสมาบับเบิล สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลจากเรดาร์ VHF ได้ดังรูปที่ 4.2 โดยข้อมูลจากเรดาร์ที่แสดงในรูปแบบของ 2-D fan plot สามารถวิเคราะห์ขนาดของพลาสมาบับเบิล และเมื่อพล็อต 2-D fan plot ร่วมกับค่าจุด IPP ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ณ เวลาเดียวกัน ขณะที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจะสามารถเชื่อมโยงได้ว่า พลาสมาบับเบิลที่เกิดขึ้นนั้นก่อให้เกิดค่าซินทิลเลชันต่อดาวเทียมจำนวนกี่ดวง พร้อมทั้งวิเคราะห์ได้ว่าที่ความสูงใดในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดพลาสมาบับเบิลสอดคล้องกับการเกิดค่าซินทิลเลชัน ส่วนการพล็อตแบบ KEOgram สามารถวิเคราะห์ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิลได้



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลจากเรดาร์ VHF

#### 4.2 ปรากฏการณ์ซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นบริเวณเขตละติจูดต่ำ และเชื่อมโยงกับคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลโดยอาศัยเครื่องมือเรดาร์ VHF

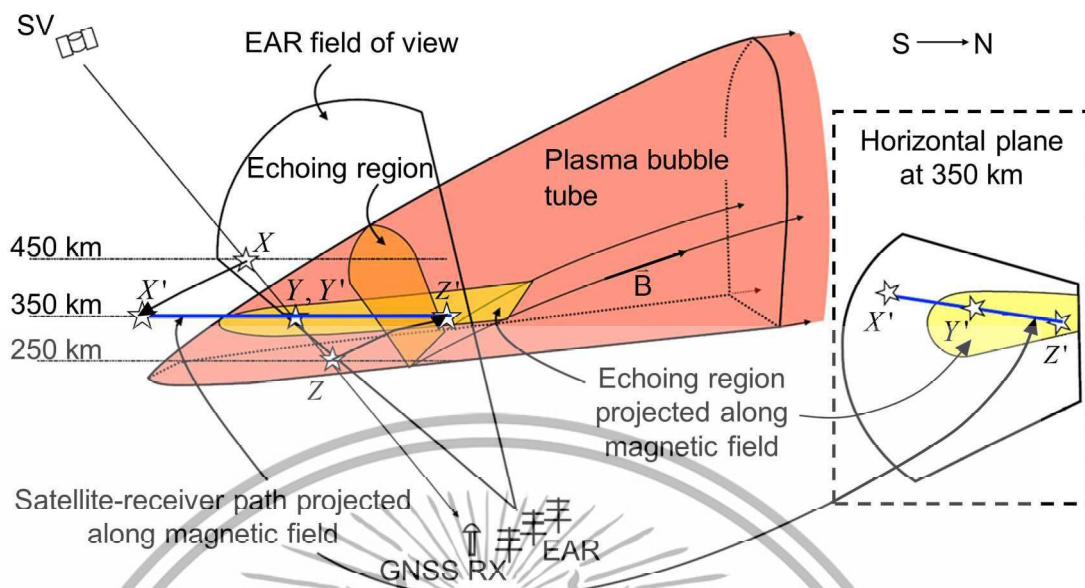
เมื่อสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีความแปรปรวนหรือเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล ส่งผลกระทบให้สัญญาณที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศขณะนั้นเกิดการเปลี่ยนแอมพลิจูดและเฟสอย่างกะทันหัน เรียกว่าปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน (Ionospheric scintillations) ในกรณีที่เลวร้ายที่สุดจะส่งผลทำให้เครื่องรับไม่สามารถรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสได้ในบางช่วงเวลา ซึ่งส่งผลให้การส่งข้อมูลผ่านชั้นบรรยากาศในขณะนั้นถูกนำไปประมวลผลได้ไม่แม่นยำนักเช่น การระบุตำแหน่งของผู้ใช้งาน หรือแม้แต่ส่งผลให้การสะท้อนของสัญญาณวิทยุใช้ไม่ได้ในบางความถี่ในช่วงเวลาที่ STEC ในชั้นบรรยากาศแปรปรวนไปเป็นต้น โดยปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน คือความผันผวนอย่างรวดเร็วของค่ามอดูเลชันและค่าแอมพลิจูดของคลื่นสัญญาณที่ถูกส่งผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆ กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกช่วงหลังพระอาทิตย์ตก [56]

โดยงานวิจัยก่อนหน้าสนใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่า ROTI กับการเกิดซินทิลเลชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในฮ่องกงซึ่งเป็นบริเวณละติจูดและลองจิจูดต่ำ [71] จากการพิจารณาสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ในกรณีที่ชั้นบรรยากาศมีการแปรปรวนสูงจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลและกรณีที่ชั้นบรรยากาศไม่มีปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ROTI และค่าดัชนี S4 ในวันที่มีความแปรปรวนมากจะมีค่าความสัมพันธ์ประมาณ 0.8 และในวันที่ไม่มีความแปรปรวนจะมีค่าความสัมพันธ์ประมาณ 0.6 ทำให้ [71] สรุปได้ว่าปรากฏการณ์ซินทิลเลชันและค่า ROTI มีความสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับงานวิจัยในหัวข้อนี้ค่าดัชนี S4 ถูกคำนวณโดยเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ถูกติดตั้งอยู่บริเวณเดียวกับสถานีเรดาร์ VHF ชื่อ EAR เพื่อวิเคราะห์ร่วมกับคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลที่ถูกตรวจจับได้ในวันและเวลาเดียวกัน โดยในแต่ละเวลาค่าจุด IPP ของดาวเทียมถูกแสดงร่วมกับค่าพลังงานสะท้อนกลับที่รับได้จากเรดาร์ EAR เพื่อวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 ที่สูงขึ้นเปรียบเทียบกับรูปร่างของพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ สำหรับพารามิเตอร์ของ EAR ที่นำมาวิเคราะห์ คือพารามิเตอร์ในชั้นเอฟ (F-layer) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถดาวน์โหลดข้อมูลดังกล่าวได้จากเว็บไซต์ของสถานี EAR โดยตรง [72] โดยค่าพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ชื่อ faifb16p8n1 และ faifb16p8n2 ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์ ประกอบไปด้วย 8 บิตเรดาร์ เมื่อนำข้อมูลของทั้งสองตัวมาพล็อตร่วมกัน จะได้ค่าพลังงานสะท้อนกลับที่เกิดจาก 16 บิตเรดาร์

ในการวิเคราะห์ดัชนี S4 ร่วมกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ ผู้วิจัยต้องวิเคราะห์ร่วมกับเส้นการส่งสัญญาณทางของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (GNSS satellite path) โดยการวิเคราะห์เส้นทางการส่งข้อมูลของสัญญาณนั้นทำได้โดยการคำนวณค่าจุดที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอสดวงดังกล่าวเดินทาง IPP ที่ความสูงแตกต่างกันของดาวเทียมแต่ละดวง ในงานวิจัยนี้คำนวณค่าจุด IPP ของดาวเทียมที่ความสูง 250 350 และ 450 กิโลเมตร โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียมที่มีความมุมเงยมากกว่า 30 องศา ( $\theta > 30^\circ$ )

ในรูปที่ 4.3 แสดงเส้นทางของสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในแนวเฉียงถูกฉายไปสู่แนวระนาบตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก เพื่อลดความซับซ้อนในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางการส่งสัญญาณของดาวเทียมและพลังงานสะท้อนกลับจากมุมมอง 3 มิติ ไปเป็นมุมมอง 2 มิติในแนวระนาบ กล่าวคือพลังงานสะท้อนกลับที่สะท้อนกลับมาเนื่องจากพลาสมาบับเบิลและเส้นทางของสัญญาณ ถูกฉายไปแนวระนาบตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกโดยอาศัยโมเดล IGRF (International Geomagnetic Reference Field) ในการฉาย จากรูปดังกล่าวแสดงเส้นทางของสัญญาณดาวเทียมในแนวเฉียงถูกฉายในแนวระนาบไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก โดยฉายทั้งระนาบไปที่ความสูง 350 กิโลเมตร

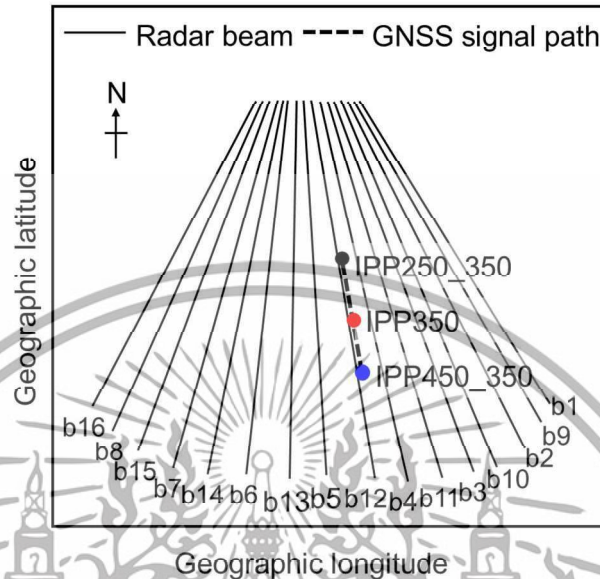


รูปที่ 4.3 เส้นทางของสัญญาณดาวเทียมในแนวเฉียงถูกฉายในแนวระนาบตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก [73]

จากรูปที่ 4.3 ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (Satellite vehicle, SV) ส่งสัญญาณมายังเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ถูกติดตั้งบนพื้นโลก โดยสัญญาณเดินทางผ่านเส้นสนามแม่เหล็กโลกและชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจากรูปสามารถสังเกตเห็นจุดที่สัญญาณ IPP ของที่สัญญาณตัดผ่านที่ความสูง 450 แทนด้วยจุด X ความสูง 350 แทนด้วยจุด Y และ 250 กิโลเมตร แทนด้วยจุด Z ตามลำดับ โดยแสดงเป็นรูปดาวในภาพดังกล่าว เพื่อฉายเส้นทางดาวเทียมให้อยู่ในแนวระนาบไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก จุด IPP ที่ความสูง 450 กิโลเมตร จะต้องฉายลงมาให้อยู่ที่ความสูง 350 กิโลเมตร ซึ่งแทนด้วยจุด X' และจุด IPP ที่ความสูง 250 กม. จะต้องฉายขึ้นไปอยู่ที่ความสูง 350 กิโลเมตร ซึ่งแทนด้วยจุด Z' ตามแนวของเส้นสนามแม่เหล็กโลก เมื่อมองจากมุมมองด้านบน (Top view) ตามแนวระนาบจะเห็นเส้นทางดาวเทียม (ถูกแสดงในเส้นสีน้ำเงินที่ความสูง 350 กิโลเมตร) และเรดาร์บีม ณ เวลาเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างค่าดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูงต่างๆ

เนื่องจากเส้นทางของสัญญาณดาวเทียมถูกอ้างอิงจากจุด IPP ที่ความสูงที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแสดงเส้นทางของสัญญาณดาวเทียมร่วมกับเรดาร์บีม ค่าพลังงานสะท้อนกลับจากแต่ละบีม ในจุดที่ใกล้เคียงกับจุดที่สัญญาณตัดผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ความสูง 250 350 และ 450 กิโลเมตรมากที่สุดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าดัชนี S4 ในทุกๆ เวลา โดยในรูปที่ รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างเส้นทางดาวเทียมที่อ้างอิงจากจุดที่สัญญาณจีเอ็นเอสเอส IPP ดังเส้นประในรูป ที่ความสูง 250 (จุดดำ หรือจุด Z' ในรูปที่ 4.3) 350 (จุดแดง หรือจุด X' ในรูปที่ 4.3) และ 450 (จุดน้ำเงิน หรือ

จุด Y' ในรูปที่ 4.3) กิโลเมตรตามลำดับ ร่วมกับเรดาร์ปริมแสดงดังในแนวระนาบที่ความสูงอ้างอิงในการฉายมีค่าเท่ากับ 350 กิโลเมตร โดยมีแกนนอนและแกนตั้งคือค่าลองจิจูดและละติจูด



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเส้นทางดาวเทียมและเรดาร์ปริมในแนวระนาบ [73]

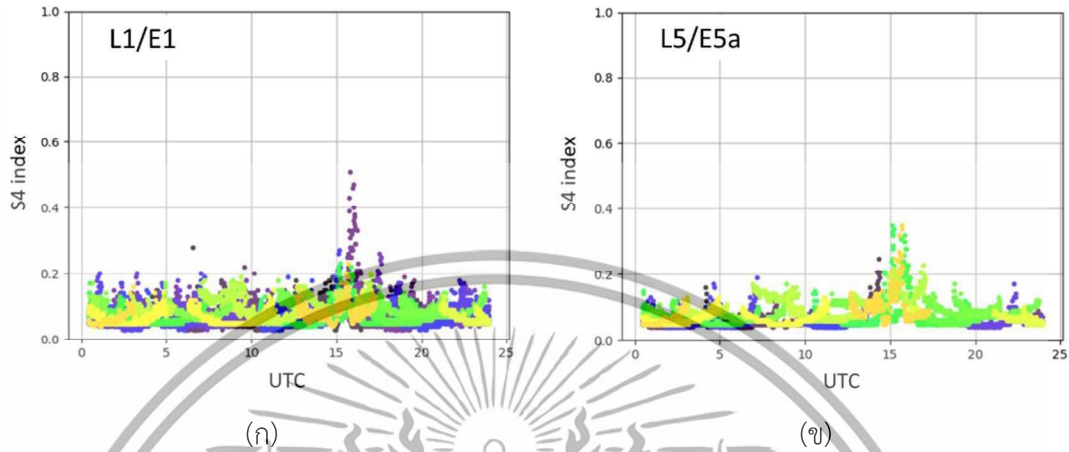
#### 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลและปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน

