

Review article

พลาสมาบับเปิดบริเวณเส้นศูนย์สูตร (EPB): คุณลักษณะ ตัวบ่งชี้กับวิธีการตรวจจับ EPB
และผลการวิจัยล่าสุด

EQUATORIAL PLASMA BUBBLE (EPB): FEATURES, INDICATORS AND DETECTION METHODS
FOR EPB, AND RECENT RESEARCH RESULTS

ปณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์*
Punyawi Jamjareegulgarn*

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus,
Chumphon 86160 Thailand

Journal of Industrial Education. 2024, Vol. 23 (No. 1), <https://doi.org/10.55003/JIE.23101>

Received: April 25, 2024, | Revised: April 26, 2024, | Accepted: April 27, 2024

ABSTRACT

This review article is a collection of research works, academic articles, and numerous academic knowledge related to equatorial plasma bubble (EPB). As per the beginning of this writing, the author was inspired by the truth that Thailand's location is close to the geomagnetic Equator with the low plasma density. Hence, Thailand has very high susceptible to occur the ionospheric anomaly during the post-sunset (e.g., EPB) and equatorial ionization anomaly (EIA). These anomalous phenomena affect directly on high-frequency communications and global navigation satellite system (GNSS). Therefore, the EPB details (e.g., EPB features, some indicators and detection methods for EPBs, recent research results, as well as conclusion and future developing trend) are the crucial content for space weather research that can support students and researchers to study and enhance in several GNSS-based applications.

Keywords: Equatorial plasma bubble, Rate of TEC change, Amplitude scintillation, Machine learning

บทคัดย่อ

บทความปริทัศน์ฉบับนี้เป็นการรวบรวมงานวิจัย บทความวิชาการและความรู้ทางวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร (EPB) โดยจุดเริ่มต้นของการเขียนนี้ ผู้เขียนได้แรงบันดาลใจมาจากการที่ประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกที่มีความหนาแน่นพลาสมาที่ต่ำ จึงทำให้มีโอกาสสูงมากที่จะเกิดความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตอนหลังพระอาทิตย์ตก (เช่น ปรากฏการณ์ EPB) และการแตกตัวที่ผิดปกติบริเวณเส้นศูนย์สูตร (EIA) ซึ่งล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อระบบการสื่อสารความถี่สูงและระบบดาวเทียมนำทางสากลบนโลก (GNSS) ทั้งสิ้น ดังนั้น รายละเอียดต่าง ๆ ของ EPB ได้แก่ คุณลักษณะของ EPB ตัวบ่งชี้และวิธีการที่ใช้ตรวจจับ EPB ผลการวิจัย และบทสรุป แนวโน้มการพัฒนาต่อไป จึงเป็นเนื้อหาที่สำคัญสำหรับงานวิจัยด้านสภาวะอวกาศที่จะช่วยให้นักศึกษาและนักวิจัยสามารถนำไปศึกษาและต่อยอดในการประยุกต์ใช้งานที่อาศัย GNSS มากมาย

คำสำคัญ: พลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร, อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า TEC, ชินทิลเลชันแอมพลิจูด, การเรียนรู้เครื่องจักรกล

1. บทนำ

ปรากฏการณ์ EPB เป็นโครงสร้างแบบคลื่นยักษ์ (Plume) ที่กระเจิงกลับ (หรือ Backscatter plume) ที่เริ่มก่อตัว (Seeding) ที่ด้านล่างของชั้น F แล้วยืดอกออกไปหรือเจาะทะลุ (Penetrate) ไปสู่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน รวมทั้งขยายตัวไปตามแนวของสนามแม่เหล็กโลกจากเส้นศูนย์สูตรไปยังละติจูดต่ำและละติจูดกลางได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการหายไปของความหนาแน่นพลาสมาเมื่อเทียบกับปริมาณพลาสมาปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Background ionosphere) โดย EPB มีความเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ Rayleigh-taylor instability (RTI) และปรากฏการณ์ Equatorial spread-F (ESF) โดยตรงและการเติบโต (Development) ของ EPB นำไปสู่ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในลักษณะต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับขนาดหรือสเกล (Scale) ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการเลี้ยวเบนของสัญญาณวิทยุ การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดและเฟสที่รวดเร็ว (Scintillation) ที่เกิดขึ้นจากชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นหลัก (จึงถูกเรียกว่า ชินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์) รวมทั้งการกระเจิงและการโพลาไรซ์ของสัญญาณดาวเทียม ดังนั้น EPBs จึงเป็นภัยคุกคามที่ร้ายแรงต่อสัญญาณวิทยุที่ส่งผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ซึ่งก่อให้เกิดผลเสียหลายอย่างต่อการสื่อสารและการนำทาง (Vankadara et al., 2023, pp. 1-25) ได้แก่

- 1) การขาดการติดต่อย่านความถี่ UHF ระหว่างดาวเทียมกับเฮลิคอปเตอร์ที่อัฟกานิสถาน ในวันที่ 4 มีนาคม 2545 อาจเกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ EPBs
- 2) การนำทางและความน่าเชื่อถือของการให้บริการระบบ GNSS ถูกทำลายอย่างหนักเมื่อเกิด EPBs ซึ่งทำให้การระบุตำแหน่งที่ผิดพลาดหลายสิบเมตรหรือมากกว่า
- 3) การเกิดชินทิลเลชันที่รุนแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจาก EPBs ซึ่งแอมพลิจูดของสัญญาณ GNSS มีค่าลดลงได้มากกว่า 25 dB วงจรติดตามคลื่นพาห์ของเครื่องรับ GNSS ถูกก่อกวน จนทำให้เกิดการ Loss-of-lock ของสัญญาณ GNSS ได้ และจำนวนของดาวเทียม GNSS ที่รับสัญญาณได้ลดลง ซึ่งนำไปสู่การระบุตำแหน่งและความล้มเหลวในการสื่อสาร/การนำทาง เนื่องจากสัญญาณ GNSS ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในงานหลายด้านในยุค Hi-tech

ความจำเป็นในการคาดการณ์ (Forecasting) การเกิดของ EPB, ชินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ส่งผลกระทบต่อความถี่ VHF และ SHF รวมทั้งการลดผลกระทบของ EPB จึงเป็นประเด็นที่สำคัญมากต่องานวิจัยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามทำนายชินทิลเลชันสัญญาณ GNSS เนื่องจาก EPB บริเวณเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ แต่ก็ยังไม่ได้ข้อสรุปที่ชัดเจน การวิจัยและการพัฒนาเกี่ยวกับ EPB จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจและสามารถนำเสนอได้อีกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยก็ตั้งอยู่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก จึงทำให้ประเทศที่พัฒนาแล้วจำนวนมากต่างให้ความสำคัญที่จะมาติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการตรวจจับและทำนายการเกิด EPB ในประเทศไทย ดังนั้น บทความปริทัศน์ฉบับนี้จึงให้ความสำคัญที่จะกล่าวถึงภาพรวมของ EPB ได้แก่ คุณลักษณะของ EPB ตัวบ่งชี้และวิธีการที่ใช้ตรวจจับ EPB (ได้แก่ การใช้ค่า ROTI, ค่า TEC gradient, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\Delta VTEC$, ค่า S4 index และการใช้วิธี Machine learning ได้แก่ Convolutional neural network (CNN) และ Support vector machine (SVM) ผลการวิจัยล่าสุดของแต่ละวิธีที่ใช้ตรวจจับ EPB รวมไปถึง บทสรุป แนวโน้มที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

2. คุณสมบัติของ EPB

ที่ผ่านมา มีการใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการสังเกตคุณลักษณะการเกิดขึ้นและการเปลี่ยนแปลงของ EPBs ยกตัวอย่างเช่น การวัดค่าปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด (Total electron content หรือ TEC) ดัชนีชั้นทิลเลชันจากเครื่องรับ GNSS สัญญาณสะท้อนกลับจากเครื่องไอโอโนซอนด์ การใช้เรดาร์วัดการกระเจิงคลื่นแบบ Coherent/แบบ Non-coherent การถ่ายภาพแอร์โกลว์ (Airglow imager) และการวัดค่าแบบอินซิทู (in situ) จากดาวเทียมวงโคจรต่ำ ผลจากการตรวจวัดคุณลักษณะของ EPB ด้วยเครื่องมือวัดชนิดต่าง ๆ พอจะสรุปได้ดังนี้

a) จากการสังเกตแผนภาพสองมิติของคลื่นสะท้อนที่กระเจิงกลับของเรดาร์ ALTAIR ร่วมกับดาวเทียมอินซิทูที่วัดค่าความหนาแน่นพลาสมา พบว่า คลื่นยักษ์ (Plumes) ที่กระเจิงกลับที่สังเกตได้นั้นเกี่ยวข้องกับ EPBs ที่มีการหายไป (Bite-out) ของความหนาแน่นพลาสมาที่ลึกและมีขอบที่ชันมาก (Tsunoda, 1981, pp. 139-149)

b) จากการใช้เครื่อง All-sky airglow imager (ASI) ที่สถานี Sata (31.0°N, 130.7°E) และที่สถานีคอนจูเกตกัน Darwin (12.4°S, 131.0°E) ที่ผ่านมา Otsuka et al. (2002, pp. 1-4) ได้พบโครงสร้าง EPBs ที่ตรวจจับได้พร้อมกันที่มีความหนาแน่นพลาสมาหายไปและมีการยึดตัวตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยังละติจูดต่ำเหนือ-ใต้ทั้งสองซีกโลก ขณะที่ EPBs ส่วนใหญ่ได้ถูกจำกัดในพื้นที่แถบเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำ แต่ก็ยังพบว่า “มีบางเหตุการณ์ของพลาสมาบับเบิลซูปเปอร์และเหตุการณ์ซินทิลเลชันที่รุนแรงก็เกิดขึ้นได้ที่ละติจูดกลาง 40°N หรือสูงกว่าในลองจิจูดบางแห่งในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกได้ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างพลาสมาที่หายไปของ EPB นั้นสามารถขยายไปถึงระดับความสูงที่สูงถึง 3,400 km หรือสูงกว่าเหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกในทิศทางโซนัล (E-W) โดยความกว้างของ EPB อาจจะพบได้หลายสเกลตั้งแต่หลายสิบกิโลเมตรไปจนถึงหลายร้อยกิโลเมตรได้

