

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN THANH DUNG

**BONG BÓNG PLASMA VÀ
ĐẶC TRƯNG DỊ THƯỜNG ION HÓA XÍCH ĐẠO
KHU VỰC VIỆT NAM VÀ LÂN CẬN**

LUẬN ÁN TIẾN SỸ VẬT LÝ ĐỊA CẦU

Hà Nội- 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

NGUYỄN THANH DUNG

**BONG BÓNG PLASMA VÀ
ĐẶC TRƯNG DỊ THƯỜNG ION HÓA XÍCH ĐẠO
KHU VỰC VIỆT NAM VÀ LÂN CẬN**

LUẬN ÁN TIẾN SỸ VẬT LÝ ĐỊA CẦU

Chuyên ngành: Vật lý địa cầu

Mã số: 9 44 01 11

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. TS. NCVCC. Lê Huy Minh**
- 2. TS. NCVC. Phạm Thị Thu Hồng**

Hà Nội- 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi. Mọi số liệu sử dụng và kết quả nghiên cứu trong luận án là khách quan, trung thực, có nguồn gốc rõ ràng và chưa từng được công bố dưới bất kỳ hình thức nào.

Tác giả luận án



Nguyễn Thanh Dung

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến TS. NCVCC. Lê Huy Minh đã dành nhiều thời gian, tâm sức, tận tình chỉ bảo, quan tâm giúp đỡ và động viên tôi trong thời gian hoàn thành luận án.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn TS. NCVCC. Phạm Thị Thu Hồng đã có những ý kiến đóng góp quý báu, động viên và khích lệ giúp tôi hoàn chỉnh luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn lãnh đạo Viện Vật lý địa cầu, tập thể phòng Địa từ, các bạn bè đồng nghiệp ở Viện Vật lý địa cầu luôn chia sẻ kinh nghiệm, khuyến khích, động viên và tạo điều kiện giúp tôi hoàn thành luận án.

Cảm ơn Ban lãnh đạo và các cán bộ Học Viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, các thầy cô trong khoa Các Khoa học Trái Đất của Học Viện đã giúp đỡ tạo điều kiện thuận lợi cho NCS. thực hiện luận án.

Hà Nội, ngày 19 tháng 9 năm 2023



Nguyễn Thanh Dung

MỤC LỤC

Lời cam đoan	
Lời cảm ơn	
Mục lục	
Danh mục các hình vẽ	
Danh mục các bảng	
Danh mục các chữ viết tắt	
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ TẦNG ĐIỆN LY, HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TOÀN CẦU VÀ NGHIÊN CỨU ĐIỆN LY VÙNG VĨ ĐỘ THẤP SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ GPS	7
1.1. Khái quát về tầng điện ly	7
1.1.1. Nguồn gốc sự hình thành tầng điện ly.....	7
1.1.2. Các lớp điện ly	9
1.1.3. Hợp phần ion.....	10
1.1.4. Dynamo lớp E	11
1.1.5. Dynamo lớp F.....	12
1.1.6. Di thường ion hóa xích đạo.....	13
1.1.6.1. Sự chuyển động của các hạt trong lớp F	14
1.1.6.2. Sự trôi dạt $\vec{E} \wedge \vec{B}$	15
1.1.7. Bất thường điện ly	16
1.1.7.1. Bong bóng plasma xích đạo	17
1.1.7.2. Lý thuyết tuyến tính bất ổn định Rayleigh-Taylor.....	17
1.2. Tổng quan về hệ thống định vị toàn cầu GPS.....	20
1.2.1. Các bộ phận của hệ thống định vị GPS	20
1.2.1.1. Bộ phận không gian	20
1.2.1.2. Bộ phận điều khiển	21
1.2.1.3. Bộ phận sử dụng	21
1.2.2. Cấu trúc tín hiệu GPS	21
1.2.3. Các đại lượng quan sát của GPS	23
1.2.3.1. Giả khoảng cách.....	23
1.2.3.2. Quan sát pha mang (Carrier phase)	23

1.2.4. Ảnh hưởng của tầng điện ly tới việc truyền tín hiệu GPS.....	24
1.3. Tổng quan tình hình nghiên cứu điện ly vùng vĩ độ thấp sử dụng công nghệ GPS	27
1.3.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới.....	27
1.3.1.1. Dị thường ion hóa xích đạo	27
1.3.1.2. Bất thường điện ly	31
1.3.2. Tình hình nghiên cứu trong nước.....	36
CHƯƠNG 2: SỐ LIỆU VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	40
2.1. Số liệu sử dụng	40
2.1.1. Số liệu từ các trạm thu GPS.....	40
2.1.2. Thông tin vệ tinh	43
2.1.3. Thông lượng mặt trời F10.7.....	43
2.1.4. Chỉ số Dst.....	43
2.1.5. El Niño và Dao động Nam (ENSO).....	44
2.1.6. Dao động tựa hai năm (QBO) của tầng bình lưu	46
2.1.7. Mô hình điện ly tham chiếu quốc tế IRI.....	47
2.1.8. Mô hình TEC toàn cầu GIMs (CODG).....	48
2.2. Các phương pháp nghiên cứu.....	49
2.2.1. Phương pháp tính TEC	49
2.2.2. Chỉ số tốc độ thay đổi TEC.....	51
2.2.3. Phương pháp làm hợp đường cong	52
2.2.4. Xử lý tín hiệu số	53
2.2.4.1. Bộ lọc thông dải.....	54
2.2.4.2. Phép biến đổi wavelet.....	55
2.2.4.3. Phương pháp phân tích biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle	57
2.2.5. Phương pháp phân tích hàm trực giao thực nghiệm	58
CHƯƠNG 3: DỊ THƯỜNG ION HÓA XÍCH ĐẠO KHU VỰC ĐÔNG NAM Á.....	61
3.1. Biến động ngày đêm của TEC tại các trạm.....	61
3.2. Đặc trưng dị thường ion hóa xích đạo khu vực Đông Nam Á	63
3.2.1. Các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ.....	63
3.2.2. Biến thiên theo mùa và biến thiên theo hoạt tính mặt trời	68

3.2.3. Biến thiên hàng năm của các đỉnh EIA	73
3.3. Các dao động tuần hoàn của các đỉnh EIA khu vực Đông Nam Á	75
3.3.1. Dao động chu kỳ ~15 ngày	78
3.3.2. Dao động chu kỳ 27 ngày	82
3.3.3. Dao động chu kỳ 6 tháng	84
3.3.4. Dao động chu kỳ 1 năm	86
3.3.5. Dao động chu kỳ tựa 2 năm (QBO)	88
CHƯƠNG 4: BẤT THƯỜNG ĐIỆN LY BAN ĐÊM KHU VỰC ĐÔNG NAM Á	
.....	96
4.1. Biến thiên ngày đêm của chỉ số tốc độ biến đổi TEC.....	96
4.2. Tần suất xuất hiện các bất thường điện ly.....	97
4.3. Sự phân bố của bất thường điện ly theo vĩ độ và thời gian	105
CHƯƠNG 5: MÔ HÌNH HÓA TEC QUAN SÁT BẰNG CÁC HÀM TRỰC	
GIAO THỰC NGHIỆM VÀ SO SÁNH VỚI CÁC MÔ HÌNH TEC TOÀN CẦU	
.....	112
5.1. Mô hình hóa TEC bằng phương pháp EOF	112
5.1.1. Phép phân tích EOF dữ liệu TEC.....	112
5.1.2. Phân tích các hệ số EOF	115
5.2. So sánh TEC quan sát với TEC từ các mô hình.....	118
5.2.1. Đối với các ngày yên tĩnh	118
5.2.2. Đối với các ngày bão từ.....	122
5.3. Đánh giá sai số các mô hình.....	124
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	127
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	129
TÀI LIỆU THAM KHẢO	130

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

<i>Hình 1.1.</i> Sơ đồ các lớp khí quyển và các lớp của tầng điện ly (Rishbeth & Garriot [8])	7
<i>Hình 1. 2.</i> Tuyến mật độ điện tử và ion theo chiều cao (mô hình điện ly tham chiếu quốc tế IRI): a) tại thời điểm 1200 LT, b) tại thời điểm 0000 LT.....	9
<i>Hình 1.3.</i> Hợp phần khí quyển và tầng điện ly trong thời gian ban ngày dựa trên các phép đo phổ kế khối lượng và vệ tinh [12].	10
<i>Hình 1.4.</i> Hiệu ứng vòi phun xích đạo [19]	14
<i>Hình 1.5.</i> a) Sơ đồ tương tự plasma của bất ổn định Rayleigh-Taylor trong hình học xích đạo. b) Bản phác thảo theo tuần tự từ các ảnh của tính bất ổn định R-T động học chất lỏng. Chất lỏng nhẹ hơn ban đầu đỡ dưới (nằm dưới) chất lỏng nặng [26].	19
<i>Hình 1.6.</i> Thời gian truyền tín hiệu giữa vệ tinh và máy thu.....	22
<i>Hình 1.7.</i> Phép đo pha trong nghiên cứu GPS.	22
<i>Hình 1.8.</i> Mô hình lớp đơn điện ly [35].....	26
<i>Hình 1.9.</i> Tín hiệu GPS bị nhấp nháy và mất dấu khi truyền qua các bất thường điện ly (Balan et al., 2018 [49]).	33
<i>Hình 1.10.</i> Hệ số S_4 (đường màu xanh) liên quan tới sự suy giảm TEC (đường màu đỏ) tại các trạm Waltair, Raipur và Kolkata của Ấn Độ (Rama Rao et al., 2006 [56]).	34
<i>Hình 1.11.</i> Trôi dạt bong bóng plasma về hướng Đông quan sát bằng Rada tại Kototabang, Indonesia (Ajith et al., 2015 [127]).....	35
<i>Hình 2.1.</i> Vị trí các trạm GPS liên tục khu vực Việt Nam và lân cận, vị trí xích đạo từ ở niên đại 2010.0 ở khoảng vĩ độ 7°	42
<i>Hình 2.2.</i> Sơ đồ trạm thu GPS model GSV4004.....	42
<i>Hình 2.3.</i> Vết của các vệ tinh quan sát được tại các trạm GPS ngày 01/5/2021:	42
<i>Hình 2.4.</i> Sơ đồ cơ chế vật lý các hiện tượng: a) El Niño, b) La Niña (https://psl.noaa.gov/enso/mei/ [164]). Ký tự H chỉ vùng áp suất cao, ký tự L chỉ vùng áp suất thấp, thang màu chỉ thị dị thường nhiệt độ mặt nước biển.	45
<i>Hình 2.5.</i> Mô hình dao động nhiệt độ khu vực Thái Bình Dương: a) Trạng thái bình thường, b) trạng thái El Niño, c) trạng thái La Niña (https://vi.wikipedia.org/wiki/Dao_động_phương_Nam [168]).	46
<i>Hình 2.6.</i> Dao động QBO gió vĩ hướng trung bình hàng tháng từ 1980 đến nay	

(https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html [169]).	46
<i>Hình 2.7.</i> Sơ đồ TEC toàn cầu theo mô hình IRI-2016 vào 10 UT ngày 26/08/2013 (theo Ji Eun-Young et al. (2020) [174]).	48
<i>Hình 2.8.</i> Sơ đồ TEC toàn cầu vào 20:00 UT ngày 19/8/2012 theo mô hình CODG (http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim.gif [175]).	49
<i>Hình 2.9.</i> Biểu đồ chỉ ra định nghĩa của bộ lọc thông dải: (B): dải thông, f_0 : tần số trung tâm, f_H : tần số cắt cao hơn, f_L : tần số cắt thấp hơn.	54
<i>Hình 2.10.</i> Minh họa biến đổi hình học của phép phân tích suy biến (Phạm Đình Khanh, 2021 [190]).	59
<i>Hình 3.1.</i> Kết quả tính toán TEC ngày 031/2021 (31/01/2021) tại một số trạm khu vực Đông Nam Á theo thứ tự lần lượt từ trái sang phải, từ trên xuống dưới: MTEV, XMIS, PHUT, BAKO, DLAT, NTUS, BACL, ANMG.	62
<i>Hình 3.2.</i> Vết của các vệ tinh ở độ cao 400 km nhìn từ mạng lưới trạm GPS khu vực Đông Nam Á (<i>hình 2.1</i>) vào ngày 027/2021 (27/01/2021).	64
<i>Hình 3.3.</i> Phân bố vết vệ tinh theo thời gian và vĩ độ quan sát được từ mạng lưới trạm GPS liên tục ở khu vực Đông Nam Á ngày 27/01/2021, góc nhìn vệ tinh $\geq 20^\circ$.	65
<i>Hình 3.4.</i> Sơ đồ VTEC theo thời gian và vĩ độ ngày 304/2021 (31/10/2021) ở khu vực Đông Nam Á. Kí hiệu ME: xích đạo từ.	66
<i>Hình 3.5.</i> Sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ trung bình tháng năm 2014, khoảng cách giữa các đường đẳng trị là 5 TECU.	67
<i>Hình 3.6.</i> Biến thiên trung bình hàng tháng biên độ TEC của 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2008- 2021: a) đỉnh bắc, b) đỉnh nam.	68
<i>Hình 3.7.</i> Biến thiên mùa của các thành phần khí trung hòa theo mô hình MSIS-86 (Ondoh et al. [191]).	69
<i>Hình 3.8.</i> Biến thiên hàng tháng của các tham số giai đoạn 2008-2021: a) thông lượng mặt trời F10.7, b) biên độ TEC của 2 đỉnh EIA.	70
<i>Hình 3.9.</i> Thời gian xuất hiện 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2008- 2021.	71
<i>Hình 3.10.</i> Chênh lệch thời gian giữa 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008- 2021.	71
<i>Hình 3.11.</i> Vĩ độ các đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021, đỉnh Bắc ở phía trên và đỉnh Nam ở phía dưới.	72
<i>Hình 3.12.</i> Mô hình tổ hợp lý thuyết gió trung hòa thổi qua xích đạo, vị trí điểm gần mặt trời và gió thổi từ vùng cực về phía xích đạo vào thời kỳ điểm chí: a) hạ chí	

nằm ở bán cầu Bắc, b) hạ chí nằm ở bán cầu Nam (Tsai et al. [52]).....	73
<i>Hình 3.13.</i> Biến thiên hàng năm của các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021: a, b) vĩ độ đỉnh Bắc, đỉnh Nam, c) biên độ, d) thời gian xuất hiện	74
<i>Hình 3.14.</i> Biến thiên hàng ngày của các tham số 2 đỉnh giai đoạn 2008-2021: a, a') lần lượt là biên độ đỉnh Bắc, đỉnh Nam; b, b' lần lượt là thời gian xuất hiện đỉnh Bắc, đỉnh Nam; c, c' lần lượt là vĩ độ đỉnh Bắc, đỉnh Nam.	75
<i>Hình 3.15.</i> a) Thông lượng mặt trời F10.7 trung bình ngày giai đoạn 2008-2021, b) biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle của F10.7, c) phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.	76
<i>Hình 3.16.</i> a) Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle của biên độ TEC các đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, b) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 50 ngày, c) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.....	77
<i>Hình 3.17.</i> a) Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle của vĩ độ các đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, b) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.	78
<i>Hình 3.18.</i> a) Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle thời gian xuất hiện các đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, b) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.	78
<i>Hình 3.19.</i> Dao động chu kỳ 15 ngày ở các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021: a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.....	81
<i>Hình 3.20.</i> Dao động chu kỳ 15 ngày ở các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2009: a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.....	81
<i>Hình 3.21.</i> Tương tự hình 3.20 nhưng cho giai đoạn 2013-2014.	82
<i>Hình 3.22.</i> Dao động chu kỳ ~ 27 ngày giai đoạn 2008-2021: a) F10.7, b) biên độ các đỉnh EIA.....	83
<i>Hình 3.23.</i> Dao động chu kỳ 27 ngày của F10.7 và biên độ các đỉnh EIA: a) giai đoạn 2008-2009, b) giai đoạn 2013-2014.....	84
<i>Hình 3.24.</i> Dao động chu kỳ 6 tháng ở các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021: a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.....	85
<i>Hình 3.25.</i> a) Chỉ số MEI.v2 và b) dao động chu kỳ 6 tháng ở tham số vĩ độ 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021.	86
<i>Hình 3.26.</i> Dao động chu kỳ 1 năm ở 3 tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021: a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.....	87
<i>Hình 3.27.</i> a) Chỉ số MEI.v2 và b) biên độ dao động chu kỳ 1 năm của tham số vĩ độ 2	

đỉnh giai đoạn 2008-2021.....	88
<i>Hình 3.28.</i> a) Thông lượng mặt trời F10.7, biến thiên biên độ TEC trung bình hàng tháng giai đoạn 2008-2021: b) đỉnh Bắc, c) đỉnh Nam.....	88
<i>Hình 3.29.</i> Phần dư Δ TEC giai đoạn 2008-2021: a) đỉnh Bắc, b) đỉnh Nam.....	89
<i>Hình 3.30.</i> Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle đối với các biến thiên Δ TEC tại 2 đỉnh EIA.....	90
<i>Hình 3.31.</i> a) Chỉ số MEI.v2, b) dao động chu kỳ QBO của Δ TEC tại 2 đỉnh EIA và QBO tăng bình lưu.....	91
<i>Hình 3.32.</i> Biến đổi Wavelet chéo giữa IQBO của đỉnh Bắc và SQBO. Độ tin cậy 95% được chỉ ra bằng đường bao quanh đậm; nón ảnh hưởng (COI, cone of influence) nơi các hiệu ứng biên có thể làm biến dạng hình ảnh được hiển thị dưới dạng vùng sáng hơn. Mỗi quan hệ tương đối được hiển thị bằng các mũi tên (cùng pha chỉ về bên phải, ngược pha chỉ về bên trái).....	92
<i>Hình 3.33.</i> Tương tự như hình 3.33 nhưng đối với đỉnh Nam.....	92
<i>Hình 4.1.</i> Biến thiên hàng ngày của TEC và ROTI nhận được tại trạm PHUT, các vạch thẳng đứng chỉ các thời điểm giữa trưa, mặt trời lặn và nửa đêm một cách tương ứng: a, c) ngày 02/01/2015; b, d) ngày 15/02/2015.....	97
<i>Hình 4.2.</i> Biến thiên Δ R tại PHUT vào năm 2011.....	98
<i>Hình 4.3.</i> Tần suất xuất hiện hàng tháng bất thường điện ly từ 2008-2018 tại các trạm: MTEV, MLAY, TGIV, DBIV, SMAV, PHUT, VINH, CMUM, HUE, CUSV...	100
<i>Hình 4.4.</i> Tần suất xuất hiện hàng tháng của bất thường điện ly từ 2008-2018 tại các trạm: CPNM, HOVM, ANMG, NTUS, BAKO, JOG2, XMIS.....	101
<i>Hình 4.5.</i> Hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường điện ly và F10.7 hàng tháng tại một số trạm.....	104
<i>Hình 4.6.</i> Sơ đồ các giá trị ROTI $\geq 0,5$ TECU/min theo vĩ độ và thời gian quốc tế trong giai đoạn 2008-2018 khu vực Đông Nam Á.....	107
<i>Hình 4.7.</i> Sơ đồ TEC trung bình hàng năm theo thời gian và vĩ độ ở khu vực Đông Nam Á trong giai đoạn 2008-2018. Khoảng các đường đồng mức: 5TECU.....	108
<i>Hình 4.8.</i> Thống kê các sự kiện bất thường điện ly (ROTI $\geq 0,5$ TECu/min) theo vĩ độ địa lý trong giai đoạn 2008-2018. Các kí hiệu: ME: xích đạo từ; SC: đỉnh Nam; NC: đỉnh Bắc.....	109
<i>Hình 4.9.</i> Vĩ độ địa lý của các đỉnh EIA ban ngày và vĩ độ địa lý vị trí nơi mà sự xuất	

hiện bất thường điện ly là cực đại trong giai đoạn 2010-2017.....	110
<i>Hình 5.1.</i> Sáu hàm cơ sở đầu tiên mô tả biến thiên ngày đêm. Vector cơ sở U_I được so sánh với giá trị TEC trung bình ngày đêm tại trạm Phú Thọy.	113
<i>Hình 5.2.</i> Sáu hệ số tương ứng với sáu hàm cơ sở và thông lượng mặt trời F10.7	114
<i>Hình 5.3.</i> Tương quan giữa vectơ cơ sở U_I với TEC tại trạm Phú Thọy (trung bình giờ trong giai đoạn 2008-2018).	114
<i>Hình 5.4.</i> Tương quan giữa hệ số C_I của vec-tơ cơ sở đầu tiên U_I với thông lượng bức xạ mặt trời F10.7.	114
<i>Hình 5.5.</i> a) TEC từ các máy thu GPS, b) TEC xây dựng lại bằng phương pháp EOF, c) TEC phân tích bằng phương pháp EOF với các tham số đầu vào là $F10.7_{av}$ và chỉ số Dst tại Phú Thọy giai đoạn 2008-2018.	117
<i>Hình 5.6.</i> Tương quan giữa giá trị TEC quan sát bằng GPS và TEC đã được phân tích bằng EOF tại Phú Thọy giai đoạn 2008-2018.	117
<i>Hình 5.7.</i> a) TEC từ các máy thu GPS, b) TEC được xây dựng lại bằng phương pháp EOF, c) TEC phân tích bằng phương pháp EOF với tham số đầu vào là $F10.7_{av}$ và chỉ số Dst tại Bạc Liêu giai đoạn 2015-2018.....	117
<i>Hình 5.8.</i> Tương quan giữa giá trị TEC quan sát bằng GPS và TEC đã được phân tích bằng EOF tại Bạc Liêu trong giai đoạn 2015-2018.	118
<i>Hình 5.9.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2009-2010 tại Phú Thọy.....	119
<i>Hình 5.10.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2011-2012 tại Phú Thọy.....	119
<i>Hình 5.11.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2013-2014 tại Phú Thọy.....	120
<i>Hình 5.12.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2015-2016 tại Phú Thọy.....	120
<i>Hình 5.13.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2017-2018 tại Phú Thọy.....	121
<i>Hình 5.14.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2015-2016 tại Bạc Liêu.....	121
<i>Hình 5.15.</i> Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2017-2018 tại Bạc Liêu.....	122

<i>Hình 5.16.</i> GPS TEC, EOF TEC, IRI TEC, CODG TEC vào thời gian bão từ ngày 16-20/3/2015 tại Phú Thụy.	123
<i>Hình 5.17.</i> GPS TEC, EOF TEC, IRI TEC, CODG TEC vào thời gian bão từ ngày 21-25/6/2015 tại Bạc Liêu.	123
<i>Hình 5.18.</i> Biến thiên ngày đêm của sai số bình phương trung bình (RMSE) của IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC so với GPS TEC tại trạm Phú Thụy.	125
<i>Hình 5.19.</i> Biến thiên ngày đêm của sai số bình phương trung bình (RMSE) của IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC so với GPS TEC tại trạm Bạc Liêu.....	125

DANH MỤC CÁC BẢNG

<i>Bảng 2.1.</i> Danh sách các trạm GPS liên tục ở khu vực Việt Nam và lân cận	40
<i>Bảng 3.1.</i> Các chu kỳ dao động chính ở tham số F10.7 và các tham số của 2 đỉnh EIA: biên độ, vĩ độ, thời gian xuất hiện trong giai đoạn 2008-2021.....	78
<i>Bảng 4.1.</i> Hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường điện ly và thông lượng mặt trời F10.7 hàng tháng.....	103
<i>Bảng 5.1.</i> Tỷ lệ phần trăm các hệ số tương quan giữa 6 hệ số EOF đầu tiên với các chỉ số hoạt động mặt trời và chỉ số hoạt tính từ.	115

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

1. CRT: Collisional Rayleigh-Taylor, hiệu ứng Rayleigh-Taylor va chạm
2. CODE: Center for Orbit Determination in Europe, Trung tâm xác định Quỹ đạo ở châu Âu
3. CODG: the Center of Orbit Determination in Europe Global model, Mô hình điện ly toàn cầu của Trung tâm xác định quỹ đạo ở châu Âu.
4. Dst: Disturbance-storm time, Chỉ số nhiễu loạn thời gian bão từ
5. EIA: Equatorial Ionization Anomaly, Dị thường ion hóa xích đạo
6. ENSO: El Niño-Southern Oscillation, El Niño và Dao động Nam
7. EOF: Empirical Orthogonal Function, Hàm trực giao thực nghiệm
8. EPB: Equatorial Plasma Bubble, Bong bóng plasma xích đạo
9. EPF: Equatorial Plasma Fountain, Hiệu ứng vòi phun plasma xích đạo
- 10.ESF: Equatorial Spread F, Spread F xích đạo
- 11.EUV: Extreme Ultraviolet, Bức xạ cực tím
12. GIM: Global Ionosphere Map, Bản đồ điện ly toàn cầu
13. GLONASS: GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Systema in Russian, Hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu của Nga
14. GNSS: Global Navigation Satellite System, Hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu
15. GPS: Global Positioning System, Hệ thống định vị toàn cầu
16. IGS: International GPS Service, Dịch vụ GPS Quốc tế
17. IQBO: Ionosphere QBO, QBO điện ly
18. IRI: International Reference Ionosphere, Mô hình điện ly tham chiếu quốc tế
19. LSTID: Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbance, Nhiễu loạn điện ly dịch chuyển quy mô lớn
20. LT: Local Time, Thời gian địa phương
21. NCS: Nghiên cứu sinh
22. MEI.v2: Multivariate ENSO Index Version 2, Chỉ số ENSO đa biến phiên bản 2
23. MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere, Quyển giữa và nhiệt quyển bên dưới
24. MSTID: Medium-Scale Traveling Ionosphere Disturbance, Nhiễu loạn điện ly dịch chuyển quy mô trung bình
25. PRE: Pre-reversal Enhancement, Sự gia tăng trước khi đảo ngược

26. QBO: Quasi-Biennial Oscillation, Dao động tựa 2 năm
27. RMSE: Root Mean Square Error, Sai số bình phương trung bình
28. ROT: Rate of TEC, Tốc độ thay đổi TEC
29. ROTI: Rate of TEC index, Chỉ số tốc độ thay đổi TEC
30. R-T: Rayleigh-Taylor
31. SQBO: Stratospher QBO, QBO tầng bình lưu
32. STEC: Slant Total Electron Content, Hàm lượng điện tử tổng cộng nghiêng
33. SVD: Singular Value Decomposition, Phân tích giá trị suy biến
34. TEC: Total Electron Content, Hàm lượng điện tử tổng cộng
35. TECU: Total Electron Content Unit, Đơn vị hàm lượng điện tử tổng cộng
36. TID: Traveling Ionospheric Disturbance, Nhiễu loạn điện ly dịch chuyển
37. TIME-GCM: Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere-Electrodynamic General Circulation Model, Mô hình hoàn lưu tổng quát điện động lực-quyển giữa-tầng điện ly-nhiệt quyển
38. UT: Universal Time, Thời gian quốc tế
39. VTEC: Vertical Total Electron Content, Hàm lượng điện tử tổng cộng thẳng đứng

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Cùng với sự tiến bộ của khoa học và công nghệ, các thiết bị điện tử đang và sẽ tiếp tục được ứng dụng ngày càng rộng rãi và mang lại hiệu quả cao trong hầu hết các lĩnh vực kinh tế kỹ thuật cũng như đời sống xã hội. Công nghệ định vị toàn cầu (GPS, Global Positioning System) là một ví dụ điển hình. Giai đoạn đầu, GPS chỉ được sử dụng trong lĩnh vực quân sự do Bộ quốc phòng Mỹ phát triển và được Không quân Mỹ quản lý. Từ năm 1993 trở lại đây GPS được sử dụng cho mục đích dân sự như lập bản đồ, khảo sát vùng đất và nghiên cứu khoa học. Trong lĩnh vực khoa học Trái Đất, công nghệ GPS liên tục có một số ứng dụng: nghiên cứu tầng điện ly, đánh giá hàm lượng hơi nước tầng đối lưu khí quyển, đánh giá dịch chuyển kiến tạo vỏ Trái Đất. Hệ thống định vị toàn cầu là một công cụ mạnh mẽ, hữu dụng trong nghiên cứu điện ly, liên tục cung cấp dữ liệu từ khắp nơi trên thế giới, với số lượng máy thu có sẵn ngày càng tăng.