ในหัวข้อนี้แบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนตามการศึกษา ในส่วนแรกคือผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ ส่วนที่สองคือผลการวิเคราะห์คุณลักษณะและการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลโดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลจากเรดาร์ VHF ที่ถูกติดตั้งที่สถานี EAR และส่วนสุดท้าย คือผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 ร่วมกับค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR เพื่อวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี S4

##### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่

ในการศึกษานี้ค่าดัชนี S4 ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่รับได้จากดาวเทียมระบบจีพีเอสและระบบกาลิเลโอที่ความถี่แบนด์ L1/E1 และ L5/E5a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1575.42 เมกะเฮิรตซ์ และ 1176.45 เมกะเฮิรตซ์ ตามลำดับถูกนำมาวิเคราะห์ โดยรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) แสดงค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ตามลำดับ ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ.2019 โดยแกนตั้งคือค่าดัชนี S4 และแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล สีที่แตกต่างกันแสดงถึงข้อมูลที่แตกต่างกันจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแต่ละดวง จากรูปดังกล่าวค่าดัชนี S4 มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาประมาณ 14.30 - 17.30 UTC สามารถแสดงเลขดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่มีค่า

ดัชนี S4 สูงเนื่องจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยดาวเทียมจีพีเอสนั้นแสดงเลขของดาวเทียมมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 32 และดาวเทียมกาลิเลโอแสดงเลขของดาวเทียมมีค่าตั้งแต่ 71 ถึง 101



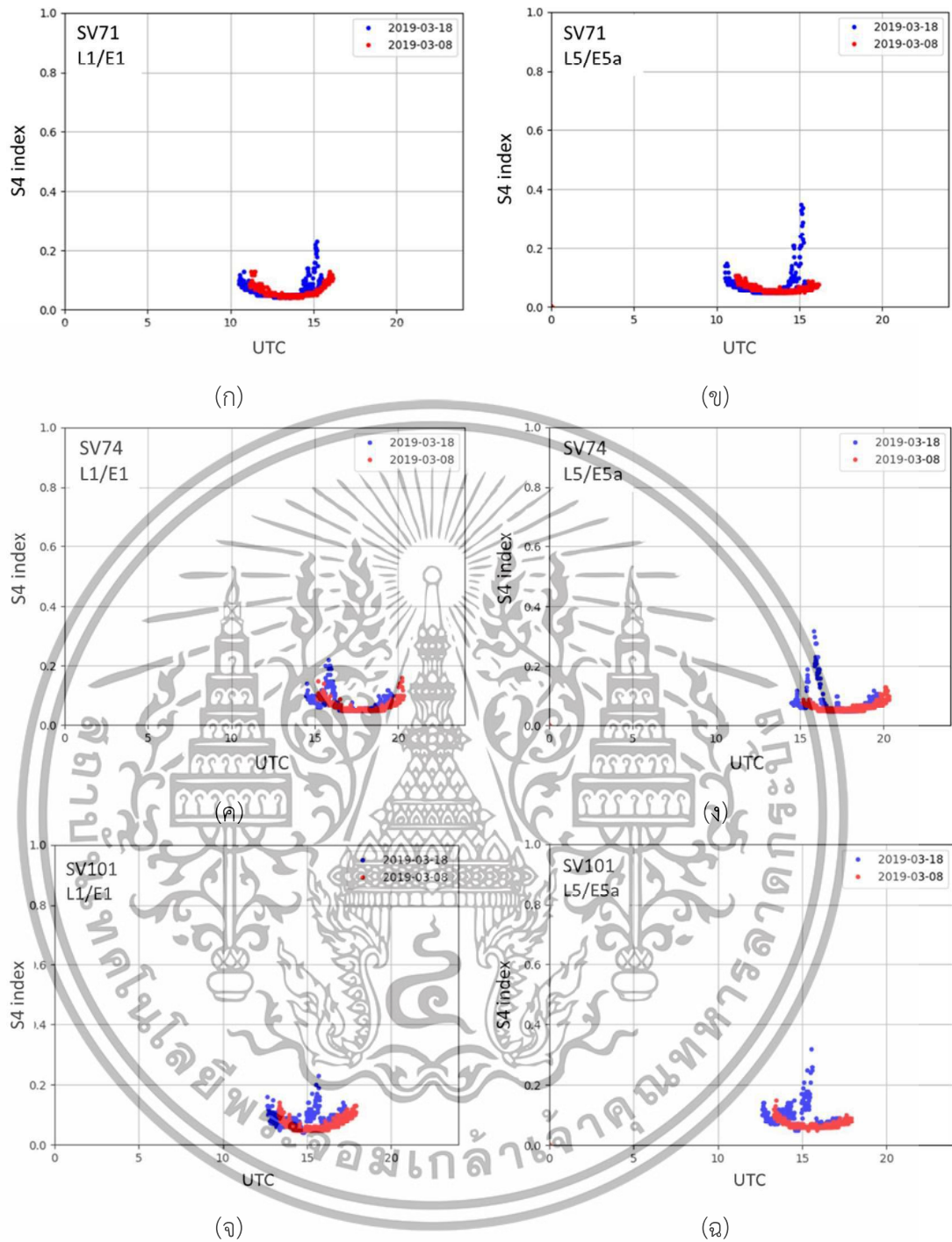
รูปที่ 4.5 ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอ  
(ก) ความถี่ L1/E1 (ข) ความถี่ L5/E5a ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019

ตารางที่ 4.1 ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่มีค่าดัชนี S4 สูง ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019

	GPS	Galileo
L1	SV2, SV5, SV13, SV19, SV28	SV71, SV74, SV89, SV101
L5	SV6	SV71, SV74, SV89, SV101

หมายเหตุ: SV คือ Satellite vehicle และดาวเทียมจีพีเอสดวงที่ 2 5 13 19 และ 28 ไม่ได้ส่งสัญญาณ L5 ดังนั้นจึงมีแต่ค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงดังกล่าวเฉพาะที่ความถี่ L1 เท่านั้น

ในการเลือกวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ส่งผลให้ค่าดัชนี S4 มีค่าสูงขึ้น จึงมีการเปรียบเทียบค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสดวงเดียวกัน ในวันที่เกิดความผิดปกติและวันที่ไม่เกิดความผิดปกติ เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของค่าดัชนี S4 โดยในรูปที่ 4.6 แสดงค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในวันที่ 8 มีนาคม ค.ศ. 2019 ซึ่งเกิดความผิดปกติ (สีน้ำเงิน) และวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 ซึ่งไม่เกิดความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (สีแดง) ของดาวเทียมดวงที่ 71 74 และ 101 จากความถี่ L1/E1 และ L5/E5a



รูปที่ 4.6 ค่าดัชนี S4 ในวันที่ 8 มีนาคม และวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019

ซึ่งเกิดความผิดปกติ (สีน้ำเงิน) และไม่เกิดความผิดปกติ (สีแดง) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์  
ของดาวเทียมดวงที่ 71 74 และ 101 จากความถี่ L1/E1 และ L5/E5a

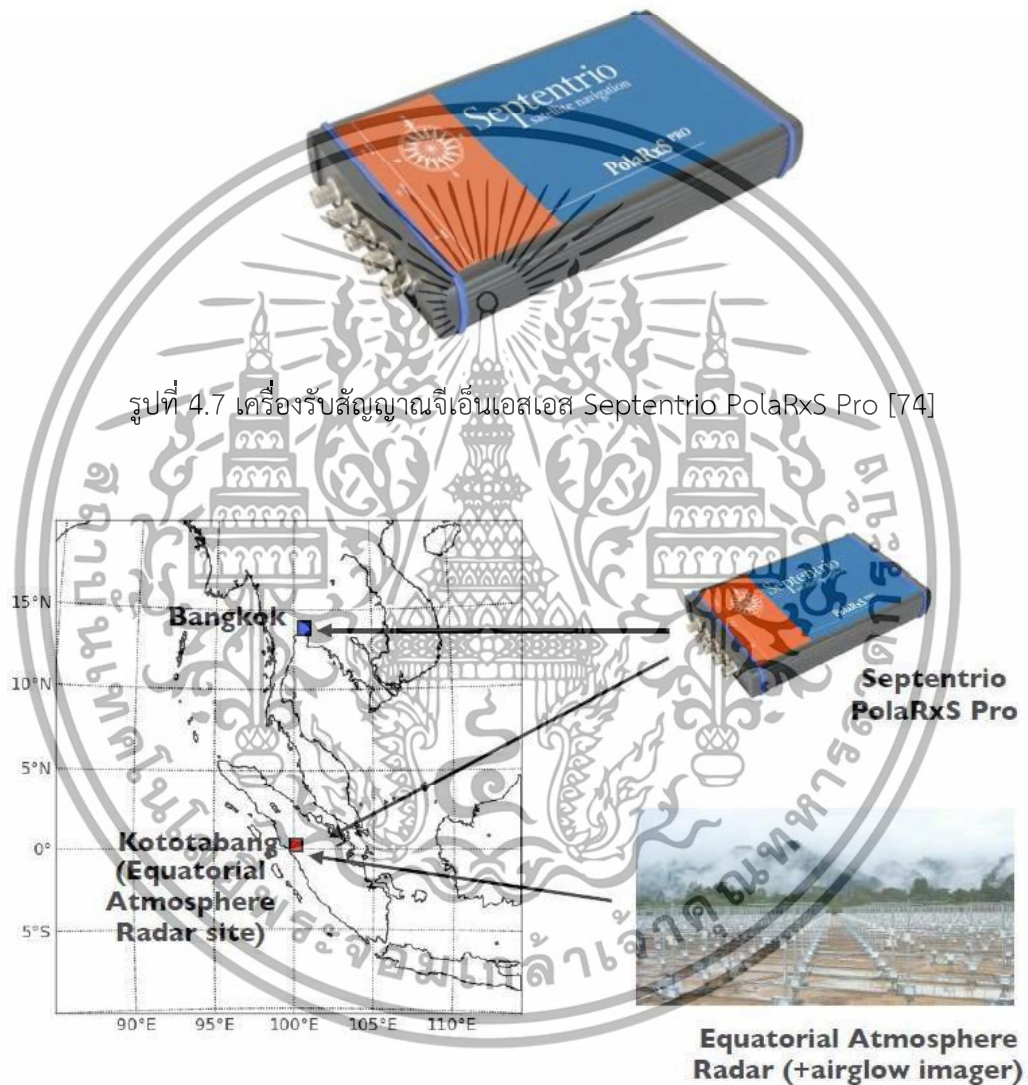
จากรูปที่ 4.6 แกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล แกนตั้งคือค่าดัชนี S4 โดยค่าดัชนี S4 ของ  
ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสดวงที่ 71 ถูกแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) สำหรับความถี่ L1/E1 และรูปที่ 4.6 (ข)  
สำหรับความถี่ L5/E5a ถัดมาค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงที่ 74 ถูกแสดงในรูปย่อย (ค) และ (ง)

สำหรับความถี่ L1/E1 และความถี่ L5/E5a ตามลำดับ และค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงที่ 101 ถูกแสดงในรูปที่ 4.6 (จ) สำหรับความถี่ L1/E1 และรูปที่ 4.6 (ฉ) สำหรับความถี่ L5/E5a เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสทั้งสองดวงจากทั้งสองความถี่ พบว่าที่เวลาประมาณ 15.00 UTC ค่าดัชนี S4 มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนในวันที่ 8 มีนาคม เมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 ที่ตลอดทั้งช่วงของค่าดัชนี S4 ไม่มีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่าดัชนี S4 ที่สูงขึ้นจากดาวเทียมดวงดังกล่าวทั้งในความถี่ L1/E1 และ L5/E5a นั้นไม่ได้เกิดจากดาวเทียมอยู่ในมุมเงยต่ำ หรือผลจากสัญญาณรบกวนและการสะท้อนหลายทิศทาง แต่เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล โดยในส่วนของผลการศึกษานี้ ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงที่ 74 เพื่ออธิบาย พบว่าค่าสูงสุดของดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.2 สำหรับความถี่ L1/E1 และ 0.31 สำหรับความถี่ L5/E5a ที่เวลา 15.39 UTC ซึ่งจะอธิบายความสัมพันธ์ของค่าดัชนี S4 และคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลจากรเรดาร์ EAR ในหัวข้อที่ 4.3.4

#### 4.3.2 ผลการตรวจพบปรากฏการณ์การรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุ บริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ

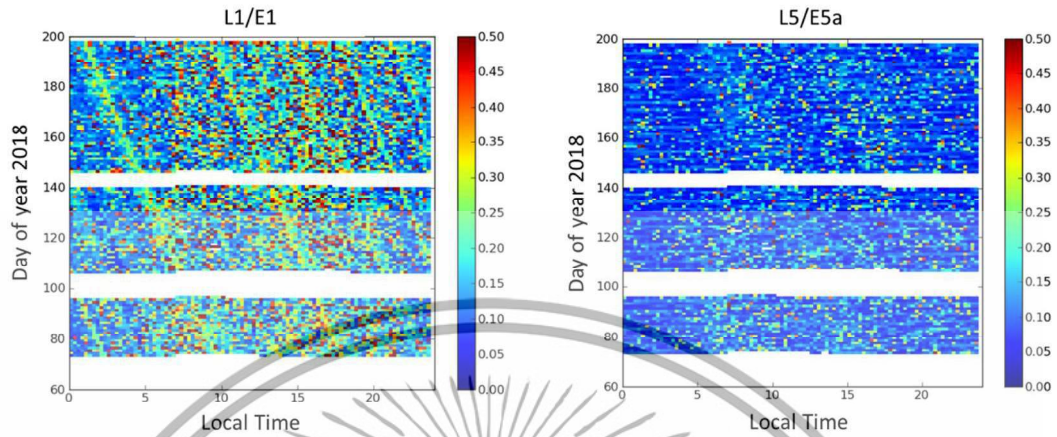
สำหรับหัวข้อนี้กล่าวถึงการแสดงค่าดัชนี S4 แบบรายฤดูที่ได้รับได้จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสระบบจีพีเอสร่วมกับระบบกาลิเลโอที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าดัชนีทิลเลชันสามารถรับได้จากเครื่องรับข้อมูลจีเอ็นเอสเอสชื่อ Septentrio รุ่น PolaRxS Pro โดยเครื่องสามารถรับข้อมูลดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสได้หลายระบบและหลายความถี่ (Multi-constellation multi-frequency GNSS receiver, MC/MF) หลังจากนั้นจึงทำการถอดข้อมูลค่าดัชนีทิลเลชันจากเครื่องรับเพื่อนำมาแสดงผลที่เป็นค่าดัชนีทิลเลชัน โดยเครื่องรับในการศึกษาหัวข้อนี้ถูกติดตั้งอยู่ที่สถานี KMIT ประเทศไทย และสถานี KTTB ประเทศอินโดนีเซีย จากผลการศึกษาได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจขึ้นจากข้อมูลของสถานี KMIT ซึ่งอยู่บริเวณใกล้เคียงกับสนามบินนานาชาติสุวรรณภูมิ นั่นคือปรากฏการณ์ที่มีลักษณะคล้ายกับการรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency interference, RFI) ส่งผลให้ค่าดัชนีทิลเลชันที่ได้รับจากสถานี KMIT ต้องผ่านการกรองนำผลกระทบนี้ออกก่อน จึงจะนำค่าดัชนีทิลเลชันมาประมวลผลได้ ซึ่งจะขออธิบายต่อไปในหัวข้อนี้ โดยในรูปที่ 4.7 แสดงภาพเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ถูกติดตั้งอยู่ ณ สองสถานี และรูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสสถานี KMIT ซึ่งติดตั้งในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย และสถานี KTTB ซึ่งติดตั้งที่ เมือง Kototabang ในประเทศอินโดนีเซีย ส่วนสถานีเรดาร์ EAR ก็ติดตั้งอยู่ในบริเวณเดียวกันกับเครื่องรับที่สถานี KTTB สำหรับการแสดงผลค่าดัชนีทิลเลชันในรูปแบบรายวัน (Daily plot) และรายฤดู (Seasonal plot) โดยช่วงเวลาทีวิเคราะห์ค่าดัชนีทิลเลชันจากสถานี KMIT มาแสดงเป็นค่าดัชนี S4 รายฤดูคือวันที่มีข้อมูลตั้งแต่ 14 มีนาคม ค.ศ. 2018 ถึง 18 มิถุนายน ค.ศ. 2019 เป็นจำนวนวันทั้งสิ้น 533 วัน

สำหรับสถานี KTTB ใช้ข้อมูลของวันที่มีข้อมูลตั้งแต่วันที่ 17 มีนาคม ค.ศ. 2018 ถึง 9 มีนาคม ค.ศ. 2019 เป็นจำนวนวันทั้งสิ้น 350 วัน โดยมีอัตราการแสดงข้อมูล (Time sample) ทุก 1 นาที และเลือกนำข้อมูลของดาวเทียมที่มีค่ามุมเงยมากกว่า  $30^\circ$  มาแสดงผล ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบจากการสะท้อนหลายทิศทางและสัญญาณรบกวน สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการถอดข้อมูลจากเครื่องรับคือ ภาษา C และใช้โปรแกรมภาษาไพธอนในการแสดงผล



ค่าดัชนี S4 uly จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากสถานี KMIT ถูกแสดงร่วมกันระหว่างระบบจีพีเอสและระบบกาลิเลโอ ดังรูปที่ 4.9 โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาท้องถิ่นและแกนตั้งคือลำดับวันของปี (Day of year) โดยมีค่าเริ่มต้นตั้งแต่ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 14 มีนาคม ถึง 17 กรกฎาคม ค.ศ. 2018 โดยสีแต่ละสีที่แสดงแทนค่าดัชนี S4 ที่มีค่าตั้งแต่ 0.00 (สีน้ำเงินเข้ม) ถึง 0.50 (สีแดงเข้ม)

โดยรูปที่ 4.9 (ก) คือค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และรูปที่ 4.9 (ข) คือค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L5/E5a ของดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอ



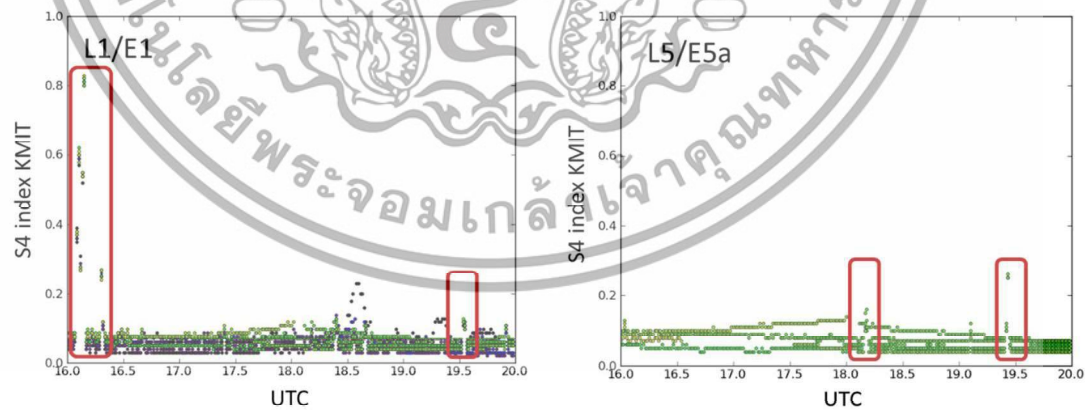
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 ค่าดัชนี S4 รายฤดูจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (จีพีเอสและกาลิเลโอ) จากสถานี KMIT

(ก) ความถี่ L1/E1 และ (ข) ความถี่ L5/E5a

จากรูปที่ 4.9 สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าค่าดัชนี S4 รายฤดูของความถี่ L1/E1 จากสถานี KMIT มีค่าสูงในทุกวันและมีค่าสูงมากกว่าความถี่ L5/E5a ซึ่งลักษณะคล้ายสัญญาณจีเอ็นเอสเอสถูกรบกวน ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 รายฤดูได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกพล็อตค่าดัชนี S4 ที่รับได้จากสถานี KMIT รายวัน ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2018 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพื่อวิเคราะห์การถูกรบกวนของสัญญาณ และหาวิธีการกรองสัญญาณที่ถูกรบกวนออกไป มีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล



(ก)

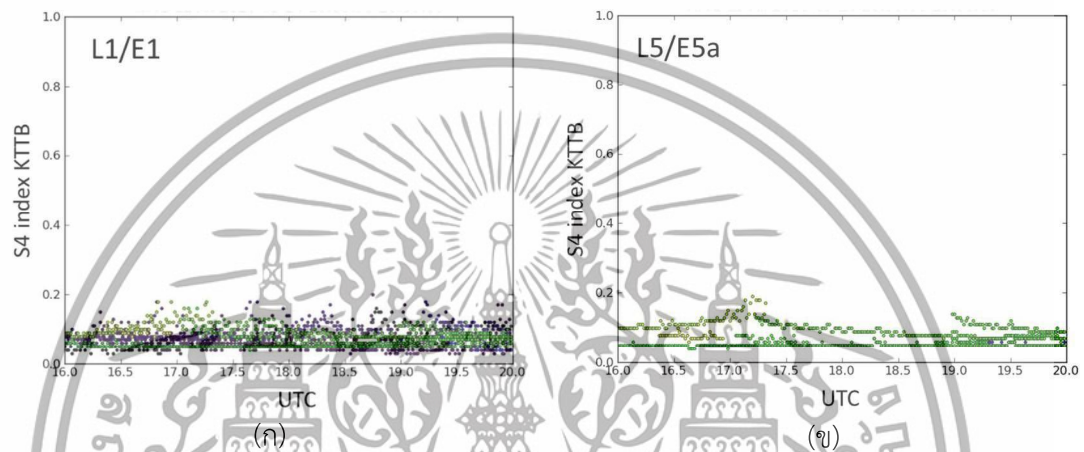
(ข)

รูปที่ 4.10 ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (จีพีเอสและกาลิเลโอ) จากสถานี KMIT

(ก) ความถี่ L1/E1 และ (ข) L5/E5a ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2018

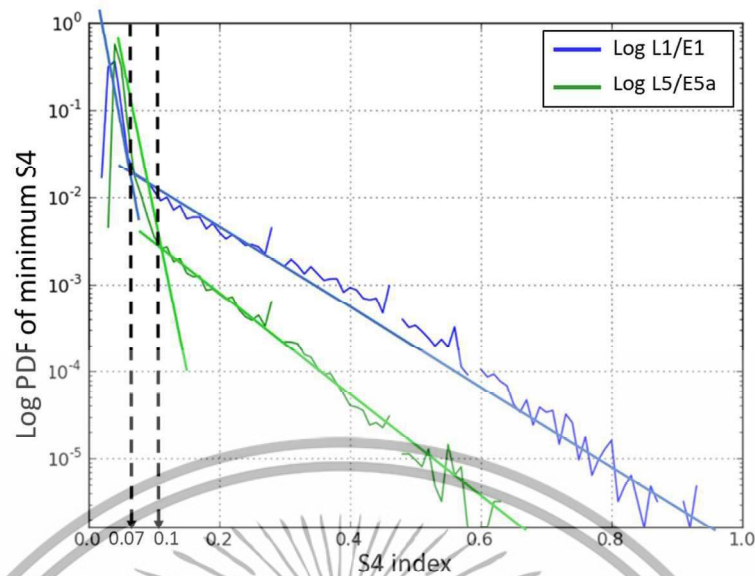
จากรูปที่ 4.10 ผู้วิจัยได้เลือกช่วงเวลา 16.00 – 20.00 UTC มาพิจารณาค่าดัชนี S4 ที่สูงผิดปกติอย่างมีนัยสำคัญ โดยในรูปที่ 4.10 (ก) แสดงค่าดัชนี S4 ที่รับได้จากดาวเทียมระบบจีพีเอส

และกาลิเลโอร่วมกัน ที่ความถี่ L1/E1 และรูปที่ 4.10 (ข) คือค่าดัชนี S4 ที่รับได้จากความถี่ L5/E5a จากกล้องสี่แดงในรูปคือช่วงเวลา ค่าดัชนี S4 มีค่าสูงขึ้นทุกดวงพร้อมกันตั้งในช่วงเวลาประมาณ 16.00 – 16.30 UTC และช่วงเวลาประมาณ 19.30 ของค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 สำหรับความถี่ L5/E5a ค่าดัชนี S4 มีค่าสูงขึ้นพร้อมกันทุกดวงในช่วงเวลาประมาณ 18.15 และ 19.30 UTC ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนี S4 ที่สถานี KTTB รับได้ในวันและช่วงเวลาเดียวกันค่าดัชนี S4 จะมีค่าที่ค่อนข้างต่อเนื่อง ไม่กระโดดสูงขึ้นดังรูปที่ 4.11 ดังนั้นจึงต้องกรองค่าดัชนี S4 ที่ได้รับผลกระทบจากการรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุก่อนนำมาแสดงผลรายฤดู



รูปที่ 4.11 ค่าดัชนี S4 จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (จีพีเอสและกาลิเลโอ) จากสถานี KTTB (ก) ความถี่ L1/E1 และ (ข) L5/E5a ในวันที่ 24 มีนาคม ค.ศ. 2018