c) จากการวัดด้วยเครื่อง Ion Velocity Meter (IVM) ที่อยู่บนดาวเทียม Communications/navigation outage forecasting system (C/NOFS) โดย Smith and Heelis (2017, p. 5749) พบว่า ความกว้างของ EPBs อาจจะมีความได้ตั้งแต่ 115 km ไปจนถึง 460 km ด้วยค่าพิคที่เด่นชัดที่เกิดขึ้นประมาณ 200 km โดย EPB ที่มีสเกลเล็กไม่สามารถตรวจจับได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องวัด IVM ที่ใช้สังเกต

d) จากการสังเกตด้วย Ground-based airglow imager โดย Liu et al. (2019, pp. 3612-3620) พบว่า ความกว้างของ EPBs ที่เกิดจากการก่อตัวของความผิดปกติสเกลเล็กที่มีระดับหลายสิบกิโลเมตร (เช่น ประมาณ 70 km) ขณะที่ความกว้างโดยทั่วไปของ EPBs มีค่าอยู่ที่หลายร้อยกิโลเมตร โดย EPBs อาจจะผลิตผลกระทบต่อเซกเตอร์ลองจิจูดที่ยาวหลายพันกิโลเมตรอันเนื่องมาจากการลอยเลื่อนในแนวโซนัล ซึ่ง EPBs จะถูกผลักอย่างแรงโดยลมโซนัลชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกภายใต้สภาวะที่เสียบทางแม่เหล็กโลกก็ได้ สำหรับสถานีเรดาร์ที่เมือง Kototabang (0.2°S, 100.3°E) ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และที่เมือง Sanya (18.3°N, 109.6°E) ในเอเชียตะวันออกได้แสดงให้เห็นว่า EPBs สามารถลอยเลื่อนในแนวโซนัลออกไปได้ไกลประมาณ 1,000 km จากตำแหน่งลองจิจูดที่ EPBs เกิดขึ้น (Li et al., 2013, p. 6544)

ขณะที่คุณลักษณะทั่วไปของ EPBs และการเปลี่ยนแปลงในระยะกลางของ EPBs สามารถที่จะเข้าใจได้เป็นอย่างดีแต่ปัจจัยต่าง ๆ ที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน (Day-to-day) การเปลี่ยนแปลงในระยะสั้นของ EPB และการเกิดซินทิลเลชันยังคงไม่ชัดเจนในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ฤดูกาลที่มีโอกาสสูงและต่ำของการเกิดขึ้น EPBs เป็นเดือน Equinox และเดือน Solstice ตามลำดับ แต่การสังเกตเหล่านั้นยังแสดงให้เห็นว่า EPBs อาจจะไม่ปรากฏ (ปรากฏ) ในบางคืนของเดือน Equinox (เดือน Solstice) ก็ได้ ดังนั้น การทำนายการเกิด EPBs และซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์จึงเป็นไปได้ยากและจะเกี่ยวข้องกับคำถามต่อไปนี้ที่ยังคงเป็นโจทย์เพื่องานวิจัยและพัฒนา (Li et al., 2021, p. 203) ดังนี้

(1) ปัจจัยใดที่ควบคุมการก่อตัวของ EPB และปัจจัยที่ควบคุมดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันอย่างไร?

(2) ปัจจัยใดที่ควบคุมการพัฒนาและช่วงเวลาการเกิด (Lifetime) ของ EPBs?

(3) เราสามารถหาค่าซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างแม่นยำได้อย่างไรจากการวัด EPB?

การก่อตัวของ EPBs ได้ถูกยอมรับว่าเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากความไม่เสถียรภาพแบบเรย์ลี-เทย์เลอร์ (Generalized rayleigh-taylor instability หรือ RTI) อัตราการเติบโตเชิงเส้นของ RTI (γ) ขึ้นอยู่กับความเร็วลอยเลื่อนพลาสมาแนวตั้งที่พุ่งขึ้นในชั้น F (V), ลมนิวทรัลที่พุ่งขึ้นตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (U), ความถี่การชนกันของไอออนและนิวทรัล (ν_{in}), ขนาดความยาวที่ไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมา (L), อัตราการรวมตัวกันใหม่ (β), ค่าความนำตามเส้นสนามแม่เหล็กรวมในชั้น E กับชั้น F ($\sum_p^E, \sum_p^F$) ซึ่งอยู่ในรูปสมการที่ (1) ดังนี้

$$\gamma = (1/L) \frac{\sum_p^F}{\sum_p^E + \sum_p^F} (V - U + g/v_{in}) - \beta \quad (1)$$

โดยทั่วไป ความไม่เท่ากันของความหนาแน่นพลาสมาที่พุ่งขึ้น (อยู่ในทิศทางขนานแต่ตรงข้ามกับทิศทางแรงโน้มถ่วงของโลก g) อย่างรุนแรงจะปรากฏตัวที่ด้านล่างของชั้น F เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก ในตอนกลางวัน ค่าความหนาแน่นในชั้น E ที่ละติจูดต่ำจะมีค่าที่สูงมาก (เนื่องจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์) และสามารถตัดสนามไฟฟ้าที่โพลาร์กับชั้น F แล้วนำไปสู่การบีบกดการก่อตัวของปรากฏการณ์ RTI ได้ จึงเป็นการยากที่ EPBs จะถูกสร้างขึ้นในตอนกลางวันยกเว้นเหตุการณ์ผิดปกติในบางครั้ง หลังจากพระอาทิตย์ตก ไม่มี Photoionization ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ อนุภาคที่มีประจุที่ระดับความสูงที่ต่ำกว่าจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำความสูงของชั้น F สูงขึ้นและทำให้ L มีค่าที่สั้นลง ค่าความหนาแน่นของชั้น E ก็ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากพระอาทิตย์ตก ซึ่งทำให้เกิดการไม่เท่ากันของค่าความหนาแน่นในทิศทางซีกโลกกับ Sunset terminator องค์ประกอบโซลของสนามไฟฟ้าชั้น F จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นหลายครั้งไปสู่ค่าสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกที่มากขึ้น ซึ่งจะถูกระบุว่า Pre-reversal enhancement (PRE) ของสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก โดย PRE นี้สามารถที่จะผลักดันให้การลอยเลื่อนพลาสมาแนวตั้งที่พุ่งขึ้นมีค่าสูงขึ้นได้ ซึ่งสามารถที่จะยกชั้น F ให้สูงขึ้นได้ด้วยค่า v_{in} และ β ที่ลดลง และนำไปสู่อัตราการก่อตัวของ RTI ที่สูงขึ้นได้

อัตราการก่อตัวเชิงเส้นของ RTI ในเวลากลางคืน ซึ่งถูกควบคุมหลักด้วยความสูงของชั้น F ค่าความหนาแน่นตามแนวเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่มีค่าน้อย ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของ EPBs อย่างรวดเร็ว หลังจากพระอาทิตย์ตก ในทางกลับกัน “การลอยเลื่อนพลาสมาที่พุ่งขึ้นปริมาณที่สูงมากจนถึง ~ 1000 m/s ได้สังเกตเห็น แต่ไม่มี EPBs ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกในเดือนตุลาคม 2003” ในการจำลองเชิงตัวเลขของ EPBs ก่อนหน้านี้ การก่อตัวของ EPBs ในช่วงเริ่มต้นด้วยการก่อตัวของความหนาแน่นของพลาสมาที่ด้านล่างของชั้น F กับอัตราการก่อตัวของ RTI พบว่า การก่อตัวในช่วงเริ่มต้น $\sim 5\%$ ขึ้นไปสามารถที่จะลดเวลาที่ต้องการสำหรับ RTI ในการก่อตัวไปสู่ EPBs ได้คลื่นแรงโน้มถ่วงโลกที่ถูกสร้างขึ้นจากกิจกรรมการนำพาในชั้นบรรยากาศด้านล่างบริเวณ Intertropical convergence zone (ITCZ) ก็เป็นอีกแหล่งกำเนิดหนึ่งที่เป็นไปได้ต่อการสร้าง EPBs เพราะเกิดการก่อตัวของความหนาแน่นพลาสมา แหล่งกำเนิดของ EPB ที่เป็นไปได้อีกหนึ่งแหล่งหนึ่งก็คือ ปรากฏการณ์ Collisional shear flow ที่เกิดขึ้นด้านล่างของชั้น F ซึ่งเป็นลักษณะที่พลาสมาลอยเลื่อนมุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก แต่ลมนิวทรัลกลับเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกในตอนช่วงใกล้เวลาที่พระอาทิตย์ตก

3. ตัวบ่งชี้ระดับความรุนแรงและวิธีที่ใช้ตรวจจับ EPB

3.1 ค่า ROTI, ค่า TEC gradient และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\Delta VTEC$

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวบ่งชี้ (Proxy) ต่าง ๆ ที่ใช้เพื่อบอกความเป็นไปได้ของการเกิดความผิดปกติของ EPB ได้แก่ ค่า ROT (Rate of TEC change), ค่า ROTI (Rate of TEC change index), ค่า $ROTI_{ave}$ (ค่าเฉลี่ยของ ROTI), ค่า TEC gradient ระหว่างสถานี GNSS (ΔTEC), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\Delta VTEC$ ($\sigma \Delta VTEC$), ค่าเฉลี่ยของ $\sigma \Delta VTEC$ ($\sigma \Delta VTEC_{ave}$) (Timoçin et al. (2020, p. 342) โดยค่า ROT (Rate of TEC change) และค่า ROTI (Rate of TEC change index) นี้ใช้แทนความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์อันเนื่องมาจากพลาสมาบับเบิล ซึ่งได้ถูกแนะนำโดย Pi et al. (1997, p. 2284) ว่าเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีสำหรับความแปรปรวนชั้นไอโอโนสเฟียร์และสามารถใช้ในการบรรยายคุณลักษณะของความผิดปกติพลาสมาบับเบิลได้ โดยค่า ROT (Rate of TEC change) หาได้จากสมการที่ (2)

$$ROT(t_k^i) = \frac{TEC_k^i - TEC_{k-1}^i}{t_k^i - t_{k-1}^i} \quad (2)$$

โดยที่ TEC แทนค่า Slant TEC, i คือจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้และ k คือ Epoch time (ช่วงเวลาที่ทำการบันทึกค่า) ในที่นี้ $k = 0.5$ นาที หลังจากนั้น เราจะหาค่า ROTI (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ROT) ทุก ๆ 5 นาที โดยหาค่าได้จากสมการที่ (3)