Tầng điện ly là vùng khí quyển trên cao của Trái Đất, nằm ở độ cao khoảng 50-1500 km, được hình thành do bức xạ mặt trời và bức xạ vũ trụ, được đặc trưng bởi sự có mặt với số lượng lớn của các hạt mang điện là các electron, ion dương và ion âm. Tầng điện ly có tác động đến sự truyền tín hiệu điện từ phát ra từ các vệ tinh GPS tới các máy thu trên mặt đất. Ảnh hưởng của tầng điện ly đến tín hiệu của các vệ tinh GPS thông qua sự có mặt của các điện tử trong tầng điện ly là chủ yếu. Hàm lượng điện tử tổng cộng (TEC: Total Electron Content) là tổng số điện tử có mặt trong ống thẳng (từ vệ tinh đến máy thu) có thiết diện là 1 m^2 . Đối với thông tin liên lạc và định vị bằng vệ tinh, TEC là một tham số tốt để theo dõi các tác động thời tiết không gian có thể xảy ra. Đơn vị của TEC là 10^{16} el/m^2 , ký hiệu là TECU (TECU, Total Electron Content Unit). Dựa trên ảnh hưởng của tầng điện ly tới sự truyền tín hiệu GPS tới các máy thu trên mặt đất mà các nhà khoa học trên thế giới đã xây dựng các thuật toán, phần mềm xử lý số liệu GPS. Trên cơ sở đó, TEC và các chỉ số xác định đã được tính toán để phục vụ cho việc nghiên cứu đặc trưng và động lực học của tầng điện ly như dị thường ion hóa xích đạo (EIA: Equatorial Ionization Anomaly) và các bất thường điện ly, đặc biệt là các bất thường điện ly ban đêm, hiện tượng thường gặp ở các vùng điện ly xích đạo và vĩ độ thấp.

EIA được đặc trưng bởi một vùng trung mật độ ở xích đạo từ và 2 đỉnh mật độ

điện từ ở khoảng $\pm 15^\circ - 20^\circ$ vĩ độ từ [1,2]. Ở vùng xích đạo, có các yếu tố khác nhau làm thay đổi cấu trúc của EIA như: gió mặt trời, sự vận chuyển plasma dọc theo đường sức trường từ do các gió trung hòa thổi theo phương kinh tuyến, các tác động của tầng khí quyển bên dưới,... Vì lý do đó, nghiên cứu EIA là một chủ đề khá thú vị cho khoa học vũ trụ và đó cũng là một trong những mục tiêu nghiên cứu của luận án.

Môi trường plasma điện ly tồn tại ở 2 trạng thái: trạng thái yên tĩnh và trạng thái bất thường. Bất thường điện ly ban đêm là một đặc trưng bất đồng nhất điện từ trong tầng điện ly, xuất hiện một cách ngẫu nhiên sau khi Mặt Trời lặn liên quan đến các quá trình động học phức tạp diễn ra trong tầng điện ly. Ở khu vực vĩ độ thấp, các bất thường điện ly thường đi kèm với các hiện tượng bong bóng plasma, nhiễu loạn điện ly dịch chuyển quy mô trung bình (MSTID: Medium Scale Travelling Ionosphere Disturbance), và spread F (quan sát được từ số liệu thăm dò thẳng đứng). Nhận mạnh rằng ở khu vực vĩ độ thấp và xích đạo, trong khi bong bóng plasma xuất hiện thường xuyên, thì các MSTID xuất hiện ít hơn và thường chỉ xuất hiện trong thời gian hoạt động bão từ và để tổng quát hóa hơn vấn đề nghiên cứu về nhiễu loạn điện ly, sau đây NCS sử dụng thuật ngữ “bất thường điện ly ban đêm” thay cho thuật ngữ “bong bóng plasma”. Sự tồn tại của các bất thường điện ly gây ảnh hưởng rất nhiều lên quá trình truyền sóng radio trong dải tần số nhỏ hơn vài GHz, cũng chính là dải tần được sử dụng trong truyền thông và dẫn đường của hệ thống GPS, với những nhiễu loạn lớn có thể gây ra mất tín hiệu, đối với những nhiễu loạn tỉ lệ nhỏ gây ra sai số trên khoảng cách [3,4,5]. Con người không thể tác động để làm giảm thiểu sự xuất hiện của các bất thường điện ly, mà chỉ có thể nâng cao khả năng dự báo sự xuất hiện của chúng để thiết lập chế độ phát-truyền tín hiệu thích hợp ở những khu vực có bất thường điện ly. Do vậy, sự hiểu biết một cách cặn kẽ chi tiết về bất thường điện ly là điều quan trọng đối với các kỹ sư và các chuyên gia công nghệ cũng như đối với các nhà khoa học. Việc nghiên cứu bất thường điện ly ban đêm là mục tiêu tiếp theo của luận án.

Lãnh thổ Việt Nam và khu vực lân cận sau đây được gọi chung là khu vực Đông Nam Á nằm ở vùng dị thường ion hóa xích đạo, khu vực miền Bắc nằm ở vùng đỉnh dị thường, khu vực miền Nam nằm ở vùng đáy dị thường ([6] và những tham khảo trong đó). Cùng với sự phát triển và hội nhập về Khoa học và Công nghệ, trong khuôn khổ hợp tác giữa Viện Vật lý địa cầu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam với Trường Đại học Rennes 1 và Trường Viễn thông quốc gia Bretagne,

Cộng hòa Pháp đã lắp đặt được 3 trạm thu GPS liên tục tại Hà Nội, Huế và Tp. Hồ Chí Minh vào năm 2005. Trong khuôn khổ hợp tác giữa Viện Vật lý Địa cầu-VAST và Đại học Quốc gia Đài Loan, sáu máy thu GPS hoạt động liên tục được lắp đặt ở Tây Bắc Việt Nam từ tháng 11 năm 2009. Từ tháng 9 năm 2011, một máy thu GPS khác đã được đặt ở Vinh, hoạt động liên tục đã được duy trì cho đến nay. Từ cuối 2017 trong khuôn khổ hợp tác với Viện Các Khoa học Trái Đất, SINICA Đài Loan, hệ thống 10 trạm GPS cắt ngang đới đứt gãy Sông Hồng (từ QHOA tới LSON) đã được lắp đặt. Như vậy, từ năm 2005 tới nay, Viện Vật lý Địa cầu đã tạo ra mạng lưới GPS cung cấp nguồn số liệu liên tục cùng với một số trạm IGS (International GPS Service) ở khu vực lân cận là một thuận lợi để nghiên cứu tầng điện ly ở khu vực Đông Nam Á.

Tóm lại, do tầm quan trọng của việc nghiên cứu EIA và các bất thường điện ly ban đêm, cùng với điều kiện thuận lợi của nguồn số liệu phong phú liên tục và vị trí của khu vực nghiên cứu, nghiên cứu sinh (NCS) đã xây dựng luận án với tên: “**Bong bóng plasma và đặc trưng dị thường ion hóa xích đạo khu vực Việt Nam và lân cận**” dưới sự hướng dẫn của TS. NCVCC. Lê Huy Minh và TS. NCVCC. Phạm Thị Thu Hồng.

2. Mục tiêu của luận án

Làm sáng tỏ các quy luật biến đổi theo thời gian của dị thường ion hóa xích đạo, đặc trưng xuất hiện của các bất thường điện ly ban đêm và hiệu quả của các mô hình điện ly ở Việt Nam và lân cận (khu vực Đông Nam Á). Mục tiêu cụ thể như sau:

- Làm sáng tỏ các quy luật biến đổi theo thời gian của các tham số dị thường ion hóa xích đạo khu vực Đông Nam Á, các dao động chu kỳ khác nhau và các nguyên nhân có thể của chúng.

- Làm sáng tỏ các đặc trưng xuất hiện của các bất thường điện ly ban đêm khu vực nghiên cứu.

- Làm sáng tỏ hiệu quả của mô hình điện ly tham chiếu quốc tế (IRI: International Reference Ionosphere), mô hình TEC toàn cầu CODG (the Center of Orbit Determination in Europe Global model) và mô hình TEC dựa trên hàm trực giao thực nghiệm EOF (Empirical Orthogonal Function) ở khu vực vĩ độ thấp và khu vực xích đạo Việt Nam.

3. Nội dung nghiên cứu của luận án

- Tìm hiểu thuật toán tính TEC từ tổ hợp trị đo pha và trị đo giả khoảng cách.

- Thành lập các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ trong giai đoạn 2008-2021 cho khu vực Đông Nam Á.

- Tính các tham số của các đỉnh EIA như: biên độ (TEC), vĩ độ, thời gian xuất hiện để nghiên cứu đặc trưng biến thiên theo thời gian của các đỉnh EIA ở khu vực Đông Nam Á: biến thiên nội mùa (15 ngày, 27 ngày), biến thiên nửa năm, biến thiên năm, biến thiên chu kỳ tựa 2 năm (QBO: Quasi-Biennial Oscillation) và biến thiên theo chu kỳ hoạt động mặt trời.

- Tính các chỉ số dao động pha ROTI trong giai đoạn 2008-2018 để nghiên cứu đặc trưng bất thường điện ly ban đêm khu vực Đông Nam Á như: tần suất xuất hiện, mối quan hệ của nó với hoạt tính mặt trời và sự phân bố theo thời gian và vĩ độ; chỉ ra mối quan hệ giữa vị trí xuất hiện cực đại bất thường với vị trí đỉnh dị thường ion hóa xích đạo.

- Tìm hiểu phương pháp phân tích hàm trực giao thực nghiệm EOF và phương pháp phân tích suy biến để mô hình hóa (phân tích) các giá trị TEC ở hai khu vực Phú Thọ (vùng đỉnh dị thường) và Bạc Liêu (vùng đáy dị thường). So sánh các giá trị TEC quan sát được bằng máy thu GPS với các giá trị TEC nhận được từ mô hình điện ly tham chiếu quốc tế IRI-2016, mô hình TEC toàn cầu GIMs/CODG và TEC phân tích bằng phương pháp EOF.

4. Những điểm mới của luận án

- Xác định được một cách tin cậy các đặc trưng dị thường ion hóa xích đạo và bất thường điện ly khu vực Đông Nam Á sử dụng chuỗi số liệu GPS dài hơn 1 chu kỳ hoạt động mặt trời (2008-2021). Phát hiện các dao động chu kỳ khác nhau của tầng điện ly khu vực Đông Nam Á thông qua các tham số của đỉnh EIA phụ thuộc phức tạp vào hoạt tính mặt trời và các yếu tố tác động có thể từ khí quyển bên dưới: ENSO, QBO, các sóng hành tinh.

- Chỉ ra một cách định lượng vị trí có tần suất hiện bất thường điện ly cực đại so với vị trí các đỉnh EIA. Bất thường điện ly ban đêm thường chỉ xuất hiện trong khoảng thời gian sau khi mặt trời lặn tới trước nửa đêm, mỗi năm bất thường điện ly xuất hiện cực đại vào thời kỳ phân điểm, phụ thuộc hoạt tính mặt trời, vĩ độ xuất hiện cực đại bất thường ban đêm cách vĩ độ cực đại EIA ban ngày khoảng 4° - 5° về phía xích đạo.

- Khẳng định mô hình EOF có thể mô phỏng khá tốt tiến trình ngày đêm của TEC trong thời gian yên tĩnh và bão từ, biến thiên theo mùa và theo hoạt tính mặt trời

cho khu vực Việt Nam. So sánh kết quả TEC từ GPS với TEC từ các mô hình toàn cầu (IRI-2016, CODG) và từ mô hình EOF cho thấy mô hình TEC dựa trên EOF dự đoán sự biến đổi theo thời gian của TEC chính xác hơn so với các mô hình toàn cầu.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- Góp phần tăng thêm hiểu biết về đặc trưng EIA và bất thường điện ly ban đêm.

- Bổ sung những đặc trưng mang tính chất địa phương của tầng điện ly góp phần vào cải tiến độ chính xác của các mô hình điện ly tham chiếu Quốc tế và các bản đồ điện ly toàn cầu.

- Nâng cao hiệu quả sử dụng các hệ thống vệ tinh dẫn đường toàn cầu khi xem xét đến các yếu tố đặc trưng khác của tầng điện ly có thể ảnh hưởng lên quá trình truyền sóng GPS.

- Trong kỷ nguyên vũ trụ hiện nay, hướng nghiên cứu thời tiết không gian ngày càng được quan tâm, các kết quả nghiên cứu của luận án chỉ ra mối liên hệ giữa các biến đổi của tầng điện ly, hoạt tính mặt trời và tầng khí quyển bên dưới mang lại những thông tin rất hữu ích trong việc xây dựng các mô hình dự báo thời tiết không gian.

6. Cấu trúc của luận án

Luận án ngoài phần mở đầu và kết luận bao gồm 5 chương với những nội dung như sau:

Chương 1: Trình bày tổng quan về tầng điện ly như: các lớp điện ly, lý thuyết hình thành tầng điện ly, các quá trình vật lý bên trong tầng điện ly (dynamo lớp E, lớp F), dị thường ion hóa xích đạo, bất thường điện ly. Tổng quan về hệ thống định vị toàn cầu GPS, các tín hiệu GPS và các tham số quan sát được từ hệ thống này, tình hình nghiên cứu tầng điện ly vĩ độ thấp và xích đạo sử dụng công nghệ GPS trên thế giới và ở Việt Nam.

Chương 2: Trình bày số liệu và các phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án.

Chương 3: Giới thiệu một số kết quả tính TEC tại một số trạm GPS liên tục ở khu vực Đông Nam Á. Thành lập các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ. Nghiên cứu đặc trưng của dị thường ion hóa xích đạo thông qua các tham số đỉnh của nó như: biên độ, vĩ độ và thời gian xuất hiện đỉnh. Phân tích các dao động chu kỳ chính của các

đỉnh EIA và tìm hiểu mối quan hệ của các dao động chu kỳ này với các yếu tố tác động có thể đến tầng điện ly.

Chương 4: Trình bày kết quả nghiên cứu đặc trưng của bất thường điện ly ban đêm ở khu vực Đông Nam Á: tần suất xuất hiện, sự phân bố bất thường theo thời gian và vĩ độ. So sánh vị trí cực đại của bất thường điện ly ban đêm với vị trí đỉnh EIA một cách định lượng.

Chương 5: Trình bày kết quả mô hình hóa TEC bằng phương pháp hàm trực giao thực nghiệm (EOF: Empirical Orthogonal Functions). So sánh TEC quan sát bằng GPS ở Việt Nam (Phú Thọ, Bạc Liêu) với TEC từ các mô hình đối với các ngày yên tĩnh và bão từ. Đánh giá sai số của các mô hình IRI, CODG và EOF.

CHƯƠNG 1

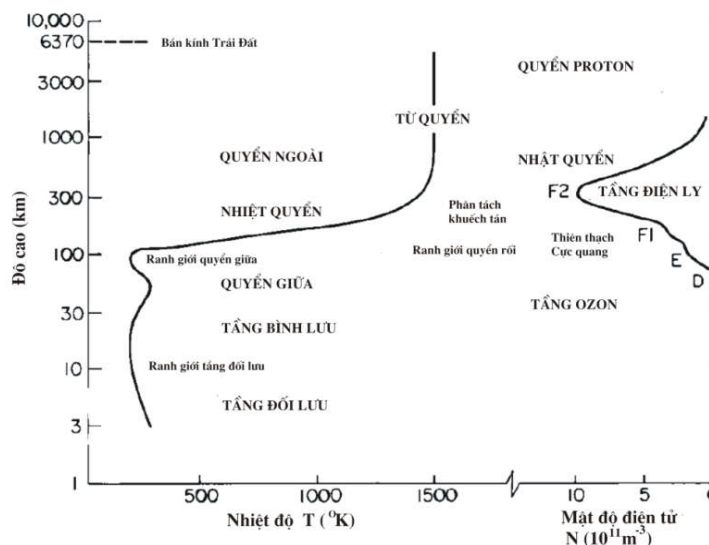
TỔNG QUAN VỀ TẦNG ĐIỆN LY, HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TOÀN CẦU VÀ NGHIÊN CỨU ĐIỆN LY VÙNG VĨ ĐỘ THẤP SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ GPS

Trong chương này NCS giới thiệu khái quát về tầng điện ly: khái niệm tầng điện ly, các lớp điện ly, sự hình thành tầng điện ly, dị thường ion hóa xích đạo, các bất thường điện ly, bất ổn định Rayleigh-Taylor, El Niño và dao động Nam (ENSO: El Niño- Southern Oscillation) của khí quyển, dao động tựa hai năm (QBO– Quasi-Biennial Oscillation) của tầng bình lưu, hệ thống định vị GPS, các nghiên cứu điện ly vùng vĩ độ thấp sử dụng công nghệ GPS.

1.1. Khái quát về tầng điện ly

1.1.1. Nguồn gốc sự hình thành tầng điện ly

Tầng điện ly là vùng khí quyển ở trên cao của Trái Đất, được hình thành do bức xạ mặt trời và bức xạ vũ trụ, nằm ở độ cao khoảng 50 km đến 1500 km so với mặt đất (hình 1.1), ở đó quá trình ion hóa đủ mạnh ảnh hưởng tới sự truyền sóng radio [7]. Mức độ ion hóa trong tầng điện ly phụ thuộc vào 3 yếu tố cơ bản: năng lượng bức xạ mặt trời gây ion hóa, hệ số hấp thụ năng lượng của các thành phần khí và mật độ khí quyển. Sau khi khí quyển trung hòa bị ion hóa, một quá trình ngược lại gọi là quá trình tái hợp giữa điện tử và ion xảy ra liên tục nhưng chậm chạp, vì vậy trong khoảng thời gian ban đêm mật độ điện tử vẫn còn được duy trì (Rishbeth & Garriot, 1969 [8]).



Hình 1.1. Sơ đồ các lớp khí quyển và các lớp của tầng điện ly (Rishbeth & Garriot [8])

Plasma tầng điện ly, hay khí ion hóa, bao gồm các ion và các electron được hình thành từ sự ion hóa các hạt trung hòa bởi năng lượng bức xạ mặt trời, và trở lại là

khí trung hòa bởi sự tái tổ hợp các ion và các điện tử. Lớp khí quyển trung hòa bị đốt nóng bởi sự hấp thụ năng lượng bức xạ mặt trời và được duy trì ở trạng thái cân bằng được thiết lập giữa sự tác động cường bức của lực hấp dẫn của Trái Đất và gradient áp suất khí quyển. Lớp khí trung hòa hấp thụ năng lượng bức xạ mặt trời tùy thuộc vào độ cao và kết cấu hình thái thể khí có mặt trong một lớp riêng biệt. Ở dưới độ cao khoảng 170 km thể khí liên tục Shumann-Runge của bức xạ cực tím (UV: ultraviolet radiation) có bước sóng từ 130-170 nm đóng vai trò là nguồn bức xạ chính, ban đầu là phản ứng phân ly O_2 . Trong phạm vi độ cao từ 170-300 km, bức xạ cực tím cực đại (EUV: Extreme ultraviolet, bước sóng $\lambda \leq 102.5$ nm) trở thành nguồn nhiệt chính do sự ion hóa thể khí loại nguyên tử và phân tử. Những photon có bước sóng $\lambda \leq 102.5$ nm bị hấp thụ gần như hoàn toàn do sự quang ion hóa N_2 , O_2 , và O , và năng lượng dư thừa từ đó được dùng hết vào quá trình ion hóa và vào sự kích thích ion trở thành năng lượng động học của những quá trình quang điện. Những phản ứng tái tổ hợp ion và sự va chạm giữa ion và nguyên tử cũng trở thành một nguồn nhiệt. Để hiểu được sự hình thành tầng điện ly, đầu tiên chúng ta phải nắm được quá trình sinh và mất plasma biến đổi như thế nào theo độ cao trong phạm vi tầng điện ly.

Sau khi hình thành, plasma được vận chuyển bởi sự tác động của trọng lực, gradient áp suất, lực điện từ và bởi sự va chạm với các hạt trung hòa. Phương trình liên tục bao gồm các tác động này là phương trình cơ bản miêu tả sự hình thành tầng điện ly. Những điều kiện tầng điện ly khác nhau quan sát được (ví dụ., những biến thiên mùa, dị thường ion hóa xích đạo, bão điện ly gây ra bởi nhiễu loạn từ, những cấu trúc bất thường...) có thể hiểu được bằng cách xem xét các số hạng trong phương trình liên tục.

Phương trình liên tục có chứa các số hạng biểu thị hiệu ứng của các quá trình khác nhau làm thay đổi mật độ điện tử N_e . Các phương trình liên tục cũng có thể viết hoặc cho các ion âm hoặc cho các ion dương hoặc bất kỳ hợp phần nào mà hàm lượng của chúng thay đổi theo thời gian. Trong một đơn vị thể tích chúng ta có phương trình [8,9,10]:

$$\begin{aligned}
 [\text{Tốc độ thay đổi mật độ điện tử}] = & \quad [\text{Tốc độ tạo điện tử}] \\
 & - [\text{Tốc độ mất điện tử}] \\
 & - [\text{thay đổi do quá trình vận chuyển}]
 \end{aligned}$$

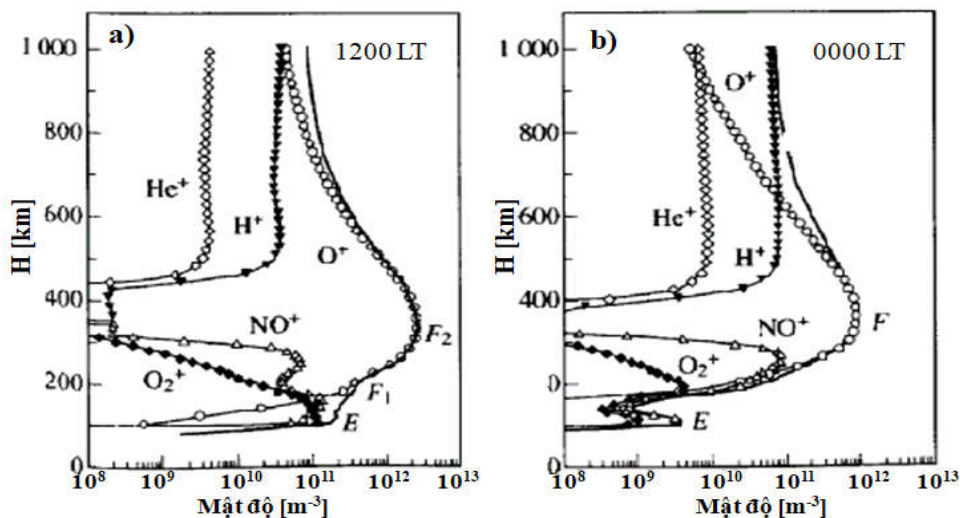
$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = q - l(N_e) - \bar{\nabla} \cdot (N_e \bar{V}) \quad (1.1)$$

trong đó: N_e : mật độ điện tử; \vec{V} : vận tốc trôi hạt thực; q và l : lần lượt là tốc độ sinh và mất điện tử, những giá trị sinh và mất được xác định chủ yếu bằng năng lượng ion hóa bức xạ mặt trời và những phản ứng tái tổ hợp ion.

Trong tầng điện ly, ở dưới độ cao 200 km, quá trình vận chuyển không lớn do đó chúng ta có thể bỏ qua đại lượng này thu được phương trình ‘quang hóa’ chỉ chứa đạo hàm $\frac{\partial N_e}{\partial t}$. Hơn nữa ‘hằng số thời gian’ liên quan tới số hạng mất mát l nhỏ hơn nhiều các số hạng khác, vì thế phương trình ‘cân bằng quang hóa’ $q = l(N_e)$ là thích hợp. Điều này đúng đối với các lớp D, E và F_1 vào ban ngày. Trên khoảng độ cao 250 km, các số hạng quang hóa q và l trong phương trình liên tục không còn chiếm ưu thế và do đó ‘trạng thái vận chuyển’ tồn tại.

1.1.2. Các lớp điện ly

Dựa vào các tuyến mật độ điện tử đạt cực đại ở một độ cao nào đó mà người ta phân chia tầng điện ly thành nhiều lớp theo trật tự tăng dần chiều cao được gọi là lớp D (ở độ cao 50-90 km), lớp E (90-150 km), và lớp F, vào ban ngày lớp F được phân thành lớp F_1 và F_2 .



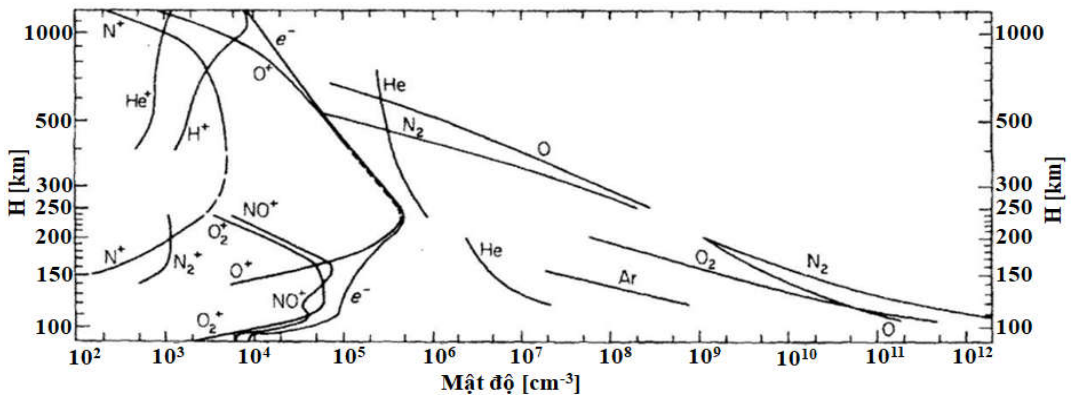
Hình 1. 2. Tuyến mật độ điện tử và ion theo chiều cao (mô hình điện ly tham chiếu quốc tế IRI): a) tại thời điểm 1200 LT, b) tại thời điểm 0000 LT

Hình 1.2 là một ví dụ về tuyến mật độ điện tử và mật độ theo mô hình IRI của một số loại ion dương trên tầng điện ly (He^+ , H^+ , O^+ , NO^+ , O_2^+) theo chiều cao vào thời gian ban ngày 1200 LT (hình 1.2a) và vào thời gian ban đêm 0000 LT (hình 1.2b) [11]. Trên các đường cong mật độ điện tử đạt cực đại rõ rệt ở độ cao lớn hơn khoảng 200 km, gọi là cực đại lớp F (ban đêm) hoặc cực đại lớp F_2 (ban ngày). Bên trên cực

đại lớp F hoặc lớp F₂ mật độ điện tử giảm dần theo chiều cao. Ban đêm lớp E giảm rất mạnh và hầu như không tồn tại. Mỗi một lớp điện ly được đặc trưng bởi các tham số: độ cao của lớp: h ; chiều dày của lớp: y ; mật độ điện tử cực đại: N_e . Các tham số này phụ thuộc vào: thời gian trong ngày, mùa trong năm, hoạt tính mặt trời, hoạt động địa từ và vị trí địa lý của mỗi khu vực.

1.1.3. Hợp phần ion

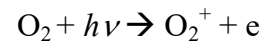
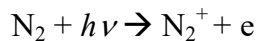
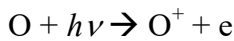
Hợp phần ion và hợp phần khí trung hòa được xác định bằng các tài liệu đo đạc bằng tên lửa cùng với các phổ kế khối lượng và vệ tinh. Johnson (1969) [12] đã tổng kết các kết quả của phép đo nồng độ được minh họa trên *hình 1.3*. Kết quả ở hình này minh họa các điều kiện ban ngày trung bình trong thời kỳ vết đen mặt trời cực tiểu.



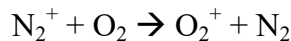
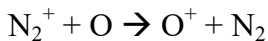
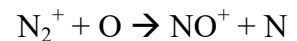
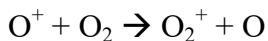
Hình 1.3. Hợp phần khí quyển và tầng điện ly trong thời gian ban ngày dựa trên các phép đo phổ kế khối lượng và vệ tinh [12].

Quan sát trên mô hình có thể thấy rằng vào ban ngày, ở dưới độ cao 165 km, các ion NO⁺ và O₂⁺ chiếm ưu thế, trên độ cao đó O⁺ chiếm ưu thế nhất. Vào ban đêm ở độ cao khoảng 220 km bắt đầu có sự chuyển tiếp. Các ion khác có mặt với hàm lượng rất nhỏ. Hợp phần khí trung hòa chính trong nhiệt quyển là O, N₂, và O₂. Như vậy các ion được tạo ra bởi quá trình quang ion hóa là: O⁺, N₂⁺, O₂⁺ thông qua các phản ứng quang hóa sau [8,9,10]:

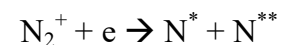
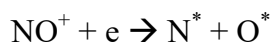
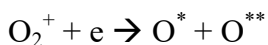
Quang hóa



Di chuyển hoặc thay đổi



Tái hợp phân ly



Trong đó, h là hằng số Planck, ν là tần số bức xạ, dấu * và dấu ** thể hiện ion ở hai trạng thái kích thích khác nhau. Các mũi tên trong các phương trình quang hóa, di chuyển hoặc thay đổi và tái hợp phân ly thể hiện quá trình tạo thành các ion và các hợp phần khí trung hòa trong mỗi kiểu phản ứng.