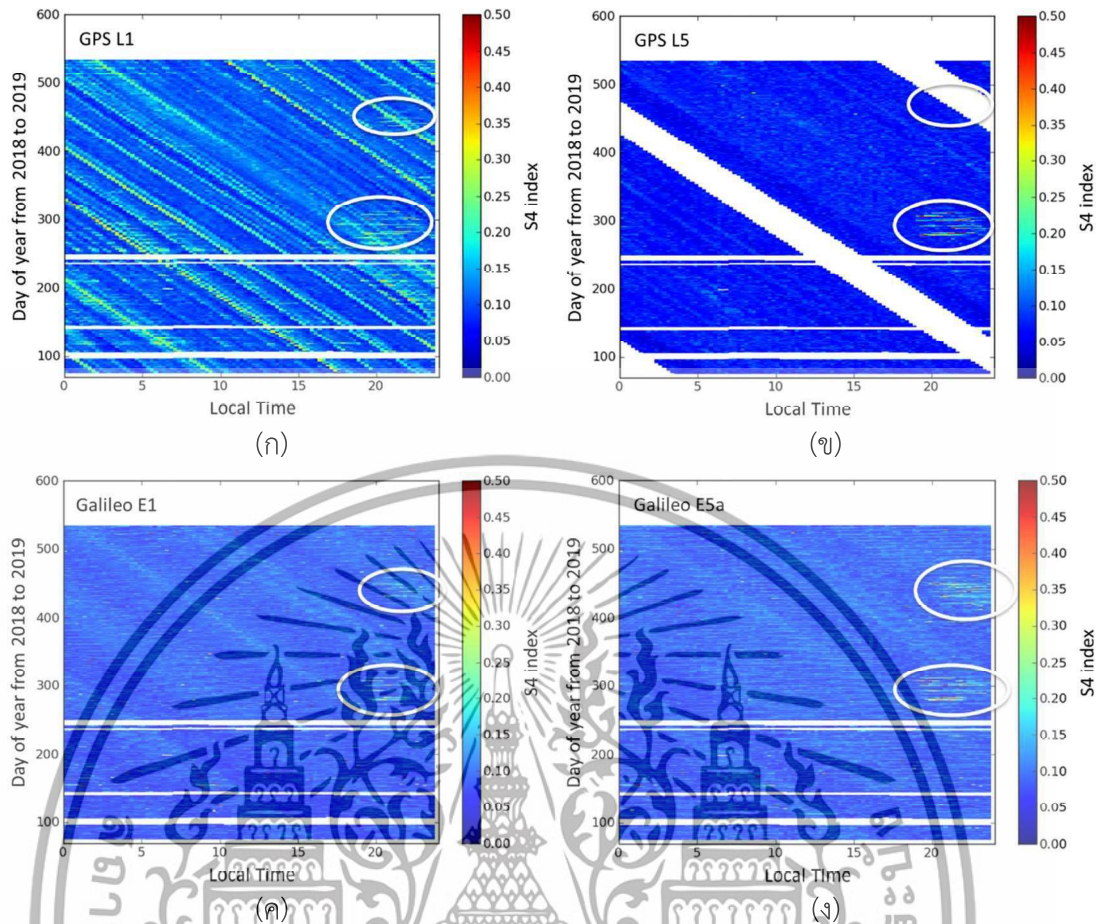
ในการกรองค่าดัชนี S4 ที่ได้รับผลกระทบจากการรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุ ทำได้โดยการหาค่าเทรชโฮลด์ที่ต่ำที่สุด (Minimum threshold) ของค่าดัชนี S4 สำหรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a โดยการพล็อตค่าลอการิทึม (Logarithm) ของค่าการกระจายตัว (Probability density function, PDF) ของค่าดัชนี S4 ที่มีค่าต่ำที่สุดในแต่ละเวลาจากข้อมูลที่ได้รับได้จากสถานี KMIT ทั้งสิ้น 533 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยค่าเทรชโฮลด์ที่ต่ำที่สุด ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.07 สำหรับค่าดัชนี S4 ที่ได้รับจากความถี่ L1/E1 และมีค่าเท่ากับ 0.1 สำหรับดัชนี S4 ที่ความถี่ L5/E5a ของดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอที่รับได้จากสถานี KMIT



รูปที่ 4.12 กราฟค่าการกระจายตัวแสดงแบบลอการิทึมของค่าดัชนี S4 ที่ต่ำที่สุดในแต่ละวัน คำนวณได้จากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจากความถี่ L1/E1 (สีน้ำเงิน) และความถี่ L5/E5a (สีเขียว)

เมื่อวิเคราะห์ได้ค่าเทรซโฮลด์ต่ำสุดที่เหมาะสมสำหรับการกรองค่าดัชนี S4 ที่ได้รับผลกระทบจากการรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุจากสถานี KMIT แล้ว ผู้วิจัยจึงทำการพล็อตค่าดัชนี S4 รายฤดู โดยผ่านการกรองค่าเทรซโฮลด์ต่ำสุด จากความถี่ L1 ของดาวเทียมระบบจีพีเอสดังรูปที่ 4.13 (ก) และความถี่ L5 ดังรูปที่ 4.13 (ข) ที่มุมเงยมากกว่า 30 องศา สำหรับค่าดัชนี S4 รายฤดูของดาวเทียมระบบกาลิเลโอที่ความถี่ E1 และ E5a ถูกแสดงดังรูปที่ 4.13 (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาท้องถิ่น และแกนตั้งคือลำดับวันในปีซึ่งเริ่มแสดงข้อมูลในช่วงวันที่ 14 มีนาคม ค.ศ. 2018 ถึง 18 มิถุนายน ค.ศ. 2019 เป็นจำนวนวันทั้งสิ้น 533 วัน บริเวณสีขาวในรูปคือช่วงเวลาที่ไม่มีข้อมูลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในช่วงเวลานั้น ๆ

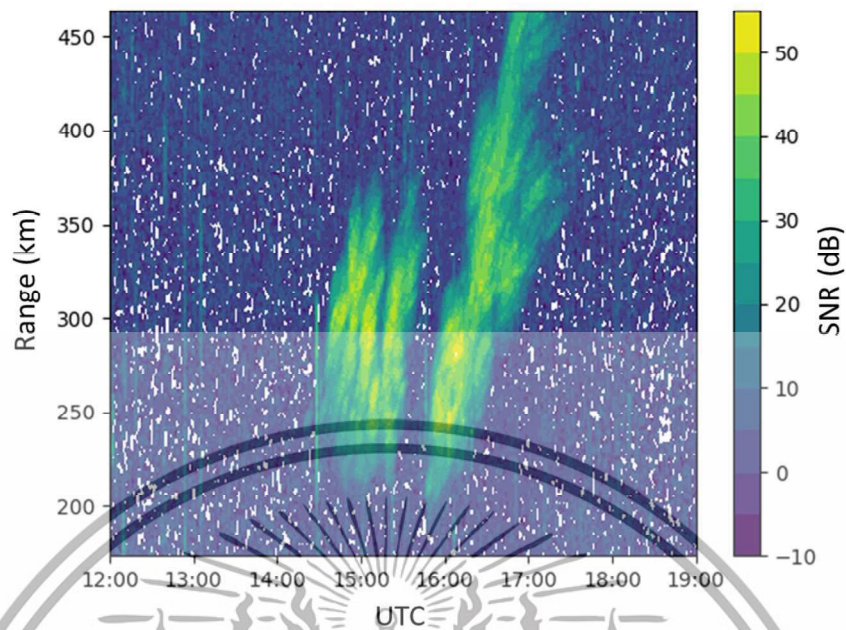
ในรูปดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นค่าดัชนี S4 ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงเวลาประมาณ 20.00 ตามเวลาท้องถิ่นเป็นต้นไป สามารถเห็นได้ชัดในวงกลมสีขาวจากค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมระบบจีพีเอสที่ความถี่ L1 และ L5 และระบบกาลิเลโอที่ความถี่ E1 และ E5a เช่นกัน จากผลการแสดงค่าดัชนีรายฤดูของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสหลายความถี่ดังรูปที่ 4.13 สามารถบ่งชี้ได้ว่าค่าดัชนี S4 มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเดือนมีนาคมและกันยายน หรือเรียกว่าช่วงเดือนอิควินอกซ์ (Equinox month) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [75]



รูปที่ 4.13 ค่าดัชนี S4 รายฤดูจากสถานี KMIT ของดาวเทียมระบบจีพีเอสและกาลิเลโอ ที่ผ่านการกรองค่าเทรชโฮลด์ต่ำสุดจากความถี่ L1/E1 และความถี่ L5/E5a

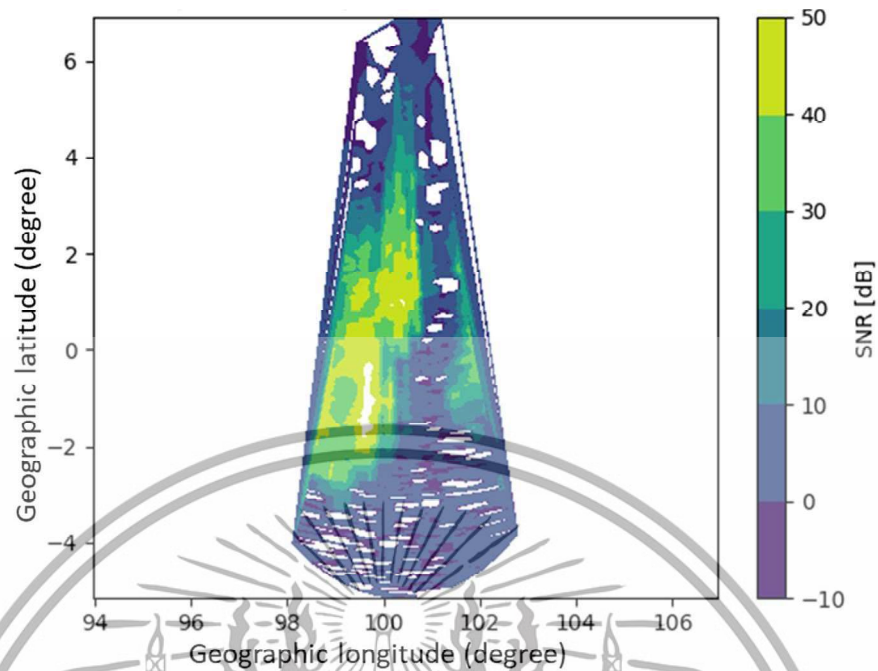
#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลโดยอาศัยเรดาร์ VHF

ในหัวข้อนี้แสดงผลการตรวจจับการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลจากรadar VHF สถานี EAR โดยแสดงตัวอย่างของผลการตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 ดังรูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจากระยะทางการสะท้อนที่แตกต่างกัน (Range time intensity, RTI) ที่รับได้จากลำคลื่นเรดาร์ที่ 1 หรือเรดาร์บีมที่ 1 จากสถานี EAR โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล และแกนตั้งคือระยะทางที่สะท้อนพลังงานกลับมายังสายอากาศรับสัญญาณ แต่ละสีแสดงค่าพลังงานสะท้อนกลับในหน่วยเดซิเบล (Decibel, dB)



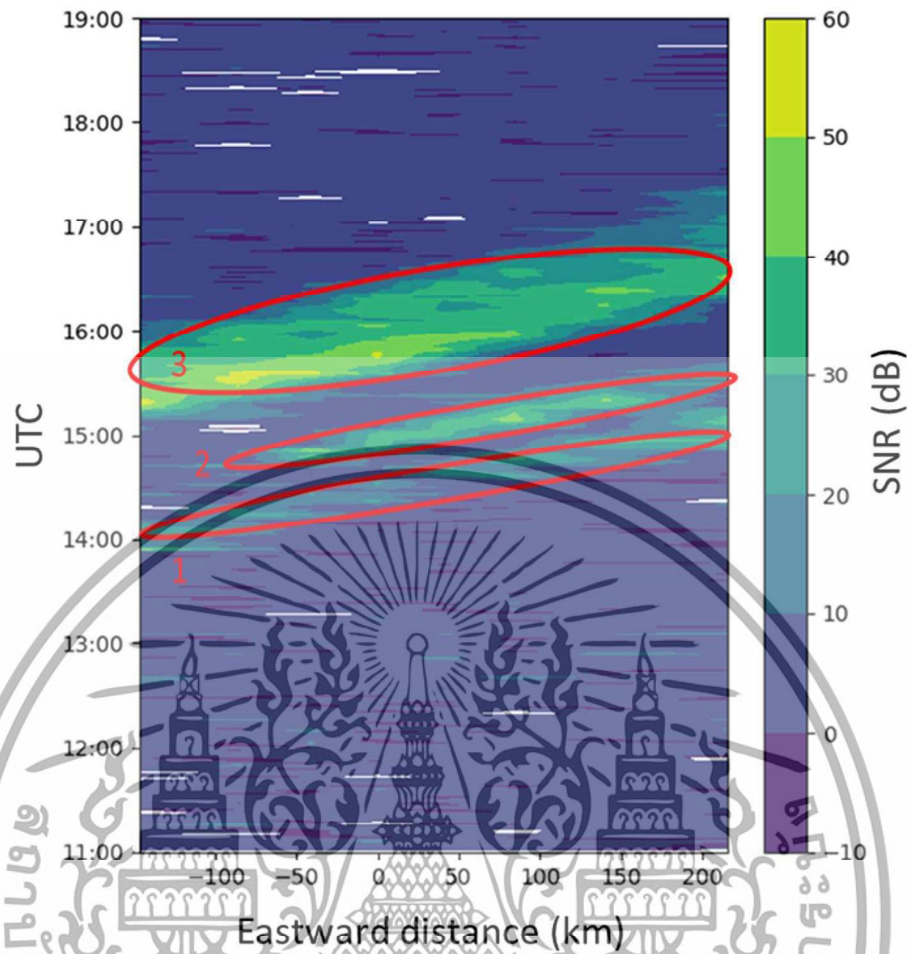
รูปที่ 4.14 ค่าพลังงานสะท้อนกลับจากความสูงแตกต่างกันจากเรดาร์บีมที่ 1