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (3)$$

โดยที่ $\langle ROT \rangle$ เป็นค่าเฉลี่ยของ ROT ในแต่ละ Epoch time โดยในงานวิจัยนี้ $ROTI \geq 0.5 \text{ TECU.min}^{-1}$ บ่งบอกถึงความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับซินทิลเลชัน โดยทั่วไป ระดับของความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์แบ่งออกเป็น 3 ระดับ: ระดับที่ 1 คือไม่รุนแรง ($0.25 \leq ROTI < 0.5$); ระดับที่ 2 คือปานกลาง ($0.5 \leq ROTI < 1$); และระดับที่ 3 คือรุนแรง ($ROTI \geq 1$) หลังจากนั้น เราก็คำนวณค่าเฉลี่ยของ ROTI ($ROTI_{ave}$) ที่ใช้ในบ่งชี้ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ทุก ๆ 30 นาที ของแต่ละสถานีสำหรับดาวเทียมที่เห็นได้ทุกดวงและดัชนีนี้ถูกใช้เพื่ออธิบายระดับความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในบทความวิจัยก่อนหน้านี้เป็นจำนวนมาก โดยค่า $ROTI_{ave}$ นี้สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (4)

$$ROTI_{ave}(0, 5h) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^k \frac{ROTI(n, 0.5h, i)}{k} \quad (4)$$

โดยที่ N คือจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้, n คือหมายเลขดาวเทียม, ตัวเลข 0.5 หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการหาค่าทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง (0, 0.5, ... 23.5, 24 ชั่วโมง), i คือ Epoch time ที่ใช้หาค่า ROTI ทุก ๆ 5 นาทีภายในช่วงเวลาทั้งหมด 30 นาทีในการหาค่า $ROTI_{ave}$, k เป็นจำนวนของค่า ROTI ที่หาค่าได้ในเวลา 30 นาทีสำหรับดาวเทียมแต่ละดวง ค่าของ $ROTI_{ave}$ แบ่งออกเป็น 3 ระดับเช่นกัน อาทิ ระดับที่ 1 คือไม่มีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ ($ROTI_{ave} \leq 0.4$); ระดับที่ 2 คือมีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้น ($0.4 < ROTI \leq 0.8$); และระดับที่ 3 คือมีความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์รุนแรง ($ROTI > 0.8$) หลังจากนั้น ค่า TEC gradient ระหว่างสถานี GNSS ($\Delta VTEC$) ก็ถูกนำเสนอเช่นกันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงตามแนวละติจูดของค่า Vertical TEC ดังนั้น สถานีต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาจะพยายามเลือกสถานีที่ตั้งอยู่ในแนวลองจิจูดเดียวกันหรือใกล้เคียงกันโดยประมาณ ค่า $\Delta VTEC$ หาค่าได้จากสมการที่ (5)

$$\Delta VTEC(t_i^k) = \frac{VTEC_x(t_i^k) - VTEC_y(t_i^k)}{\Delta latitude} \quad (5)$$

โดยที่ x และ y แทน 2 คู่สถานี ยกตัวอย่างเช่น x แทนคู่ของสถานี IISC และ SGOC (สัญลักษณ์ IISC-SGOC) และ x แทนคู่ของสถานี HYDE และ IISC (สัญลักษณ์ HYDE-IISC), i คือ Epoch time ($i = 1$ ถึง 720), k คือจำนวนดาวเทียมที่มองเห็นได้ และ $\Delta latitude$ คือผลต่างค่าละติจูดระหว่างสองสถานี โดย Epoch time ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 นาที ซึ่งเท่ากับเวลาที่ใช้ในการหาค่า ROT ต่อจากนั้น เราจะหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\Delta VTEC$ ($\sigma \Delta VTEC$) บนช่วงเวลาที่เราพิจารณาเท่ากับ 5 นาทีต่อไป เราจะหาค่าเฉลี่ยของ $\sigma \Delta VTEC$ ($\sigma \Delta VTEC_{ave}$) ภายในช่วงเวลา 30 นาทีสำหรับแต่ละคู่สถานี สุดท้าย เราจะพิจารณาความน่าจะเป็นของการเกิดพลาสมาบับเบิลสำหรับแต่ละชั่วโมง ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (6)

$$\text{Occurrence Probability } (t_i)\% = \frac{X_i(ROTI_{ave} > 0.4)}{X_{i(total)}} \times 100 \quad (6)$$

โดย i เป็นชั่วโมงของวัน, X คือจำนวนครั้ง (Epoch) ที่ค่า $ROTI_{ave}$ มีค่ามากกว่า 0.4 และ X_{total} คือจำนวน Epoch ทั้งหมด

3.2 วิธีการตรวจจับ EPB โดยใช้ค่า S4 index

นอกจากตัวบ่งชี้ที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เราก็สามารถใช้ค่าแอมพลิจูดซินทิลเลชัน (Amplitude scintillation หรือ S₄ index) และค่าสเกลเฟรสนเอลด์บัทที่ 1 (d_F) ในการตรวจจับและอธิบายโครงสร้าง EPBs สเกลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ (Li et al., 2021, p. 205) ซึ่งโดยปกติ ขนาดสเกลของโครงสร้าง EPB มีค่าหลายพันกิโลเมตรตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกและมีค่าหลายสิบไปจนถึงหลายร้อยกิโลเมตรในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นสนามแม่เหล็กโลก โครงสร้าง EPBs สเกลเล็กและปานกลางสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์และ Backscatter plume echoes จากเรดาร์ได้ แต่ไม่สามารถใช้อธิบายโครงสร้าง EPBs สเกลใหญ่ได้ โดยค่า S₄ index ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการศึกษาซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (7)

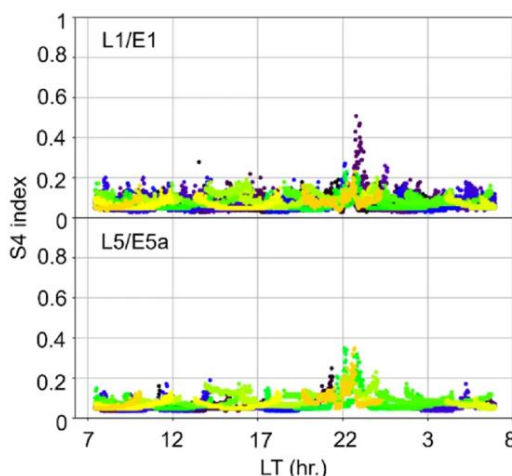
$$S_4 = \sqrt{(\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2} \quad (7)$$

ในที่นี้ I เป็นค่าความเข้มของสัญญาณ และ $\langle \rangle$ หมายถึงค่า Ensemble average โดยความรุนแรงของซินทิลเลชันขึ้นอยู่กับความถี่คลื่นวิทยุ สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดซินทิลเลชันคือความผิดปกติของความหนาแน่นพลาสมาที่มีขนาดสเกลต่ำกว่าค่า d_F โดยค่า d_F นี้จะใช้ในการอธิบายและคำนวณหาค่าโครงสร้าง EPBs สเกลใหญ่ได้โดยใช้สมการที่ (8)

$$d_F = \sqrt{2\lambda z} \quad (8)$$

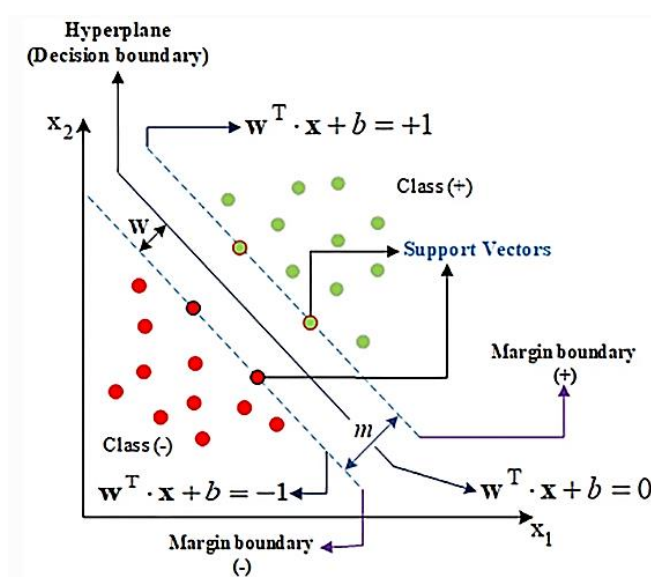
ในที่นี้ z คือความสูงของบริเวณที่เกิดความผิดปกติ (มี EPB เกิดขึ้น) และ λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณ GNSS ที่ใช้งาน เช่น สำหรับความถี่ GPS L1 (1,575.42 MHz) และถ้าสมมติว่า z เท่ากับ 400 km ค่า d_F มีค่าประมาณ 390 เมตร

เป็นที่ทราบกันดีว่า ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นต้นเหตุผลกระทบที่รุนแรงต่อสัญญาณระบบ GNSS ซึ่งบ่อยครั้งมักจะพบในรูปของการแกว่งที่รวดเร็วทั้งแอมพลิจูดและเฟส เหนือพื้นที่ละติจูดต่ำ EPB มักจะเกิดขึ้นบ่อยหลังพระอาทิตย์ตก ทำให้เกิดซินทิลเลชันสัญญาณ GNSS เนื่องจากสัญญาณพาดผ่านบริเวณที่เกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้น งานวิจัยของ Bumrunkit et al. (2022, p. 2) จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า S₄ index ที่มีต่อสัญญาณ GNSS และคุณลักษณะเฉพาะของ EPB ความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างระหว่างสัญญาณ Backscatter echoes ที่เกี่ยวข้องกับ EPB กับซินทิลเลชันหลายระบบ GNSS และหลายความถี่ (MC/MF GNSS scintillation receiver) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัญญาณ L1/E1 และสัญญาณ L5/E5a ของระบบดาวเทียม GPS และ Galileo ในการวิเคราะห์ซินทิลเลชัน GNSS ตามเส้นทางของสัญญาณ GNSS นั้น ตำแหน่ง GNSS lonospheric pierce points (IPPs) จะถูกแมปกับค่า S₄ index ที่ความสูงต่าง ๆ และฉายภาพ (Project) ไปตามเส้นสนามแม่เหล็ก ร่วมกับ Backscatter echoes โดยใช้เครื่องมือวัดจำพวก Equatorial atmosphere radar (EAR) ของสถานี Kototabang (KTTB) เมืองสุมาตราตะวันตก ประเทศอินโดนีเซีย