1.1.4. Dynamo lớp E

Dynamo lớp E chi phối bởi các dao động triều của khí quyển [13,14]. Triều trong khí quyển là các dao động tuần hoàn của không khí có quy mô toàn cầu. Các triều khí quyển này được tạo ra do hơi nước và khí quyển hấp thụ bức xạ năng lượng mặt trời trong ngày. Các triều trong khí quyển có biên độ lớn nhất chủ yếu được tạo ra ở tầng đối lưu và tầng bình lưu, chúng lan truyền ra khỏi các vùng nguồn và di chuyển lên quyển giữa và nhiệt quyển. Trong trường hợp không có bất kỳ sự suy giảm hay sự bão hòa, động năng trên một đơn vị thể tích ($pU^2/2$) của quá trình lan truyền lên trên có xu hướng không đổi và do đó vận tốc U tăng theo chiều cao. Khả năng của dạng triều để tạo ra các dòng điện tầng điện ly phụ thuộc vào bước sóng dọc của nó. Dạng triều có bước sóng dọc ngắn có xu hướng tạo ra các dòng điện có hướng ngược nhau sau mỗi vài km mà nó gây ra, do đó, các dòng điện theo phương ngang liên kết với nhau theo phương thẳng đứng rất nhỏ. Do đó chỉ những dao động triều đồng pha ở trên độ cao tầng điện ly có độ dẫn điện lớn (~90-120 km ở lớp E) sẽ sinh ra các dòng điện có cường độ lớn trên tầng điện ly thiết lập quá trình dynamo [13,14,15,16,17]. Gió trung hòa cùng với các thành phần nhật triều và bán nhật triều khí quyển gây ra các dòng điện chạy trong vùng có độ cao khoảng ~90-120 km.

Gió trung hòa có vận tốc U , di chuyển ngang qua đường sức trường từ \vec{B} , gây ra một lực Lorentz $q(\vec{U} \wedge \vec{B})$ tác động lên điện tích q . Mức độ mà các ion và điện tích bị ảnh hưởng bởi lực này tùy thuộc vào tỉ số giữa tần số va chạm tương ứng của chúng (ν) với tần số hồi chuyển (Ω), các đại lượng này là hàm theo độ cao. Trên ~90 km chỉ có các ion dịch chuyển dưới tác động của gió vì $\nu_i \gg \Omega_i$ và $\nu_e \ll \Omega_e$. Sự di chuyển này của các ion có xu hướng tích lũy điện tích với tốc độ được cho bởi $\vec{V} \cdot (N_e q \vec{V}_i)$ trong đó \vec{V}_i là vận tốc trôi dạt ion, và do đó trường điện phân cực E_x (x theo hướng vĩ tuyến) được thiết lập. Các điện tử chuyển động tự do dọc theo các đường sức trường từ để điều chỉnh sự phân bố điện tích. Như vậy trường điện theo phương thẳng đứng \vec{E}_p được sinh ra, làm cho các ion và các điện tích di chuyển ngang qua đường sức từ

trường, sao cho ở trạng thái ổn định dòng điện không phân cực, người ta có,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot N_e q (\vec{V}_i - \vec{V}_e) \quad (1.2)$$

trong đó \vec{V}_i và \vec{V}_e là vận tốc trôi dạt ion và điện tử, một cách tương ứng. Dòng điện J có thể được biểu diễn bởi:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}' \quad (1.3)$$

trong đó, \vec{E}' bao gồm thành phần cảm ứng “ $\vec{U} \wedge \vec{B}$ ” do ảnh hưởng của gió “ \vec{U} ” và thành phần phân cực “ \vec{E}_p ”, σ là độ dẫn. Trường điện phân cực này có nguồn gốc từ một điện thế ‘ ϕ ’ được tạo ra bởi sự phân bố điện tích, tức là,

$$\vec{E}' = \vec{E}_p + \vec{U} \wedge \vec{B} \quad (1.4)$$

trong đó:

$$\vec{E}_p = -\vec{\nabla} \phi \quad (1.5)$$

Thế ‘ ϕ ’ phụ thuộc vào phân bố của gió và độ dẫn quy mô toàn cầu.

Vì trường điện được tạo ra thông qua chuyển động cơ học của các ion/điện tử dưới tác động của gió do sự có mặt của trường từ là tương tự với hoạt động ‘Dynamo’; quá trình này ở lớp E tầng điện ly được gọi là dynamo lớp E hay hệ thống dòng dynamo gió mặt trời yên tĩnh (S_q). Kết quả của hệ thống dòng này là một trường tĩnh điện hướng về phía Đông từ bình minh đến hoàng hôn ở những vĩ độ thấp. Trường điện theo hướng Đông trong vùng dynamo có một hệ quả quan trọng ở vùng xích đạo. Trường điện theo hướng Đông ở các vĩ độ ngoài xích đạo ánh xạ vào vùng F xích đạo và sinh ra dị thường ion hóa xích đạo sẽ được đề cập những phần dưới đây.

1.1.5. Dynamo lớp F

Hệ thống gió nhiệt quyển được tạo ra do sự khác biệt về áp suất do bức xạ mặt trời là động lực chính cho dynamo lớp F hình thành. Rishbeth (1971) [15] lần đầu tiên đưa ra ý tưởng về lớp F có dynamo riêng của nó. Sau khi Mặt Trời lặn, độ dẫn lớp E trở nên quá nhỏ và do đó plasma lớp F tạo thành một lớp với ranh giới dưới được xác định rõ ràng, có thể được xấp xỉ gần đúng thành hình dạng phiến.

Plasma lớp F có độ dẫn Pedersen hữu hạn và không đổi bên trong phiến, bằng 0 bên ngoài phiến, và gió vĩ hướng không đổi cũng thịnh hành bên trong phiến. Kết quả là, trường điện phân cực thẳng đứng phát triển ở lớp F, làm phát sinh trôi dạt vĩ hướng (V_D) của plasma lớp F. Vào thời gian ban đêm, vận tốc trôi dạt vĩ hướng này có cùng hướng với hướng của gió trung hòa, tức là, có hướng về phía Đông [15,18]. Đối với trường điện thẳng đứng, sự phân tách điện tích sẽ xảy ra theo cách mà dòng điện tổng

‘ J_z ’ bằng 0. Do đó, chúng ta có [10]:

$$J_z = \sigma_p E_z + \sigma_p u B = 0 \quad (1.6)$$

trong đó σ_p là độ dẫn Pedersen:

$$\sigma_p = \frac{ne^2 v_{in}}{M\Omega_i^2}$$

với n là mật độ plasma, e là điện tích nguyên tố, v_{in} là tần số va chạm giữa ion và hạt trung hòa, M là khối lượng ion, Ω_i là tần số hồi chuyển của ion. Thành phần thẳng đứng E_z được xác định bởi:

$$E_z = -uB \quad (1.7)$$

trong đó u là thành phần vĩ hướng của gió trung hòa, B là cường độ từ trường. Đối với dynamo lớp F hoàn hảo, phương trình trên có thể được tổng quát hóa và viết dưới dạng:

$$\vec{E} + \vec{U} \wedge \vec{B} = 0 \quad (1.8)$$

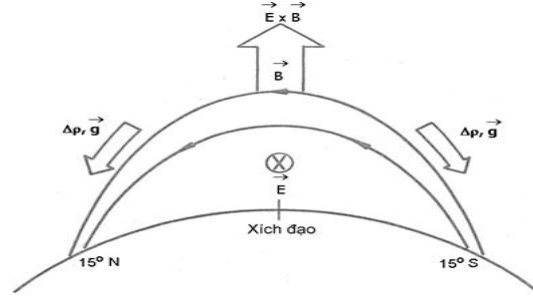
Điều này có nghĩa là vào ban đêm, lực điện từ tác động lên plasma biến mất và gió nhiệt quyển thổi tự do mà không có lực cản ion (ion-drag). Các quan sát vào ban đêm về trôi dạt plasma vĩ hướng và các vận tốc gió trung hòa đã thực sự cho thấy chúng gần như bằng nhau. Tuy nhiên, vào ban ngày, kịch bản thay đổi vì độ dẫn tích phân lớp E có thể bằng hoặc lớn hơn độ dẫn tích phân lớp F theo hướng đường sức từ trường. Do đó, trường điện lớp F không thể hình thành và lực cản ion vào ban ngày vẫn còn cao.

1.1.6. Dị thường ion hóa xích đạo

Tầng điện ly của khu vực xích đạo và vĩ độ thấp có phân bố mật độ plasma bất thường; mật độ plasma trong khu vực này có giá trị nhỏ nhất ở xích đạo từ và có hai cực đại ở về hai phía của xích đạo từ [1,2]. Hiện tượng này còn được gọi là dị thường ion hóa xích đạo (EIA), hiệu ứng gây ra EIA được gọi là hiệu ứng vòi phun xích đạo (*hình 1.4*).

Vào ban ngày dao động triều và dao động nhiệt mặt trời trong lớp dưới của tầng điện ly làm di chuyển plasma lên trên và cắt ngang các đường sức từ trường. Điều đó đã tạo nên một bản dòng trong lớp E cùng với một điện trường E hướng từ Tây sang Đông. Trường điện này trong lớp E cùng với trường từ nằm ngang trong vùng xích đạo từ đã làm cho plasma dịch chuyển lên trên vào vùng F của tầng điện ly (sự trôi dạt dưới tác dụng của lực $\vec{E} \times \vec{B}$). Plasma đã bị nâng lên phía trên xích đạo sau đó bị khuếch tán dọc theo đường sức từ trường về phía hai cực dưới tác dụng của trọng lực

và gradient áp suất. Kết quả là EIA được tạo thành với mật độ ion của lớp F ở xích đạo giảm đi và mật độ ion tăng ở hai đỉnh xung quanh $\pm 15^\circ - 20^\circ$ vĩ độ từ ở về hai phía của xích đạo từ. Hiện tượng này giống như hình ảnh của một “vòi phun” nên người ta gọi là “hiệu ứng vòi phun plasma xích đạo”. Sự hình thành EIA được mô tả bằng các phương trình toán học như dưới đây.



Hình 1.4. Hiệu ứng vòi phun xích đạo [19]

1.1.6.1. Sự chuyển động của các hạt trong lớp F

Ion và điện tử trong tầng điện ly chịu sự tác dụng của trọng lực, gradient áp suất khí, lực Lorentz, và các lực do sự va chạm giữa ion, điện tử với các loại khí khác. Khi những lực này cân bằng với nhau và trạng thái cân bằng được thiết lập, chúng ta có thể sử dụng phương trình động lượng để biểu diễn sự vận chuyển của điện tử (ký hiệu là chữ e) và ion (ký hiệu là chữ i) như sau [10,20]:

$$m_i \bar{g} - \frac{k_B}{n_i} \bar{\nabla} (T_i n_i) + e (\bar{E} + \bar{v}_i \times \bar{B}) - m_i v_i (\bar{v}_i - \bar{v}_e) - m_i \sum_j v_{ij} (\bar{v}_i - \bar{v}_j) = 0 \quad (1.9)$$

$$m_e \bar{g} - \frac{k_B}{n_e} \bar{\nabla} (T_e n_e) - e (\bar{E} + \bar{v}_e \times \bar{B}) - m_e v_{en} (\bar{v}_e - \bar{v}_n) - m_e \sum_j v_{ej} (\bar{v}_e - \bar{v}_j) = 0 \quad (1.10)$$

trong đó:

\bar{g} : gia tốc trọng trường;

T_i, T_e : nhiệt độ ion/ điện tử

m_i, m_e : khối lượng ion/điện tử

v_{in}, v_{en} : tần số va chạm ion/điện tử với phân tử khí trung hòa;

v_{ie} : tần số va chạm giữa loại ion i và điện tử;

\bar{v}_n : vận tốc phân tử khí trung hòa.

k_B : hằng số Boltzmann

n_i, n_e : mật độ ion/điện tử

\bar{v}_i / \bar{v}_e : vận tốc ion/điện tử

v_{ij} : tần số va chạm giữa loại khí i và loại ion j ;

v_{ej} : tần số va chạm giữa điện tử và

loại ion j ;

Trong (1.9) và (1.10) số hạng thứ nhất là trọng lực, số hạng thứ hai là gradient áp suất, số hạng thứ ba là lực Lorentz, các số hạng còn lại ứng với các lực va chạm giữa ion với hạt trung hòa, ion với điện tử và các loại ion với nhau.

Khi xem xét sự hình thành của tầng điện ly, một vài số hạng trong phương trình

(1.9) và (1.10) có thể bỏ qua. Do khối lượng điện tử nhỏ hơn nhiều so với khối lượng của ion, năng lượng hầu như không đủ để chuyển thành những va chạm giữa các điện tử và các ion, do đó số hạng thứ 5 ở bên phải của phương trình (1.10) có thể bỏ qua. Mối tương quan về độ lớn giữa tần số góc hồi chuyển ($\Omega = eB/m$) của các phân tử tích điện và các phân tử trung hòa là quan trọng trong việc xác định cơ chế vận chuyển điện tử và ion. Vì $v_{en} \ll \Omega_e$, do đó $m_e v_{en} \ll eB$. Vì vậy những số hạng va chạm nhỏ hơn rất nhiều so với số hạng lực điện từ trong phương trình (1.10) có thể bỏ qua số hạng va chạm. Nếu chúng ta giả thiết rằng thành phần của một khí đơn lẻ chỉ bao gồm các ion O^+ ($n = n_i = n_e$) và tương ứng với nhiệt độ ($T = T_e = T_i$). Hai phương trình (1.9) và (1.10) có thể được đơn giản hóa như sau:

$$m_i \bar{g} - \frac{k_B}{n} \bar{\nabla}(Tn) + e(\bar{E} + \bar{v}_i \times \bar{B}) - m_i v_{in} (\bar{v}_{in} - \bar{v}_n) = 0 \quad (1.11)$$

$$-\frac{k_B}{n} \bar{\nabla}(Tn) - e(\bar{E} + \bar{v}_e \times \bar{B}) = 0 \quad (1.12)$$

1.1.6.2. Sự trôi dạt $\bar{E} \wedge \bar{B}$

Từ các phương trình (1.11) và (1.12), hãy xem xét thành phần vuông góc với đường sức từ trường. Chúng ta đặt các điều kiện đặc trưng đối với lớp F: $|\bar{E}| = 10^{-3} V/m$,

$T = 1000K$, gradient mật độ điện tử (hay ion) $(\frac{\partial n}{\partial h}) \cdot \frac{1}{n} = (50km)^{-1}$, cùng với các hằng số

vật lý có giá trị như sau:

Điện tích nguyên tố	e	$1.6022 \times 10^{-19} C$
Hằng số Boltzmann	k_B	$1.3807 \times 10^{-23} J/độ$
Hằng số điện môi trong chân không	ϵ_0	$8.8542 \times 10^{-12} F/m$
Khối lượng đơn vị nguyên tử	m_a	$1.6605 \times 10^{-27} kg$
Khối lượng điện tử tĩnh	m_e	$9.1094 \times 10^{-31} kg$
Vận tốc ánh sáng trong chân không	C	$2.9979 \times 10^8 m/s$
Hằng số Planck	h	$6,62607015 \times 10^{-34} J/Hz$

Từ những giá trị giả thiết ở trên và các hằng số vật lý cho trong bảng chúng ta nhận thấy rằng $eE \gg m_i g$, $k_B \bar{\nabla}(Tn)/n$. Bỏ qua gió khí quyển trung hòa phương trình động lượng có thể được xấp xỉ bằng:

$$m_i v_{in} \bar{v}_i = e(\bar{E} + \bar{v}_i \times \bar{B}) \quad (1.13)$$

$$0 = e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) \quad (1.14)$$

Đặt $k_i = \Omega_i / v_{in}$, thành phần vuông góc với trường từ có thể được viết như sau:

$$\vec{v}_{i\perp} = \frac{k_i}{1+k_i^2} \frac{\vec{E}}{B} + \frac{k_i^2}{1+k_i^2} \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (1.15)$$

$$\vec{v}_{e\perp} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (1.16)$$

Ở độ cao lớp F số hạng $1/k_i$ và những số hạng bậc cao của nó có thể bỏ qua, khi đó chúng ta có:

$$\vec{v}_{i\perp} = \vec{v}_{e\perp} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (1.17)$$

Phương trình này chỉ ra rằng những sự trôi dạt plasma vuông góc với vectơ trường từ và vectơ trường điện. Chúng ta gán điều này như là sự trôi dạt $\vec{E} \times \vec{B}$ (hoặc $\vec{E} \wedge \vec{B}$)

1.1.6.3. Sự khuếch tán lưỡng cực

Xem xét các thành phần dọc theo đường sức từ trường được miêu tả trong các phương trình (1.11) và (1.12) trong phạm vi một ống ảo. Lực hấp dẫn tác động theo hướng đường sức từ trường, ngoại trừ trên xích đạo từ, do sự khác biệt về khối lượng của các điện tử và các ion, chúng có xu thế bị phân tách dưới tác dụng của lực hấp dẫn. Tác động phân tách này dẫn tới việc sinh ra một điện trường \vec{E} theo hướng đường sức từ trường. Do các điện tử có thể di chuyển dễ dàng theo hướng đó, chúng nhanh chóng làm trung hòa trường điện. Như vậy, vì cả ion và điện tử đều khuếch tán cùng nhau nên điều này được gọi là khuếch tán lưỡng cực.

Bỏ qua những số hạng trường điện, tổ hợp phương trình (1.11) và (1.12) chúng ta có [9,10,20].

$$-m_i g \sin I - \frac{2k_B}{n} \frac{\partial Tn}{\partial s} - m_i v_{in} (v_{\parallel} - v_n \cos I) = 0 \quad (1.18)$$

trong đó đạo hàm theo s được lấy dọc theo hướng đường sức trường từ, I độ từ khuynh,

$v_n = |\vec{v}_n|$, $g = |\vec{g}|$. Tốc độ gió trung hòa được giả thiết chỉ có thành phần nằm ngang.

1.1.7. Bất thường điện ly

Cho đến thời điểm này, chúng ta đã coi tầng điện ly như một vùng được hình thành bởi sự sinh, mất, và khuếch tán plasma, và đã đề cập đến những biến thiên có tính chất chu kỳ xảy ra trong đó. Tuy nhiên, những thay đổi trong cấu trúc tầng điện ly không phải lúc nào cũng xảy ra một cách có trật tự và có thể dự đoán được. Những bất

thường trên quy mô từ lớn hơn vài mét đến vài chục km cũng là những đặc điểm quan trọng của tầng điện ly. Sự bất ổn định trong tầng điện ly, phát triển dưới những điều kiện nhất định, dẫn đến sự hình thành các cấu trúc bất thường trong tầng điện ly. Khi xem xét cấu trúc tầng điện ly trên quy mô lớn, cho đến nay chúng ta đã bỏ qua các dòng điện cắt ngang đường sức trường từ, nhưng các dòng điện này đóng một vai trò quan trọng trong sự mất ổn định tầng điện ly. Những dao động mật độ điện tử cục bộ xuất hiện trong tầng điện ly tạo ra điện trường phân cực do dòng điện chạy vuông góc với đường sức trường từ. Khi trường điện phân cực tác động làm tăng dao động mật độ ban đầu, tầng điện ly sẽ chuyển sang trạng thái không ổn định. Kiểu bất ổn định tầng điện ly ban đêm được đề cập trong luận án liên quan đến hiện tượng bất ổn định Rayleigh-Taylor; các bất thường tầng điện ly liên quan đến bong bóng plasma và nhiễu loạn điện ly dịch chuyển quy mô trung bình (MSTID), cơ chế vật lý và lý thuyết hình thành của chúng sẽ được trình bày trong các phần sau.

1.1.7.1. Bong bóng plasma xích đạo

Bong bóng plasma xích đạo (Equatorial Plasma Bubble- EPB) là hiện tượng xuất hiện ở tầng điện ly xích đạo và vĩ độ thấp sau khi Mặt Trời lặn và ở vùng đáy lớp F thông qua cơ chế bất ổn định Rayleigh-Taylor [10,21]. EPB thường liên quan đến vùng có mật độ điện tử bị suy giảm và có quy mô cỡ từ vài m cho đến hàng trăm km, tồn tại ở khoảng vĩ độ $\pm 20^\circ$ ở 2 phía của xích đạo từ. Vào thời điểm sau hoàng hôn, hiện tượng trôi dạt về hướng Đông gia tăng trong thời gian ngắn. Sự gia tăng này được gọi là sự gia tăng sau hoàng hôn hoặc sự gia tăng trước khi đảo ngược (PRE: Pre-reversal Enhancement) của điện trường hướng Đông [22]. Trường điện gia tăng này làm cho lớp F ở khu vực xích đạo được nâng lên và tạo ra gradient ở đáy dẫn tới bất ổn định Rayleigh-Taylor (R-T). Sự nâng lên theo phương thẳng đứng của lớp plasma do trường điện hướng Đông giúp gia tăng gradient mật độ ở đáy. PRE và lý thuyết bất ổn định R-T là chìa khóa quan trọng cho sự hình thành các bất thường điện ly.

1.1.7.2. Lý thuyết tuyến tính bất ổn định Rayleigh-Taylor

Quá trình chính là nguyên nhân cho sự sinh ra các bất thường EPB là cơ chế bất ổn định Rayleigh-Taylor va chạm (CRT: Collisional Rayleigh-Taylor) [23]. Sau khi Mặt Trời lặn, không có sự ion hoá do bức xạ mặt trời, phần mặt phẳng phía trên lớp F tầng điện ly trải qua sự tái tổ hợp ion-điện tử một cách nhanh chóng và mật độ điện tử suy giảm dẫn đến sự giảm nhanh gradient mật độ thẳng đứng. Trạng thái này của lớp F

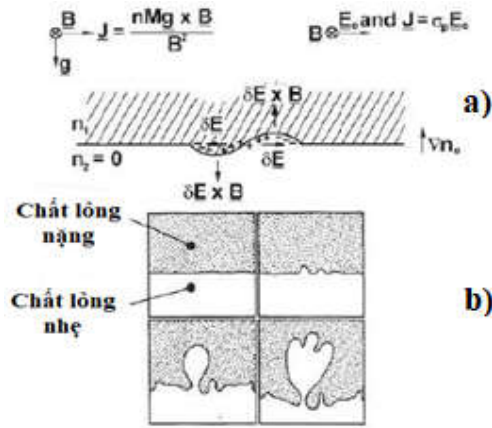
tầng điện ly giống với trường hợp chất lỏng mật độ nhẹ hơn nằm dưới chất lỏng mật độ lớn hơn chống lại sự tác động của trọng lực. Cơ chế CRT có thể được giải thích như sau: Coi sự nhiễu loạn của mật độ ion và điện tử (n') có dạng hình sin, trên nền giá trị trạng thái ổn định (n_0) lớp F theo phương vĩ hướng như đã mô tả ở hình 1.5. \vec{v}_{n_0} có hướng song song với lực hấp dẫn, trường từ \vec{B} đi vào mặt phẳng của tờ giấy. Dưới tác dụng của sự trôi dạt trọng lực, các nhiễu loạn về mật độ điện tử và ion di chuyển về hướng Tây và hướng Đông với vận tốc trôi dạt trọng lực tương ứng là g/Ω_i và g/Ω_e (Ω_i và Ω_e lần lượt là tần số hồi chuyển của ion và điện tử). Vì trôi dạt trọng lực tỉ lệ thuận với tần số hồi chuyển, nhiễu loạn về mật độ ion di chuyển nhanh hơn trạng thái nhiễu loạn về mật độ điện tử và dẫn đến sự phân tách điện tích. Do sự phân ly điện tích, các trường điện phân cực được tạo ra hướng về hướng Đông nơi có mật độ suy giảm và hướng về phía Tây nơi có mật độ tăng. Các trường điện phân cực làm cho vùng có mật độ suy giảm trôi dạt hướng lên phía trên và đưa vùng có mật độ gia tăng xuống dưới. Để duy trì sự phát triển của bất thường, quá trình này sẽ nhanh hơn thời gian tồn tại ảnh hưởng của các ion, $1/v_R$ (v_R là tốc độ tái tổ hợp), nếu không các ion sẽ bị mất do sự tái tổ hợp dẫn đến ức chế sự phát triển nhiễu loạn. Vùng suy giảm plasma được gọi là bong bóng tương tự với trường hợp thủy động lực học. Sự trôi dạt plasma lên trên chấm dứt ở các độ cao mà mật độ điện tử xung quanh trở nên ngang bằng với mật độ điện tử bên trong bong bóng. Điều này xác định độ cao cực đại của các bong bóng plasma xích đạo và quy mô theo độ cao của nó.

Tốc độ phát triển tuyến tính “ γ_g ” đối với bất ổn định trọng lực R-T đã được chỉ ra [24,25] là:

$$\gamma_g = \frac{1}{L} \frac{g}{v_{in}} \frac{k_x^2}{K} \quad (1.19)$$

trong đó v_{in} là tần số va chạm ion-hạt trung hòa, g là gia tốc trọng trường, L là chiều dài tỉ lệ gradient nghịch đảo, được cho bởi $L = \left[\frac{1}{n_0} \left(\frac{dn_0}{dz} \right) \right]^{-1}$. Thành phần vec-tơ sóng tổng K vĩ hướng, có biên độ biểu hiện bằng số sóng, được ký hiệu là k_x .

Tốc độ sinh được cho là cực đại khi nhiễu loạn dọc theo phương vĩ tuyến và trở nên độc lập với bước sóng đối với sóng truyền theo phương ngang [25] và do đó phương trình (1.19) trở thành:



Hình 1.5. a) Sơ đồ tương tự plasma của bất ổn định Rayleigh-Taylor trong hình học xích đạo. b) Bản phác thảo theo tuần tự từ các ảnh của tính bất ổn định R-T động học chất lỏng. Chất lỏng nhẹ hơn ban đầu đỡ dưới (nằm dưới) chất lỏng nặng [26].

$$\gamma_g = \frac{1}{L} \frac{g}{v_{in}} \quad (1.20)$$

Ngoài lực hấp dẫn, trường điện hướng Đông cũng góp phần làm tăng biên độ của nhiễu loạn mật độ. Do sự trôi dạt Hall $\left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{B^2}\right)$ plasma được nâng lên tới độ cao lớn hơn đến vùng có các tần số va chạm ion hạt trung hoà nhỏ hơn, do đó làm tăng tốc độ phát triển của bất ổn định R-T. Sự trôi dạt này không phụ thuộc vào khối lượng và điện tích của các hạt, tuy nhiên sự phân tách điện tích xuất hiện dọc theo hướng của trường điện do sự khác biệt về độ linh động độ dẫn điện Pederson $\left(\frac{1}{eB} \frac{v_{in}}{\Omega_a}\right)$. Ở đây v_{in} có thể hoặc là tần số va chạm giữa ion-hạt trung hoà, hoặc là tần số va chạm giữa điện tử- hạt trung hoà (v_{in}, v_{en}) tùy từng trường hợp. Do sự phân ly điện tích này, trường điện phân cực về phía Đông được thiết lập ở vùng trung mật độ, và hướng về phía Tây ở vùng đỉnh mật độ. Điều này dẫn đến những trôi dạt khác nhau theo chiều thẳng đứng, ảnh hưởng đến sự phát triển của biên độ nhiễu loạn. Tác động chính của trường điện E_x theo hướng Đông [10,25] trong việc thúc đẩy tốc độ tăng trưởng bất ổn định R-T được cho bởi:

$$\gamma_E = \frac{1}{L} \frac{E}{B} \quad (1.21)$$

Ngoài trường điện, các tham số trung hòa như gió vĩ hướng hướng Đông W_x cũng có thể dẫn đến bất ổn định khi gradient mật độ điện tử nền hướng về phía Tây. Tốc độ tăng trưởng được đưa ra bởi:

$$\gamma_{wx} = \frac{1}{L} W_x \left(\frac{v_{in}}{\Omega_i} \right) \quad (1.22)$$

Gió theo phương thẳng đứng (W_z), tồn tại trong tầng điện ly xích đạo mặc dù có biên độ nhỏ [27,28,29,30]. Do đó một biểu thức cho tốc độ tăng bất ổn định R-T tổng quát bao gồm tất cả các tham số được đề cập ở trên được đưa ra là [29]:

$$\gamma = \frac{1}{L} \left[\frac{g}{v_{in}} + \frac{E}{B} + W_x \left(\frac{v_{in}}{\Omega_i} \right) - W_z \right] \quad (1.23)$$

Biểu thức này quan tâm đến sự tăng trưởng tuyến tính của bất ổn định R-T, là cơ chế chính cho việc tạo ra EPB.