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าพลังงานการสะท้อนกลับหรือพลังงานสะท้อนกลับที่บีมที่ 1 รับผิดชอบโดยแกนนอนคือเวลาตามเวลาสากล แกนตั้งคือระยะทางการสะท้อน (Range) ของเรดาร์บีม สำหรับแถบสีแสดงค่าความเข้มของพลังงานสะท้อนกลับที่เรดาร์บีมนี้รับผิดชอบได้ โดยค่าพลังงานสะท้อนกลับจะสอดคล้องกับการตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลได้ เมื่อบีมไม่ได้สะท้อนกับพลาสมาบับเบิลค่าพลังงานสะท้อนกลับจะมีค่าต่ำแสดงในรูปเป็นบริเวณสีน้ำเงินเข้ม เมื่อเรดาร์บีมสะท้อนกับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล ค่าพลังงานสะท้อนกลับจะมีค่าสูงแสดงในรูปเป็นบริเวณสีเขียวอ่อนไปจนถึงสีเหลือง จากรูปสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าเรดาร์สามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 2 ลูก ที่ช่วงเวลาประมาณ 14.30 – 15.30 UT ตั้งแต่ระยะสะท้อนประมาณ 200 ~ 380 กิโลเมตร และเวลาประมาณ 15.50 – 17.30 UT ตั้งแต่ระยะสะท้อนประมาณ 200 ~ 450 กิโลเมตร จากข้อมูลของค่า RTI นี้ สามารถแสดงในรูปแบบของการพล็อตเรดาร์บีมรูปพัดแบบสองมิติ (2-D fan plot) ได้ เมื่อพิจารณาค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ได้รับจากทุกเรดาร์บีม ณ เวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยแกนนอนคือค่าลองจิจูดและแกนตั้งคือค่าละติจูดทางภูมิศาสตร์ สำหรับแถบสีแสดงค่าความเข้มของพลังงานสะท้อนกลับที่สอดคล้องกับการเกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล



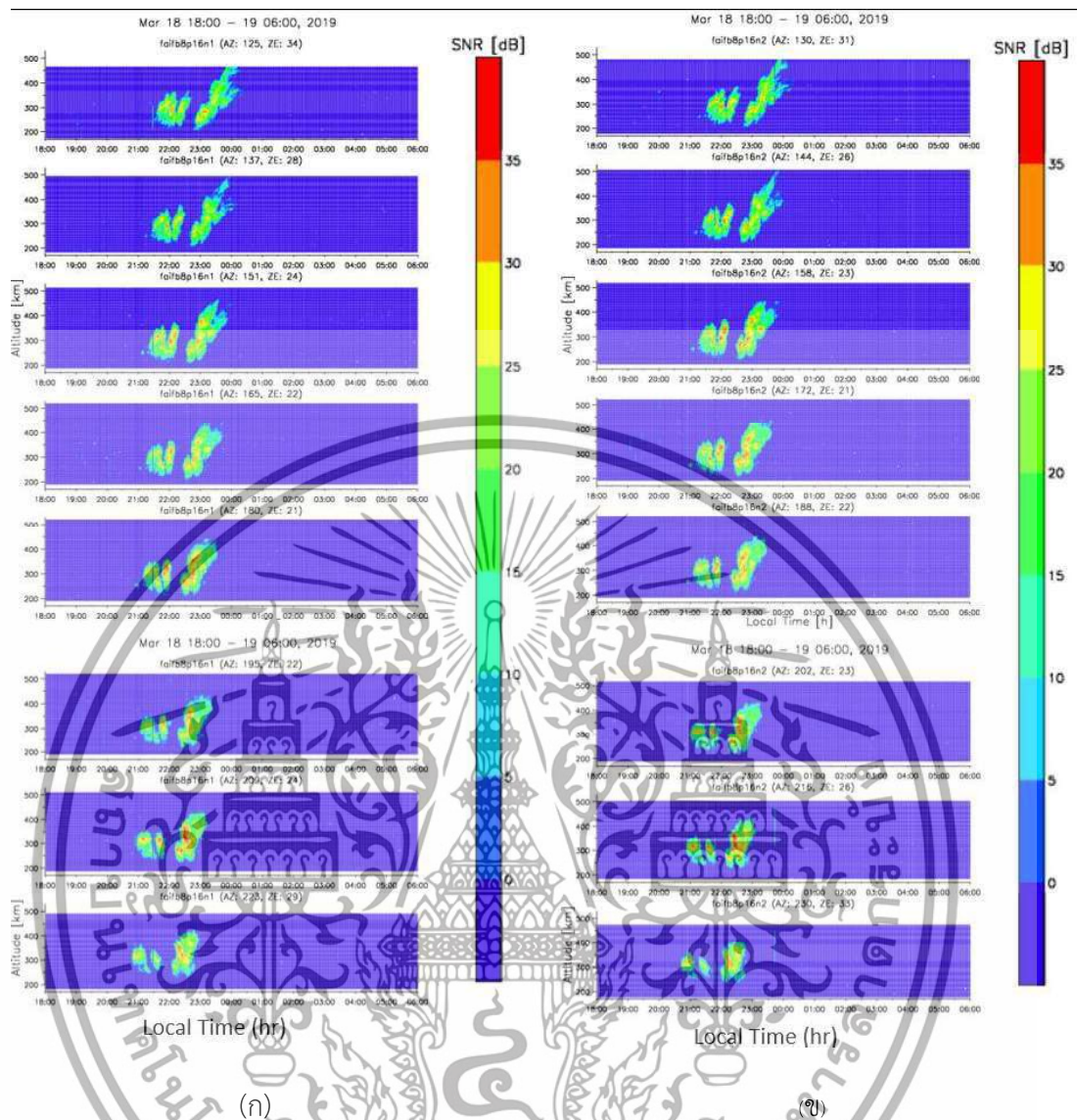
รูปที่ 4.15 ค่าพลังงานสะท้อนกลับแสดงในแบบรูปพัดสองมิติ  
ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 ณ เวลา 15.30 UT

จากรูปที่ 4.15 แสดงการพล็อตพลังงานสะท้อนกลับจากรadar ในรูปแบบสองมิติหรือ 2-D fan plot ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า ณ เวลา 15.30 UT ของวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 radar VHF สามารถตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลได้ โดยสังเกตจากบริเวณที่ค่าพลังงานสะท้อนกลับมีค่าสูง ส่วนบริเวณที่เป็นสีน้ำเงินเข้มคือบริเวณที่ radar VHF ไม่ได้สะท้อนกับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล ซึ่งบริเวณของแถบสีทั้งนี้แสดงถึงพื้นที่การตรวจจับของ radar (Radar field-of-view) สำหรับการพล็อตข้อมูล radar ในรูปแบบ KEOgram ทำให้สามารถคำนวณความเร็วของพลาสมาบับเบิลที่ radar ตรวจจับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยแกนนอนแสดงระยะทางในแนวตะวันออกเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของ radar ที่ตำแหน่ง 0 และแกนตั้งคือเวลาตามเวลาสากล แถบสีแสดงค่าความเข้มของพลังงานสะท้อนกลับซึ่งสามารถกำหนดให้ KEOgram นี้แสดงค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูงต่างๆ ได้ เช่น 250, 300 หรือ 350 กิโลเมตร เป็นต้น



รูปที่ 4.16 ภาพ KEOgram ของเรดาร์ VHF ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019  
ที่ความสูง 350 กิโลเมตร

จากรูปที่ 4.16 แสดงภาพ KEOgram ของเรดาร์ VHF ตั้งแต่ช่วงเวลา 11.00 – 19.00 UT พบว่าที่ความสูง 350 กิโลเมตร เรดาร์ VHF สามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ 3 ลูกที่ช่วงเวลา ประมาณ 14.00-14.50 UT 14.45-15.15 UT และ 15.10-17.00 UT ตามลำดับ จากรูปนี้สังเกตเห็นได้ชัดว่า เมื่อเวลาผ่านไปพลาสมาบับเบิลทั้งสามลูกเคลื่อนที่จากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก ซึ่งสามารถคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของพลาสมาบับเบิลโดยเทียบระหว่างระยะทางที่พลาสมาบับเบิลเคลื่อนที่กับเวลา โดยลูกที่ 1 มีความเร็วประมาณ 83 เมตร/วินาที ลูกที่ 2 มีความเร็วประมาณ 55 เมตร/วินาที และลูกที่ 3 มีความเร็วประมาณ 64 เมตร/วินาที ตามลำดับ และในรูปที่ 4.17 แสดงค่า RTI จากทั้งหมด 16 บีมที่รับได้จากสถานี EAR ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 โดยรูปที่ 4.17 (ก) คือค่าที่คำนวณจากพารามิเตอร์ชุด faifb8p16n1 และรูปที่ 4.17 (ข) คือค่า RTI จากพารามิเตอร์ชุด faifb8p16n2 โดยสามารถดาวน์โหลดไฟล์พลังงานสะท้อนกลับในรูปแบบของไฟล์ตารางได้ที่เว็บไซต์ทางการของสถานีเรดาร์ EAR (<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/index-e.html>) โดยมีแกนนอนคือเวลาตามเวลาท้องถิ่น



รูปที่ 4.17 ค่า RTI ทั้งหมด 16 ปีมาจกสถานีเรดาร์ EAR ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 ของ (ก) พารามิเตอร์ชุด faifb8p16n1 และ (ข) พารามิเตอร์ชุด faifb8p16n2 [72]

จากรูปที่ 4.17 สามารถสังเกตเห็นค่าพลังงานสะท้อนกลับที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงเวลาตั้งแต่ 21.00 - 23.30 LT หรือมีค่าเท่ากับ 14.00 to 16.30 UTC ซึ่งค่าพลังงานสะท้อนกลับนั้นสอดคล้องกับการเกิดพลาสมาบับเบิลจึงกล่าวได้ว่าเรดาร์ EAR สามารถตรวจจับพลาสมาบับเบิลได้ในช่วงเวลาดังกล่าว

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์การเกิดพลาสมาบับเบิลที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี S4

จากหัวข้อที่ 4.3.1 กล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าดัชนี S4 โดยในที่นี้ขอยกตัวอย่างจากดาวเทียมดวงที่ 74 ซึ่งเป็นดาวเทียมกาลิเลโอดวงที่ 4 (E04) มีค่าดัชนี S4 สูงสุดที่เวลา 15.39 UTC ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงช่วงเวลาดังกล่าวของดาวเทียมทุกดวง เทียบกับพลังงานสะท้อนกลับที่ถูกปลี้อแบบสองมิติ เพื่อดูความสัมพันธ์ของคุณลักษณะพลาสมาบับเบิลและค่าดัชนี S4 ในตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนเหตุการณ์ของวันก็นำมาวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในปี ค.ศ. 2019 โดยมีจำนวนของเหตุการณ์ที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้คือ 22 เหตุการณ์ [73] ในวันที่เรดาร์ EAR ตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลได้พร้อมกับสถานี KTTB ตรวจจับค่าดัชนี S4 ที่สูงขึ้นสอดคล้องกันในเวลาดังกล่าว และในตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนดาวเทียมที่เครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสามารถรับสัญญาณได้ ณ เวลา 15.39 UTC พร้อมทั้งแสดงข้อมูลค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ค่ามุมเงยและมุมกวาด ของดาวเทียมที่รับข้อมูลได้ ณ ขณะนั้น

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของวันก็นำมาวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในปี ค.ศ. 2019 [73]

วันที่	เลขดาวเทียม	แบนด์ความถี่	ช่วงเวลาท้องถิ่นที่วิเคราะห์
26 กุมภาพันธ์	E 01	E1/E5a	18.48 – 23.50
	E 04	E1/E5a	22.50 – 4.00
28 กุมภาพันธ์	E 02	E1/E5a	20.24 – 01.12
6 มีนาคม	E 07	E1/E5a	22.44 – 03.53
	E 30	E1/E5a	18.40 – 23.42
18 มีนาคม	E 01	E1/E5a	17.29 – 22.29
	E 04	E1/E5a	21.29 – 02.39
	E 31	E1/E5a	19.38 – 00.15
25 มีนาคม	E 01	E1/E5a	18.42 – 23.30
	E 04	E1/E5a	22.48 – 03.42
	E 19	E1/E5a	20.45 – 01.31
	E 21	E1/E5a	16.36 – 21.33
3 เมษายน	E 09	E1/E5a	19.16 – 00.13

วันที่	เลขดาวเทียม	แบนด์ความถี่	ช่วงเวลาท้องถิ่นที่วิเคราะห์
	E 24	E1/E5a	17.12 – 22.12
6 เมษายน	E 03	E1/E5a	21.33 – 02.33
	E 05	E1/E5a	19.24 – 00.30
11 กันยายน	G 10	L1/L5	18.22 – 22.18
	E 24	E1/E5a	17.28 – 22.30
18 กันยายน	G 26	L1/L5	18.55 – 23.10
	E 09	E1/E5a	20.42 – 01.49
	E 24	E1/E5a	18.43 – 23.31
	E 31	E1/E5a	16.36 – 21.36