รูปที่ 1 อนุกรมเวลาของค่าซินทิลเลชันแอมพลิจูดหรือ S₄ index ที่ได้รับทุก ๆ 1 นาที จากดาวเทียมทุกดวงที่รับสัญญาณ L1/E1 และสัญญาณ L5/E5a ในวันที่ 18 มีนาคม 2562 ที่สถานี KTTB ที่มา: Bumrunkit et al. (2022, p. 6)

โดยการศึกษาของ Bumrungrkit et al. (2022, pp. 4-5) นั้นจะพิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่ระดับปานกลางเท่านั้นเนื่องจากข้อมูลที่ใช้ศึกษามีจำกัดและผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่า S4 index กับบริเวณที่รับสัญญาณ Backscatter echoes ของเรดาร์ EAR จะถูกนำเสนอ โดยค่า S4 index จะถูกวัดค่าได้จากเครื่องตรวจจับ MC/MF GNSS scintillation receiver (รุ่น PolarRxS ของบริษัท Septentrio) โดยค่าขึ้นทิลเลชันจะถูกประมาณค่าได้จากเครื่องรับทุก ๆ นาที่และค่ากำลัง Backscatter echo ของเรดาร์ EAR ของสัญญาณย่านความถี่ VHF ก็ถูกวัดค่าออกมาเช่นกันทุก ๆ 2-4 นาที ช่วงเวลาการทำงาน (Scanning) อาจเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการมีการตรวจวัดค่าอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศที่จะต้องกระทำระหว่าง Scanning รูปที่ 1 แสดงอนุกรมเวลาของค่าขึ้นทิลเลชันแอมพลิจูดหรือ S4 index ที่ได้รับทุก ๆ 1 นาทีจากดาวเทียมทุกดวงที่รับสัญญาณ L1/E1 และสัญญาณ L5/E5a ในวันที่ 18 มีนาคม 2562 ที่สถานี KTTB สีที่ต่างกันบ่งชี้ถึงค่า S4 index จากระบบดาวเทียมที่ต่างกัน โดยค่า S4 index ของสัญญาณ L1/E1 ที่ได้รับจากดาวเทียมทุกดวงจะแสดงไว้ที่รูปบนและค่า S4 index ของสัญญาณ L5/E5a ที่ได้รับจากดาวเทียมทุกดวงจะแสดงไว้ที่รูปล่าง จากรูปที่ 1 พบว่า ค่า S4 index ของทั้งสองความถี่มีค่าที่สูงที่เวลาประมาณ 22LT ถึงแม้ว่าสัญญาณที่ความถี่ L1/E1 จะเกิดขึ้นทิลเลชันที่สูงกว่าสัญญาณ L5/E5a และค่า S4 index ที่สูงขึ้นสามารถที่จะเห็นได้อย่างชัดเจนในช่วงเวลาประมาณ 21:40-00:30 LT



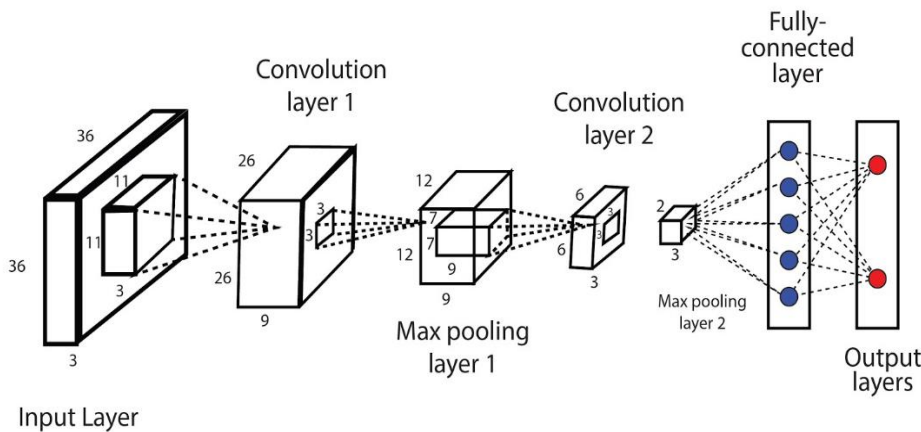
รูปที่ 2 Hyperplane และ Support vectors ของวิธี SVM
ที่มา: Thanakulketsarat et al. (2023, p. 3)

3.3 วิธีการตรวจจับ EPB โดยใช้ machine learning

นอกจากนี้ Thanakulketsarat et al. (2023, p. 3) ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับ EPB โดยใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้เครื่องจักรกล (Machine learning) ได้แก่ วิธี Convolutional neural network (CNN) และวิธี Support vector machine (SVM) โดยแบบจำลองที่ 1 เป็นการผสมวิธี Singular value decomposition (SVD) เข้ากับวิธี SVM ขณะที่ แบบจำลองที่ 2 เป็นการผสมวิธี CNN เข้ากับวิธี SVM ในที่นี้ จะขออธิบายหลักการเบื้องต้นของ SVM และ CNN ดังนี้

Support vector machine (SVM) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นสำหรับการจำแนกและการประมาณค่าที่ถูกนำเสนอโดย Vapnik and Lerner (1963, pp. 774-780) ซึ่งมันสามารถที่จะจัดการกับข้อมูลที่สามารถจำแนกแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้เคอร์เนล (Kernel) อัลกอริทึมของมันจะสร้างขอบเขตการตัดสินใจที่ถูกเรียกว่า Hyperplane ที่แยกได้ทั้งคลาสเชิงบวก และเชิงลบ โดยการทำให้อัฒจันทร์ (Margin) มีค่ามากที่สุดและค่าความผิดพลาดจากการจำแนกลดลง โดยมาตรวัดเป็นค่าระยะห่างระหว่าง Hyperplane กับตำแหน่งค่าข้อมูลที่ใกล้ที่สุดจากแต่ละคลาสที่ถูกเรียกว่า support vectors รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างและวิธีตัดสินใจของวิธี Support vector machine เพื่อที่จะสรุป Hyperplane ใช้จำแนกที่เหมาะสมที่สุดท่ามกลางข้อมูลที่ถูกแยกออกไปได้แบบเชิงเส้น

Convolutional neural network (CNN) เป็นวิธีการคำนวณแบบคอนโวลูชันที่ถูกนำไปใส่เพิ่มเติมในโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) เพื่อที่จะหาคุณลักษณะเด่นของภาพนั้นได้ถูกแนะนำโดย Lecun et al. (1990, p. 37) โดยชั้นที่คำนวณคุณลักษณะเด่นของภาพโดยใช้เทคนิคคอนโวลูชันนั้นจะถูกเรียกว่า ชั้นคอนโวลูชัน (Convolutional layer) Lecun et al. (1998, pp. 2278-2324) ได้นำเสนอวิธี Convolutional neural network (CNN) ที่ถูกเรียกว่า LeNet-5 ซึ่งได้แนะนำหลักการของชั้นที่เชื่อมต่อกันแบบเต็มที่ (Fully connected layer) โดยชั้นนี้ทำตัวเสมือนเป็นชั้นหนึ่งของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีหลายชั้น 1 ชุดที่ส่งผลดีทำให้ CNN สามารถที่จะดึงคุณลักษณะเด่น (Feature extraction) และจำแนกคลาส (Classification) ของข้อมูลทดสอบได้ โดยโครงสร้างของ CNN มีแสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นที่สำคัญจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นคอนโวลูชัน, ชั้นพูลลิง (Pooling layer) และชั้นที่เชื่อมต่อกันแบบเต็มที่



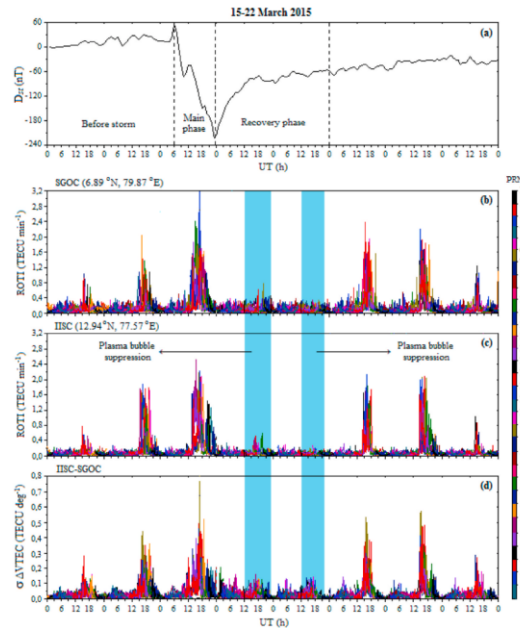
รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมของวิธี Convolutional neural network
ที่มา: Rohit Dwivedi (2020, Online)