1.2. Tổng quan về hệ thống định vị toàn cầu GPS

Hệ thống định vị toàn cầu GPS được Chính phủ Mỹ phát triển ban đầu với mục đích phục vụ quân sự, sau năm 1980 Chính phủ Mỹ cho phép sử dụng trong dân sự. Do đó, các ứng dụng của GPS vào nhiều lĩnh vực khác nhau đã được nghiên cứu và phát triển rộng rãi trong hầu hết các nước [31,32,33]. Các vệ tinh GPS được theo dõi bởi một hệ thống trạm giám sát trên mặt đất. Nhờ hệ thống vệ tinh GPS, tại bất kỳ điểm nào trên Trái Đất vào bất kỳ thời gian nào cũng có thể quan sát được ít nhất 4 vệ tinh. Việc đo khoảng cách đồng thời tới 4 vệ tinh sẽ loại bỏ được ảnh hưởng của sự không đồng bộ về thời gian của đồng hồ vệ tinh và đồng hồ máy thu. Hệ thống định vị GPS gồm 3 bộ phận chính: bộ phận trên không gian, bộ phận điều khiển và bộ phận sử dụng.

1.2.1. Các bộ phận của hệ thống định vị GPS

1.2.1.1. Bộ phận không gian

Bộ phận không gian gồm các vệ tinh chuyển động ở độ cao cách mặt đất khoảng 20200 km trên 6 mặt phẳng quỹ đạo nghiêng với mặt phẳng xích đạo của Trái Đất một góc 55° . Các vệ tinh GPS có quỹ đạo gần tròn, tâm sai của quỹ đạo vệ tinh GPS có giá trị biểu kiến bằng 0. Hiện nay, chòm vệ tinh của hệ thống GPS có tổng cộng 32 vệ tinh, 4 vệ tinh cùng một quỹ đạo. Chu kỳ vòng quay quỹ đạo mỗi vệ tinh là khoảng 11 giờ 58 phút, gần như đúng một nửa ngày thiên văn. Do chu kỳ quỹ đạo là bội gần chính xác của chu kỳ quay của Trái Đất, nên các vệ tinh hoàn thành hai vòng quay quỹ đạo trong khi Trái Đất quay được một góc 360° so với không gian quán tính. Tất cả các vệ tinh GPS đều có thiết bị tạo dao động với tần số chuẩn cơ sở là $f_0=10,23$ MHz. Tần số này là tần số chuẩn của đồng hồ nguyên tử, với độ chính xác cỡ 10^{-12} . Từ

tần số cơ sở f_0 thiết bị sẽ tạo ra các tần số sóng tải: L1, L2 và L5. Việc giám sát và hiệu chỉnh tần số các đồng hồ vệ tinh là một trong các chức năng của bộ phận điều khiển. Ngoài hệ thống định vị toàn cầu GPS của Mỹ, trên thế giới còn có các hệ thống định vị khác như GLONASS của Nga, GALILEO của Liên minh châu Âu, IRNSS của Ấn Độ, QZSS của Nhật Bản, Bắc Đẩu của Trung Quốc.

1.2.1.2. Bộ phận điều khiển

Bộ phận điều khiển gồm 4 trạm điều khiển được đặt ở Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia và 1 trạm chủ được đặt ở Colorado Springs, Hoa Kỳ. Hệ thống các trạm điều khiển sử dụng anten mặt đất, đảm bảo cho các vệ tinh bay đúng quỹ đạo, thực hiện việc đồng bộ thời gian cho các đồng hồ nguyên tử, lịch thiên văn trên mỗi vệ tinh, cũng như cập nhật được "thời tiết vũ trụ". Các giả khoảng cách được đo đạc với độ phân giải thời gian là 1,3 giây và sử dụng các tài liệu điện ly và khí tượng, chúng được làm tròn để tạo nên số liệu với khoảng cách thời gian là 15 phút gửi tới trạm điều khiển chính.

1.2.1.3. Bộ phận sử dụng

Các máy thu GPS chính là bộ phận sử dụng trong hệ thống GPS. Ngày nay, các máy thu GPS được sử dụng rộng rãi trên khắp thế giới, các ăng-ten thu nhận thông tin từ các vệ tinh sẽ cung cấp cho người dùng vị trí, vận tốc di chuyển thời gian thực ... Một vài ứng dụng nổi bật của GPS:

- Dẫn đường theo không gian ba chiều, sử dụng để làm hoa tiêu trong hàng không, đường thủy và cả vận tải đường bộ.

- Xác định vị trí chính xác, được sử dụng trong trắc địa, nghiên cứu chuyển động kiến tạo của vỏ Trái Đất.

- Việc truyền tín hiệu từ độ cao khoảng 20200 km từ vệ tinh đến máy thu đi qua các tầng khí quyển khác nhau, gây nên sự trễ tín hiệu thu được, từ đặc điểm này người ta có thể có các nghiên cứu sự thay đổi hơi nước trong tầng đối lưu, hàm lượng độ điện tử tổng cộng tầng điện ly..., những thông tin rất hữu ích trong nghiên cứu khí tượng, truyền thông,...

1.2.2. Cấu trúc tín hiệu GPS

Mỗi vệ tinh GPS là một máy dao động chất lượng cao, nó là một tập hợp các đồng hồ nguyên tử Cesi và Rubidium, được dùng để phát ra kế tiếp nhau hai sóng mang liên kết L1 và L2. Hai tần số mang này được rút ra từ tần số cơ bản $f_0 = 10,23$

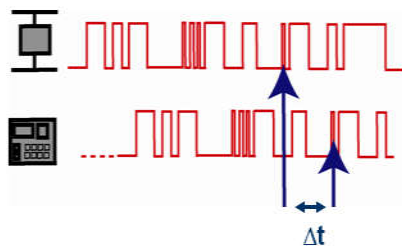
MHz: $f_1 = 154f_0 = 1575,42$ MHz, $f_2 = 120f_0 = 1227,60$ MHz, tương ứng với 2 bước sóng $\lambda_1 = c/f_1 = 190$ mm, $\lambda_2 = c/f_2 = 244$ mm. Trong đó, $c=299792458$ m/s là vận tốc ánh sáng trong chân không.

Từ năm 2008, các vệ tinh khối II-F có thêm sóng tải L5, có tần số $f_5=115.f_0=1176,45$ MHz và bước sóng $\lambda_5=25,5$ cm. Các sóng tải L1, L2 và L5 thuộc dải sóng cực ngắn. Với tần số lớn như vậy các tín hiệu sẽ ít bị ảnh hưởng của tầng điện ly và tầng đối lưu vì mức độ làm chậm tín hiệu do tầng điện ly tỷ lệ nghịch với bình phương của tần số sóng tải. Các phép đo GPS sử dụng sóng tải L1 và L2 được sử dụng trong luận án để nghiên cứu tầng điện ly.

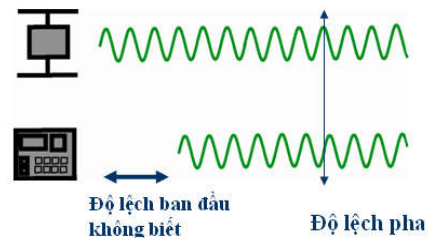
Các giả khoảng cách được suy ra từ thời gian truyền tín hiệu đo được từ mỗi vệ tinh tới máy thu dùng hai mã nhiễu giả ngẫu nhiên được điều biến trên hai sóng mang cơ bản trên:

+ Mã thứ nhất là mã C/A có thể dùng cho mục đích dân sự. Mã C/A, được chỉ định như phục vụ định vị chuẩn, có bước sóng hiệu dụng xấp xỉ 300 m. Mã C/A hiện nay được điều biến chỉ ở L1 và được loại bỏ một cách có chủ ý khỏi L2. Sự loại bỏ này cho phép kiểm tra quảng bá thông tin bởi vệ tinh và như vậy ngăn chặn không cho những người sử dụng phi quân sự có thể đạt được độ chính xác đầy đủ của hệ thống.

+ Mã thứ hai là mã P (mã chính xác) dành riêng cho quân đội Mỹ và những người sử dụng được phép khác. Mã P, được chỉ định như phục vụ định vị chính xác, có bước sóng hiệu dụng là 30 m. Mã P được điều biến trên cả 2 sóng mang L1 và L2. Sử dụng không hạn chế mã P được cho phép chỉ khi hệ thống được tuyên bố hoạt động một cách đầy đủ.



Hình 1.6. Thời gian truyền tín hiệu



Hình 1.7. Phép đo pha trong nghiên cứu GPS.

giữa vệ tinh và máy thu.

Trong nghiên cứu GPS, phép đo giả khoảng cách rất được quan tâm, nếu sử dụng mã C/A (giả tần số 1 MHz) độ chính xác khoảng 30 m, còn nếu sử dụng mã P (giả tần số 10 MHz) độ chính xác tới 10 m. Điều này dễ đạt được vì thời gian các xung có độ rộng trùng nhau 1 tuần mới xảy ra 1 lần (chu kỳ 1 tuần). Lưu ý, độ rộng xung

càng nhỏ cho độ chính xác càng cao (hình 1.6). Với phép đo pha, độ chính xác có thể đạt tới 20 mm trên cả L1 và L2, nhưng có một khó khăn gặp phải là không biết được độ lệch pha ban đầu (hình 1.7).

1.2.3. Các đại lượng quan sát của GPS

Các kiểu quan sát của các máy thu GPS tùy thuộc vào khả năng kỹ thuật của các loại máy thu khác nhau. Các máy thu tần số đơn chỉ có thể thu được trên tần số L1, trong khi đó có những máy thu có thể thu được cả hai tần số L1 và L2. Các đại lượng quan sát GPS là các khoảng cách được tính từ thời gian đo được hoặc các hiệu pha dựa vào so sánh giữa các tín hiệu thu được và các tín hiệu máy thu phát ra. Không như các đo đạc khoảng cách điện từ trên mặt đất, GPS dùng “khái niệm một chiều” trong đó hai đồng hồ được dùng, cụ thể là một đồng hồ trên vệ tinh và một đồng hồ khác ở máy thu. Như vậy các khoảng cách bị sai lệch bởi sai số đồng hồ vệ tinh và máy thu được gọi là giả khoảng cách. Trong bất kỳ trường hợp nào các quan sát GPS đều thu được ba thông tin được gọi là: giả khoảng cách, pha mang và các phép đo Doppler.

1.2.3.1. Giả khoảng cách

Phép đo giả khoảng cách là đo thời gian (được đổi ra đơn vị khoảng cách là mét) tín hiệu từ ăng-ten phát đến ăng-ten thu. Giá trị này không phải là khoảng cách thực từ vệ tinh đến máy thu mà nó bị sai lệch do nhiều nguyên nhân nên nó được gọi là giả khoảng cách. Quan sát này được biểu diễn bởi phương trình:

$$P_i^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta \rho_{i,ion}^k + c(b^k + b_i) + \varepsilon \quad (1.24)$$

trong đó, ρ_i^k là khoảng cách thực từ vệ tinh thứ k đến máy thu thứ i; $\Delta t_i, \Delta t^k$ là các độ lệch của đồng hồ máy thu và đồng hồ vệ tinh so với thời gian của hệ thống GPS; $\Delta \rho_{i,trop}^k$ là độ trễ của tín hiệu do tầng đối lưu; $\Delta \rho_{i,ion}^k$ là độ trễ của tín hiệu do tầng điện ly; b^k, b_i là các độ trễ do phân cứng của vệ tinh và của máy thu; c là vận tốc ánh sáng trong chân không; ε là sai số ngẫu nhiên (bao gồm cả sai số do hiệu ứng đa đường).

1.2.3.2. Quan sát pha mang (Carrier phase)

Quan sát pha mang là phép đo pha của tín hiệu từ vệ tinh đến máy thu, phương trình biểu diễn là:

$$L_i^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta \rho_{i,trop}^k - \Delta \rho_{i,ion}^k + \lambda B_i^k + \varepsilon \quad (1.25)$$

trong đó, L_i^k là quan sát pha mang, được biểu thị bằng đơn vị độ dài; ρ_i^k là khoảng cách thực từ vệ tinh thứ k đến máy thu thứ i; λ là bước sóng, c là vận tốc ánh sáng

trong chân không; B_i^k là ký hiệu độ lệch không đổi, được biểu thị bằng vòng quay, về nguyên tắc chứa sự mù mờ pha mang ban đầu N_i^k , λB_i^k là số hạng độ lệch. Nói một cách chặt chẽ, λB_i^k chứa $\lambda(N_i^k + \delta N_i^k) + c(b^k + b_i)$, trong đó, N_i^k là số nguyên và δN_i^k ký hiệu ảnh hưởng gây bởi “pha kết thúc”. Tuy nhiên người ta không thể tách N_i^k khỏi b^k và b_i và vì vậy phải thay thế bằng λB_i^k , trong đó B_i^k bây giờ là một số thực. Trong trường hợp tổng quát, một tham số độ lệch chưa biết B_i^k phải được xác định cho mỗi lần vệ tinh đi qua, cho mỗi máy thu và mỗi tần số. So sánh các phương trình (1.24) và (1.25), người ta thấy rằng độ trễ nhóm và sự sớm pha gây bởi sự khúc xạ điện ly $\Delta\rho_{i,ion}^k$ có độ lớn bằng nhau nhưng ngược dấu.

Trong các phần sau của luận án NCS chỉ quan tâm đến độ trễ do tầng điện ly gây ra và sử dụng tính chất này để tính TEC tầng điện ly từ phương pháp tổ hợp trị đo pha và trị đo giả khoảng cách. Lưu ý rằng tầng điện ly cũng là nguồn gây sai số lớn nhất trong phép định vị sử dụng hệ thống vệ tinh.

1.2.4. Ảnh hưởng của tầng điện ly tới việc truyền tín hiệu GPS

Tín hiệu điện từ truyền từ các vệ tinh GPS đến các máy thu đặt trên mặt đất bị khúc xạ bởi tầng điện ly và tầng khí quyển. Sự khúc xạ bao hàm cả sự làm cong đường tia và sự trễ quá trình truyền. Tầng điện ly là môi trường tán xạ sóng điện từ gây nên sự sớm pha và sự trễ nhóm đối với tín hiệu truyền từ các vệ tinh GPS đến các máy thu.

Vì tầng điện ly là một môi trường tán xạ đối với tín hiệu GPS. Theo Seeber (1993) [34] chỉ số khúc xạ pha n_{ph} được xấp xỉ bằng chuỗi:

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^2} + \frac{c_4}{f^2} + \dots \quad (1.26)$$

Các hệ số c_2, c_3, c_4, \dots không phụ thuộc vào tần số nhưng phụ thuộc vào mật độ điện tử N_e dọc theo đường truyền tín hiệu. Chuỗi xấp xỉ trên chỉ lấy đến bậc 2 ta có:

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (1.27)$$

Vi phân cả hai vế phương trình trên ta được:

$$dn_{ph} = -\frac{2c_2}{f^3} df \quad (1.28)$$

Chỉ số khúc xạ nhóm n_{gr} được tính theo công thức:

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df} \quad (1.29)$$

Thay (1.27) và (1.28) vào (1.29) ta có:

$$n_{gr} = 1 + \frac{c_2}{f^2} - f \frac{2c_2}{f^3} \quad (1.30)$$

$$n_{gr} = 1 - \frac{c_2}{f_2} \quad (1.31)$$

Từ (1.27) và (1.31) có thể thấy hệ số khúc xạ nhóm và hệ số khúc xạ pha lệch so với đơn vị với các dấu ngược nhau. Seeber (1993) [34] đã đưa ra một đánh giá đối với $c_2 = -40,3N_e(Hz^2)$. Một hệ quả khác nhau của vận tốc là xảy ra một sự trễ nhóm và sự sớm pha. Nói cách khác, các đo đặc mã GPS bị trễ và các pha mang bị sớm. Vì vậy, các giả khoảng cách mã được đo quá dài, còn các giả khoảng cách pha mang được đo quá ngắn so với khoảng cách thực giữa vệ tinh và máy thu. Lượng chênh lệch là như nhau trong cả 2 trường hợp. Theo nguyên lý Ferma, khoảng cách đo được s được xác định bởi:

$$s = \int nds \quad (1.32)$$

trong đó tích phân phải được lấy dọc theo đường truyền tín hiệu. Khoảng cách hình học s_0 dọc theo đường đi của tia sáng giữa vệ tinh và máy thu có thể thu được một cách tương tự bằng cách đặt $n=1$:

$$s_0 = \int ds_0 \quad (1.33)$$

Hiệu số Δ^{iono} giữa khoảng cách đo đặc và khoảng cách thực được gọi là khúc xạ điện ly hay còn gọi là độ trễ nhóm và độ trễ pha và được tính bởi:

$$\Delta^{iono} = \int nds - \int ds_0 \quad (1.34)$$

Thay (1.27) vào (1.34) ta có:

$$\Delta_{ph}^{iono} = \int \left(1 + \frac{c_2}{f^2}\right) ds - \int ds_0 \quad (1.35)$$

Thay (1.31) vào (1.34) ta có:

$$\Delta_{gr}^{iono} = \int \left(1 - \frac{c_2}{f^2}\right) ds - \int ds_0 \quad (1.36)$$

Ta thu được công thức khi lấy tích phân đối với số hạng đầu tiên trong (1.35) và (1.36) dọc theo đường hình học. Trong trường hợp này, ds trở thành ds_0 và thu được các công thức:

$$\Delta_{ph}^{iono} = \int \frac{c_2}{f^2} ds_0 \text{ và } \Delta_{gr}^{iono} = - \int \frac{c_2}{f^2} ds_0 \quad (1.37)$$

Chúng có thể được viết lại như sau:

$$\Delta_{ph}^{iono} = - \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds_0, \quad \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40,3}{f^2} \int N_e ds_0 \quad (1.38)$$

Đại lượng $\int N_e ds_0$ là TEC, hàm lượng điện tử tổng cộng dọc theo đường truyền tín hiệu từ vệ tinh đến máy thu, được thừa nhận bao hàm các điện tử trong một cột với tiết diện ngang m^2 và trải dài từ máy thu tới vệ tinh. Thay vào phương trình (1.38) ta có:

$$\Delta_{ph}^{iono} = -\frac{40,3}{f^2} TEC, \quad \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (1.39)$$

Δ_{ph}^{iono} và Δ_{gr}^{iono} ở trên có thứ nguyên độ dài. Thông thường TEC được cho bằng đơn vị TECU, trong đó: $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$. Ví dụ, với $TEC = 1 \text{ TECU}$ thì độ trễ mã C/A $\Delta_{gr}^{iono} = 0,16 \text{ m}$.

Giá trị TEC ở các phương trình trên chỉ đúng với các vệ tinh ở thiên đỉnh. Đối với đường truyền tín hiệu tùy ý góc thiên đỉnh của vệ tinh phải được xem xét tới. Hàm lượng điện tử tổng cộng thẳng đứng được mô hình hóa theo mô hình lớp đơn [35]. Giả thiết rằng tất cả các điện tử tập trung trong một lớp cầu mỏng vô hạn ở độ cao h_{ion} và chứa điểm cắt tầng điện ly IPP. Từ hình 1.8 ta có:

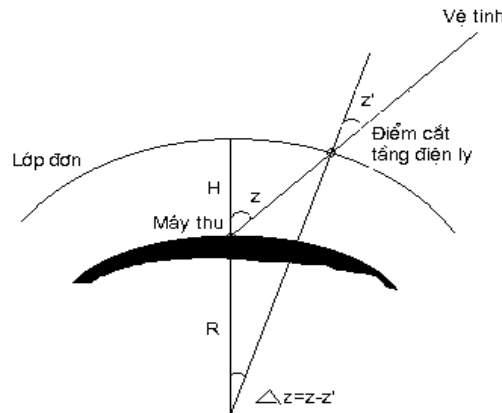
$$\sin z' = \frac{R_E}{R_E + h_{ion}} \sin z_0 \quad (1.40)$$

trong đó R_E là bán kính trung bình của Trái Đất, h_{ion} là giá trị trung bình đối với độ cao của tầng điện ly, z' và z_0 là các góc thiên đỉnh ở điểm cắt tầng điện ly và ở điểm quan sát. Góc thiên đỉnh z_0 có thể được tính đối với một vị trí vệ tinh đã biết và tọa độ xấp xỉ của vị trí quan sát. Người ta thường lấy h_{ion} trong khoảng 300-400 km. Do đó ta có.

$$\Delta_{ph}^{iono} = -\frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC, \quad \Delta_{gr}^{iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (1.41)$$

Hai đại lượng trên chỉ khác nhau về dấu nên đưa vào kí hiệu, phương trình (1.41) trở thành:

$$\Delta^{ion} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (1.42)$$



Hình 1.8. Mô hình lớp đơn điện ly [35]

Từ phương trình (1.42) cho ta thấy mối liên hệ giữa độ trễ của tín hiệu do tầng điện ly gây ra và hàm lượng điện tử tổng cộng thẳng đứng (VTEC). Dựa trên mối liên hệ này mà tham số VTEC của tầng điện ly được xác định tốt bằng phương pháp tổ hợp trị đo pha và trị đo giả khoảng cách để phục vụ cho việc nghiên cứu các đặc trưng của tầng điện ly. Phương pháp tính toán TEC sẽ được trình bày chi tiết trong chương 2.

1.3. Tổng quan tình hình nghiên cứu điện ly vùng vĩ độ thấp sử dụng công nghệ GPS

1.3.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

1.3.1.1. Dị thường ion hóa xích đạo

Vì Mặt Trời chiếu sáng nhiều nhất ở khu vực xích đạo, mật độ tầng điện ly được dự kiến sẽ thay đổi từ mức tối đa ở xích đạo đến mức tối thiểu ở vĩ độ cao. Nhưng đo sự thay đổi mật độ, nhận thấy có một cấu trúc lớn bất ngờ với một lõm xung quanh xích đạo từ, các đỉnh gần $\pm 15-20^\circ$ vĩ độ từ và tỷ số giữa mật độ điện tử cực đại (N_{max}) vào ban ngày ở vùng đỉnh và ở vùng đáy khoảng 1.6. Cấu trúc lớn này được gọi là dị thường ion hóa xích đạo [1,2] phát triển từ buổi sáng vào khoảng 10:00 LT, tiếp tục tồn tại tới sau hoàng hôn và bao phủ khoảng một nửa diện tích toàn cầu trong 24 giờ; vị trí của các đỉnh và tỷ lệ giữa đỉnh với vùng lõm thay đổi theo các điều kiện địa vật lý khác nhau.

Sau khi được phát hiện, một số lý thuyết như: lý thuyết khuếch tán [36], lý thuyết trôi dạt điện động lực học [37] được đề xuất để giải thích EIA. Vào thời gian ban ngày, sự trôi dạt $\vec{E} \wedge \vec{B}$ xung quanh xích đạo từ là hướng lên trên do trường điện hướng về phía Đông (nhưng lại hướng về phía Tây vào thời gian ban đêm). Plasma được nâng lên vào thời gian ban ngày và sau đó khuếch tán ra xa xích đạo từ dọc theo đường sức trường từ do lực hấp dẫn của Trái Đất và gradient áp suất. Moffett & Hanson (1965) [38] đã thành công trong việc giải thích các hiện tượng quan sát được bằng sự kết hợp giữa các lý thuyết trôi dạt và khuếch tán tạo ra hiệu ứng vòi phun xích đạo (EPF: Equatorial Plasma Fountain). Hanson & Moffett (1966) [49] đã đưa ra những hình ảnh đầu tiên về EPF và EIA ở bán cầu Bắc từ các tính toán mô hình trạng thái ổn định sử dụng vận tốc trôi dạt $\vec{E} \wedge \vec{B}$ giả định (vận tốc trôi dạt chưa được đo). Anderson (1973) [40] đã chỉ ra sự điều biến bởi gió trung hòa của EIA.

Mô hình tầng điện ly-quyển plasma của Đại học Sheffield (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model: SUPIM) [41] kết hợp các giá trị vận tốc

trôi đạt $\vec{E} \wedge \vec{B}$ đo được [42] và tốc độ gió trung hòa (từ mô hình gió ngang: HWM, Horizontal Wind Model) [43] cho thấy những hình ảnh chi tiết của vòi phun plasma khi có và không có gió trung hòa và ảnh hưởng của chúng trong việc sinh ra và điều biến EIA [44,45]. SUPIM cũng chỉ ra sự gia tăng mạnh mẽ của hiệu ứng vòi phun trong quá trình gia tăng của trôi đạt $\vec{E} \wedge \vec{B}$ hướng lên trên trước khi đảo chiều và vòi phun plasma đảo ngược trong quá trình trôi đạt hướng xuống dưới sau đó. Các bài báo đánh giá tổng quan về EIA đã được trình bày bởi Rajaram (1977) [46], Moffett (1979) [47], Stening (1992) [48] và Balan et al. (2018) [49].

Một số công trình nghiên cứu sự biến đổi hình thái của EIA và chỉ ra rằng cường độ và vị trí vĩ độ của đỉnh EIA phụ thuộc vào thời gian địa phương, mùa và chu kỳ hoạt động mặt trời [50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]. Sử dụng phương pháp Doppler vi phân từ các quan sát Hệ thống Vệ tinh dẫn đường Hải quân (NNSS, Navy Navigation Satellite System) ở khu vực châu Á, Huang et al. (1989) [50] nhận thấy đỉnh EIA hình thành vào buổi sáng, di chuyển từ vĩ độ thấp tới vĩ độ cao khi nó phát triển, giá trị đỉnh lớn nhất vào khoảng 14:00 LT. Huang & Cheng (1996) [51] đã nghiên cứu sự biến thiên của EIA theo chu kỳ mặt trời bằng số liệu TEC thu được từ trạm Lumpung-Đài Loan (25.00°N, 12.17°E). Kết quả nghiên cứu cho thấy mối tương quan rõ ràng giữa TEC và hoạt tính mặt trời: vào thời kỳ hoạt tính mặt trời yếu, biên độ TEC nhỏ, vào thời kỳ hoạt tính mặt trời cực đại biên độ TEC tăng rõ rệt. Các tác giả nhận thấy rằng đỉnh vào mùa đông xuất hiện sớm và lớn hơn đỉnh vào mùa hè, đỉnh mùa hè xuất hiện ở vĩ độ thấp hơn so với các mùa khác. Họ đã gán những hiệu ứng mùa này với gió kinh tuyến vào ban ngày. Biến thiên hàng ngày của EIA được cho rằng do gió thổi qua xích đạo ở nhiệt quyền gây ra sóng chu kỳ 2 ngày có thể tạo ra sự vận chuyển plasma lớp F theo vĩ độ [60].

Sử dụng các phép đo TEC bằng vệ tinh ATS-6 phase II, Rastogi & Klobuchar (1990) [61] đã chỉ ra một sự biến thiên hàng ngày lớn ở vị trí đỉnh EIA ở khu vực Ấn Độ và sự phụ thuộc của nó vào dòng điện xích đạo. Ở khu vực Ấn Độ đỉnh EIA được tìm thấy xuất hiện vào khoảng 15°-25°N vĩ độ địa lý, biến thiên TEC hàng ngày tại đỉnh EIA đạt cực đại vào 13:00 LT và 16:00 LT và cực tiểu trong khoảng 05:00-06:00 LT [56].

Dựa trên hàm lượng tổng cộng tầng điện ly thu được từ các phép đo GPS, Wu et al. (2008) [55] và Kumar et al. (2014) [59] đã chỉ ra rằng cường độ (TEC) của các đỉnh

EIA cực đại vào thời kỳ phân điểm và cực tiểu vào mùa hè cho thấy biến thiên nửa năm của chúng. Kumar & Singh (2009) [58] đã nghiên cứu biến thiên EIA tại Varanasi, Ấn Độ trong thời gian Mặt Trời hoạt động yếu từ tháng 5 năm 2007 tới tháng 4 năm 2008 và nhận thấy rằng có sự tương quan cao với chỉ số K_p . Kumar et al. (2014) [59] sử dụng số liệu GPS tại hai trạm gần khu vực dị thường ion hóa xích đạo Ấn Độ, trạm Varanasi (vĩ độ địa lý $25^{\circ}16'N$, kinh tuyến $82^{\circ}59'E$, vĩ độ từ $16^{\circ}08'N$), và Kanpur (vĩ độ địa lý $26^{\circ}18'N$, kinh độ $80^{\circ}12'E$, vĩ độ từ $17^{\circ}18'N$). Đặc biệt, họ đã nghiên cứu sự biến thiên hàng tháng, mùa và hàng năm cũng như ảnh hưởng của hoạt tính mặt trời và hoạt tính từ lên EIA trong pha đi xuống 2005-2009, kết quả nghiên cứu chỉ ra đỉnh EIA đạt cực đại vào thời kỳ phân điểm và đạt cực tiểu vào mùa hè. Các kết quả cũng chỉ ra dị thường mùa đông hay dị thường mùa trong giai đoạn 2005-2009 ngoại trừ năm Mặt Trời hoạt động cực yếu 2007-2008.