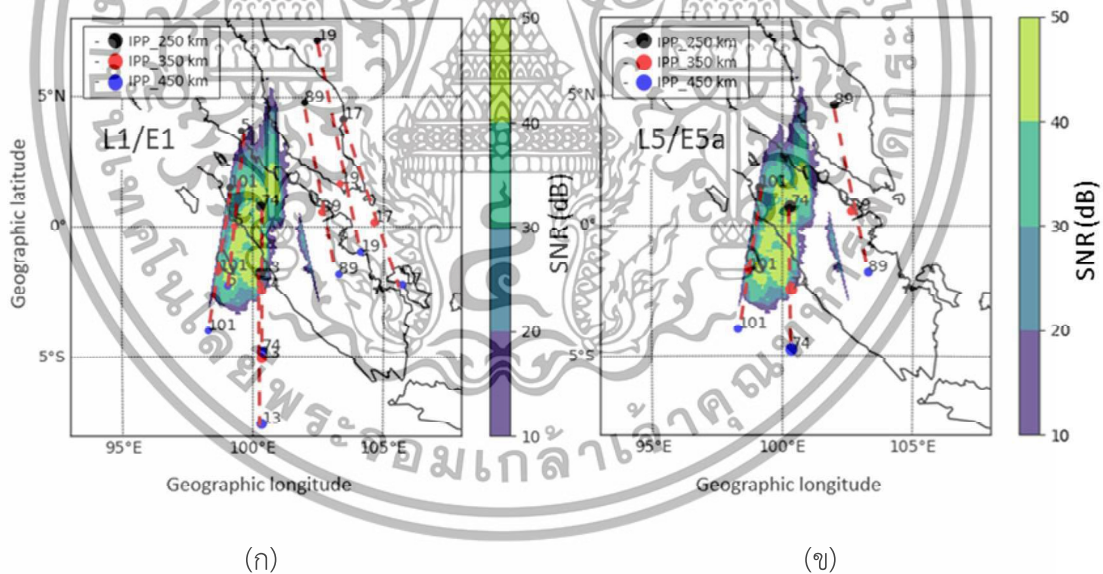
ตารางที่ 4.3 จำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ณ เวลา 15.39 UTC ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019  
ที่สถานี KTTB รับสัญญาณได้

	L1					L5				
SV	5	13	17	19	74	89	101	74	89	101
S4	0.09	0.25	0.13	0.11	0.2	0.12	0.11	0.31	0.18	0.17
Elevation	70	30	33	39	53	50	53	53	50	53
Azimuth	283	180	85	58	180	71	228	180	71	228

จากตารางที่ 4.3 ดาวเทียมดวงที่ 17 19 และ 89 มีเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมอยู่นอกบริเวณพลังงานสะท้อนกลับ จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา (แสดงในคอลัมน์ที่ถูกแรเงาด้วยสีเทาในตาราง) สำหรับดาวเทียมดวงที่ 13 ซึ่งมีค่าดัชนี S4 สูงที่สุดในช่วงเวลาดังกล่าว แต่ดาวเทียมดวงที่ 13 ส่งสัญญาณที่ความถี่ L1 เพียงอย่างเดียว ไม่ได้ส่งสัญญาณที่ความถี่ L5 ด้วย จึงไม่ถูกนำมาพิจารณาเช่นกัน ดังนั้นดาวเทียมดวงที่ 74 หรือกาลิเลโอ E 04 จึงเป็นดาวเทียมที่ถูกนำมาอธิบายในผลการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเห็นว่าดาวเทียมดวงที่ 74 มีค่าดัชนี S4 เท่ากับ 0.2 ที่ความถี่ E1 และ 0.31 ที่ความถี่ E5a ทั้งนี้มุมเงยของดาวเทียมดวงดังกล่าว ยังมีค่า 53 องศา ซึ่งให้เห็นว่าค่าดัชนี S4 ที่สูงขึ้นนั้นเป็นผลมาจากปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล

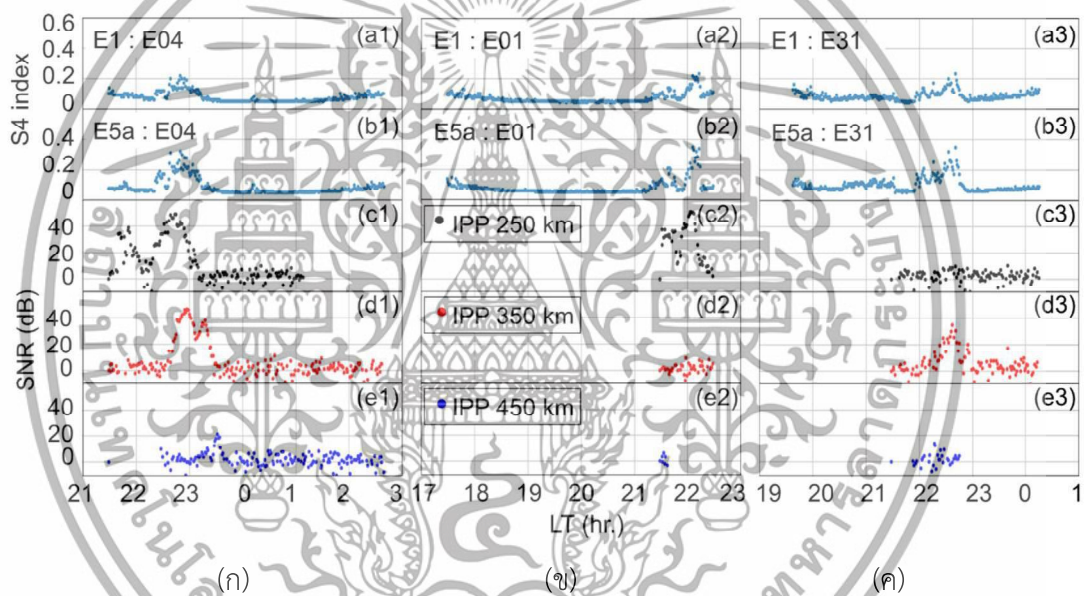
ถัดมาในรูปที่ 4.18 แสดงเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมถูกแสดงร่วมกับพื้นที่พลังงานสะท้อนกลับ ที่ฉายลงในแนวระนาบบนพิกัดภูมิศาสตร์ ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 เวลา

15.39 UTC โดยแกนนอนคือค่าลงจุดและแกนตั้งคือค่าละติจูดในหน่วยองศา โดยเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมแต่ละดวงคือเส้นทางการเดินทางของสัญญาณ ณ เวลานั้นๆ จากความสูงของจุดที่สัญญาณตัดชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ 250, 350 และ 450 กิโลเมตร ตามลำดับ ในรูปที่ 4.18 (ก) แสดง เส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับได้จากความถี่ L1/E1 และรูปที่ 4.18 (ข) L5/E5a โดยขนาดของจุด IPP มีขนาดแปรผันตามค่าดัชนี S4 ที่ต่างกัน กล่าวคือเมื่อค่าดัชนี S4 มีค่าสูง ขนาดของจุด IPP ก็ใหญ่ขึ้นด้วย ส่วนจุด IPP แต่ละสี แสดงถึง ตำแหน่งจุด IPP ของดาวเทียมแต่ละดวงที่ความสูง 250 (สีดำ) 350 (สีแดง) และ 450 (สีน้ำเงิน) และเส้นประสีแดงคือเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมแต่ละดวง ซึ่งถูกฉายไปที่ความสูง 350 กิโลเมตรตามแนวระนาบของเส้นสนามแม่เหล็กโลก สามารถสังเกตเห็นว่าเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมดวงที่ 74 หรือกาลิเลโอ E04 มีช่วงที่ผ่านบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลที่ความสูงระหว่าง 250 – 350 กิโลเมตร กล่าวได้ว่าเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมเดินทางผ่านปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในช่วงล่าง (Bottom side) เนื่องจากเส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมอยู่นอกพลาสมาบับเบิลที่ความสูงระหว่าง 350 – 450 กิโลเมตร ซึ่งถือเป็นความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ช่วงกลางถึงบน (Middle to top side)



รูปที่ 4.18 เส้นทางการเดินทางของสัญญาณดาวเทียมแสดงร่วมกับพื้นที่พลังงานสะท้อนกลับ  
ที่ความสูง 350 กิโลเมตร (ก) L1/E1 (ข) L5/E5a  
ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 เวลา 15.39 UTC

เพื่อความเชื่อมโยงปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลและการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนี S4 ในรูปที่ 4.19 จึงแสดงค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเปรียบเทียบกับค่าพลังงานสะท้อนกลับที่มีหน่วยเป็น เดซิเบล ในฟังก์ชันของเวลาตามเวลาท้องถิ่น ณ จุดที่สัญญาณดาวเทียม IPP ที่ความสูงแตกต่างกัน ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 โดยรูปที่ 4.19 (ก) แสดงค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงที่กาลิเลโอดวงที่ 4 ที่ความถี่ E1 (a1) และ E5a (b1) เปรียบเทียบกับค่าพลังงานสะท้อนกลับที่จุด IPP ที่ความสูงแตกต่างกันใน โดยรูป (c1) คือค่าพลังงานสะท้อนกลับ ณ จุด IPP ที่ความสูง 250 กิโลเมตรรูป (d1) คือค่าพลังงานสะท้อนกลับ ณ จุด IPP ที่ความสูง 350 กิโลเมตร และรูป (e1) คือค่าพลังงานสะท้อนกลับ ณ จุด IPP ที่ความสูง 450 กิโลเมตรตามลำดับ นอกเหนือไปจากดาวเทียมกาลิเลโอดวงที่ E04 แล้วนั้น ผลการเปรียบเทียบค่าดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูงแตกต่างกันของ ดาวเทียมดวงที่ E01 และ E31 ถูกแสดงในรูปที่ 4.19 (ข) และ รูปที่ 4.18 (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเปรียบเทียบกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ ณ จุดที่สัญญาณดาวเทียม IPP ที่ความสูงแตกต่างกัน ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 2019 [73]

จากรูปที่ 4.19 (ก) ในรูปย่อย (a1) และ (b1) แสดงค่าดัชนี S4 ของดาวเทียมดวงที่ E04 สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าค่าดัชนี S4 เริ่มมีค่าสูงขึ้นที่เวลาประมาณ 22.20 LT และมีค่าสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัดเจนที่เวลา 22.39 LT หลังจากนั้นค่าดัชนี S4 จึงมีค่าลดลงจนถึงเวลาประมาณ 23.20 LT เมื่อวิเคราะห์ช่วงเวลาที่มีค่าดัชนี S4 มีค่าสูงร่วมกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าค่าดัชนี S4 ที่คำนวณได้จากความถี่ E5a มีค่าสูงกว่า E1 เมื่อเปรียบเทียบ ณ เวลาที่ค่าดัชนี S4 สูงสุดเทียบกับค่าพลังงานสะท้อนกลับ ณ จุด IPP จากทั้ง 3 ความสูง พบว่าค่าดัชนี S4 มีความสอดคล้องกับช่วงความสูงที่มากกว่า 250 กิโลเมตร แต่ต่ำกว่า 350 กิโลเมตร อย่างชัดเจน เนื่องจากค่าสูงสุด

ของดัชนี S4 เกิดขึ้นหลังจากค่าสูงสุดของพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูง 250 กิโลเมตรเล็กน้อย แต่เกิดขึ้นก่อนค่าสูงสุดของพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูง 350 กิโลเมตร

สำหรับผลของดาวเทียมกาลิเลโอดวงที่ E01 แสดงดังรูปที่ 4.18 (ข) จากรูปดังกล่าวสังเกตเห็นว่าค่าดัชนี S4 ที่สถานี KTTB รับสัญญาณได้ตั้งแต่ช่วงเวลา 17.30 ถึง 22.30 LT แต่ในส่วนของค่าพลังงานสะท้อนกลับสถานี EAR สามารถรับค่าได้ในช่วงเวลา 21.30 ถึง 22.30 LT ทำให้การเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับมีช่วงระยะเวลาที่เปรียบเทียบ 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นความสอดคล้องของค่าสูงสุดของดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับที่เวลาประมาณ 22.10 LT เมื่อสังเกตค่าพลังงานสะท้อนกลับที่จุด IPP ที่ความสูง 250 กิโลเมตร ดังรูป (c2) พบว่าค่าสูงสุดของพลังงานสะท้อนกลับเกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาที่สอดคล้องกลับค่าสูงสุดของดัชนี S4 และเมื่อสังเกตรูปที่ (d2) และ (e2) พบว่าไม่สามารถสังเกตค่าเพิ่มขึ้นของพลังงานสะท้อนกลับที่สอดคล้องกับค่าดัชนี S4 ที่ความสูงของจุด IPP ที่ความสูง 350 กิโลเมตรและ 450 กิโลเมตรได้ได้ และในรูปที่ 4.18 (ค) แสดงผลของดาวเทียมกาลิเลโอดวงที่ E31 โดยสังเกตเห็นความสอดคล้องระหว่างค่าสูงสุดของดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูงของจุด IPP มีค่า 350 กิโลเมตร จากผลที่แสดงดังกล่าวถูกนำมาคำนวณความสัมพันธ์โดยแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้าม (Cross-correlation coefficient) ระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR ที่แต่ละความสูงและค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามได้ดังสมการที่ (4.2)

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.2)$$

โดย  $R_{xy}$  คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR และค่าดัชนี S4 ส่วนตัวแปร  $x, y$  แทนค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR ที่แต่ละความสูงและค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a และ  $\bar{x}, \bar{y}$  คือค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR และค่าเฉลี่ยของค่าดัชนี S4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจาก EAR ที่แต่ละความสูงและค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a [73]