4. ผลการศึกษาและบทวิจารณ์

4.1 ผลการตรวจจับ EPB โดยใช้ค่า ROTI และค่า $\sigma\Delta V_{TEC}$

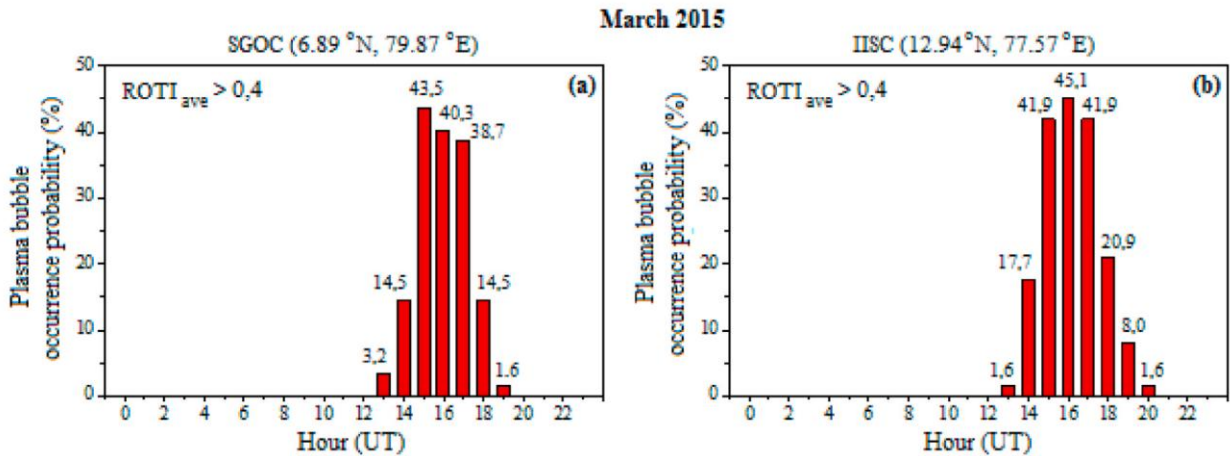
ผลการศึกษาความผิดปกติของ EPBs ที่เกิดขึ้นในช่วงพายุแม่เหล็กโลกและตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ต่างกัน มีดังนี้ จากรูปที่ 4 เป็นการเปลี่ยนแปลงรายวันของดัชนี Dst, ค่า ROTI ของสถานี SGOC, ค่า ROTI ของสถานี IISC และค่า $\sigma\Delta V_{TEC}$ ของคู่สถานี IISC-SGOC ระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดพายุเซนต์แพทริก (Saint Patrick) - พายุที่รุนแรงมากที่สุด ในวัฏจักรโซลาร์ที่ 24 โดยค่า Dst มีค่าต่ำสุดถึง -234 nT ดังในรูปที่ 4(a) การเพิ่มขึ้นที่มากที่สุดในระดับความรุนแรงของ ROTI จะถูกพบได้ตั้งแต่เวลา 13-19 UT (ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก) โดยมีค่ามากกว่า 1 TECU.min⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง โดยความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สังเกตเห็นได้ในช่วงเวลานี้จะถูกเรียกว่าความผิดปกติพลาสมาบับเบิลหลังพระอาทิตย์ตก โดยนักวิจัยได้รายงานไว้ว่า ค่าเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาในแนวตั้งที่สูงอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันใหม่ที่สูงที่ด้านล่างของชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรหลังพระอาทิตย์ตกนั้นเป็นสาเหตุการก่อตัวของกระบวนการ RTI โดยกระบวนการ RTI นี้เป็นต้นเหตุให้เกิดบริเวณพลาสมาที่หายไปหรือถูกเรียกว่า “ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร” (EPB) ที่จะเกิดการยกตัวขึ้นไปชั้น F ด้านบนได้ โดยความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรอาจจะถูกสร้างขึ้นเป็นปกติหลังจากที่พระอาทิตย์ตกอันเนื่องมาจากการก่อตัวของกระบวนการ RTI ที่ด้านล่างของชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรได้ จากรูปที่ 4(b) และ 1(c) การเพิ่มขึ้นในระดับความรุนแรงของ ROTI เมื่อเทียบกับค่า ROTI ในสภาวะที่ไม่มีพายุจะถูกพบได้ที่ทั้งสองแห่งในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก นักวิจัยได้กล่าวไว้ว่า ระดับความรุนแรงของกิจกรรมแม่เหล็กโลกที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจจะเป็นต้นเหตุที่ทำให้อัตราการเกิดพลาสมาบับเบิลเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยสนามไฟฟ้าเฉื่อยแบบทันที (PPEFs) ในช่วงเฟสหลักมีทิศทางมุ่งหน้าไปทางตะวันออกที่ตอนพระอาทิตย์ตก ทำให้ ExB drift ที่ชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรมีทิศทางพุ่งขึ้น และวางตัวขนานไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกไปยัง $\pm 15^\circ$ (EIA crest) ซึ่งสภาวะการณดังกล่าวนี้เป็นสภาวะที่เอื้อต่อการเกิดกระบวนการ RTI เป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของกระบวนการ RTI ในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลกจึงเป็นต้นเหตุการเพิ่มขึ้นในระดับความรุนแรงของความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เราเรียกว่า “พลาสมาบับเบิลหลังพระอาทิตย์ตก” นอกจากนี้ จากรูปที่ 4(b) และ 1(c) การลดลงในระดับความรุนแรงของ ROTI ที่ทั้งสองแห่งก็ถูกพบเช่นกันในช่วงเวลา 13-19 UT ระหว่างวันที่ 18-19 มีนาคม 2558 โดยการเกิดพลาสมาบับเบิลในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดังกล่าวจะถูกยับยั้งอย่างสิ้นเชิงในช่วงเฟสฟื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก

จากการศึกษาพบว่า มีกลไก 2 ประการที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการเกิด EPBs ได้ในช่วงเฟสฟื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก กลไกแรกคือสนามไฟฟ้าไดนาโมการรบกวน (DDEF) ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตก โดยพายุแม่เหล็กโลกจะเป็นตัวสร้างลมนิวทรัลที่บริเวณออโรรา หลังจากนั้นการก่อกวนของลมนิวทรัลก็เดินทางมาถึงชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรภายในระยะเวลาไม่นาน (2-3 ชั่วโมง) แล้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกตอนพระอาทิตย์ตก โดย DDEF ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกนี้เป็นต้นเหตุให้ชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรตอนพระอาทิตย์ตกนั้นเคลื่อนตัวต่ำลง (Downward) แล้วนำไปสู่การยับยั้งกระบวนการ RTI กลไกที่ 2 คือสนามไฟฟ้าเจาะทะลุแบบทันที (PPEF) ในช่วงเฟสฟื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลกที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกตอนพระอาทิตย์ตก โดย PPEF ที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันตกนี้เป็นต้นเหตุให้ชั้น F บริเวณเส้นศูนย์สูตรตอนพระอาทิตย์ตกนั้นเคลื่อนตัวต่ำลง ซึ่งเป็นการยับยั้งกระบวนการ RTI ดังนั้น ทั้งสองกลไกนี้นำไปสู่การยับยั้งความผิดปกติ EPB ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตก อีกทั้ง การยับยั้งความผิดปกติ EPB เกิดขึ้นในช่วงเฟสฟื้นตัวมากกว่าในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงรายวันของ (a) ดัชนี Dst (b) ROTI ของสถานี SGOC (c) ROTI ของสถานี IISC และ (d) ค่า $\sigma\Delta VTEC$ ของคู่สถานี IISC-SGOC ระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558
ที่มา: Timoçin et al. (2020, p. 343)

รูปที่ 4(d) แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า $\sigma\Delta VTEC$ สำหรับดาวเทียมที่มองเห็นได้ทุกดวง ในระหว่างวันที่ 15-22 มีนาคม 2558 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า $\sigma\Delta VTEC$ จะแสดงพฤติกรรมที่คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า ROTI ตามที่สังเกตเห็นได้ที่สถานี SGOC และ IISC แสดงให้เห็นว่า “มีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า VTEC gradient ตามแนวละติจูดกับการเกิดความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ แอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดตอน 13-19 UT (ช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก) ตอนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก พฤติกรรมของค่า ROTI และค่า $\sigma\Delta VTEC$ ตอนหลังพระอาทิตย์ตกแสดงแนวโน้มและทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันทั้ง 2 แห่ง จากรูปที่ 4(d) พบว่า แอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่สังเกตตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสหลักของพายุนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าค่าดังกล่าวในช่วงเวลาที่ไม่มีพายุ (เงียบ) การเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดของค่า $\sigma\Delta VTEC$ ที่สังเกตตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสหลักของพายุนั้นบ่งชี้ผลเชิงกระตุ้นการเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ อีกทั้ง แอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่สังเกตได้ตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสฟื้นตัวของพายุ (วันที่ 18-19 มีนาคม 2558) นั้นก็มีค่าที่ต่ำที่สุด การลดลงของแอมพลิจูดของค่า $\sigma\Delta VTEC$ ที่สังเกตตอนหลังพระอาทิตย์ตกในช่วงเฟสฟื้นตัวของพายุนั้นบ่งชี้ผลเชิงยับยั้งการเกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ กล่าวโดยสรุป “พายุแม่เหล็กโลกมีอิทธิพลอย่างมากต่อระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ โดยระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 17 มีนาคม 2558 (ในช่วงเฟสหลักของพายุ) ผลที่ได้รับเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า เฟสหลักของพายุตอนหลังพระอาทิตย์ตกส่งผลเชิงกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ EIA ขณะที่เฟสฟื้นตัวของพายุตอนหลังพระอาทิตย์ตกส่งผลเชิงยับยั้งให้เกิดปรากฏการณ์ EIA”



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงรายวันของค่า ROTI เฉลี่ยที่สถานี SGOC และ IISC ในเดือนมีนาคม 2558
ที่มา: Timoçin et al. (2020, p. 345)