Các đỉnh Bắc và Nam EIA có chung một tác nhân kiểm soát (trường điện vĩ hướng xích đạo) vì thế chúng thường thể hiện hành vi tương tự nhau và có mối tương quan cao [52,62]. Sử dụng TEC được đo bởi hai trạm quan sát GPS (YMSM: $22.51^{\circ}N$, $121.61^{\circ}E$, DGAR: $7.31^{\circ}S$, $72.41^{\circ}E$), Tsai et al. (2001) [52] đã tìm ra các giá trị TEC ở cả 2 đỉnh Bắc và Nam EIA đạt cực đại vào các tháng xuân phân và thu phân, thời gian xuất hiện các đỉnh EIA thường sớm hơn vào mùa đông và muộn hơn vào mùa hè, vị trí đỉnh EIA dịch chuyển về phía xích đạo vào mùa đông và dịch chuyển về phía cực vào những tháng mùa hè và phân điểm. TEC được quan sát bởi một mạng lưới các máy thu GPS ở khu vực Tây Thái Bình Dương, Lin et al. (2001) [62] đã cho biết TEC cực đại có mối tương quan cao giữa bán cầu Bắc và bán cầu Nam. Trong khi đó, bên cạnh trường điện vĩ hướng xích đạo, các nhân tố khác như: gió trung hòa, các thành phần trung hòa (hợp phần trung hòa), quá trình quang ion hóa và cấu hình trường địa từ (độ từ thiên, độ từ khuynh và sự dịch chuyển của xích đạo địa từ) cũng ảnh hưởng tới các biến thiên EIA và làm cho các đỉnh EIA Bắc và Nam thể hiện sự bất đối xứng bán cầu [63,64,65,66,67,68,69,70,71]. Với mạng lưới GPS quan sát ở cả 2 bán cầu ở các kinh tuyến $70-150^{\circ}E$ để nghiên cứu khí hậu học EIA từ 1996-2004, Zhao et al. (2009) [66] đã phát hiện ra rằng vĩ độ của đỉnh Bắc EIA được mở rộng trong thời gian xuân phân cho thấy biến thiên nửa năm yếu trong khi đỉnh Nam cũng bị giảm trong giai đoạn từ tháng 6 đến tháng 8 cho thấy sự biến thiên mạnh theo mùa. Từ mạng lưới các trạm GPS ở khu vực kinh tuyến $110^{\circ}E$ trong giai đoạn 2000-2011, Huang et al. (2013) [67]

đã cho biết trong thời gian hoạt tính mặt trời thấp, đỉnh Bắc EIA di chuyển về phía xích đạo vào mùa đông và đỉnh Nam di chuyển về phía xích đạo vào mùa hè và hướng về phía cực vào mùa đông, trong thời gian hoạt tính mặt trời cao, đỉnh phía Nam di chuyển một chút về phía xích đạo vào mùa hè. Sử dụng các quan sát FORMOSAT-3/COSMIC trong giai đoạn 2007-2012, Luan et al. (2015) [68] đã chỉ ra rằng sự bất đối xứng bán cầu của EIA phụ thuộc vào thời gian địa phương, theo mùa và hoạt tính mặt trời. Huang et al. (2018) [72] đã tìm thấy thời gian chuyển tiếp của bất đối xứng bán cầu của EIA biến đổi ở những kinh tuyến khác nhau phụ thuộc vào cấu hình trường từ, và cho rằng hoạt tính mặt trời có ảnh hưởng rõ rệt đến sự thay đổi theo độ cao và kinh tuyến của thời gian chuyển tiếp.

Các tác động của trường điện vĩ hướng xích đạo, gió trung hòa và quá trình quang ion hóa lên các hoạt động EIA bị thay đổi cùng với sự dịch chuyển của xích đạo từ, độ từ khuynh và sự điều biến sóng theo chiều thẳng đứng từ khí quyển bên dưới, chẳng hạn như chế độ triều không di chuyển DE3 (Zonal Wave Number 3) [73,74], vì vậy các đỉnh EIA cũng thể hiện sự phụ thuộc vào kinh tuyến [63,64,75,76]. Bản đồ TEC với độ phân giải theo không gian và thời gian (1° kinh độ \times 1° vĩ độ \times 5 phút) từ 2000-2011, Liu et al. (2020) [76] đã nghiên cứu trạng thái của đỉnh Bắc EIA ở các khu vực Đông Á và châu Mỹ, kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng biến thiên mùa của vị trí EIA ở hai khu vực này là rất khác nhau, ở khu vực châu Mỹ là rõ ràng hơn so với khu vực châu Á. Họ cho rằng sự chênh lệch biến thiên theo mùa ở 2 khu vực này là do sự biến đổi của gió nhiệt quyển thổi qua xích đạo liên quan đến sự khác biệt về vị trí tương đối của xích đạo từ và xích đạo địa lý ở hai khu vực.

Ngoài các đặc trưng biến thiên theo mùa, biến thiên theo hoạt tính mặt trời, sự biến đổi theo kinh tuyến đã nêu ở trên, biến đổi chu kỳ gần 2 năm cũng được nhiều tác giả quan tâm. Thuật ngữ dao động tựa hai năm (QBO: Quasi-Biennial Oscillation) lần đầu tiên được đưa ra bởi Reed et al. (1961) [77] và Ebdon & Veryard (1961) [78], các tác giả đã nhận thấy rằng các gió tầng bình lưu vùng xích đạo theo phương vĩ tuyến luân chuyển giữa hướng Tây và hướng Đông liên tục với khoảng thời gian trung bình khoảng 26-28 tháng. Có bằng chứng rõ ràng cho thấy QBO ảnh hưởng đến nhiệt độ và sự lưu thông trong những vùng ngoại nhiệt đới và vùng cực, và giải thích cho sự ấm lên đột ngột tầng bình lưu [79,80,81,82]. Baldwin et al. (2001) [83] đã có một sự đánh giá tổng quan về QBO. Labitzke & van Loon (1988) [80] đã phát hiện ra rằng khi các

số liệu nhiệt độ và chiều cao địa thế năng tầng bình lưu vùng cực được phân theo pha của QBO trong tầng bình lưu xích đạo thì các số liệu này có tương quan với hoạt tính mặt trời: khi QBO ở pha hướng Tây, tài liệu cực có tương quan dương với hoạt tính mặt trời, trong khi đó các tài liệu này ở vùng vĩ độ trung bình và vĩ độ thấp tương quan này là âm; ngược lại đối với pha QBO hướng Đông. Sau đó, các nghiên cứu tương tự về QBO đã được mở rộng đến các khu vực vĩ độ khác và đối với các tham số khác. Chen (1992) [84] cung cấp bằng chứng phản ứng của tầng điện ly với QBO khí quyển, và đề xuất rằng các biến thiên từ ngày này qua ngày khác của dị thường ion hóa xích đạo chủ yếu là kết quả từ các sóng hành tinh lan truyền hướng lên phía trên từ tầng khí quyển bên dưới. Cơ chế tác động của hiệu ứng dynamo gió trung hòa (hiệu ứng vòi phun) dường như là nguyên nhân chính gây ra QBO tầng điện ly, mặc dù sự tồn tại của một mối quan hệ với các hoạt tính mặt trời và địa từ không thể bị loại bỏ [84,85,86,87]. Apostolov (1985) [88], Chanin et al. (1989) [89] và Kane (2005) [90] đã đưa ra biến thiên QBO được xác định theo một vài tham số mặt trời và địa từ. Các nghiên cứu trước đây về QBO trong tầng điện ly đã được tiến hành bằng cách sử dụng dữ liệu đo được từ một vài trạm. Tang et al. (2014) [91] đã nghiên cứu các đặc trưng biến thiên QBO trong tầng điện ly trong giai đoạn 1999-2011 bằng các quan sát hàm lượng điện tử tổng cộng tầng điện ly trên phạm vi toàn cầu. Nghiên cứu chỉ ra rằng ở vùng xích đạo, dị thường ion hóa xích đạo có đặc trưng dao động với chu kỳ gần 2 năm (QBO), hệ số tương quan giữa QBO tầng điện ly với QBO tầng bình lưu bằng 0.704 trong giai đoạn 1999-2005. Do đó có thể cho phép chúng ta giả định rằng QBO tầng bình lưu có ảnh hưởng đến hiện tượng QBO tầng điện ly.

1.3.1.2. Bất thường điện ly

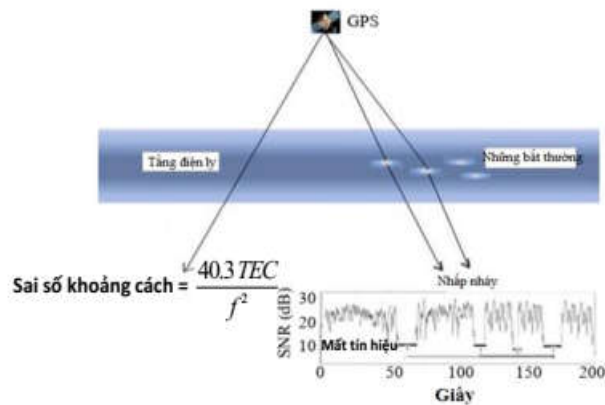
Bất thường trong tầng điện ly bao gồm các hiện tượng chẳng hạn như: bong bóng plasma, nhiễu loạn điện ly dịch chuyển, sporadic E, spread F. Những bất thường điện ly đã được nghiên cứu rộng rãi hơn 70 năm qua trên toàn thế giới nhằm tìm hiểu được đặc trưng phân bố và sự biến đổi của chúng và để giảm nhẹ ảnh hưởng xấu của nó đến liên lạc và định vị. Các bất thường plasma được sinh ra có các quy mô khác nhau từ vài cm đến hàng trăm km biểu hiện như Spread-F ở điện ly đồ [92], bong bóng plasma trong bản đồ radar [93] và hình ảnh quang học trên các ảnh chụp toàn cảnh bầu trời đêm [94]. Quan sát đầu tiên về cấu trúc mật độ plasma bất thường trong tầng điện ly được Booker & Wells (1938) [92] báo cáo là các vết điện ly đồ khuếch tán tại trạm

xích đạo Huancayo ở Peru, cái được gọi là spread-F xích đạo (ESF, Equatorial Spread F). Booker & Wells [92] đã giải thích một cách chính xác rằng, bản chất khuếch tán của các vết phản xạ được tạo ra bởi sự tán xạ sóng vô tuyến, từ các dao động mật độ điện tử. ESF sau đó được gọi với tên là bất thường lớp F vào ban đêm khu vực tầng điện ly xích đạo [95]. Sử dụng radar tán xạ rời rạc tại trạm xích đạo Jicamarca, Woodman & La Hoz (1976) [93] lần đầu tiên báo cáo sự suy giảm mật độ plasma trong vùng có ESF mạnh. Họ giải thích sự suy giảm là do các bất thường ở phía dưới tiến triển phi tuyến tính vào tầng điện ly ở phía trên trong khi hình thành các cấu trúc giống như bong bóng hoặc bong bóng plasma xích đạo (EPB, Equatorial Plasma Bubble). Lý thuyết định tính này của Woodman & La Hoz [93] đã sớm được hỗ trợ bởi các mô phỏng số có tính định lượng [96]. Nhiều bài báo về các khía cạnh khác nhau như: spread F, bong bóng plasma và các nhấp nháy trong điều kiện từ yên tĩnh và hoạt động đã được báo cáo bằng cách sử dụng các thiết bị như: thăm dò thẳng đứng tầng điện ly, radar, máy ảnh quang học, tên lửa và vệ tinh [97,98,99]. Đặc biệt, các quan sát vệ tinh đã cung cấp một bức tranh rõ ràng về khí hậu học của các bất thường [100,101,102].

Nhấp nháy sóng vô tuyến truyền qua bất thường tầng điện ly được xem là chủ đề chính trong nghiên cứu ảnh hưởng của thời tiết không gian lên hệ thống truyền thông, đặc biệt là các bất thường điện ly ở vùng xích đạo và vĩ độ thấp [3,103,104,105]. Basu et al. (2002) [106] đã phát biểu rằng dự báo nhấp nháy điện ly ở vùng xích đạo vẫn còn là một thách thức, tại những vùng này, các bất thường điện ly chủ yếu gây ra nhấp nháy biên độ trên tín hiệu vệ tinh. Sự xuất hiện các bất thường điện ly khu vực điện ly xích đạo và vĩ độ thấp ảnh hưởng đến chất lượng của các hệ thống liên lạc tần số cao và độ chính xác của hệ thống định vị toàn cầu GPS, vì các tín hiệu sóng vô tuyến dễ bị dao động về pha/hoặc biên độ khi chúng truyền qua các bất thường điện ly gây ra hiện tượng nhấp nháy điện ly [107]. Những bất thường quy mô nhỏ theo hàm lượng điện tử tổng cộng tầng điện ly, với sự phân bố trong không gian từ vài m đến vài km, có thể gây ra cả hiệu ứng nhiễu xạ và khúc xạ trên tín hiệu máy thu GPS. Sự khúc xạ làm thay đổi hướng và vận tốc truyền sóng điện từ, và sự nhiễu xạ làm gia tăng những dao động về cả pha và biên độ của tín hiệu. Sự di chuyển của các bất thường điện ly liên quan đến đường truyền tín hiệu, do hiệu ứng nhiễu xạ làm biến đổi các dao động không gian thành các dao động theo thời gian được quan sát như là

các nhấp nháy trên tín hiệu máy thu GPS [108]. Seo et al. (2011) [109] đã chỉ ra rằng một máy thu GPS có thể bị mất tín hiệu pha mang trong điều kiện suy giảm sâu do nhấp nháy điện ly mạnh gây ra, và trong trường hợp như vậy tín hiệu không được sử dụng để tính toán vị trí cho đến khi trạng thái được thiết lập lại. Các nhấp nháy điện ly mạnh thường tập trung ở nơi có gradient mật độ plasma cao đó là khu vực đỉnh dị thường ion hóa xích đạo [110,111]. *Hình 1.9* là một ví dụ về tín hiệu GPS bị nhấp nháy và mất dấu khi nó truyền qua các bất thường điện ly.

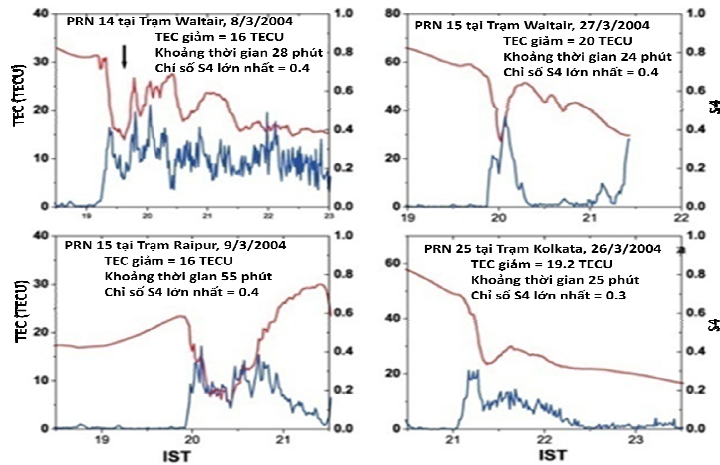
Hiện tượng ESF thường liên quan đến bong bóng plasma xích đạo (EPB, Equatorial Plasma Bubble), sự hiểu biết về các hiện tượng vật lý dẫn đến sự hình thành các bong bóng đã dần được thiết lập nhờ sự đóng góp của các tác giả: Tsunoda et al. (1982) [21], Haerendel (1973) [23], Sultan (1996) [112]. Aarons (1982) [113] được xem là các công trình tiên phong trong việc nghiên cứu hình thái học nhấp nháy điện ly trên toàn cầu bằng cách sử dụng các phép đo trên mặt đất.



Hình 1.9. Tín hiệu GPS bị nhấp nháy và mất dấu khi truyền qua các bất thường điện ly (Balan et al., 2018 [49]).

Những nghiên cứu sau này về các đặc trưng hình thái học của các bong bóng plasma [114,115] chỉ ra chúng kéo dài từ xích đạo từ tới hoặc vượt xa dị thường ion hóa xích đạo. Các bong bóng plasma được hình thành ở vùng đáy lớp F tại xích đạo từ vào thời điểm sau hoàng hôn thông qua cơ chế bất ổn định plasma Rayleigh-Taylor [56,116,117]. Tsunoda (1985) [118] đã chỉ ra rằng sự xuất hiện của các bong bóng plasma là cực đại khi hoàng hôn trong các lớp E liên kết là đồng thời. Basu et al. (1978) [119] đã chỉ ra được cấu trúc không gian của bất thường điện ly, trong khoảng thời gian từ thời điểm mặt trời lặn cho đến nửa đêm, các bất thường quy mô 3 m gây ra tán xạ rada ở 50 MHz tồn tại đồng thời với những bất thường quy mô vài km gây ra nhấp nháy tín hiệu trên dải L. Tác giả cũng chỉ ra rằng các nhấp nháy thường xuyên và

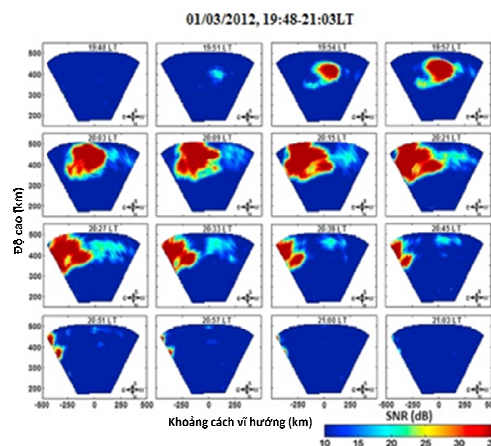
mạnh hơn liên quan đến bong bóng plasma trong khoảng thời gian mặt trời hoạt động cực đại và giảm mạnh cả về tần số và cường độ trong khoảng thời gian mặt trời hoạt động cực tiểu.



Hình 1.10. Hệ số S_4 (đường màu xanh) liên quan tới sự suy giảm TEC (đường màu đỏ) tại các trạm Waltair, Raipur và Kolkata của Ấn Độ (Rama Rao et al., 2006 [56]).

Một số công trình nghiên cứu đã chỉ ra rằng, bong bóng plasma là vùng có TEC suy giảm và trải rộng từ xích đạo từ lên tới vùng đỉnh EIA [56,105,120] (hình 1.10). Maruyama & Matuura (1984) [121], Burke et al. (2004) [100] đã phát biểu sự xuất hiện đáng kể của bong bóng plasma ở khu vực châu Á xích đạo trong thời kỳ phân điểm liên quan đến hoạt tính mặt trời từ thấp đến cao. Ngoài ra các tác giả cũng nghiên cứu sự phụ thuộc của bong bóng plasma vào hoạt tính từ. Burke et al. (2004) [100] đã chỉ ra sự xuất hiện bong bóng plasma là cao ở các khu vực châu Mỹ, Đại Tây Dương, châu Phi vào những thời kỳ phân điểm. Nghiên cứu cũng cho thấy vào thời kỳ hạ chí, bong bóng plasma xuất hiện ở vùng châu Phi trong khi đó chúng không xuất hiện ở vùng châu Mỹ và Đại Tây Dương; vào thời kỳ đông chí, các bong bóng plasma xuất hiện ở châu Mỹ và Đại Tây Dương trong khi đó không xuất hiện ở những khu vực khác. Valladare et al. (2004) [122] đã phát hiện ra các nhấp nháy đạt tới cực đại tại hầu hết những vĩ độ thấp hơn ranh giới của đỉnh EIA ở khu vực kinh tuyến Châu Mỹ. Sử dụng hệ thống GPS của dịch vụ IGS để nghiên cứu đặc trưng xuất hiện bong bóng plasma trên phạm vi toàn cầu, Nishioka et al. (2008) [123] nhận thấy sự xuất hiện bong bóng plasma phụ thuộc vào hoạt tính mặt trời là khác nhau ở các khu vực khác nhau, biến thiên tần suất xuất hiện hàng tháng bong bóng plasma có hai cực đại ở các khu vực châu Phi, châu Á, và Đại Tây Dương; ở khu vực châu Á hai cực đại xuất hiện vào thời kỳ phân điểm tháng 03-04 và tháng 09-10 và có tính bất đối xứng, cực đại

xuất hiện bong bóng vào tháng 3 lớn hơn vào tháng 9. Otsuka et al. (2009) [124] nhận thấy rằng các vết phản xạ của rada tán xạ ngược vào khoảng thời gian sau nửa đêm và lập luận rằng chúng liên quan tới các đặc trưng khác nhau của các bất thường. Do đó, nhiều câu hỏi liên quan đến các bất thường về tầng điện ly ở vĩ độ thấp vẫn chưa được giải quyết. Abadi et al. (2014) [125] đã kết luận, ở khu vực Đông Nam Á, bong bóng plasma xuất hiện nhiều vào thời kỳ phân điểm (tháng 03-04 và tháng 09-10). Do cường độ nhấp nháy biên độ tỉ lệ thuận với mật độ điện tử, cho nên các nhấp nháy mạnh xuất hiện ở EIA nơi có mật độ điện tử cao [126]. Bằng cách sử dụng radar EAR ở Indonesia, Ajith et al. (2015) [127] đã chỉ ra các EPB trôi dạt về phía Đông. *Hình 1.11* là một ví dụ mô tả sự phát triển của EPB quan sát được bằng rada ở Kotabang, Indonesia, bong bóng được hình thành vào lúc 19:51 LT tăng kích thước và trôi dạt về hướng Đông theo thời gian và biến mất vào khoảng 21:03 LT.



Hình 1.11. Trôi dạt bong bóng plasma về hướng Đông quan sát bằng Rada tại Kototabang, Indonesia (Ajith et al., 2015 [127]).

Ngoài hiện tượng bất thường điện ly liên quan tới bong bóng plasma còn có hiện tượng nhiễu loạn điện ly dịch chuyển (Traveling Ionospheric Disturbance- TID). Vào những ngày bão từ các nhiễu loạn điện ly dịch chuyển (TIDs) có thể xuất hiện vào ban đêm, đó là những nhiễu loạn plasma điện ly dưới dạng sóng [128,129]. Có hai loại TID có dao động gần như có tính chu kỳ [130]: TID quy mô lớn (Large Scale Traveling Ionospheric Disturbance, LSTID) có đặc trưng vận tốc cao (> 300 m/s) và chu kỳ dài (> 1 h) và TID quy mô trung bình (Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbance- MSTID) được đặc trưng bởi vận tốc thấp (50-300 m/s) và chu kỳ ngắn (10'-1h). LSTID xuất hiện như là một chuỗi sóng ngắn cùng với số chu kỳ nhỏ, trong khi đó MSTID có thể có một vài chu kỳ [131]. Ngoài các TID đã đề cập, còn có các

MSTID không có chu kỳ xuất hiện như là các dao động với các dao động mật độ điện tử chu kỳ khác nhau. MSTID xuất hiện ở lớp F tầng điện ly. LSTID rất hiếm khi xuất hiện, nó chỉ xuất hiện trong những trường hợp xảy ra những trận bão từ rất lớn. LSTID được cho là có nguồn gốc ở vùng cực [130,132]. Munro (1958) [133], Davies & Jones (1971) [134] đưa ra những kết quả nghiên cứu về MSTID những cơ chế nguồn của chúng là những vùng vĩ độ thấp hơn. Nhiều nghiên cứu về TID dựa trên những quan sát về hàm lượng điện tử tổng cộng tầng điện ly từ mạng lưới GPS dày đặc ở Nhật [135,136,137], ở Bắc Mỹ [138], ở châu Âu [139] và từ mạng lưới các trạm GPS ở khu vực châu Phi-châu Âu [140] cũng đều quan sát được các dấu hiệu TID ở những khu vực vĩ độ thấp và trung bình. Lakshmi Narayanan et al. (2014) [141] sử dụng những hình ảnh phát quang bầu trời để quan sát MSTID vào ban đêm tại Yonaguni (24.5°N, 123.0°E, 19.3° vĩ độ từ), Nhật Bản. Nghiên cứu đã chỉ ra giới hạn vĩ độ của MSTID. EIA tham gia vào ngăn cản sự di chuyển của MSTID vào ban đêm tới những vĩ độ thấp và vĩ độ xích đạo, điều đó giải thích cho sự biến mất của MSTID ở những vĩ độ thấp. MSTID quan sát được ở vùng vĩ độ thấp có thể là mầm mống để kích hoạt sự hình thành EPB [142,143].

1.3.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Nghiên cứu điện ly ở nước ta đã được thực hiện trong nhiều năm qua và đã đạt được một số những kết quả nhất định dựa trên cơ sở số liệu thăm dò thẳng đứng tầng điện ly tại đài điện ly Phú Thọy- Hà Nội, trạm Nha Trang, đài xích đạo từ Bạc Liêu và đài quan trắc khí quyển Hóc Môn-Tp Hồ Chí Minh.

Từ năm 1997, khảo sát biến thiên các thông số điện ly phục vụ dự báo truyền sóng, một số đặc trưng biến thiên điện ly tại đài điện ly Phú Thọy đã được giới thiệu [144]. Sử dụng số liệu thăm dò thẳng đứng từ năm 1962-2000 tại đài điện ly Phú Thọy Lê Huy Minh và Phạm Văn Trì (2001) [145] đã chỉ ra biến thiên theo thời gian của lớp E và lớp F. Hoàng Thái Lan và nnk (2003) [146] đã nghiên cứu về đặc điểm và cấu trúc các lớp điện ly khu vực phía Nam sử dụng số liệu quan sát tại trạm Nha Trang. H. Phạm Thi Thu et al. (2011) [147] đã nghiên cứu biến thiên chu kỳ dài của đỉnh Bắc dị thường tại Phú Thọy trong giai đoạn 1962-2002. Các công trình nghiên cứu kể trên đã chỉ ra đặc trưng biến thiên theo thời gian của các tham số điện ly khác nhau một cách rõ rệt giữa các lớp trong tầng điện ly cũng như sự khác biệt giữa hai vùng nghiên cứu phía Bắc (Phú Thọy) và phía Nam (Hóc Môn, Bạc Liêu). Ở Phú Thọy và Hóc Môn

(Bạc Liêu), biến thiên tần số tới hạn f_0F2 của lớp F2 đạt cực tiểu vào khoảng 05:00 LT nhưng đạt cực đại vào khoảng 14:00 LT tại Phú Thụ và tồn tại hai cực đại tại Hóc Môn (Bạc Liêu) vào khoảng 09:00 LT và 17:00 LT. Biến thiên chu kỳ dài của các tần số tới hạn phụ thuộc vào chu kỳ mặt trời 11 năm, tần số tới hạn f_0F2 thể hiện biến thiên nửa năm với cực đại tại phân điểm.