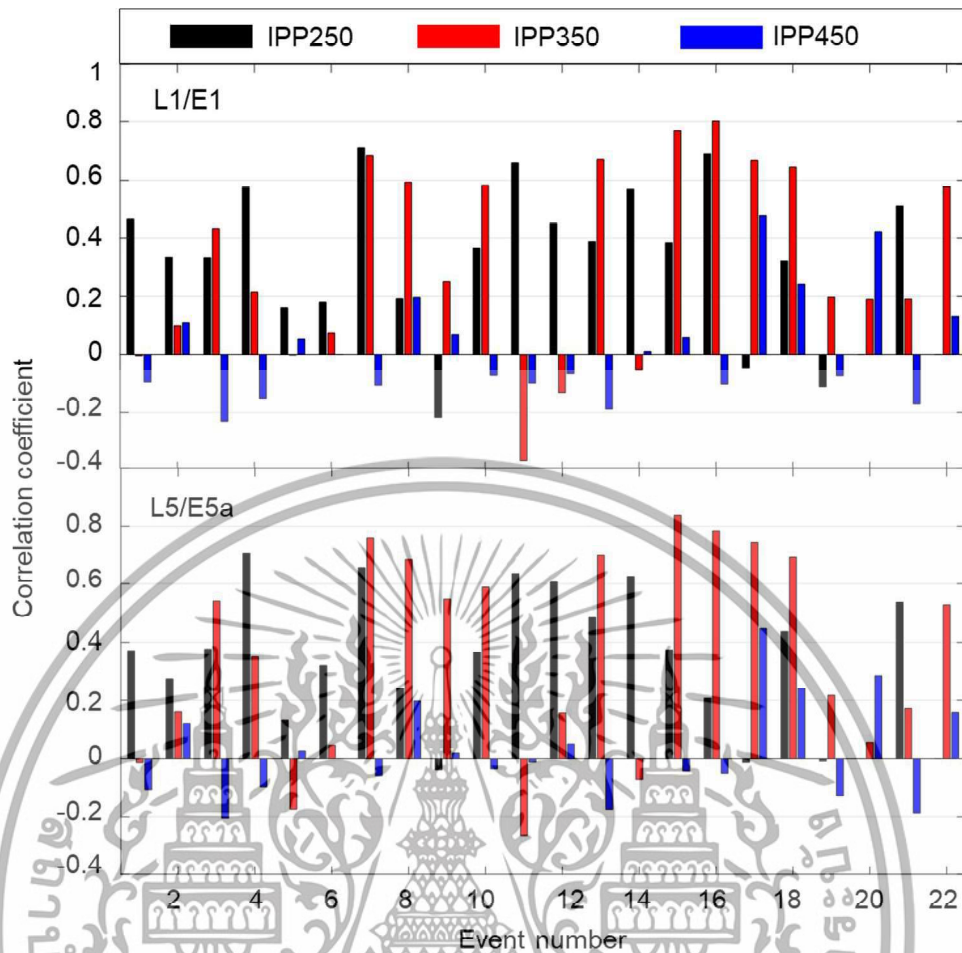
วันที่	ดาวเทียม	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์					
		ความสูง 250 กิโลเมตร		ความสูง 350 กิโลเมตร		ความสูง 450 กิโลเมตร	
		L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a
26/02/2019	E 01	0.469	0.372	-0.004	-0.0144	-0.095	-0.107
	E 04	0.335	0.275	0.1	0.161	0.11	0.12
28/02/2019	E 02	0.333	0.377	0.432	0.542	-0.23	-0.205
06/03/2019	E 07	0.574	0.707	0.215	0.349	-0.15	-0.097
	E 30	0.161	0.132	-0.002	-0.174	0.051	0.026
18/03/2019	E 01	0.18	0.32	0.071	0.045	นอกขอบเขตมุมมองของเรา	
	E 04	0.713	0.657	0.683	0.76	-0.106	-0.059
	E 31	0.192	0.243	0.594	0.686	0.196	0.197
25/03/2019	E 01	-0.217	-0.039	0.251	0.548	0.066	0.019
	E 04	0.366	0.367	0.584	0.589	-0.073	-0.036
	E 19	0.659	0.637	-0.366	-0.268	-0.099	-0.013
	E 21	0.45	0.606	-0.131	0.157	-0.067	0.049
03/04/2019	E 09	0.388	0.485	0.67	0.7	-0.189	-0.175
03/04/2019	E 24	0.568	0.627	-0.055	-0.072	0.01	0
06/04/2019	E 03	0.384	0.375	0.77	0.837	0.056	-0.043

วันที่	ดาวเทียม	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์					
		ความสูง 250 กิโลเมตร		ความสูง 350 กิโลเมตร		ความสูง 450 กิโลเมตร	
		L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a	L1/E1	L5/E5a
	E 05	0.689	-0.207	0.802	0.784	-0.102	-0.051
11/09/2019	G 10	-0.049	-0.014	0.667	0.745	0.48	0.447
	E 24	0.321	0.437	0.645	0.694	0.242	0.24
18/09/2019	G 26	-0.111	-0.009	0.197	0.217	-0.074	-0.129
	E 09	นอกขอบเขตมุมมองของเรดาร์		0.19	0.055	0.421	0.286
	E 24	0.512	0.538	0.191	0.172	-0.171	-0.187
	E 31	นอกขอบเขตมุมมองของเรดาร์		0.576	0.529	0.132	0.158

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ข้ามที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ระหว่าง 250 350 และ 450 กิโลเมตร ที่ความสูงดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันพร้อมกับการตรวจจับปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลด้วยเรดาร์ EAR ในรูปที่ 4.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในรูปแบบของกราฟแท่ง โดยมีแกนนอนแทนจำนวนของเหตุการณ์ ซึ่งในการศึกษานี้มีเหตุการณ์ทั้งหมด 22 เหตุการณ์ กราฟแท่งแต่ละสีแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจากแต่ละความสูงคือ 250 (สีดำ) 350 (สีแดง) และ 450 กิโลเมตร (สีน้ำเงิน) และค่าดัชนี S4 ที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนี S4 และค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีค่าสูงที่ความสูงระหว่าง 250 และ 350 กิโลเมตร และมีค่าน้อยลงที่ความสูง 450 กิโลเมตร

อาจกล่าวได้ว่าปรากฏการณ์ซินทิลเลชันนั้นได้รับผลกระทบมาจากพลาสมาบับเบิล ที่ความสูงระหว่าง 250 ถึง 350 กิโลเมตร มากกว่าที่ความสูง 450 กิโลเมตร ซึ่งถือว่าความสูงดังกล่าวสอดคล้องกับความสูงของชั้นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์





รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานสะท้อนกลับจากแต่ละความสูง (250, 350 และ 450 กิโลเมตร) และค่าดัชนี S4 (บน) ที่ความถี่ L1/E1 และ (ล่าง) ที่ความถี่ L5/E5a สำหรับเหตุการณ์ 22 เหตุการณ์ [73]

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอความสำคัญของการศึกษาคูณลักษณะของความผิดปกติที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะและความผิดปกติของความหนาแน่นของ STEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเขตละติจูดต่ำซึ่งใกล้เคียงกับเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่เรียกว่าปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิล โดยการศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆ ได้ดังนี้

หัวข้อแรกการประมาณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ตรวจจับได้ จากการทดลองคำนวณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลคำนวณจากดาวเทียมทุกดวงในวันที่เกิดปรากฏการณ์พลาสมาบับเบิลในปี ค.ศ. 2015 โดยอาศัยหลักการของสมการฮาร์เวอร์ไซน์ในการคำนวณระยะห่างในแนวลองจิจูดระหว่างจุดกำเนิดของพลาสมาบับเบิลที่ตรวจพบ สามารถวิเคราะห์การเกิดพลาสมาบับเบิลได้จากความชันของค่า STEC ถัดมาจึงเป็นการคำนวณค่าระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลที่ได้รับการชดเชยแล้วพบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 1,200 กิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิลอยู่ที่ 423.20 กิโลเมตร จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ อาจส่งผลกระทบต่อสูญหายของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสได้ในบางช่วงเวลาเนื่องจาก สัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาที่เกิดพลาสมาบับเบิลส่งผลให้สัญญาณความแปรปรวนทั้งแอมพลิจูดและเฟส โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจทำให้เครื่องรับสัญญาณไม่สามารถรับสัญญาณได้ในบางเวลา (Loss of tracking) ซึ่งส่งผลกระทบต่อความพร้อมใช้งาน (Availability) และความต่อเนื่อง (Continuity) ในการให้บริการของระบบ GBAS ดังนั้นเพื่อให้การจำลองความพร้อมใช้งานของระบบ GBAS เป็นไปอย่างสมจริง ค่าพารามิเตอร์ระยะห่างของพลาสมาบับเบิลนี้จึงเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญในการจำลองความพร้อมใช้งานของระบบ GBAS ต่อไป จึงเกิดเป็นการศึกษาในหัวข้อที่สอง คือผลการศึกษาเบื้องต้นของ การจำลองผลกระทบของพลาสมาบับเบิลจำนวนสองลูกต่อประสิทธิภาพของระบบ GBAS ในการศึกษาที่คำนวณค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS หรือค่า VPE จากผลการวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างพลาสมาบับเบิล นำไปสู่การจำลองค่าผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS โดยจำลองสถานการณ์การเกิดพลาสมาบับเบิล ที่มีระยะห่างแตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 200 – 1200 กิโลเมตร และประมาณค่า VPE ในแต่ละเวลา ผลการจำลองพบว่าค่าเฉลี่ยสูงสุดของจำนวนดาวเทียมที่ได้รับผลกระทบจากพลาสมาบับเบิลจำนวนสองลูก เกิดจากระยะห่างของพลาสมาบับเบิลที่มีค่าประมาณ 700 กิโลเมตร

สำหรับหัวข้อที่สามคือการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของพลาสมา บับเบิลและค่าดัชนี S4 จากสัญญาณจีพีเอสและกาลิเลโอที่ความถี่ L1/E1 และ L5/E5a โดยคุณลักษณะของพลาสมาบับเบิลที่ได้มาจากข้อมูลเรดาร์ VHFจากสถานี KTTB ประเทศอินโดนีเซีย วิเคราะห์ร่วมกับค่าดัชนี S4 ที่ติดตั้งอยู่บริเวณ KTTB หลังจากนั้นจึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ข้ามระหว่างค่าดัชนี S4 ที่ถูกฉายไปที่ความสูงต่างๆ คือ 250 350 และ 450 กิโลเมตร กับค่าพลังงาน สะท้อนกลับ (echo power) อันเนื่องมาจากพลาสมาบับเบิลที่ เรดาร์ VHFตรวจจับได้ ผลการวิจัย พบว่าค่าดัชนี S4 มีค่าสูงสอดคล้องกับค่าพลังงานสะท้อนกลับที่ความสูงระหว่าง 250 – 350 กิโลเมตร ซึ่งคือชั้นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Bottom-side of ionosphere)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการจำลองผลกระทบของความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของระบบ GBAS นั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจำลอง โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่นอกเหนือไปจากค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งในแนวตั้งของระบบ GBAS ในการวิเคราะห์หรือจำลองฉากทัศน์ (Scenario) เช่นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับทิศทางของรันเวย์ (Runway direction) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของสถานีฐานของ GBAS ที่สัมพันธ์กับค่าเทรชโฮลด์ของรันเวย์ (Runway threshold) หรือค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวางตัวของพลาสมาบับเบิล (EPB tilt angle) ยิ่งไปกว่านั้นการใช้ประโยชน์จากการเฝ้าสังเกตทั้งจากสถานีฐานและอากาศยานเช่นวิธีการดั้งเดิม CCD (Code-carrier divergence monitor) หรือการเฝ้าสังเกตค่าเกรเดียนต์หนึ่งช่วงเวลาเชิงระยะทางก็มีความสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ GBAS บริเวณประเทศไทย

สำหรับผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์และสิ่งที่คุณพบจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาจไม่ได้บ่งชี้ถึงความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณภูมิภาคอื่นๆ เนื่องจากการค้นพบในงานวิจัยนี้ได้ใช้ช่วงของข้อมูลที่มีจำกัด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Retterer and P. Roddy, "Faith in a seed: on the origins of equatorial plasma bubbles," *Annales Geophysicae*, vol. 32, p. 485–498, 2014.
- [2] R. H. Wiens et al., "Equatorial plasma bubbles in the ionosphere over Eritrea: Occurrence and drift speed," *Annales Geophysicae*, vol. 24, no. 5, p. 1443–1453, 2006.
- [3] K. K. Ajith et al., "On the fresh development of equatorial plasma bubbles around the midnight hours of June solstice," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 121, p. 9051–9062, 2016.
- [4] Y. Otsuka et al., "VHF radar observations of nighttime F-region field-aligned irregularities over Kototabang, Indonesia," *Earth, Planets and Space*, vol. 61, no. 4, p. 431–437, 2009.
- [5] S. Magdaleno et al., "Climatology characterization of equatorial plasma bubbles using GPS data," *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 7, 2017.
- [6] K. Watthanasangmechai et al., "Predawn plasma bubble cluster observed in Southeast Asia," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 121, p. 5868–5879, 2016.
- [7] J. Dungey, "Convective diffusion in the equatorial F region," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 9, no. 5–6, pp. 304–310, 1956.
- [8] P. J. Sultan, "Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 101, no. A12, p. 26875–26891, 1996.
- [9] M. C. Kelley, "The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics (Second Edition)", Ithaca, NY: Elsevier Inc., 2009.
- [10] P. M. Kintner et al., "GPS and ionospheric scintillations," *Space Weather*, vol. 5, p. S09003, 2007.