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า ROTI เฉลี่ย ($ROTI_{ave}$) ที่สถานี SGOC และ IISC ในเดือนมีนาคม 2558 มีแสดงไว้ในรูปที่ 5(a) และ 2(b) ตามลำดับ จากรูป พบว่า ค่าของ $ROTI_{ave}$ ตอน 13-20 UT นั้นมีค่าที่สูงเกินกว่า 0.4 TECU.min⁻¹ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “มีความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรเกิดขึ้น” ขณะที่ ค่าของ $ROTI_{ave}$ ในช่วงเวลาอื่นมีค่าที่น้อยกว่า 0.4 TECU.min⁻¹ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “ไม่มีความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรเกิดขึ้น” นอกจากนี้ ค่าความน่าจะเป็นการเกิดขึ้นของความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือสถานี SGOC และ IISC ในเดือนมีนาคม 2558 ก็ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6(a) และ 3(b) จากรูป พบว่า ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่ทั้ง 2 แห่ง จะเกิดขึ้นตอน 13-20 UT เท่านั้น ค่าความน่าจะเป็นการเกิดขึ้นของความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่สถานี SGOC มีค่าสูงสุด 43.5% ที่เวลา 16 UT และมีค่าต่ำสุด 1.6% ที่เวลา 19 UT ส่วนที่สถานี IISC เราพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าสูงสุด 45.1% ที่เวลา 17 UT และมีค่าต่ำสุด 1.6% ที่เวลา 13 UT และ 20 UT อีกทั้ง เราไม่พบความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่เวลาอื่น ๆ ของ 2 สถานีนี้เลย ผลที่ได้รับเหล่านี้บ่งบอกว่า “ความผิดปกติพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตรอาจจะถูกทำให้เกิดขึ้นเป็นปกติหลังพระอาทิตย์ตก เนื่องจากการก่อตัวของกระบวนการ RTI ทางด้านล่างของชั้น F แถบเส้นศูนย์สูตร” งานวิจัยก่อนหน้านี้จำนวนมากได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของ EIA (Equatorial ionization anomaly) และ ESF (Equatorial spread-F) ที่มีต่อการเกิดความผิดปกติพลาสมาบับเบิลที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตก โดย EIA ถูกทำให้เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เนื่องจากการยกตัวสูงขึ้นของพลาสมาบริเวณรอบ ๆ เส้นศูนย์สูตรด้วยปรากฏการณ์ ExB drift จึงนำไปสู่การเกิดร่อง (Trough) และยอด (Crests) รอบ ๆ ละติจูดแม่เหล็กโลก $\sim \pm 15^\circ$ โดย EIA มีปริมาณ TEC และค่าเกรเดียนต์สูงที่สุดในทั้ง 2 ด้านของดิปอิลเคเตอร์ ($\sim \pm 15^\circ$) ทำให้ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็จะเห็นได้ชัดมากที่สุดที่บริเวณ EIA ดังกล่าวนี้ โดยความรุนแรงของ EIA ที่ตอนพระอาทิตย์ตกมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงผลักของ Eastward PPEF ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งมันทำให้เกิดการก่อตัวของความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรงตอนพระอาทิตย์ตกในชั้นไอโอโนสเฟียร์แถบเส้นศูนย์สูตร อีกทั้ง EIA ตอนพระอาทิตย์ตกก่อให้เกิดเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่มีค่าสูงตั้งแต่บริเวณร่องไปจนถึงบริเวณยอด โดยเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่สูงนี้เป็นต้นเหตุที่นำไปสู่การเกิดการกระจายตัวความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแนวเหนือ-ใต้ ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นหลังพระอาทิตย์ตกบ่งบอกว่า “EIA ตอนพระอาทิตย์ตกมีส่วนอย่างมากที่ทำให้เกิดพลาสมาบับเบิลบริเวณเส้นศูนย์สูตร”

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ก็ได้ศึกษาผลของพายุแม่เหล็กโลกอีกหนึ่งลูกที่เกิดระหว่างวันที่ 6-11 กันยายน 2560 โดยเราพบค่า Dst ที่ต่ำสุดมี 2 ค่า เท่ากับ -142 nT (ที่เวลา 02 UT) และ -122 nT (ที่เวลา 15 UT) ในวันที่ 8 กันยายน 2560 ที่เกิดขึ้นกับพายุลูกนี้ จึงทำให้พายุลูกนี้มีคุณลักษณะพิเศษที่น่าสนใจการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ กล่าวคือ มี 2 เฟสหลักและมี 2 เฟสพื้นตัว โดยได้ทำการศึกษาค่า $ROTI_{ave}$ ที่เกิดขึ้นที่ 3 สถานี (SGOC, IISC และ HYDE) รวมถึงค่า $\sigma\Delta VTEC$ ที่เกิดขึ้นกับคู่สถานี IISC-SGOC และ HYDE-IISC จากการศึกษ พบว่า ผลการทดลองของพายุลูกพิเศษนี้จะสอดคล้องกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในช่วงพายุเซนต์แพทริก แต่ผลที่น่าสนใจมากที่สุดก็คือ ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นของคู่สถานี HYDE-IISC จะสูงกว่าค่าดังกล่าวของคู่สถานี IISC-SGOC อีกทั้ง ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นของคู่สถานี IISC-SGOC จะสังเกตเห็นได้

ชัดเจนในช่วงเวลา 14-18 UT ขณะที่ ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ ที่เพิ่มขึ้นของคู่สถานี HYDE-IISC จะสังเกตเห็นได้ตั้งแต่ก่อนพระอาทิตย์ขึ้นไปจนถึงพระอาทิตย์ตก (Dawn-dusk) ระดับแอมพลิจูดของ $\sigma\Delta VTEC$ หลังจากพระอาทิตย์ตกนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดตอนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า “พายุแม่เหล็กโลกที่เกิดตอนหลังพระอาทิตย์ตกนั้นจะส่งผลเชิงกระตุ้นให้เกิด EIA หลังจากนั้น EIA ก็ทำให้เกิดเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่สูงระหว่างร่องกับยอดของ EIA แล้วเกรเดียนต์ความหนาแน่นพลาสมาที่สูงนี้ก็จะส่งผลให้เกิดความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่กระจายตัวจากทางทิศเหนือ-ทิศใต้”

รูปที่ 6 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการเกิดพลาสมาบับเบิลที่สถานี SGOC, IISC และ HYDE ที่เกิดขึ้นในช่วงของวันที่ต่างกันของเดือนกันยายน 2560 อย่างไรก็ตาม เราจะพบว่า ความผิดปกติ EPBs ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 แห่งจะเกิดขึ้นตอน 14-18 UT โดยค่าความน่าจะเป็นของ EPBs มีค่ามากที่สุดตอน 16 UT และมีค่าต่ำที่สุดตอน 18 UT และก็ไม่พบความผิดปกติ EPBs ที่เวลาอื่น ๆ ของ 3 สถานีนี้เลย ผลที่ได้รับนี้บ่งบอกว่า “ความผิดปกติ EPBs อาจจะถูกทำให้เกิดขึ้นเป็นปกติหลังพระอาทิตย์ตกเนื่องจากการก่อตัวของกระบวนการ RTI ทางด้านล่างของชั้น F แถบเส้นศูนย์สูตร” โดยภาพรวมของงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ความผิดปกติ EPBs ระหว่างการเกิดพายุแม่เหล็กโลกในเดือนมีนาคม 2558 และเดือนกันยายน 2560 โดยอาศัยค่า TEC ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS จำนวน 3 สถานีที่ตั้งอยู่ในบริเวณร่องและยอดของ EIA ($\sim \pm 20^\circ$) ผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นใหม่ที่น่าสนใจและมีประโยชน์ต่อการระบุพิสัยแบบ RTK ดังนี้

a) ความผิดปกติ EPBs พบได้ในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกในฤดูอิควินอกซ์ทั้ง 3 สถานี ความผิดปกติ EPB สำหรับสถานีตรวจจับทั้งหมดนั้นถูกสังเกตพบได้ตั้งแต่เวลา 13-20 UT หรือ 18-01 UT (ซึ่งเป็นช่วงเวลาลงหลังพระอาทิตย์ตกไปจนถึงหลังเที่ยงคืน) ในช่วงฤดูอิควินอกซ์ ระดับความเข้มของ ROTI ในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกนั้นมีค่ามากกว่า 1 TECU.min^{-1} ค่า ROTI เฉลี่ย (ROTI_{ave}) ระหว่างช่วงเวลา 13-20 UT นั้นมีค่าสูงกว่า $0.4 \text{ TECU.min}^{-1}$ ขณะที่ ค่า ROTI_{ave} ที่เวลาอื่นมีค่าที่น้อยกว่า $0.4 \text{ TECU.min}^{-1}$

b) อัตราการเกิดขึ้นของความผิดปกติ EPBs เหนือทุกสถานีเพิ่มขึ้นเมื่อกิจกรรมแม่เหล็กโลกมีค่าเพิ่มขึ้น

c) ผลกระทบเชิงกระตุ้น (Enhancement) ของพายุก่อให้เกิดความผิดปกติ EPBs ตอนหลังพระอาทิตย์ตกถูกพบได้ในช่วงเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก

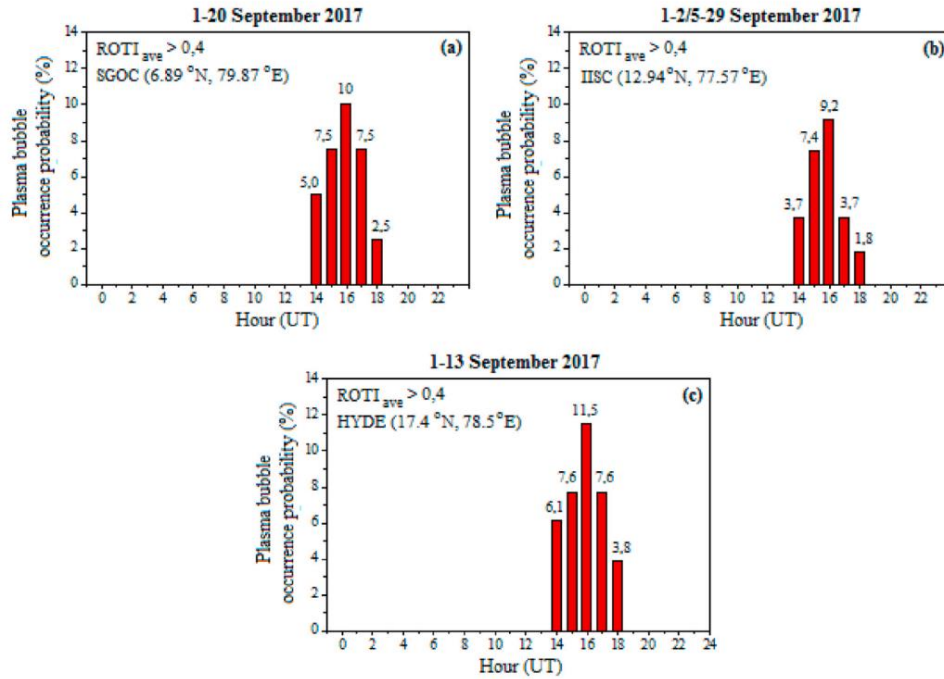
d) ผลกระทบเชิงยับยั้ง (Suppression) ของพายุที่มีต่อ (ก่อให้เกิด) ความผิดปกติ EPBs ตอนหลังพระอาทิตย์ตกถูกพบได้ในช่วงเฟสพื้นตัวของพายุแม่เหล็กโลก

e) ความไม่สมมาตรระหว่าง 2 ฤดูอิควินอกซ์ในแต่ละปีสามารถที่จะสังเกตพบได้ กล่าวคือ อัตราการเกิด EPBs ของทั้ง 2 ฤดูอิควินอกซ์นั้นไม่เท่ากัน

f) อัตราการเกิดขึ้นของความผิดปกติ EPB ใน March equinox มีค่าที่มากกว่าค่าดังกล่าวใน September equinox มาก โดยค่าความน่าจะเป็นการเกิดขึ้นของ EPB ใน March equinox มีค่าสูงสุด 45.1% ที่เวลา 17 UT ขณะที่ค่าดังกล่าวใน September equinox มีค่าสูงสุด 11.5% ที่เวลา 16 UT

g) การเพิ่มขึ้นและการลดลงของค่า VTEC gradients ตามแนวละติจูดแสดงพฤติกรรม (แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง) ที่คล้ายกับการเกิดขึ้นของความผิดปกติ EPBs

h) ค่า VTEC gradients ตามแนวละติจูดมีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวลองจิจูดไปยัง EIA crest (ละติจูดแม่เหล็กโลก ($\sim 15^\circ$)) ดังนั้น ผลของ EIA ที่มีต่อการเกิดความผิดปกติ EPBs ก็จะทำให้สถานี HYDE ที่อยู่ใกล้กับ EIA crest จะมีจำนวนของ PBs ที่สูงกว่าสถานี SGOC และสถานี IISC