Việc ứng dụng công nghệ GPS liên tục vào nghiên cứu khoa học Trái Đất nói chung và nghiên cứu tầng điện ly nói riêng ở nước ta đã bắt đầu từ năm 2005 với việc lắp đặt 3 trạm thu GPS liên tục tại Hà Nội, Huế và Tp Hồ Chí Minh trong khuôn khổ hợp tác giữa Viện Vật lý địa cầu với Trường Đại học Rennes 1 và Trường Viễn thông quốc gia Bretagne, Cộng hòa Pháp [148]. Đặc trưng biến thiên theo không gian và thời gian của đỉnh dị thường ion hóa xích đạo đã được bắt đầu nghiên cứu. Le Huy Minh et al. (2014) [149] nghiên cứu biến thiên theo thời gian của hàm lượng điện tử tổng cộng vùng dị thường điện ly xích đạo Đông Nam Á giai đoạn 2006-2011 bằng việc sử dụng chuỗi các trạm thu GPS theo vĩ độ ở cả hai bán cầu Bắc và Nam. Kết quả tính toán chỉ ra rằng dạng của biến thiên ngày đêm của TEC phụ thuộc vào vĩ độ: có dạng một mũ chóp bằng ở các trạm gần xích đạo và dạng phân bố Gauss ở trạm xa xích đạo. Tác giả chỉ ra giá trị TEC biến thiên theo thời gian nửa năm ở tất cả các trạm với các cực đại vào thời kỳ phân điểm. Ở cả 2 bán cầu biên độ đỉnh dị thường vào mùa xuân lớn hơn vào mùa thu từ 2006-2008 và vào mùa xuân nhỏ hơn vào mùa thu từ 2009-2011. Hệ số tương quan giữa biên độ TEC ở cả 2 đỉnh dị thường và số vết đen mặt trời cỡ 0,88. Biên độ TEC của các đỉnh dị thường trở nên khá nhỏ vào các tháng mùa hè và mùa đông trong năm hoạt động mặt trời cực tiểu. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra sự biến thiên của đỉnh EIA theo vĩ độ và mùa: cả hai đỉnh dị thường dịch chuyển một cách đáng kể về phía xích đạo vào mùa đông hơn là so với các mùa khác, và cả hai đỉnh có xu hướng xuất hiện vào mùa đông sớm hơn vào mùa hè. Le Huy Minh et al. (2016a) [6], sử dụng mạng lưới GPS liên tục ở Việt Nam để nghiên cứu TEC ở khu vực Đông Nam Á giai đoạn 2006-2013, trong nghiên cứu này cũng chỉ ra 2 đỉnh dị thường xích đạo đạt cực đại vào thời kỳ phân điểm, có một sự bất đối xứng cả về biên độ và vị trí của hai đỉnh dị thường. Le Huy Minh et al. (2016b) [150], cũng sử dụng mạng lưới GPS liên tục để tính TEC theo phương pháp tổ hợp các trị đo pha và giả khoảng cách trong trận bão từ vào tháng 3 năm 2015. Kết quả tính toán cho thấy việc tính toán TEC bằng phương pháp tổ hợp các trị đo pha và giả khoảng cách là ít phân tán hơn việc tính

TEC chỉ bằng việc sử dụng trị đo giả khoảng cách. Bài báo đưa ra một số nhận định về đặc trưng của đỉnh EIA, trong thời gian xuất hiện bão từ, trong pha chính của bão từ quan sát được 2 đỉnh EIA mở rộng cùng với sự gia tăng biên độ TEC; trong ngày đầu của pha hồi phục, biên độ của đỉnh Bắc giảm xuống, biên độ của đỉnh Nam thì gần như biến mất hoàn toàn.

Ở nước ta, nghiên cứu về nhấp nháy điện ly dựa trên số liệu GPS cũng bắt đầu được quan tâm. Trần Thị Lan và nnk. [151,152] sử dụng số liệu GPS liên tục tại Việt Nam nghiên cứu hàm lượng điện tử tổng cộng và nhấp nháy điện ly đối với trường hợp ngày yên tĩnh từ 16/05/2006 và ngày nhiễu loạn từ 6-7/05/2006. Lê Huy Minh và nnk [153,154] đã trình bày mối quan hệ giữa bão từ và bão điện ly cũng như ảnh hưởng của bão từ tới sự thay đổi hàm lượng điện tử tổng cộng vùng dị thường ion hóa xích đạo Đông Nam Á. Một số kết quả nghiên cứu về việc xuất hiện spread F khu vực xích đạo Việt Nam cũng đã có một số kết quả được công bố như: Hoàng Thái Lan và nnk [155,156], nghiên cứu đặc trưng xuất hiện spread F quan sát được tại đài điện ly Hóc Môn-Tp Hồ Chí Minh; Trần Thị Lan và Đào Thế Cường (2013) [157] nghiên cứu đặc trưng xuất hiện spread F tại đài Điện ly Phú Thụy-Hà Nội. Sự xuất hiện nhấp nháy điện ly hay spread F là các bất thường điện ly có liên quan tới các bong bóng plasma trong tầng điện ly. Trần Thị Lan và nnk (2015) [158], nghiên cứu đặc trưng xuất hiện nhấp nháy ở Việt Nam trong giai đoạn 2009-2012, tác giả đã chỉ ra rằng nhấp nháy điện ly ở khu vực Việt Nam xuất hiện chủ yếu vào thời gian ban đêm trong khoảng 2000-2400 LT. Sự xuất hiện nhấp nháy được cho là phụ thuộc vào mùa và hoạt tính mặt trời: hoạt động nhấp nháy đạt cực đại vào thời kỳ phân điểm (tháng 3, 4 và 9, 10) và xuất hiện nhiều trong những năm mặt trời hoạt động mạnh. Tran et al. (2017) [159] đã chỉ ra rằng, ở khu vực Việt Nam trong giai đoạn 2006- 2014 hoạt động nhấp nháy là cực đại vào thời gian phân điểm và phụ thuộc vào hoạt tính mặt trời. Nhấp nháy xuất hiện chủ yếu vào thời điểm trước nửa đêm, xung quanh đỉnh Bắc của EIA, từ 15°N đến 20°N và đạt cực đại ở khoảng 16°N. Trong một công bố nghiên cứu gần đây, Le Huy Minh et al. (2016b) [150] quan sát thấy hiện tượng MSTID trên các bản đồ TEC trong thời gian bão từ vào tháng 3/2015; MSTID này được sinh ra bởi sóng trọng lực âm tần ở khu vực đỉnh Bắc EIA sau khi mặt trời lặn di chuyển về phía xích đạo với vận tốc khoảng 210m/s.

Tóm lại, vấn đề nghiên cứu dị thường ion hóa xích đạo và bất thường điện ly

ban đêm ở khu vực vĩ độ thấp và xích đạo đang là chủ đề nghiên cứu được nhiều nhà khoa học trên thế giới cũng như ở Việt Nam quan tâm, nhiều thiết bị và công nghệ khác nhau được sử dụng như: thăm dò thẳng đứng, rada, chụp ảnh quang học, vệ tinh. Các nghiên cứu ở trong nước sử dụng số liệu GPS theo hướng này có một số hạn chế:

- Sử dụng phương pháp tính TEC từ trị đo giả khoảng cách ít chính xác hơn phương pháp tổ hợp trị đo pha và trị đo giả khoảng cách và không tính toán được chỉ số tốc độ thay đổi hàm lượng điện tử tổng cộng ROTI.

- Nghiên cứu nhấp nháy điện ly (bất thường) bằng chỉ số S_4 làm cho hạn chế sử dụng máy thu (chỉ sử dụng được các máy thu GSV4004).

- Cho đến nay vẫn chưa có nghiên cứu nào chỉ ra một cách định lượng đặc trưng dao động chu kỳ của các đỉnh EIA.

- Sự phân bố các bất thường điện ly vẫn chưa được xác định một cách định lượng.

- Các giá trị TEC ở Việt Nam chưa được mô hình hóa phục vụ dự báo.

Trong luận án sẽ khắc phục những hạn chế nêu trên với chuỗi số liệu sử dụng dài hơn (hơn một chu kỳ hoạt động mặt trời), không bị hạn chế sử dụng máy thu GPS trong việc nghiên cứu bất thường điện ly ban đêm. EIA được nghiên cứu chi tiết hơn với việc phát hiện ra các dao động chu kỳ chính và mối quan hệ của nó với các yếu tố ảnh hưởng có thể. Sự phân bố bất thường điện ly ban đêm được đưa ra một cách định lượng. Ngoài ra các giá trị TEC ở khu vực Việt Nam bước đầu được mô hình hóa bằng phương pháp EOF.

CHƯƠNG 2

SỐ LIỆU VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để nghiên cứu về dị thường ion hóa xích đạo và các bất thường điện ly ban đêm ở khu vực Việt Nam và lân cận, luận án sử dụng các tham số hàm lượng điện tử tổng cộng tầng điện ly, chỉ số tốc độ thay đổi TEC tính được từ số liệu GPS; các số liệu thông lượng mặt trời F10.7, chỉ số Dst, gió trung bình vĩ hướng tầng bình lưu nhiệt đới xích đạo, chỉ số ENSO đa biến (MEI.v2), cũng như mô hình tham chiếu điện ly toàn cầu IRI, mô hình TEC toàn cầu CODG. Luận án sử dụng các phương pháp tính toán và xử lý số liệu hiện đại: tính TEC từ tổ hợp trị đo pha và trị đo giả khoảng cách, chỉ số tốc độ thay đổi TEC (ROTI- Rate of TEC), phương pháp thống kê, phương pháp bình phương tối thiểu, biến đổi wavelet, phương pháp hợp đường cong, phân tích biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle, phương pháp lọc dải, phân tích hàm trực giao thực nghiệm.

2.1. Số liệu sử dụng

2.1.1. Số liệu từ các trạm thu GPS

Số liệu sử dụng trong luận án thu thập được từ các trạm GPS liên tục ở Việt Nam và lân cận. Tọa độ địa lý, vĩ độ từ (niên đại 2010) của các trạm GPS được liệt kê ở trong *bảng 2.1* và được minh họa bởi *hình 2.1*. Số liệu của một số trạm dịch vụ GNSS (IGS: International GNSS Services) Quốc tế cũng được sử dụng như: CMUM, CUSV, và CPNM ở Thái Lan, ANMG ở Malaysia, NTUS ở Singapore, BAKO và JOG2 ở Indonesia và XMIS ở Australia. Vị trí của xích đạo từ ở khoảng vĩ độ 7°N (*hình 2.1*). *Bảng 2.1* chỉ ra rằng tất cả số liệu của 30 trạm được sử dụng để tính toán TEC, nhưng chỉ có số liệu của 17 trạm được sử dụng để tính toán chỉ số ROTI, chủ yếu do số liệu của các trạm ở phía Nam xích đạo từ tương đối ít, trong khi số lượng trạm ở phía Bắc xích đạo từ khá nhiều, nên NCS chỉ sử dụng những trạm có chất lượng số liệu tốt để tính toán chỉ số ROTI, để phân bố ROTI ở hai phía xích đạo từ có số số lượng giá trị ROTI không quá chênh lệch (chương 4).

Bảng 2.1. Danh sách các trạm GPS liên tục ở khu vực Việt Nam và lân cận

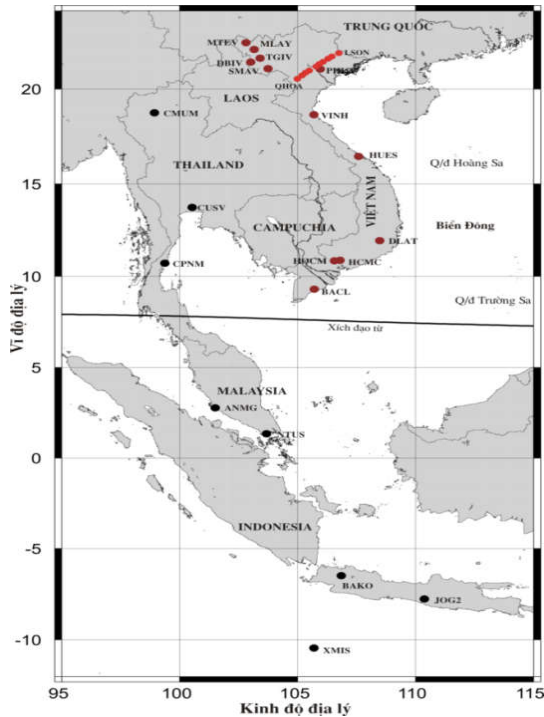
TT	Tên trạm	Tọa độ địa lý		Vĩ độ từ (2010)	Thiết bị	Thời gian quan sát	Đại lượng tính toán
		Kinh độ	Vĩ độ				
1	MTEV	102,80719	22,38719	15,92	NETRS	12/2009- 12/2018	TEC, ROTI
2	MLAY	103,15385	22,04187	15,54	NETRS	1/2012- 12/2018	TEC, ROTI
3	LSON	106,74906	21,85260	15,78	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
4	CLAN	106,44731	21,67466	15,59	CORS5700	01/2018-12/2021	TEC

5	HUUL	106,28931	21,55973	15,47	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
6	TANY	106,07433	21,40704	15,30	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
7	SOCS	105,91935	21,29166	15,17	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
8	DANH	105,78528	21,16494	15,03	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
9	QOAI	105,49226	20,95633	14,81	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
10	HOAB	105,32750	20,84219	14,68	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
11	TLAC	105,18232	20,69587	14,53	CORS5700	01/2018-12/2021	TEC
12	QHOA	104,99143	20,52457	14,33	CORS5700	12/2017-12/2021	TEC
13	DBIV	103,01829	21,38992	14,84	NETRS	11/2009- 12/2018	TEC, ROTI
14	TGIV	103,41803	21,59225	15,06	NETRS	11/2009- 12/2018	TEC, ROTI
15	SMAV	103,74971	21,05629	14,49	NETRS	6/2010- 7/2018	TEC, ROTI
16	PHUT	105,95872	21,02938	14,49	GSV4004	2/2009- 12/2021	TEC, ROTI
17	VINH	105,69659	18,64999	11,91	CORS5700	9/2011- 12/2021	TEC, ROTI
18	HUES	107,59265	16,45919	9,58	GSV4004	1/2006- 10/2011	TEC, ROTI
19	DLAT	108,48175	11,94527	5,07	GSV4004	11/2014- 12/2021	TEC
20	HOCM	106,55979	10,84857	3,47	GSV4004	01/2008- 10/2012	TEC, ROTI
21	HCMC	106,80139	10,87808	3,52	NET R9	2/2018- 12/2021	TEC
22	BACL	105,75167	9,26806	2,73	GSV4004	05/2015- 12/2021	TEC
23	CPNM	99,37438	10,72465	2,80	Trạm IGS	10/2015-04/2018	TEC, ROTI
24	CMUM	98,93238	18,76088	12,32	Trạm IGS	01/2014-12/2021	TEC, ROTI
25	CUSV	100,53392	13,73591	6,43	Trạm IGS	5/2008-12/ 2021	TEC, ROTI
26	ANMG	101,50660	2,78465	-5,14	Trạm IGS	02/2014-12/2021	TEC, ROTI
27	NTUS	103,67996	1,34580	-7,05	Trạm IGS	1/2008-12/ 2021	TEC, ROTI
28	BAKO	106,84891	-6,49106	-15,52	Trạm IGS	1/2008- 12/2021	TEC, ROTI
29	JOG2	110,37272	-7,76377	-16,75	Trạm IGS	10/2013- 12/2021	TEC, ROTI
30	XMIS	105,68350	-10,44996	-19,99	Trạm IGS	01/2008-12/2021	TEC, ROTI

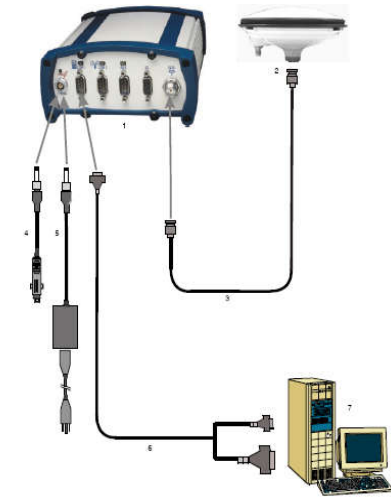
Thiết bị sử dụng là các máy thu GPS 2 tần số với các loại khác nhau như: NETR9, NETRS và CORS5700 của hãng Trimble, GSV4004 của hãng NovAtel. Mỗi máy thu GPS sẽ có 3 bộ phận chính: anten, bộ thu và chuyển đổi số liệu, máy tính cá nhân để lưu số liệu (*hình 2.2*). Số liệu được ghi liên tục trên máy tính là những tệp dưới dạng nhị phân. Một phần mềm đi kèm cho phép chuyển đổi tệp số liệu nhị phân sang tệp số liệu chuẩn kiểu RINEX phục vụ cho những nghiên cứu tiếp theo của luận án.

Hình 2.3 miêu tả vết của các vệ tinh quan sát được: a) tại trạm GPS PHUT, b) tại trạm GPS BACL ngày 01/05/2021 ở các góc nhìn vệ tinh α khác nhau, màu xanh ($\alpha \leq 10^\circ$), xanh lá cây ($10^\circ < \alpha \leq 20^\circ$), màu đỏ ($20^\circ < \alpha \leq 30^\circ$), màu hồng ($30^\circ < \alpha \leq 40^\circ$), màu nâu ($\alpha > 40^\circ$). Độ cao điểm cắt tầng điện ly của các vết vệ tinh là

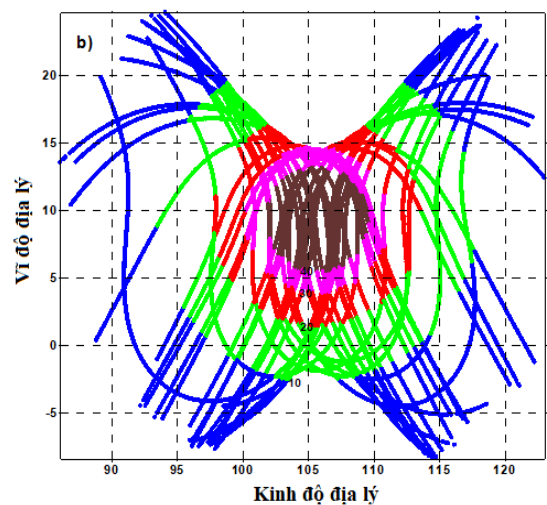
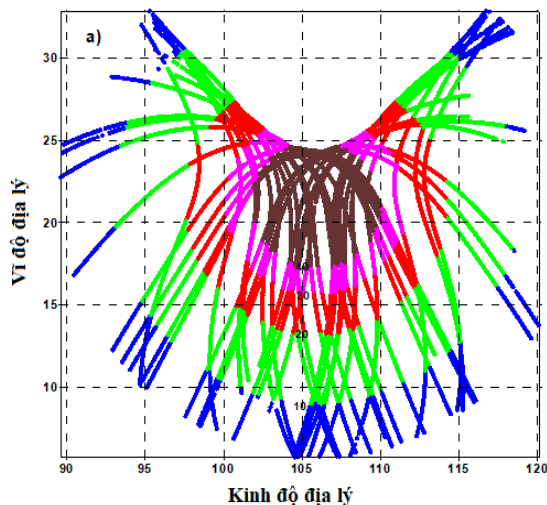
400 km. Trong luận án, các quan sát với góc nhìn vệ tinh $\alpha < 20^\circ$ thường không được sử dụng để tránh hiệu ứng đa đường. Hình 2.3 cho thấy các vết vệ tinh có góc nhìn $\alpha \geq 20^\circ$ khá đầy đủ, điều này cho thấy nguồn số liệu có chất lượng tốt đáp ứng được những nghiên cứu đặt ra trong luận án.



Hình 2.1. Vị trí các trạm GPS liên tục khu vực Việt Nam và lân cận, vị trí xích đạo từ ở niên đại 2010.0 ở khoảng vĩ độ 7° .



Hình 2.2. Sơ đồ trạm thu GPS model GSV4004.



Hình 2.3. Vết của các vệ tinh quan sát được tại các trạm GPS ngày 01/5/2021:

a) Phú Thủy, b) Bạc Liêu.

2.1.2. Thông tin vệ tinh

Số liệu thu thập được từ các trạm thu GPS cùng với các tệp niên giám Yuma sử dụng để tính toán TEC tầng điện ly. Số liệu niên giám Yuma cung cấp thông tin vệ tinh có thể tải xuống từ website <http://celestrack.org/almanac/Yuma/> [160]. Các tệp số liệu này cung cấp các thông tin liên quan đến tình trạng vệ tinh như: số vệ tinh đang hoạt động, góc nghiêng của quỹ đạo so với mặt phẳng xích đạo của vệ tinh tại thời điểm quan sát, độ trễ đồng hồ vệ tinh.

2.1.3. Thông lượng mặt trời F10.7

F10.7 là mật độ thông lượng mặt trời ở bước sóng 10.7 cm trung bình trong một giờ [161] còn được gọi là chỉ số F10.7. F10.7 là một chỉ số đặc trưng cho hoạt động của Mặt Trời. Nó là một trong những phép ghi hoạt động lâu nhất về hoạt động mặt trời. F10.7 có sự tương quan tốt với số vết đen mặt trời cũng như số bức xạ cực tím (UV: Ultra Violet) tại Ottawa, Ontario; và sau đó là tại Đài quan sát Vô tuyến Penticton ở British Columbia, Canada. Không giống như nhiều chỉ số năng lượng mặt trời, thông lượng mặt trời F10.7 có thể dễ dàng đo đạc hàng ngày một cách tin cậy từ bề mặt trái đất, trong mọi loại thời tiết. Tập hợp số liệu F10.7 có ít khoảng trống hay các vấn đề về hiệu chỉnh. Trong “đơn vị thông lượng mặt trời”, (s.f.u: solar flux units), F10.7 có thể thay đổi từ dưới 50 s.f.u tới trên 300 s.f.u trong mỗi chu kỳ hoạt động mặt trời. Các phép đo F10.7 do Hội đồng Nghiên cứu Quốc gia Canada (National Research Council Canada) hợp tác với Bộ Tài nguyên Thiên nhiên Canada cung cấp.

Chỉ số F10.7 đã được chứng minh là rất có giá trị trong việc xác định và dự báo thời tiết không gian. Do chuỗi số liệu F10.7 dài, nó cung cấp thông tin khí hậu học hoạt động mặt trời hơn 6 chu kỳ. Bởi vì thông lượng F10.7 đến từ sắc quyển và vành nhật hoa của Mặt Trời, nên thông lượng F10.7 bao hàm các phát xạ quan trọng hình thành ở các vùng nêu trên của khí quyển mặt trời. Các phát xạ bức xạ cực tím tác động đến tầng điện ly và làm thay đổi tầng khí quyển bên trên biến đổi theo thông lượng F10.7. Nhiều bức xạ cực tím ảnh hưởng đến tầng bình lưu và ozone cũng có mối tương quan tốt với chỉ số F10.7. Tập hợp số liệu F10.7 được tải xuống từ trang web: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> [162] và được sử dụng trong các chương 3, 4, 5 của luận án.

2.1.4. Chỉ số Dst

Chỉ số Dst (disturbance-storm time) được sử dụng rộng rãi như một chỉ số về

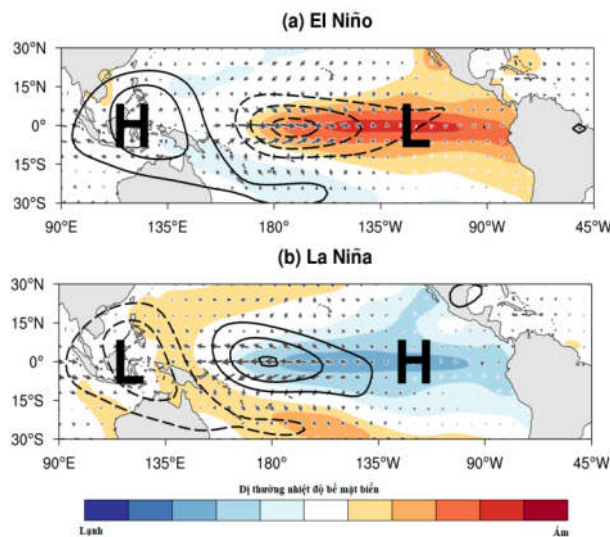
hoạt động địa từ. Dst được tính mỗi giờ một giá trị và ghi lại theo thời gian thực. Trong thời gian trường từ yên tĩnh Dst nằm trong khoảng ± 20 nT (nano Tesla). Vào thời gian bão từ, dựa trên cường độ của chỉ số Dst mà phân chia thành các loại bão từ như sau: bão nhỏ ($-30 \text{ nT} > \text{Dst} > -50 \text{ nT}$), bão vừa ($-50 \text{ nT} > \text{Dst} > -100 \text{ nT}$), bão cường độ mạnh ($\text{Dst} < -100 \text{ nT}$), và cơn bão rất mạnh ($\text{Dst} < -250 \text{ nT}$) [163]. Chỉ số Dst được sử dụng để đo sự nhiễu loạn từ gây bởi dòng vòng chạy trong mặt phẳng xích đạo ở khoảng cách từ 3 đến 8 lần bán kính Trái Đất. Trong một trận bão từ thường có 3 pha: pha đầu, pha chính và pha hồi phục. Pha đầu thường được đặc trưng bởi chỉ số Dst tăng lên 20-50 nT trong hàng chục phút. Những trận bão có sự tăng chỉ số Dst một cách đột ngột thường được gọi là bão từ bất đầu bất ngờ. Tuy nhiên không phải trận bão từ nào cũng có pha đầu có chỉ số Dst tăng lên một cách đột ngột. Pha chính của bão từ được xác định khi giá trị Dst bắt đầu suy giảm đến giá trị cực tiểu (từ -50 đến -600 nT), thời gian xuất hiện pha chính thường kéo dài từ 2 đến 8 giờ. Pha hồi phục được xác định khi giá trị Dst thay đổi từ giá trị cực tiểu đến giá trị trong ngày yên tĩnh từ, thời gian của pha hồi phục thường kéo dài từ vài giờ đến vài ngày. Tập hợp số liệu về chỉ số Dst được tải xuống từ trang web: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> [162] và được sử dụng trong chương 5 của luận án.

2.1.5. El Niño và Dao động Nam (ENSO)

ENSO là dị thường quy mô lớn của hệ thống đại dương-khí quyển với nhiễu động lớn trong dòng biển và nhiệt độ mặt nước biển gây nên điều kiện dị thường khí quyển và môi trường trong khu vực xích đạo, chủ yếu là ở Thái Bình Dương <https://psl.noaa.gov/enso/> [164]. ENSO là chữ viết tắt của các từ ghép El Niño - Southern Oscillation để chỉ hai hiện tượng El Niño và La Niña có liên quan đến dao động khí áp giữa 2 bờ phía Đông Thái Bình Dương với phía Tây Thái Bình Dương-Đông Ấn Độ Dương (được gọi là El Niño và dao động Nam) (<https://bnews.vn/ban-biet-gi-ve-el-nino-va-la-nina/175478.html> [165]). ENSO là hiện tượng khí hậu đơn lẻ biến động định kỳ giữa 3 pha: trung tính, La Niña (pha lạnh), El Niño (pha nóng) [166]. Hiện tượng ENSO liên quan chặt chẽ với hoàn lưu khí quyển theo chiều Đông Tây ở vùng xích đạo. Hoàn lưu này được Walker phát hiện năm 1924 nên còn gọi là hoàn lưu Walker. Hoàn lưu Walker được sinh ra bởi lực gradien khí áp có nguồn gốc từ một vùng khí áp cao trên Đông Thái Bình Dương và một hệ thống áp thấp trên Indonesia [167] (*hình 2.4*). Mô hình dao động nhiệt độ bề mặt biển ở Thái Bình Dương

trong trạng thái bình thường (*hình 2.5a*), dòng nước lạnh dồn bề nước ấm về phía Tây, nước lạnh trôi lên dọc duyên hải Nam Mỹ. Các trạng thái El Niño, La Niña (*hình 2.5b,c*) được giải thích như sau:

- Chênh lệch nhiệt độ và khí áp giữa Đông và Tây Thái Bình Dương nhỏ, hoàn lưu Walker suy yếu hoặc đảo lộn (bao gồm gió mậu dịch) sẽ khiến nước biển lạnh sâu bót hoặc không trôi lên bề mặt, do đó tạo ra El Niño (*hình 2.5b*). El Niño là hiện tượng nóng lên dị thường của lớp nước biển bề mặt ở khu vực xích đạo trung tâm và Đông Thái Bình Dương, kéo dài 8-12 tháng, hoặc lâu hơn, thường xuất hiện 3-4 năm một lần, song cũng có chu kỳ dài hơn hoặc thưa hơn.



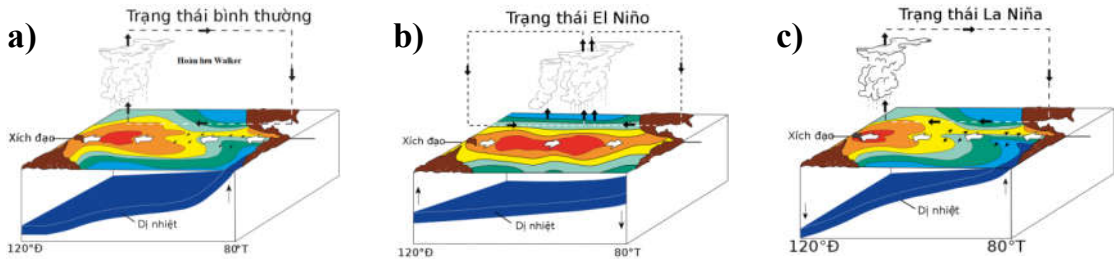
Hình 2.4. Sơ đồ cơ chế vật lý các hiện tượng: a) El Niño, b) La Niña

(<https://psl.noaa.gov/enso/mei/> [164]). Ký tự H chỉ vùng áp suất cao, ký tự L chỉ vùng áp suất thấp, thang màu chỉ thị dị thường nhiệt độ mặt nước biển.