- [11] S. Fukao et al., "Eastward traverse of equatorial plasma plumes observed with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia," *Annales Geophysicae*, vol. 24, pp. 1411-1418, 2006.
- [12] Y. Sahai et al., "Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 62, no. 15, pp. 1377-1383, 2000.
- [13] J. J. Makela et al., "Analysis of the seasonal variations of equatorial plasma bubble occurrence observed from Haleakala, Hawaii," *Annales Geophysicae*, vol. 22, p. 3109–3121, 2004.
- [14] G. J. Wang et al., "Ionospheric plasma bubbles observed concurrently by multi-instruments over low-latitude station Hainan," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, p. 2288–2298, 2015.
- [15] L. Sun et al., "Evolution processes of a group of equatorial plasma bubble (EPBs) simultaneously observed by ground-based and satellite measurements in the equatorial region of China," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 122, p. 4819–4836, 2017.
- [16] T. Tsujii et al., "Measurement and simulation of equatorial ionospheric plasma bubbles to assess their impact on GNSS performance," *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 30, no. 6\_2, pp. 607-613, 2012.
- [17] R. T. Tsunoda, "On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread F," *Geophysical Research Letters*, vol. 32, no. 8, 2005.
- [18] H. Takahashi et al., "Plasma bubble monitoring by TEC map and 630 nm airglow image," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 130–131, pp. 151-158, 2015.
- [19] M. Yoon et al., "Assessment of equatorial plasma bubble impacts on Ground-Based Augmentation Systems in the Brazilian region," in *International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Monterey, California, 2016.
- [20] ICAO Asia and Pacific Office, "REPORT OF THE FOURTH MEETING OF THE ICAO ASIA/PACIFIC GBAS/SBAS IMPLEMENTATION TASK FORCE (GBAS/SBAS ITF/4)," INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2022.

- [21] K. C. Yeh and C. H. Liu, "Radio wave scintillations in the ionosphere," *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 4, pp. 324-360, 1982.
- [22] L. Hoai et al., "Loss-of-lock statistics from the GPS receiver near Suvarnabhumi airport, Thailand," in *IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace 2011)*, Penang, Malaysia, 2011.
- [23] Y. Liu et al., "Study of GNSS loss of lock characteristics under ionosphere scintillation with GNSS data at Weipa (Australia) during solar maximum phase," *Sensors*, vol. 17, no. 10, 2017.
- [24] S. Pullen et al., "A preliminary study of the effect of ionospheric scintillation on WAAS user availability in equatorial regions," in *Proc. ION GPS*, Nashville, 1998.
- [25] M. Caamano et al., "Multi-constellation GBAS: how to benefit from a second constellation," in *Proceedings of IEEE/ION PLANS*, Savannah, 2016.
- [26] Z. He et al., "The ionospheric scintillation effects on the BeiDou signal receiver," *Sensors*, vol. 16, no. 11, 2016.
- [27] N. Hlubek et al., "Scintillations of the GPS, GLONASS, and Galileo signals at equatorial latitude," *J. Space Weather Space Clim.*, vol. 4, 2014.
- [28] L. A. Salles et al., "Investigating Ionospheric Scintillation Effects on Multifrequency GPS Signals," *Surveys in Geophysics*, vol. 42, pp. 999-1025, 2021.
- [29] NovAtel, "An Introduction to GNSS", Alberta, Canada: NovAtel Inc., 2015.
- [30] P. E. Pratap Misra, "Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance (Revised Second Edition)", Lincoln, Massachusetts: Ganga-Jamuna Press, 2012.
- [31] ESA, "Galileo satellites," European Space Agency, [Online]. Available: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo\\_satellites](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_satellites).
- [32] "About GLONASS," Center of Roscosmos, [Online]. Available: [https://glonass-iac.ru/en/about\\_glonass/](https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/).
- [33] "BeiDou Navigation Satellite System," [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>.
- [34] [Online]. Available: <https://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg>.

- [35] [Online]. Available:  
<https://gssc.esa.int/navipedia/images/8/89/GlonassConstellation.JPG>.
- [36] [Online]. Available:  
[https://www.esa.int/Applications/Navigation/Colloquium\\_on\\_scientific\\_and\\_fundamental\\_aspects\\_of\\_Galileo](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Colloquium_on_scientific_and_fundamental_aspects_of_Galileo).
- [37] [Online]. Available: <http://en.people.cn/n3/2019/0408/c90000-9564487.html>.
- [38] ""Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) : NavIC", [Online]. Available: [https://www.isro.gov.in/IRNSS\\_Programme.html](https://www.isro.gov.in/IRNSS_Programme.html).
- [39] ""Quazi-Zenith Satellite System", [Online]. Available: <https://qzss.go.jp/en/>.
- [40] [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/irns#irns-indian-regional-navigational-satellite-system>.
- [41] [Online]. Available: <https://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>.
- [42] R. K. Crane, "Ionospheric Scintillation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, no. 2, pp. 180-199, 1977.
- [43] A. B. Y. He, "Iterative least squares method for global positioning system," *Advances in Radio Science*, vol. 9, pp. 203-208, 2011.
- [44] M. M. Reza et al., "Least Squares Techniques for GPS Receivers Positioning Filter using Pseudo-Range and Carrier Phase Measurements," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 18-26, 2014.
- [45] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins, *Global positioning system: theory and practice* (Fifth, revised edition), Springer Verlag/Wien, 2012.
- [46] T. W. Garner et al., "Total electron content measurements in ionospheric physics," *Advances in Space Research*, vol. 42, no. 4, pp. 720-726, 2008.
- [47] A. J. Mannucci et al., "A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements," *Radio Science*, vol. 33, no. 3, pp. 565-582, 1998.
- [48] Norsuzila Ya'acob et al., *GPS Total Electron Content (TEC) Prediction at Ionosphere Layer over the Equatorial Region*, IntechOpen, 2010.
- [49] T. Walter et al., "Robust detection of ionospheric irregularities," in *Proc. ION GPS*, Salt Lake City, 2000.

- [50] "Thailand GNSS and Space Weather Information Data Center," [Online]. Available: [http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page\\_id=243](http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243).
- [51] Pavel Najman and Tomislav Kos, Performance Analysis of Empirical Ionosphere Models by Comparison with CODE Vertical TEC Maps, Mitigation of Ionospheric Threats to GNSS: an Appraisal of the Scientific and Technological Outputs of the TRANSMIT Project, InTech, 2014.
- [52] J. D. Huba, G. Joyce, "Global modeling of equatorial plasma bubbles," *Geophysical Research Letters*, vol. 37, no. L17104, 2010.
- [53] R. H. Weins et al., "Equatorial plasma bubbles in the ionosphere over Eritrea: occurrence and drift speed," *Annales Geophysicae*, vol. 24, pp. 1443-1453, 2006.
- [54] Don Huton, Odile de la Beaujardière, "C/NOFS Press Conference," AGU, 15 December 2008. [Online]. Available: [http://www.nasa.gov/pdf/296963main\\_cnofs\\_CINDI\\_Final.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/296963main_cnofs_CINDI_Final.pdf).
- [55] S. Saito, N. Fujii, "Impact of the low latitude ionosphere disturbances on GNSS studied with a three-dimensional ionosphere model," in *EWAC*, Tokyo, Japan, 2010.
- [56] P. Abadi, S. Saito, and W. Srigutomo, "Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia," *Annales of Geophysicae*.
- [57] P. M. Kintner et al., "Inside GNSS," [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.insidegnss.com/au-to/julyaug09-kintner.pdf>.
- [58] A. J. Van Dierendonck, J. Klobucha and Q. Hua, "Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers," *proceedings of ION GPS*, vol. 93, pp. 1333-1342, 1993.
- [59] A. Bumrungit, S. Rungraengwajjake, P. Supnithi, A. Saekow, "Analysis of Ionospheric Irregularity Observed near Suvarnabhumi International Airport in Thailand," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 781, pp. 85-88, 2015.
- [60] A. Bumrungit et al., "Drift Velocity Estimation of Ionospheric Disturbance using GPS Observations," in *The 4th Joint International Conference on Information*

and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE-2014), Chiangrai, Thailand, 2014.

- [61] A. Bumrungrit et al., "Statistical Analysis of Separation Distance Between Equatorial Plasma Bubbles Near Suvarnabhumi International Airport, Thailand," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 123, pp. 7858-7870, 2018.
- [62] R. A. Steenburgh, "Ionospheric scintillation effects on single frequency GPS," *Space weather*, vol. 6, p. S04D02, 2008.
- [63] R. C. Das et al., "Location based ATM locator system using OpenStreetMap," in *The 8th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA 2014)*, 2014.
- [64] S. S. Vemuri et al., "Investigation of the effect of ionospheric gradients on GPS signals in the context," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 57, pp. 191-205, 2014.
- [65] J. Li et al., "Mid-latitude ionospheric irregularities persisting into late morning during the magnetic storm on 19 March 2001," *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, p. A08304, 2012.
- [66] J. Lee et al., "Observations of low-elevation ionospheric anomalies for ground-based augmentation of GNSS," *Radio Science*, vol. 46, p. RS6005, 2011.
- [67] J. Seo et al., "Targeted parameter inflation within ground-based augmentation systems to minimize anomalous ionospheric impact," *Journal of Aircraft*, vol. 49, no. 2, pp. 587-599, 2012.
- [68] "International GNSS Service," [Online]. Available: <https://igs.org/data/>.
- [69] A. Bumrungrit et al., "Evaluation of EPB effects on GBAS CAT II/III performance based on GNSS signals near Suvarnabhumi international airport, Thailand," in *ENRI Int. Workshop on ATM/CNS*, Tokyo, Japan, 2019.
- [70] T. Yokoyama et al., "West wall structuring of equatorial plasma bubbles simulated by three-dimensional HIRBmodel," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, p. 8810-8816, 2015.

- [71] Z. Yang et al., "Correlation between ROTI and Ionospheric Scintillation Indices using Hong Kong low-latitude GPS data," *GPS Solutions*, vol. 20, pp. 815-824, 2016.
- [72] "Equatorial Atmosphere Radar (EAR)," [Online]. Available: <https://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/index-e.html>.
- [73] A. Bumrunkit et al., "A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude regions," *GPS Solutions*, vol. 26, no. 148, 2022.
- [74] "Septentrio PolaRxS Packaged Receivers," [Online]. Available: [https://www.navtechgps.com/septentrio\\_polarxs\\_packaged\\_receivers/](https://www.navtechgps.com/septentrio_polarxs_packaged_receivers/).



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวอัจฉราภรณ์ บำรุงกิจ

วัน เดือน ปีเกิด 26 พฤศจิกายน 2532 ที่จังหวัดจันทบุรี

ที่อยู่ 351/5 ถนนท่าแฉลบ 6 ตำบลตลาด อำเภอเมือง  
จังหวัดจันทบุรี 22000 โทร. 086-4536179

ประวัติการศึกษา 2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิชาโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาโทรคมนาคม

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Bumrungrkit, A., Supnithi, P., Saito, S., & Myint L. M. M. (2022) A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude regions. GPS Solutions GPS 26, 148.
2. Bumrungrkit, A., Supnithi, P., & Saito, S. (2018). Statistical Analysis of Separation Distance Between Equatorial Plasma Bubbles Near Suvarnabhumi International Airport, Thailand. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123(9), 7858-7870.

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ

1. Bumrungrkit, A., Supnithi, P., & Saito, S. (2020) "A study of equatorial plasma bubble structure using VHF radar and GNSS scintillations over the low-latitude region," in JpGU-AGU Joint meeting 2020.
2. Bumrungrkit, A., Supnithi, P., & Saito, S. (2019) "Evaluation of EPB effects on GBAS CAT II/III performance based on GNSS signals near Suvarnabhumi international airport, Thailand," in ENRI Int. Workshop on ATM/CNS. Tokyo, Japan. (EIWAC 2019).
3. Bumrungrkit, A., Phakphisut, W., & Supnithi, P. (2019, June). Preliminary results of EPB impact on GBAS performance. In 2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) (pp. 1-3). IEEE.
4. Bumrungrkit, A., & Supnithi, P. (2018, July). Thai GNSS and Space Weather Information Center. In The 33rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) 2018, (pp. 663-665).
5. Bumrungrkit, A., Supnithi, P., & Saito, S. (2018) "Analysis of Ionospheric delay gradients over Thailand during geomagnetic storm on 8 September 2017," in the 5th Asia Oceania Space Weather Alliance (AOSWA2018).
6. Bumrungrkit, A., & Supnithi, P. (2017, March). Statistical Analysis of Separation Distance between Equatorial Plasma Bubbles. In 2017 IEEE 13th International Symposium on Autonomous Decentralized System (ISADS) (pp. 212-215). IEEE.
7. Bumrungrkit, A., Rungraeungwajiake, S., Supnithi, P., & Siansawasdi, N. (2015) "A comparison of delay gradient near Suvarnabhumi International airport in Thailand," International Reference Ionosphere 2015 (IRI 2015).