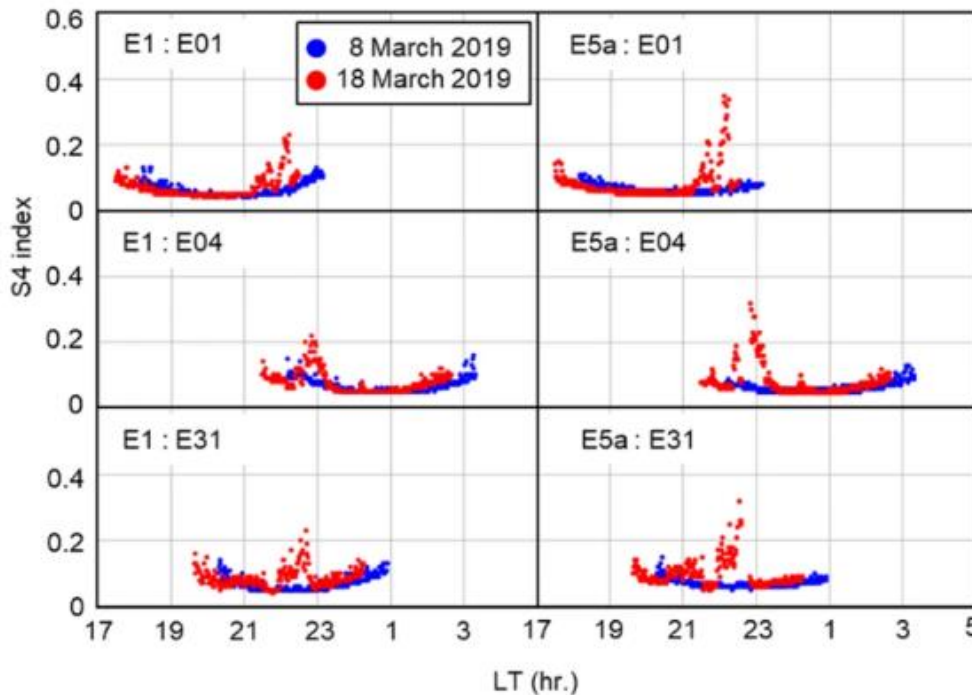


รูปที่ 6 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิด EPBs ที่สถานี SGOC, IISC และ HYDE ในเดือนกันยายน 2560
 ที่มา: Timoçin et al. (2020, p. 349)

4.2 ผลการตรวจจับ EPB โดยใช้ค่า S4 index

ซินทิลเลชันแอมพลิจูดหรือค่า S4 index ได้ถูกนำมาศึกษาร่วมกับค่ากำลังของ Backscatter echo ที่รับได้จากเรดาร์ EAR เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดซินทิลเลชันกับการเกิด EPBs ในบริเวณละติจูดต่ำ โดยค่าข้อมูล S4 index นั้นได้รับมาจากเครื่องรับ MC/MF GNSS scintillation receiver (รุ่น Septentrio PolarRxS) ที่สถานีโกโตตะบัง ประเทศอินโดนีเซีย (ตำแหน่งภูมิศาสตร์ 0.20°S, 100.32°E) โดยเราใช้สัญญาณ L1 (ย่านความถี่ 1,575.42 MHz) กับ L5 (ย่านความถี่ 1,176.45 MHz) ของดาวเทียม GPS และสัญญาณ E1 (ย่านความถี่ L1) กับ E5a (ย่านความถี่ L5) ของดาวเทียม Galileo ค่าคัทออฟมมิกของดาวเทียมมีค่าเท่ากับ 30 องศาเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบมลติพาธ ค่า S4 index ได้ถูกประมาณค่าที่เครื่องรับ GNSS ที่ทุกๆ ช่วงเวลา 60 วินาที และเรดาร์ EAR ก็ติดตั้งและใช้งานที่บริเวณเดียวกับเครื่องรับ GNSS เช่นกัน โดยเครื่องมือวัด EAR นี้เป็นเรดาร์ที่ใช้หลักการดอปเปลอร์และใช้สายอากาศแบบเฟสอาร์เรย์ (Phased-array pulsed Doppler radar) ที่ทำงานที่ความถี่ 47.0 MHz รายละเอียดเพิ่มเติมของเรดาร์ EAR สามารถศึกษาได้ใน Fukao et al. (2003, pp. 2-8)

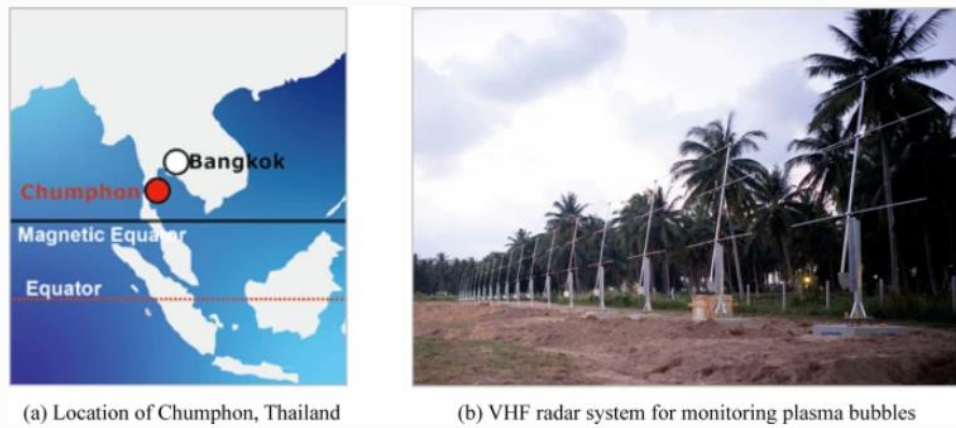
รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบของค่า S4 index ที่เกิดขึ้นที่สถานีโกโตตะบังช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก (Disturbed day) ในวันที่ 18 มีนาคม 2562 (สีแดง) และวันที่ไม่มีพายุในวันที่ 8 มีนาคม 2562 (สีน้ำเงิน) ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ E1 และ E5a ของดาวเทียม E01 (รูปบน), ดาวเทียม E04 (รูปกลาง) และดาวเทียม E31 (รูปล่าง) จะเห็นได้ชัดว่า ซินทิลเลชันมักจะเกิดขึ้นบ่อยในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกและ EPB มีผลต่อซินทิลเลชันชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมาก โดยค่า S4 index ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ L5/E5a signal จะเกิดซินทิลเลชันที่มากกว่าค่า S4 index ที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ L1/E1 นอกจากนี้ เรายังพบคอร์รีเลชันที่สูงระหว่าง EAR Backscatter echoes กับค่า S4 index ของทั้งสัญญาณ L1/E1 และ L5/E5a ที่ความสูงระหว่าง 250-350 km ซึ่งชี้ให้เห็นว่า EPB เกิดขึ้นที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง



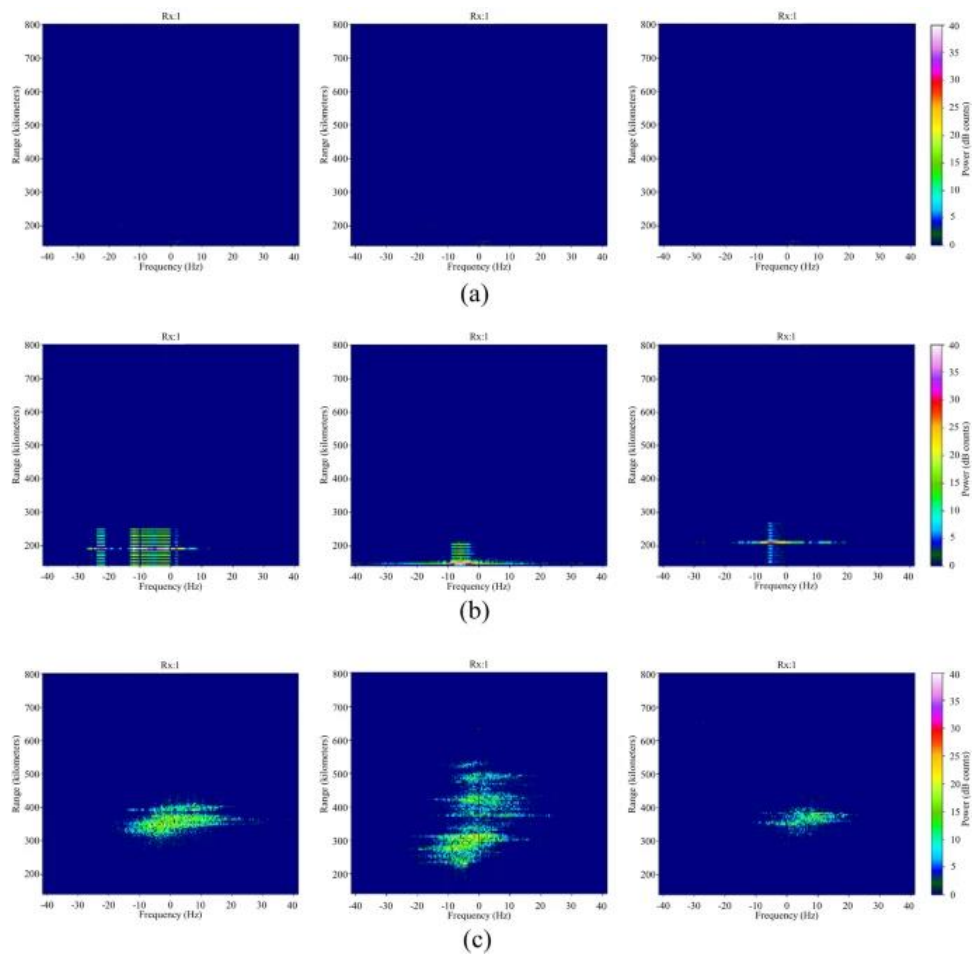
รูปที่ 7 ผลเปรียบเทียบค่า S4 index ที่เกิดขึ้นที่สถานีโกโตะบังช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในวันที่ 18 มีนาคม 2562 – สีแดง และวันที่ไม่มีพายุในวันที่ 8 มีนาคม 2562 – สีน้ำเงิน
ที่มา: Bumrungrkit et al. (2022, p. 7)