- Chênh lệch nhiệt độ và khí áp giữa Đông và Tây Thái Bình Dương lớn (Hoàn lưu Walker đặc biệt mạnh sẽ gây La Niña dẫn đến nhiệt độ đại dương mát hơn ở vùng nhiệt đới trung và Đông Thái Bình Dương do nước trôi gia tăng (*hình 2.5c*). La Niña là một hiện tượng khí quyển-đại dương kết hợp, đối lập với El Niño. La Niña là hiện tượng lạnh đi dị thường của lớp nước biển bề mặt ở khu vực xích đạo trung tâm và Đông Thái Bình Dương, xảy ra với chu kỳ tương tự hoặc thưa hơn El Niño.

ENSO được đặc trưng định lượng bằng một số chỉ số: SOI (chỉ số dao động Nam), ONI (chỉ số Niño đại dương của NOAA), JEI (chỉ số ENSO của Cơ quan khí tượng Nhật Bản) và MEI (chỉ số ENSO đa biến). MEI.v2 (chỉ số ENSO đa biến phiên bản 2) được sử dụng trong luận án vì MEI.v2 là chuỗi thời gian kết hợp của 5 biến số khác nhau: áp suất mực nước biển, nhiệt độ mực nước biển, thành phần kinh vĩ hướng

gió bề mặt và bức xạ sóng dài trên lưu vực nhiệt đới Thái Bình Dương, do vậy MEI.v2 có thể đặc trưng đầy đủ hiện tượng ENSO. Các giá trị MEI.v2 được tải xuống từ trang web: <http://psl.noaa.gov/enso/mei/> [164] và được sử dụng trong chương 3 của luận án.

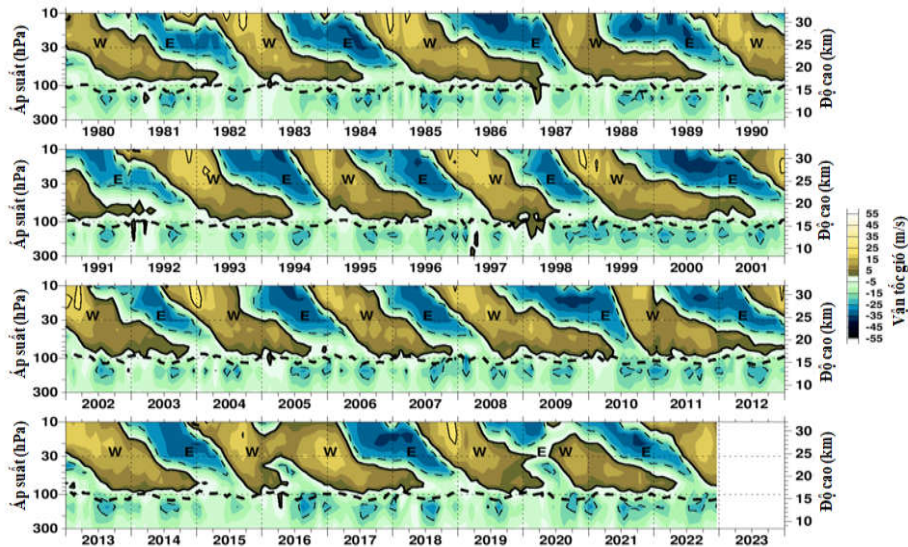


Hình 2.5. Mô hình dao động nhiệt độ khu vực Thái Bình Dương: a) Trạng thái bình thường, b) trạng thái El Niño, c) trạng thái La Niña

(https://vi.wikipedia.org/wiki/Dao_động_phương_Nam [168]).

2.1.6. Dao động tựa hai năm (QBO) của tầng bình lưu

Tầng bình lưu là một lớp khí quyển trên Trái Đất nằm ở độ cao khoảng từ 16-50 km, là nơi chứa lớp ozone bảo vệ Trái Đất khỏi các tia cực tím từ Mặt Trời. Gió ở tầng bình lưu nhiệt đới trải qua dao động tựa hai năm, luân chuyển xung quanh hành tinh, luân phiên theo hướng Tây và hướng Đông [167] (hình 2.6).



Hình 2.6. Dao động QBO gió vĩ hướng trung bình hàng tháng từ 1980 đến nay

(https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html [169]).

Các luồng gió từ phía Tây phát triển trên đỉnh tầng bình lưu, rồi dần dần hạ thấp xuống khoảng 16 km bên trên bề mặt Trái Đất, cùng lúc bị thế chỗ bởi một lớp gió bên trên chúng từ phía Đông; sau đó các luồng gió từ phía Đông trên đỉnh tầng bình lưu cũng dần dần hạ thấp xuống và bị thế chỗ bởi lớp gió từ phía Tây. Phương thức hoạt

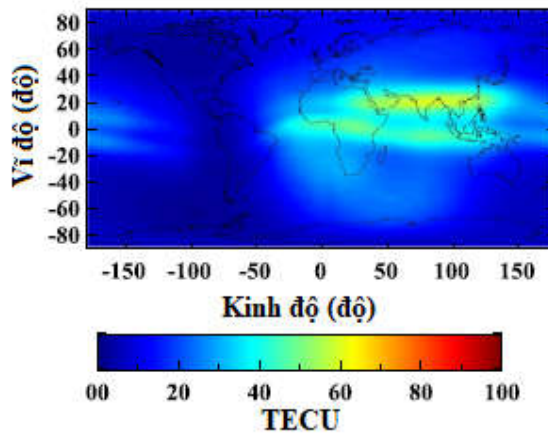
động này trong chu kỳ khoảng từ 28-29 tháng. NCS sử dụng số liệu gió vĩ hướng tầng bình lưu nhiệt đới ở 50 hPa (~20 km), chỉ số đại diện cho hoạt động QBO bình lưu, được tải xuống từ trang web: https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html [169] và được sử dụng trong chương 3 của luận án.

2.1.7. Mô hình điện ly tham chiếu quốc tế IRI

Mô hình điện ly tham chiếu quốc tế (International Reference Ionosphere-IRI) được thành lập bởi Ủy ban nghiên cứu Vũ trụ và Liên hiệp Khoa học Vô tuyến Quốc tế vào cuối những năm 60. Sự ra đời của mô hình IRI gắn với mục tiêu phát triển một tham chiếu quốc tế cho việc xác định các thông số plasma tầng điện ly Trái Đất. Mô hình IRI cung cấp giá trị mật độ điện tử, nhiệt độ điện tử, nhiệt độ ion, thành phần ion, TEC tầng điện ly và một số tham số khác ở độ cao từ 60-2000 km ở thời điểm bất kỳ với các tham số hoạt tính mặt trời và hoạt tính từ nhất định. Mô hình IRI được sử dụng rộng rãi trong việc mô tả khí hậu học TEC toàn cầu [170] (*hình 2.7*). Nó được chấp nhận rộng rãi như một mô hình tham chiếu để mô tả các nét đặc trưng tầng điện ly trong các ứng dụng khác nhau như: thông tin liên lạc, hàng không, dẫn đường. IRI là một mô hình thực nghiệm được tổng hợp từ các tập hợp dữ liệu toàn cầu bao gồm các phép đo thăm dò thẳng đứng tầng điện ly, rada và các phép đo tại chỗ khác [170,171]. IRI liên tục được cải tiến bằng cách sử dụng nhiều loại dữ liệu mặt đất và không gian, các mạng Hệ thống Vệ tinh Dẫn đường Toàn cầu (GNSS, Global Navigation Satellite System), dữ liệu thăm dò thẳng đứng.

Mô hình IRI luôn được cập nhật và IRI-2016 là phiên bản mới nhất [172]. IRI-2016 cải tiến hơn so với các phiên bản cũ, nó đưa ra 2 mô hình mới cho chiều cao mật độ điện tử cực đại lớp F2 (h_mF2) và những cải tiến về thành phần ion khi hoạt động mặt trời mạnh và yếu. Ngoài ra, một số thay đổi đã được thực hiện liên quan đến dữ liệu đầu vào và sử dụng các chỉ số mặt trời và tầng điện ly, đồng thời thực hiện những thay đổi trong code chương trình FORTRAN để tăng tốc độ tính toán [172]. Các hệ số của mô hình được tính bằng phương pháp trung bình trượt và làm tròn, do đó gây ra những hạn chế về tính chính xác của mô hình trong việc mô tả những nét đặc trưng địa phương của tầng điện ly như sự thay đổi TEC trong khu vực EIA. Trong những trường hợp như vậy, những mô hình địa phương có tính ưu việt hơn trong việc dự báo TEC đặc trưng cho khu vực đó. Trong chương 5 của luận án sử dụng giá trị TEC nhận được

từ mô hình IRI-2016, có thể chạy online trên trang web: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php [173], hoặc lấy code FORTRAN của mô hình để biên dịch và tính toán.



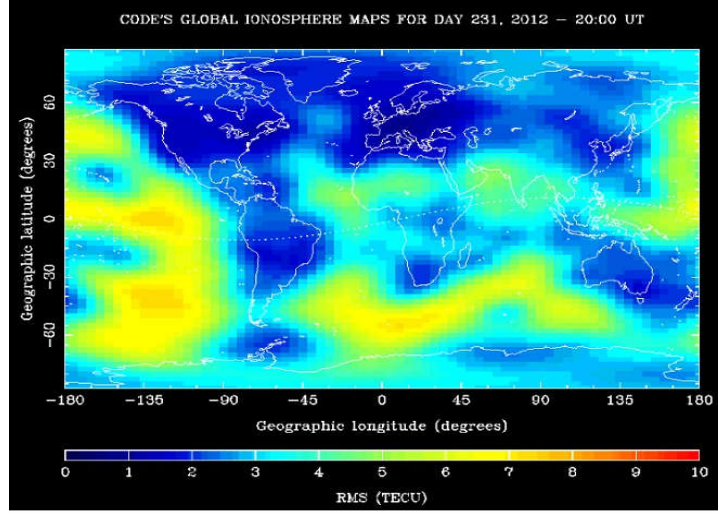
Hình 2.7. Sơ đồ TEC toàn cầu theo mô hình IRI-2016 vào 10 UT ngày 26/08/2013 (theo Ji Eun-Young et al. (2020) [174]).

2.1.8. Mô hình TEC toàn cầu GIMs (CODG)

Mô hình hàm lượng điện tử tổng cộng toàn cầu được thành lập và phát triển bởi Trung tâm Xác định Quỹ đạo ở Châu Âu (CODE: Center for Orbit Determination in Europe). Mô hình này cung cấp các bản đồ TEC phụ thuộc vào tọa độ địa lý ở phạm vi toàn cầu và ở khoảng cách thời gian là 1 giờ (trước đây là 2 giờ). Bản đồ TEC điện ly toàn cầu (GIM: Global Ionosphere Map) được tạo ra hàng ngày tại CODE bằng cách sử dụng dữ liệu từ khoảng 200 trạm GPS/GLONASS của IGS và các tổ chức khác. TEC thẳng đứng được mô hình hóa trong hệ quy chiếu chuẩn Địa từ-Mặt Trời bằng cách dùng biểu diễn điều hòa cầu đến bậc và hạng 15. Các hàm tuyến tính từng đoạn được sử dụng để biểu diễn trong miền thời gian. Độ lệch thiết bị, được gọi là sai lệch mã P1-P2 cho tất cả các vệ tinh GPS và máy thu được ước tính là giá trị không đổi cho mỗi ngày, đồng thời với 3328 tham số được sử dụng để thể hiện sự phân bố VTEC toàn cầu.

Sự phát triển của các mô hình tầng điện ly góp phần quan trọng trong việc dự báo tầng điện ly. Nhiều nhà nghiên cứu đã thực hiện các nghiên cứu so sánh về TEC theo mô hình toàn cầu và TEC quan sát trên các khu vực khác nhau, các kết quả này giúp cho việc cải tiến hiệu quả của mô hình toàn cầu, như đạt được hiện nay, dữ liệu mô hình toàn cầu là rất quan trọng để nghiên cứu tầng điện ly. Các thuật toán của mô hình được viết bằng phần mềm Matlab bởi các nhà khoa học trên thế giới. Giá trị TEC nhận được từ mô hình CODG bằng cách chạy chương trình trên phần mềm Matlab và được sử dụng

để chuẩn hóa các giá trị tính TEC từ số liệu GPS liên tục trong chương 3 của luận án và so sánh với giá trị GPS TEC ở Bạc Liêu và Phú Thọ trong chương 5.



Hình 2.8. Sơ đồ TEC toàn cầu vào 20:00 UT ngày 19/8/2012 theo mô hình CODG (<http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim.gif> [175]).

2.2. Các phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp tính TEC

Khi tín hiệu vệ tinh truyền qua tầng điện ly, ảnh hưởng của tầng điện ly gây ra sự trễ đường truyền dẫn đến sai số trong phép đo. Độ trễ tầng điện ly tỉ lệ thuận với TEC dọc theo đường truyền tín hiệu. Do đó, tham số TEC là một trong những tham số quan trọng để nghiên cứu tầng điện ly và các máy thu GPS 2 tần số cho phép chúng ta trích xuất được tham số này.

Để tính TEC từ các máy thu GPS liên tục ở Việt Nam và khu vực lân cận NCS sử dụng phương pháp tổ hợp trị đo pha và trị đo giả khoảng cách. Trong phép đo GPS 2 tần số, gọi p_{1j}^i và p_{2j}^i là trị đo giả khoảng cách giữa vệ tinh i và máy thu j đối với tần số f_1 (1.57542 GHz) và f_2 (1.22760 GHz), gọi L_{1j}^i và L_{2j}^i là trị đo pha giữa vệ tinh i và máy thu j , phương trình đối với trị đo giả khoảng cách [176] và trị đo pha được viết như sau [177]:

$$p_{1j}^i = s_{0j}^i + d_{ion1j}^i + d_{tropj}^i + c(\tau^i - \tau_j) + b_{p1j} + m_1^p + \varepsilon_1^p \quad (2.1a)$$

$$p_{2j}^i = s_{0j}^i + d_{ion2j}^i + d_{tropj}^i + c(\tau^i - \tau_j) + b_{p2j} + m_2^p + \varepsilon_2^p \quad (2.1b)$$

$$L_{1j}^i = s_{0j}^i + d_{ion1j}^i + d_{tropj}^i + c(\tau^i - \tau_j) + b_{\phi 1}^i + \lambda_1 N_{ij}^i + m_1^\phi + \varepsilon_1^\phi \quad (2.1c)$$

$$L_{2j}^i = s_{0j}^i + d_{ion2j}^i + d_{tropj}^i + c(\tau^i - \tau_j) + b_{\phi 1}^i + \lambda_2 N_{ij}^i + m_2^\phi + \varepsilon_2^\phi \quad (2.1d)$$

trong đó các chỉ số i và j lần lượt là vệ tinh thứ i và máy thu j ; s_0 là khoảng cách thực giữa vệ tinh và máy thu; d_{ion} và d_{trop} là độ trễ tầng điện ly và độ trễ tầng đối lưu; c là vận tốc ánh sáng trong chân không, τ là sai số đồng hồ vệ tinh hoặc sai số đồng hồ máy thu, b là độ trễ thiết bị vệ tinh hoặc máy thu, N là số nguyên đa trị, λ là bước sóng truyền, m là hiệu ứng đa đường trong phép đo pha và phép đo giả khoảng cách, ε là nhiễu tương ứng với các phép đo tại tần số f_1 và f_2 .

Theo Appleton (Budden, 1985 [178]), độ trễ tầng điện ly tương ứng với hàm lượng điện tử tổng cộng nghiêng (STEC) giữa máy thu R_x và vệ tinh T_x có thể được viết thành:

$$d_{ion} = s' - s_0 = \int_{T_x}^{R_x} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) dl = \frac{40,3}{f^2} \int_{T_x}^{R_x} N(l) dl = \frac{40,3}{f^2} STEC \quad (2.2)$$

Trong đó s' là khoảng cách biểu kiến giữa máy thu và vệ tinh, $N(l)$ mật độ điện tử dọc theo đường truyền máy thu-vệ tinh đơn vị tính bằng el/m^3 , n là hệ số phản xạ, và f là tần số sóng radio tính bằng Hz.

Tầng điện ly làm tán xạ các tín hiệu GPS nhưng tầng đối lưu thì không, vì vậy độ trễ của tầng đối lưu có thể được bỏ qua bằng cách lấy (2.1b)-(2.1a) và (2.1c)-(2.1d), sử dụng hiệu (2.1b)-(2.1a) đồng thời bỏ qua hiệu ứng đa đường và nhiễu, chúng ta có:

$$p_{2j}^i - p_{1j}^i = d_{ion2j}^i - d_{ion1j}^i + (b_{p2}^i - b_{p1}^i) + (b_{p2j} - b_{p1j}) = d_{ion2j}^i - d_{ion1j}^i + b_p^i + b_{pj} \quad (2.3)$$

Từ phương trình (2.2) và (2.3), TEC nghiêng (STEC) thu được từ các giả khoảng cách:

$$STEC = \frac{1}{40,3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (p_{2j}^i - p_{1j}^i - (b_p^i + b_{pj})) \quad (2.4)$$

Sử dụng hiệu (2.1c)-(2.1d) đồng thời loại bỏ hiệu ứng đa đường và nhiễu, chúng ta có:

$$\begin{aligned} L_{1j}^i - L_{2j}^i &= d_{ion1j}^i - d_{ion2j}^i + (b_{\phi}^i - b_{2\phi}^i) + (b_{1\phi j} - b_{2\phi j}) + (\lambda_1 N_{1j}^i - \lambda_2 N_{2j}^i) = \\ &= d_{ion1j}^i - d_{ion2j}^i + b_{\phi}^i + b_{\phi j} + (\lambda_1 N_{1j}^i - \lambda_2 N_{2j}^i) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Từ phương trình (2.2) và (2.5) chúng ta có STEC thu được từ các trị đo pha:

$$STEC = \frac{1}{40,3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left[(L_{1j}^i - L_{2j}^i) + (b_{\phi}^i + b_{\phi j}) - (\lambda_1 N_{1j}^i - \lambda_2 N_{2j}^i) \right] \quad (2.6)$$

Trong phương trình (2.4) và (2.6) STEC có đơn vị là TECU trong đó $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$

Vì vậy, để tìm ra giá trị của STEC từ công thức (2.4) chúng ta cần tính toán độ trễ thiết bị b_p^i và b_{pj} hoặc tổng của nó $b_p = b_p^i + b_{pj}$ (hằng số đối với cặp máy thu-vệ tinh) và để tính được STEC từ phương trình (2.6) chúng ta phải tính độ trễ thiết bị tổng cộng

$\left[b_{\phi}^i + b_{\phi_j} + (\lambda_1 N_{1j}^i - \lambda_2 N_{2j}^i) \right]$ cũng là hằng số đối với mỗi cặp vệ tinh-máy thu. Trong công thức (2.4) $STEC_p = \frac{1}{40,3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (p_{2j}^i - p_{1j}^i)$ là một đại lượng được xác định một cách rõ ràng, tuy nhiên do ảnh hưởng của nhiễu và hiệu ứng đa đường, giá trị của nó thường bị phân tán, và trong công thức (2.6), đại lượng $STEC_{\phi} = \frac{1}{40,3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (L_{1j}^i - L_{2j}^i)$ được xác định chính xác nhưng gặp trở ngại do sự trượt vòng pha và sự mù mờ pha ban đầu [177]. Chúng ta sử dụng đại lượng $STEC_p$ để đánh giá sự nhảy bậc trong $STEC_{\phi}$ như sau: Trong mỗi một khoảng liên tục của các vết vệ tinh, $STEC_p$ được xấp xỉ bằng đa thức bậc 4; đại lượng $STEC_{\phi}$ được so sánh với $STEC_p$ đã được làm trơn bằng xấp xỉ đa thức để đánh giá độ lớn của các bước nhảy trong giá trị tính $STEC_{\phi}$ trên cùng vết vệ tinh. $STEC_{\phi}$ sau khi đã điều chỉnh các bước nhảy được so sánh với giá trị của $STEC$ được tính từ mô hình TEC toàn cầu (mô hình CODG) tại thời điểm tương ứng nhằm để xác định độ trễ tổng cộng của độ trễ thiết bị và sự không xác định của pha ban đầu giống như sự đánh giá độ trễ thiết bị trong việc tính toán TEC tuyệt đối bằng việc sử dụng trị đo giả khoảng cách. Giá trị độ trễ tổng cộng đối với mỗi cặp máy thu-vệ tinh trong ngày quan sát là giá trị trung bình độ trễ tổng cộng tại mỗi thời điểm quan sát. Để giảm hiệu ứng đa đường do góc ngẩng vệ tinh thấp, các giá trị $STEC$ sử dụng để so sánh với $STEC$ tính từ mô hình VTEC toàn cầu được lựa chọn với góc nhìn vệ tinh $\alpha \geq 30^\circ$.

Hàm lượng điện tử tổng cộng thẳng đứng tầng điện ly là VTEC hay thường được viết là TEC quan sát tại điểm cắt tầng điện ly được xác định theo mô hình lớp đơn [35]:

$$TEC = STEC \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{R \cos \theta}{R + h} \right) \right] \quad (2.7)$$

trong đó θ là góc nhìn vệ tinh tính bằng độ ($^\circ$), $R = 6371.2$ km là bán kính trung bình của Trái Đất, h là chiều cao lớp đơn tầng điện ly, thường được lấy bằng 400 km [66].

Các giá trị TEC thu được bằng phương pháp tính nêu trên sẽ được sử dụng cho việc nghiên cứu dị thường ion hóa xích đạo khu vực Đông Nam Á, được trình bày và thảo luận một cách chi tiết trong chương 3.

2.2.2. Chỉ số tốc độ thay đổi TEC

Khi tín hiệu vệ tinh truyền qua các bất thường điện ly, các bất thường này sẽ gây ra các dao động nhanh về pha và biên độ như đã được ghi lại trên mặt đất bằng các máy thu GPS. Các dao động pha được quan sát thấy dọc theo đường truyền tín hiệu vệ tinh GPS sẽ tương ứng với các dao động về TEC trong tầng điện ly. Các dao động TEC được đặc trưng bởi tốc độ thay đổi TEC hay còn gọi là ROT (Rate of TEC). ROT và chỉ số tốc độ thay đổi TEC (ROTI) là các tham số chính đối với thời tiết không gian được sử dụng rộng rãi như là một thước đo về mức độ bất thường của tầng điện ly. ROTI được định nghĩa là độ lệch chuẩn của ROT trong một khoảng thời gian xác định (ở đây NCS lấy là 5 phút) [4,177] và có thể nhận được từ TEC trong các phép đo GPS. Các giá trị ROT được tính theo công thức sau:

$$ROT = \frac{STEC_{\varphi}(t + \delta t) - STEC_{\varphi}(t)}{\delta t} \quad (2.8)$$

trong đó $\delta t = 30s$, và ROT tính theo đơn vị TECU/min. Chỉ số tốc độ thay đổi TEC (ROTI) được tính theo công thức:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (2.9)$$

trong đó kí hiệu $\langle \rangle$ là giá trị trung bình, ROTI cũng tính bằng TECU/min.

Các giá trị của ROT chỉ ra những biến thiên tỉ lệ nhỏ trên nền của xu thế tỉ lệ lớn. Nhìn chung $ROTI \geq 0.5$ TECU/min là dấu hiệu cho thấy sự có mặt của những bất thường điện ly có quy mô cỡ vài km hoặc hơn [179].

Sử dụng tham số ROT hay ROTI trong việc nghiên cứu bất thường điện ly có ưu điểm hơn sử dụng các chỉ số nhấp nháy biên độ S_4 là nó được tính dựa trên những phép đo từ các máy thu GPS 2 tần số bất kỳ mà không bắt buộc phải sử dụng loại máy thu GPS GSV4004, điều này khắc phục được sự hạn chế trong việc sử dụng máy thu GPS. Thuật toán để tính ROTI được thực hiện một cách dễ dàng và trực quan hơn thuật toán tính chỉ số nhấp nháy S_4 .

Để nghiên cứu các bất thường điện ly vào ban đêm cho khu vực Đông Nam Á, NCS sử dụng chỉ số ROTI trong giai đoạn 2008-2018, kết quả của nghiên cứu sẽ được trình bày và thảo luận chi tiết trong chương 4.

2.2.3. Phương pháp làm hợp đường cong

Giá trị TEC thu được từ những tính toán xây dựng các bản đồ TEC hàng ngày, xác định các tham số đỉnh dị thường hàng ngày, tính toán giá trị biên độ TEC cực đại (TEC tại các đỉnh EIA) trung bình tháng trong khoảng thời gian 2008-2021. Trong

l luận án này NCS sử dụng chỉ số thông lượng mặt trời trung bình hàng tháng F10.7. Để loại bỏ tác động của hoạt động mặt trời, cũng như các dao động chu kỳ 1 năm và 6 tháng trong nghiên cứu về QBO điện ly, biên độ TEC ($I_c^{(N,S)}$) trung bình tháng ở các đỉnh EIA được biểu diễn bằng một phương trình hồi quy phụ thuộc vào thông lượng mặt trời F10.7 có dạng đa thức bậc 2 và các hàm sin cos có chu kỳ 6 và 12 tháng. Do đó, chúng ta có phương trình hồi quy sau [91]:

$$I_c^{(N,S)}(t) = A_0 + A_1.F_{107}(t) + A_2.F_{107}^2(t) + (B_0 + B_1.F_{107}(t)).\sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \theta_1\right) + (C_0 + C_1.F_{107}(t)).\sin\left(\frac{2\pi t}{T_2} + \theta_2\right) \quad (2.10)$$

trong đó $I_c^{(N,S)}(t)$ là biên độ TEC cực đại trung bình tháng và F10.7(t) và chỉ số hoạt động mặt trời trung bình hàng tháng trong giai đoạn 2008- 2021; T1 và T2 biểu thị chu kỳ 12 và 06 tháng; A, B và C là các hệ số hồi quy. Phương trình (2.10) được giải bằng phương pháp bình phương tối thiểu để tính toán các hệ số hồi quy và cuối cùng thu được các giá trị $I_c^{(N,S)f}$ xấp xỉ bằng phương trình trên. Trong một số hình vẽ của kết quả nghiên cứu đại lượng biên độ $I_c^{(N,S)}$ đôi khi được sử dụng là TEC như trong một số công bố trước đây [6,149,150], chương trình tính phương trình (2.10) được viết bằng phần mềm Matlab. Phương pháp này được sử dụng để nghiên cứu tín hiệu QBO của các đỉnh EIA được trình bày trong chương 3.

2.2.4. Xử lý tín hiệu số

Xử lý tín hiệu số (DSP: Digital Signal Processing) là phương pháp đề cập đến các phép xử lý các dãy số để có được các thông tin cần thiết như phân tích, tổng hợp mã hóa, biến đổi tín hiệu sang dạng mới phù hợp với hệ thống. Xử lý tín hiệu được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như:

- Xử lý tín hiệu âm thanh, tiếng nói: nhận dạng tiếng nói, người nói; tổng hợp tiếng nói/biến văn bản thành tiếng nói; kỹ thuật âm thanh số;...
- Xử lý ảnh: thu nhận và khôi phục ảnh; làm nổi đường biên; lọc nhiễu; nhận dạng; thị giác máy; hoạt hình; các kỹ xảo về hình ảnh; bản đồ;...
- Viễn thông: xử lý tín hiệu thoại và tín hiệu hình ảnh, video; truyền dữ liệu; khử xuyên kênh; điều chế, mã hóa tín hiệu; ...
- Quân sự: truyền thông bảo mật; xử lý tín hiệu rada, sonar; dẫn đường tên lửa;...