4.3 ผลการตรวจจับ EPB โดยใช้ Machine learning

เพื่อที่จะศึกษาเชิงวิเคราะห์ถึง EPB ที่เกิดขึ้นใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก สถาบัน NICT ร่วมกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL) ได้ร่วมมือกันจัดตั้งสถานีพระจอมเกล้าวิทยุเอพเฟรตารี่ขึ้นที่ KMITL วิทยาเขตชุมพรฯ (ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์: 10.72°N , 99.73°E) ในประเทศไทย โดยสถานี VHF radar นี้ทำหน้าที่เฝ้าสังเกตการณ์หรือตรวจจับ EPBs ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ รูปที่ 8 แสดงสายอากาศยาคิ (Yagi antenna) จำนวน 18 ต้นที่วางตัวในแนวเส้นตรงจากตะวันตกไปยังตะวันออกด้วยระยะห่างของสายอากาศโดยประมาณเท่ากับ 5 เมตร โดยระบบเรดาร์จะรับส่งสัญญาณที่มีความถี่ 39.65 MHz มีภาพเรดาร์ 2 ประเภทที่สถานี VHF radar เก็บบันทึกไว้ได้คือ ไฟล์ภาพแบบ Quick look (QL) และ Range–altitude–time intensity (RATI) รูปที่ 9 แสดงไฟล์ภาพ QL ที่บันทึกได้ โดย (a) ภาพที่ไม่เกิด EPB (b) ภาพที่ไม่แน่ใจ (ไม่สามารถที่จะระบุว่าเป็น EPB หรืออาจจะเกิดจากความผิดพลาดของระบบ) และ (c) ภาพที่เกิด EPB ในที่นี้ แกน x แทนค่าความถี่ต่อเพลอร์ (Hz) และแกน y แทนระยะความสูง (km) โดยภาพที่นำมาใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 1,000 ภาพ ประกอบไปด้วย ภาพที่ไม่เกิด EPB จำนวน 350 ภาพ, ภาพที่ไม่แน่ใจ จำนวน 350 ภาพ และ ภาพที่เกิด EPB จำนวน 300 ภาพ ทั้งนี้ภาพต้นฉบับจะถูกตัดที่มีขนาดเป็น $360 \times 360 \times 3$ พิกเซล และมีการนำเสนอ 3 วิธีในการเปรียบเทียบความถูกต้องในการจำแนก EPB ได้แก่ วิธี SVM, วิธี SVD-SVM และวิธี CNN-SVM ผลจากการศึกษาพบว่า วิธี CNN-SVM จะให้ความแม่นยำในการทำนายผลการตรวจจับ EPB ที่ดีกว่าวิธี SVD-SVM และ SVM โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วิธี CNN-SVM ที่ใช้เคอร์เนลแบบ RBF สามารถที่จะให้ความแม่นยำได้สูงที่สุดเท่ากับ 93.08% ขณะที่ วิธี CNN-SVM ที่ใช้เคอร์เนลแบบ Polynomial สามารถที่จะให้ความแม่นยำได้สูงที่สุดเท่ากับ 92.14% เท่านั้น ในทางตรงข้าม วิธี SVD-SVM ให้ความแม่นยำในการตรวจจับเพียง 88.37% แต่ใช้เวลาในการประมวลผลที่น้อยที่สุด ดังนั้น วิธีที่นำเสนอของ Thanakulketsarat et al. (2023, p. 14) นี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการตรวจจับและจำแนกการเกิด EPBs ได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งมีความสำคัญต่อภารกิจทางด้านสภาพอากาศในอวกาศ (Space weather)



รูปที่ 8 ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของสถานีพระจอมเกล้าวិไลโอฬารเรดาร์และสายอากาศยักจำนวน 18 ต้น
ที่มา: Thanakulketsarat et al. (2023, p. 6)



รูปที่ 9 ภาพ QL (a) ภาพที่ไม่เกิด EPB (b) ภาพที่ไม่แน่ใจ และ (c) ภาพที่เกิด EPB
ที่มา: Thanakulketsarat et al. (2023, p. 7)

บทสรุป แนวโน้มการพัฒนาต่อไป

พลาสมาบับเปิดแถบเส้นศูนย์สูตร (Equatorial plasma bubbles หรือ EPBs) เป็นบริเวณความหนาแน่นพลาสมาที่หายไป ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นในช่วงหลังพระอาทิตย์ตก ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับการจางหายไปและคืนกลับของสัญญาณวิทยุ ที่ส่งข้ามชั้นไอโอโนสเฟียร์ รวมทั้งคืนกลับที่รุนแรงมีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่อาศัยระบบ GNSS ดังนั้น การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะ (โครงสร้าง) ตัวบ่งชี้และวิธีการตรวจจับ EPB ด้วยวิธีต่าง ๆ ที่นำเสนอในบทความปริทัศน์ ฉบับนี้จึงเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับนักศึกษาและนักวิจัยที่จะนำต่อยอด ปรับปรุงและพัฒนากระบวนการนำทางอัตโนมัติสำหรับรถยนต์ ไร้คนขับ โดรน และเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่อาศัย GNSS ในอนาคต หัวข้องานวิจัยที่สามารถต่อยอดและพัฒนาต่อไป ได้แก่ การจัดทำ เว็บแอปพลิเคชันเพื่อแสดงการปรากฏ/ไม่ปรากฏ EPBs หลังจากการตรวจจับ EPBs และการวิเคราะห์โครงสร้าง และทิศทางการเคลื่อนที่ของ EPB ด้วยปัญญาประดิษฐ์ หลังจากที่ได้ทำการตรวจจับ EPB โดยใช้ CNN-SVM แล้ว

เอกสารอ้างอิง

- 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 Solution*, 26(148), 1-15.
- Dwivedi, R. (2020). 5 Common architectures in Convolution Neural Networks (CNN). Retrieved from <https://www.analyticssteps.com/blogs/common-architectures-convolution-neural-networks>
- Fukao, S., Hashiguchi, H., Yamamoto, M., Tsuda, T., Nakamura, T., Yamamoto, M. K., Sato, T., Hagio, M., & Yabugaki, Y. (2003). Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results. *Radio Science*, 38(3), 1-17.
- Lecun, Y., Matan, O., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., Jacket, L.D., & Baird, H. S. (1990, June). Handwritten zip code recognition with multilayer networks. In *Proceedings. 10th International Conference on Pattern Recognition* (Vol. 2, pp. 35-40). IEEE.
- Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. In *Proceedings of the IEEE* (pp. 2278-2324). IEEE.
- Li, G., Ning, B., Abdu, M. A., Otsuka, Y., Yokoyama, T., Yamamoto, M., & Liu, L. (2013). Longitudinal characteristics of spread F backscatter plumes observed with the EAR and Sanya VHF radar in Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(10), 6544-6557.
- Li, G., Ning, B., Otsuka, Y., Abdu, M. A., Abadi, P., Liu, Z., Spogli, L., & Wan, W. (2021). Challenges to equatorial plasma bubble and ionospheric scintillation short-term forecasting and future aspects in east and southeast Asia. *Surveys in Geophysics*, 42, 201-238.
- Liu, K., Li, G., & Ning, B. (2019). Possible evidence for small-scale wave seeding of equatorial plasma bubbles. *Advances in Space Research*, 63(11), 3612-3620.
- Otsuka, Y., Shiokawa, K., Ogawa, T., & Wilkinson, P. (2002). Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions. *Geophysical Research Letters*, 29(15), 1-4.
- Pi, X., Mannucci, A. J., Lindqwister, U. J., & Ho, C. M. (1997). Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophysical Research Letters*, 24(18), 2283-2286.
- Smith, J., & Heelis, R. A. (2017). Equatorial plasma bubbles: Variations of occurrence and spatial scale in Local time, longitude, season, and solar activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(5), 5743-5755.
- Thanakulketsarat, T., Supnithi, P., Myint, L. M. M., Hozumi, K., & Nishioka, M. (2023). Classification of the equatorial plasma bubbles using convolutional neural network and support vector machine techniques. *Earth, Planets and Space*, 75(161), 1-15.

- Timoçin, E., Inyurt, S., Temuçin, H., Ansari, K., Jamjareegulgarn, P. (2020). Investigation of equatorial plasma bubble irregularities under different geomagnetic conditions during the equinoxes and the occurrence of plasma bubble suppression. *Acta Astronautica*, 177, 341-350.
- Tsunoda, R. T. (1981). Time evolution and dynamics of equatorial backscatter plumes 1. Growth phase. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A1), 139-149.
- Vankadara, R. K., Jamjareegulgarn, P., Seemala, G. K., Siddiqui, M. I. H., & Panda, S. K. (2023). Trailing Equatorial Plasma Bubble Occurrences at a Low-Latitude Location through Multi-GNSS Slant TEC Depletions during the Strong Geomagnetic Storms in the Ascending Phase of the 25th Solar Cycle. *Remote Sensing*, 15(20), 1-25.
- Vapnik, V. N., & Lerner, A. (1963). Pattern recognition using generalized portrait method. *Automation and Remote Control*, 24(6), 774-780.