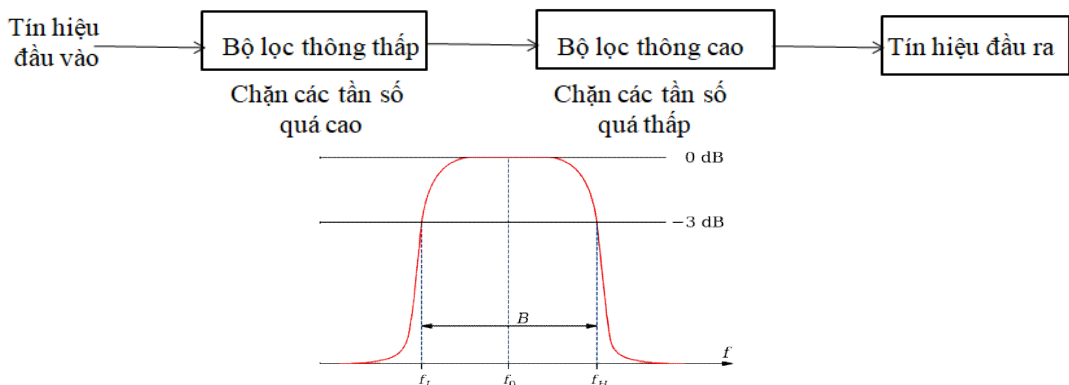
- Y học: điện não đồ; điện tim; chụp X quang; chụp CT (Computed Tomography Scans); nội soi;...

Ngoài những ứng dụng của xử lý tín hiệu số kể trên, nó cũng được ứng dụng rộng rãi trong xử lý số liệu địa vật lý. Hai mục tiêu chính của xử lý tín hiệu địa vật lý là: cải thiện tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và biểu diễn kết quả một cách thuận tiện nhất để tạo điều kiện thuận lợi cho việc minh giải địa chất và địa vật lý. Xử lý tín hiệu áp dụng trong địa vật lý thường liên quan đến việc phân tích chuỗi thời gian, phân tích phổ, phân tích wavelet, biến đổi Fourier, thiết kế các bộ lọc số và các phương pháp phân tích tần số khác. Nếu việc xử lý tín hiệu địa vật lý không hiệu quả, hoặc không được thực hiện tốt, thì việc xử lý dữ liệu sẽ tốn nhiều hơn và tốn nhiều thời gian hơn. Nếu không tăng cường tín hiệu hoặc loại bỏ nhiễu, việc giải thích dữ liệu sẽ khó thực hiện hơn và dữ liệu có thể bị hiểu sai. Trong khuôn khổ của luận án, NCS đã áp dụng các phương pháp xử lý tín hiệu như: bộ lọc thông dải, biến đổi wavelet, phân tích phổ bằng phương pháp biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle...

2.2.4.1. Bộ lọc thông dải

Trong quá trình xử lý tín hiệu NCS sử dụng bộ lọc FIR- đáp ứng xung hữu hạn (FIR: Finite Impulse Response). Bộ lọc FIR được sử dụng để thực hiện hầu hết mọi loại đáp ứng tần số kỹ thuật số. Thông thường các bộ lọc này được thiết kế với một hệ số nhân, bộ cộng và một loạt các độ trễ để tạo ra đầu ra của bộ lọc. Một hàm truyền FIR thường có dạng:

$$H(z) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_Nz^{-N} \quad (2.11)$$



Hình 2.9. Biểu đồ chỉ ra định nghĩa của bộ lọc thông dải: (B): dải thông, f_0 : tần số trung tâm, f_H : tần số cắt cao hơn, f_L : tần số cắt thấp hơn.

Phương pháp thiết kế các bộ lọc FIR được thực hiện một cách trực tiếp trong miền rời rạc, tức là xác định trực tiếp các hệ số b_0, b_1, \dots, b_N , dựa trên các đặc tả thông

số thiết kế. Bộ lọc FIR thông dải đã được áp dụng trong quá trình xử lý dữ liệu của luận án, NCS gọi tắt là bộ lọc thông dải.

Bộ lọc thông dải cho phép đi qua các thành phần trong một dải tần số xác định, được gọi là băng thông của nó nhưng lại chặn các thành phần có các tần số cao hoặc thấp trong dải này. Mục tiêu của luận án là lọc dữ liệu ở các chu kỳ quan tâm, ở đây NCS sử dụng hàm “*fir1*” có trong phần mềm Matlab. Sơ đồ khối mức hệ thống và biểu đồ của bộ lọc thông dải được biểu diễn trên *hình 2.9*.

2.2.4.2. Phép biến đổi wavelet

Kỹ thuật biến đổi wavelet ngày càng trở thành công cụ phổ biến trong việc nghiên cứu chuỗi thời gian cụ thể là trong việc xử lý tín hiệu số, nó giúp khắc phục hạn chế của phép biến đổi Fourier. Phép biến đổi Fourier là phép biến đổi một hàm số hoặc một tín hiệu trong miền thời gian sang miền tần số. Tuy nhiên, phép biến đổi Fourier chỉ cung cấp thông tin có tính toàn cục và chỉ thích hợp cho những tín hiệu tuần hoàn, không chứa các đột biến hoặc các thay đổi không dự báo được. Phép biến đổi Fourier của số cho từng đoạn nhỏ của tín hiệu (của số) đã được Gabor (1946) [180] áp dụng để khắc phục hạn chế nói trên; phép biến đổi này cho thấy mối liên hệ giữa không gian và tần số nhưng bị không chế bởi nguyên lý bất định Heisengber cho các thành phần tần số cao và tần số thấp trong tín hiệu [181]. Phép biến đổi wavelet là bước tiếp theo để khắc phục hạn chế này [182].

Năm 1975, Morlet phát triển phương pháp đa phân giải, tác giả đã sử dụng một xung dao động, được hiểu là một “wavelet” (sóng nhỏ) kích thước được thay đổi và so sánh với tín hiệu ở từng đoạn riêng biệt. Phương pháp này bắt đầu với sóng nhỏ chứa các dao động tần số khá thấp. Sóng nhỏ này được so sánh với tín hiệu phân tích để có một bức tranh toàn cục của tín hiệu ở độ phân giải thô. Sau đó sóng nhỏ được nén lại để nâng cao dần tần số dao động. Quá trình này gọi là hàm thay đổi tỉ lệ phân tích; khi thực hiện tiếp bước so sánh, tín hiệu sẽ được nghiên cứu chi tiết ở các độ phân giải cao hơn, giúp phát hiện các thành phần biến thiên nhanh còn ẩn bên trong.

Trong luận án, NCS sử dụng phép biến đổi wavelet liên tục và wavelet chéo để xử lý số liệu, các phương pháp này sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

a. Phép biến đổi wavelet liên tục

Wavelet là một hàm có giá trị trung bình bằng 0 và định vị được theo cả tần số và thời gian. Gọi $f(x)$ là tín hiệu 1-D, phép biến đổi wavelet liên tục của $f(x)$ sử dụng

hàm wavelet ψ_0 được biểu diễn bởi:

$$W(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_0^* \left(\frac{x-b}{s} \right) dx \quad (2.12)$$

trong đó: $W(s, b)$ là hệ số biến đổi wavelet liên tục của $f(x)$, với s là tỉ lệ (nghịch đảo của tần số) và b là dịch chuyển đặc trưng vị trí; $\psi_0^*(x)$ $\psi_0^*(x)$ là hàm liên hiệp phức của wavelet $\psi_0(x)$ được gọi là hàm wavelet phân tích.

Phương trình (2.12) cho thấy, phép biến đổi wavelet là một ánh xạ chuyển từ hàm một biến $f(x)$ thành hàm $W(s, b)$ phụ thuộc vào hai biến số là biến tỉ lệ s và biến dịch chuyển b . Hệ số chuẩn hóa $1/\sqrt{s}$ trong (2.12) đảm bảo cho sự chuẩn hóa sóng wavelet với các tỉ lệ phân tích s khác nhau $\|\psi_{0(s,b)}\| = \|\psi_0\|$.

Phép biến đổi wavelet có tính linh động cao so với phép biến đổi Fourier (sử dụng duy nhất hàm mũ) vì không nhất thiết phải sử dụng một hàm wavelet cố định, mà có thể lựa chọn các hàm wavelet khác nhau trong họ hàm wavelet sao cho thích hợp với bài toán (hình dạng của hàm wavelet phù hợp với tín hiệu cần phân tích) để kết quả phân tích là tốt nhất. Hiện nay, người ta đã xây dựng được khoảng vài chục các hàm wavelet khác nhau nhằm áp dụng cho nhiều mục đích phân tích đa dạng. Trong các bài toán nghiên cứu địa vật lý với mục đích trích xuất ra các thông tin ở các miền tần số khác nhau thì wavelet Morlet là lựa chọn tốt nhất để xử lý dữ liệu.

Wavelet Morlet được cho bởi:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-j\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2.13)$$

và biến đổi của nó:

$$\psi(\omega) = e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (2.14)$$

b. Biến đổi wavelet chéo

Cho hai chuỗi thời gian X và Y , với biến đổi wavelet $W_n^X(S)$ và $W_n^Y(S)$, chúng ta có thể xác định phổ wavelet chéo là $W_n^{XY}(s) = W_n^X(S)W_n^{Y*}(S)$, trong đó $W_n^{Y*}(S)$ là liên hiệp phức của $W_n^Y(S)$. Phổ wavelet chéo là phức, và do đó người ta có thể xác định công suất wavelet chéo là $|W_n^{XY}(S)|$.

Mức độ tin cậy đối với công suất wavelet chéo có thể được tính từ căn bậc hai của tích của hai phân phối chi bình phương (χ^2) [183]. Giả sử cả hai phổ wavelet đều

là phân bố χ^2 với ν bậc tự do, phân bố xác suất được cho bởi:

$$f_\nu(z) = \frac{2^{2-z}}{\Gamma^2\left(\frac{\nu}{2}\right)} Z^{\nu-1} K_0(z) \quad (2.15)$$

trong đó z là biến ngẫu nhiên, Γ là hàm Gamma, và $K_0(z)$ là hàm Bessel bậc zero đã thay đổi. Hàm phân phối tích lũy được cho bởi tích phân $p = \int_0^{z_\nu(p)} f_\nu(z) dz$, trong đó $Z_\nu(p)$ là mức độ tin cậy liên quan đến xác suất p . Cho trước xác suất p , tích phân này có thể được nghịch đảo để tìm mức độ tin cậy $Z_\nu(p)$. Nếu hai chuỗi thời gian có phổ Fourier lý thuyết là P_k^X và P_k^Y , khi đó phân bố wavelet chéo là:

$$\frac{|W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)|}{\sigma_X\sigma_Y} \Rightarrow \frac{z_\nu(p)}{\nu} \sqrt{P_k^X P_k^Y} \quad (2.16)$$

trong đó σ_X và σ_Y là độ lệch chuẩn tương ứng. Đối với $\nu=1$ (các wavelet thực), $Z_1(95\%)=2.182$, trong khi $\nu=2$ (các wavelet phức), $Z_2(95\%)=3.999$.

Phép biến đổi wavelet chéo được sử dụng trong chương 3 của luận án được viết dưới dạng gói phần mềm Matlab của Torrence & Compo [184].

2.2.4.3. Phương pháp phân tích biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle

Phương pháp biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle là một công cụ toán học được sử dụng rất rộng rãi trong việc tìm kiếm chu kỳ và phân tích tần số của một chuỗi thời gian bất kỳ, nó được áp dụng rất rộng rãi trong nghiên cứu địa vật lý. Cơ sở toán học của phương pháp chu kỳ biểu đồ đã được đưa ra bởi Barning (1963) [185], Lomb (1976) [186] và Scargle (1982) [187]. Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle cho phép chúng ta tìm và kiểm tra các tín hiệu chu kỳ yếu trên tập hợp dữ liệu ngẫu nhiên, dữ liệu lấy mẫu không đều.

Gọi N là điểm quan sát, giá trị x_k bất kỳ được lấy ở một thời điểm t_k bất kỳ, trong đó $k=1, \dots, N$. Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle được viết dưới dạng phương trình.

$$P_{LS}(f) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x}) \cos(2\pi f(t_k - \tau)) \right]^2}{\sum_{k=1}^N \cos^2(2\pi f(t_k - \tau))} + \frac{\left[\sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x}) \sin(2\pi f(t_k - \tau)) \right]^2}{\sum_{k=1}^N \sin^2(2\pi f(t_k - \tau))} \right\} \quad (2.17)$$

trong đó:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (2.18)$$

Và

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2 \quad (2.19)$$

Lần lượt là giá trị trung bình và phương sai của dữ liệu. Chênh lệch thời gian, τ , được chọn là:

$$\operatorname{tg}(2(2\pi f)\tau) = \frac{\sum_{k=1}^N \sin(2(2\pi f)t_k)}{\sum_{k=1}^N \cos(2(2\pi f)t_k)} \quad (2.20)$$

Để đảm bảo tính bất biến thời gian của phổ được tính, bất kỳ sự dịch chuyển nào $t_k \rightarrow t_k + T$ trong các phép đo thời gian đều dẫn đến sự dịch chuyển đồng nhất trong phần bù: $\tau \rightarrow \tau + T$. Ngoài ra, sự lựa chọn đảm bảo rằng “một cực đại trong biểu đồ chu kỳ xuất hiện ở cùng một tần số làm giảm thiểu tổng bình phương của phần dư của việc làm khớp của một sóng hình sin với dữ liệu” [187]. Độ lệch chỉ phụ thuộc vào các thời điểm và các biến đo đặc khi các thời điểm cách đều nhau.

Nếu tín hiệu đầu vào bao gồm nhiễu trắng Gauss, thì $P_{LS}(f)$ tuân theo phân phối xác suất hàm mũ với trung bình đơn vị [188].

Phương pháp biểu đồ-chu kỳ Lomb-Scargle được sử dụng trong chương 3 của luận án đã được viết dưới dạng hàm Matlab `lomb.m`.

2.2.5. Phương pháp phân tích hàm trực giao thực nghiệm

Trong thống kê và xử lý tín hiệu, phương pháp phân tích hàm trực giao thực nghiệm (EOF: Empirical Orthogonal Function) là sự phân tích tín hiệu hoặc tập dữ liệu dưới dạng các hàm cơ sở trực giao được xác định từ dữ liệu [189]. Thuật ngữ này cũng có thể thay thế cho phép phân tích các thành phần chính địa vật lý có trọng số trong địa vật lý.

Phương pháp phân tích EOF về cơ bản tương tự như phân tích sóng hài, nhưng phân tích sóng hài thường sử dụng các hàm trực giao xác định trước, ví dụ, các hàm sin và cos ở các tần số cố định.

Khi dữ liệu của một trường có qui mô lớn, việc nghiên cứu thông tin của trường đó trở nên rất khó khăn; khi đó, để có được thông tin mô tả trường đó mà không cần phải sử dụng toàn bộ số liệu của trường, ta có thể dùng cách đưa lượng thông tin toàn trường vào một số thành phần chính của trường để mô tả được gần đúng về trường đó (ví dụ như nén thông tin), một trong số các phương pháp là sử dụng phân tích một trường thành các thành phần EOF.

Việc phân tích các thành phần EOF có thể được coi như tương tự với việc cấu trúc lại trường số liệu dựa trên biến đổi Fourier, bản chất của chúng là chuỗi các thành phần (véc-tơ) có đặc trưng trực giao. Sau khi phân tích EOF được N thành phần (được

gọi là những véc-tơ riêng), sắp xếp các véc-tơ theo thứ tự giá trị giảm dần, kết quả sẽ cho thấy với một số n_{EOF} véc-tơ đầu tiên ($n_{\text{EOF}} \ll N$) có khả năng chứa được hầu hết lượng thông tin của trường. Bởi vậy người ta ứng dụng để đưa thông tin của một trường cỡ lớn vào một trường có cỡ nhỏ hơn rất nhiều mà vẫn có gần hết lượng thông tin của trường đó. Có thể coi như tương tự với việc lọc các nhiễu qui mô nhỏ. Các thành phần EOF đầu tiên có thể mô tả được cơ bản hình ảnh của trường đó theo một không gian với phương sai lớn nhất. Cách đơn giản nhất để tính toán các EOF là sử dụng phân tích giá trị suy biến (SVD: Singular Value Decomposition, Phạm Đình Khanh (2021) [190]), về cơ bản thực hiện toàn bộ phép tính trong một bước.

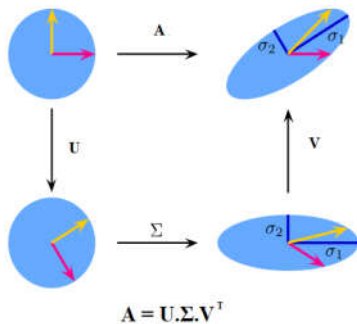
Phép phân tích SVD là một dạng nhân tử hóa ma trận (matrix factorization) khái quát hơn so với phép phân tích riêng đã trình bày ở trên. Theo đó phương pháp này cũng nhằm phân tích một ma trận thành tích của ba ma trận số thực hoặc số phức. Trong đó hai ma trận ở vị trí đầu tiên và cuối cùng là ma trận trực giao có thể không là khả nghịch của nhau và ở giữa là ma trận đường chéo có thể không vuông.

$$A_{mn} = U_{mn} \sum_{mn} V_m^T \quad (2.21)$$

Kích thước ma trận được để ở bên dưới chân ma trận, tức là ma trận $A_{mn} \in R^{m \times n}$. Trong công thức trên thì U_{mn} , V_{mn} là các ma trận trực giao và \sum_{mn} là ma trận đường chéo.

Phép phân tích suy biến sẽ lần lượt trải qua:

+ Phép xoay: Từ một điểm dữ liệu $x \in R^m$ trong không gian gốc, chúng ta nhân với ma trận U_{mn} để thực hiện xoay trục. Tại phép biến đổi này không làm thay đổi tích vô hướng của hai điểm dữ liệu. Thật vậy, giả sử hai véc-tơ x_i và $x_j \in R^m$. Phép xoay sẽ giúp biến đổi các véc-tơ thành hai véc-tơ mới là $y_i = Ux_i$ và $y_j = Ux_j$. Tích vô hướng của chúng là:



Hình 2.10. Minh họa biến đổi hình học của phép phân tích suy biến (Phạm Đình Khanh, 2021 [190]).

$$y_j^T y_i = X_i^T U^T U X_j = X_i^T I_n X_j = X_i^T X_j \quad (2.22)$$

+ Phép nới rộng (scaling): Kết quả thu được sau phép xoay tiếp tục được nhân với ma trận đường chéo. Khi đó mỗi chiều của dữ liệu sẽ được scale lên số lần chính bằng giá trị của trị riêng nằm trên đường chéo chính.

+ Tiếp tục lại là một phép xoay: Sau phép nới rộng thì dữ liệu đã được chuyển về không gian thấp chiều. Ta lại tiếp tục thực hiện một phép xoay bằng cách nhân với ma trận V_{nn} .

Từ các tập số liệu TEC tính toán được như đã nêu trong phần 2.2.2, NCS sử dụng phương pháp phân tích EOF để mô hình hóa các giá trị TEC tính được từ số liệu GPS liên tục, kết quả được trình bày chi tiết trong chương 5.

Phương pháp phân tích EOF được sử dụng trong chương 5 của luận án được thiết kế từ hàm Matlab SVD.m.

Kết luận chương 2

Tập hợp số liệu của 30 trạm GPS ở khu vực Việt Nam và lân cận giai đoạn 2008-2021 sẽ được sử dụng để xây dựng các sơ đồ TEC hàng ngày cho phép nghiên cứu đặc trưng của dị thường ion hóa xích đạo khu vực Đông Nam Á ở chương 3. Đây là chuỗi số liệu GPS liên tục dài nhất được sử dụng ở Việt Nam cho đến nay. Lưu ý rằng dù rằng tất cả 30 trạm không đủ số liệu trong tất cả các ngày thuộc giai đoạn nói trên nhưng tập hợp số liệu có được đủ để xây dựng các sơ đồ TEC hàng ngày của khu vực trong cả giai đoạn nghiên cứu.

Các số liệu tải từ các website quốc tế (lich thiên văn vệ tinh, mô hình TEC toàn cầu CODG, F10.7, Dst, MEI.v2, gió vĩ hướng tầng bình lưu) là những số liệu chuẩn quốc tế được sử dụng rộng rãi trong nhiều cứu về điện ly, địa từ, khí quyển.

Chỉ số ROTI sẽ được tính toán để nghiên cứu đặc trưng phân bố của bất thường điện ly ban đêm ở khu vực Đông Nam Á (chương 4).

Phương pháp EOF được sử dụng để bước đầu nghiên cứu dự báo TEC khu vực Việt Nam. Đánh giá hiệu quả của các mô hình điện ly toàn cầu đối với khu vực Việt Nam, luận án so sánh giá trị TEC tính trực tiếp từ số liệu GPS với các giá trị TEC nhận được từ mô hình toàn cầu IRI-2016, CODG (chương 5).

Luận án sử dụng một số phương pháp tính toán số: phương pháp hợp đường cong, biến đổi wavelet chéo, tính phổ bằng phương pháp Lomb-Scargle, bộ lọc thông dải, phương pháp phân tích EOF. Đây là những phương pháp tính toán hiện đại mang lại hiệu quả cao trong xử lý số liệu, kết quả đạt được rất khách quan và tin cậy.

CHƯƠNG 3

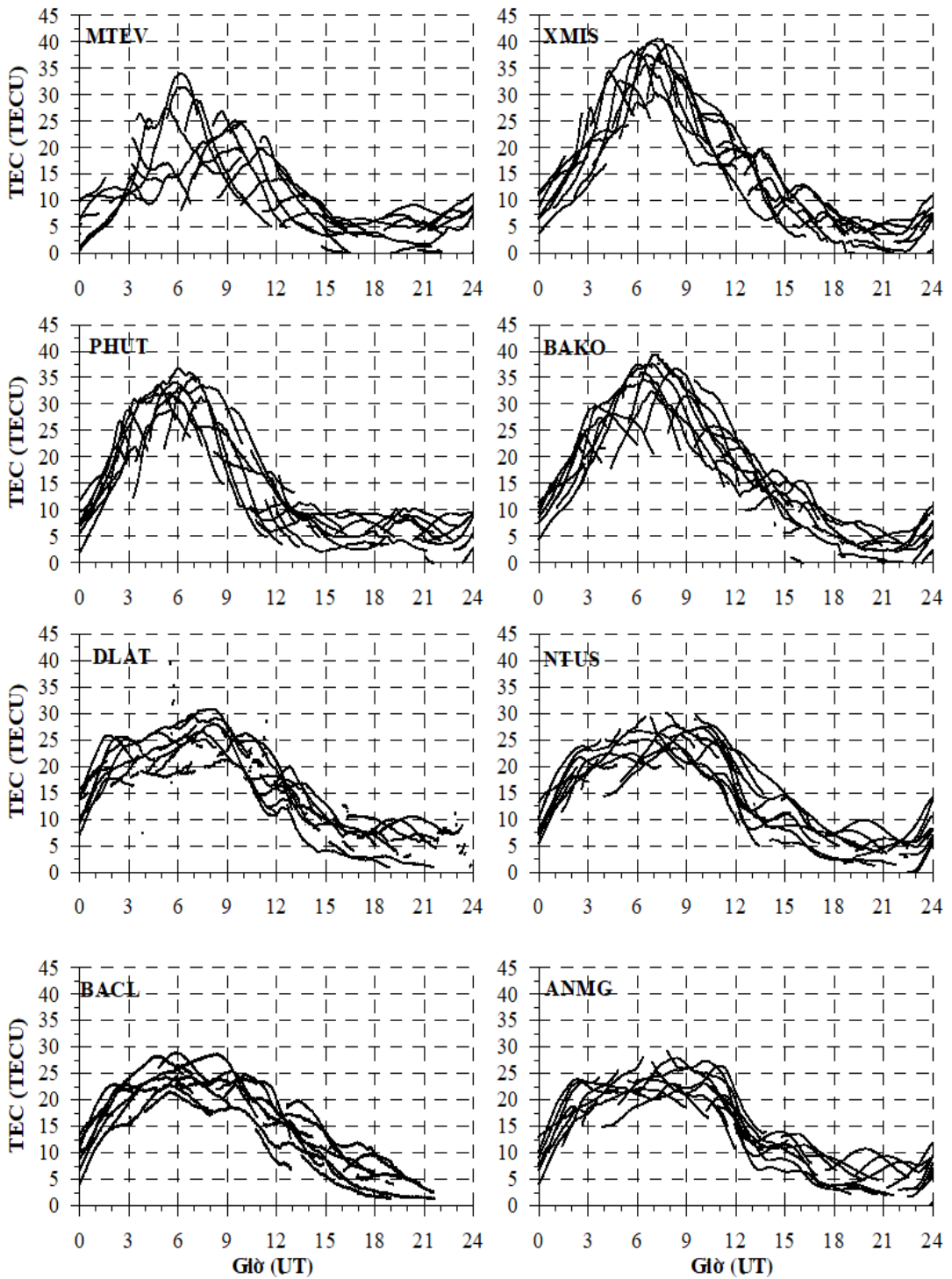
DI THƯỜNG ION HÓA XÍCH ĐẠO KHU VỰC ĐÔNG NAM Á

Biến động của hình thái cấu trúc EIA phụ thuộc vào nhiều yếu tố: hoạt tính mặt trời, trường từ trái đất, gió trung hòa tầng điện ly, gió thổi theo phương kinh tuyến... Ngoài ra, EIA còn có các dao động có tính chất chu kỳ liên quan đến các cơ chế vật lý rất phức tạp giữa tầng điện ly với tầng khí quyển bên dưới thông qua tác động của các yếu tố như: sóng hành tinh, sóng trọng lực, ENSO, triều khí quyển, hoạt động đối lưu,... Trong chương này, NCS trình bày các kết quả nghiên cứu đặc trưng biến thiên của các đỉnh dị thường ion hóa xích đạo và xác định các dao động chu kỳ chính của chúng, từ tập hợp giá trị TEC thu được từ mạng lưới máy thu GPS ở Việt Nam và lân cận giai đoạn 2008-2021. Việc phân tích đặc trưng biến đổi các đỉnh EIA trong mối quan hệ đặc trưng biến đổi ở thông lượng mặt trời F10.7, gió vĩ hướng tầng bình lưu xích đạo vùng nhiệt đới ở 50 hPa (~20 km) như đã được giới thiệu trong chương 2 sẽ cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa EIA với hoạt động mặt trời và tương tác có thể giữa tầng khí quyển bên dưới và tầng điện ly. Các kết quả nghiên cứu thu được đã sử dụng phương pháp tính toán TEC cùng với các phương pháp xử lý số liệu khác cũng được trình bày trong chương 2.

3.1. Biến động ngày đêm của TEC tại các trạm

Các tệp dữ liệu định dạng rinex thu thập được từ các trạm GPS liên tục ở Việt Nam và khu vực lân cận được lưu trữ tròn ngày theo giờ quốc tế UT. Các tệp số liệu niên giám Yuma cung cấp thông tin vệ tinh và các tệp TEC từ mô hình GIM/CODG Quốc tế cho từng ngày được sử dụng để tính TEC trong mỗi ngày đối với mỗi một trạm cũng được lưu trữ tròn ngày theo giờ quốc tế UT. Bằng cách sử dụng chương trình “*calcul_tec.m*” viết bằng phần mềm matlab NCS thu được các giá trị TEC trong mỗi một ngày tại mỗi một trạm được lưu trữ để thành lập các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ. Lưu ý rằng chương trình “*calcul_tec.m*” được sử dụng cho số liệu của một trạm thu GPS riêng biệt, không có độ lệch do phần cứng máy thu đã biết như đối với một trạm của mạng lưới IGS quốc tế. Do đó chương trình này có thể được sử dụng để tính toán TEC tuyệt đối của tầng điện ly với số liệu của trạm thu GPS bất kỳ, với điều kiện số liệu đầu vào ở định dạng rinex chuẩn với độ phân giải thời gian là 30 giây. Dưới đây là một ví dụ tính TEC bằng chương trình “*calcul_tec.m*” cho một ngày tại

một số trạm khu vực Đông Nam Á.



Hình 3.1. Kết quả tính toán TEC ngày 03/1/2021 (31/01/2021) tại một số trạm khu vực Đông Nam Á theo thứ tự lần lượt từ trái sang phải, từ trên xuống dưới: MTEV, XMIS, PHUT, BAKO, DLAT, NTUS, BACL, ANMG.

Hình 3.1 chỉ ra kết quả tính TEC vào ngày 31/03/2021 tại một số trạm: MTEV, PHUT, DLAT, BACL, ANMG, NTUS, BAKO và XMIS. Hình 3.1 cho thấy rằng,

TEC tại các trạm phản ánh rõ quy luật biến đổi theo thời gian ngày đêm: các giá trị TEC có xu thế tăng dần theo thời gian từ 00:00 UT (07:00 LT), đạt giá trị cực đại vào thời gian ban ngày khoảng 06:00- 08:00 UT (13:00-15:00 LT) sau đó giảm dần và có giá trị nhỏ nhất thời gian ban đêm khoảng 21:00-22:00 UT (04:00-05:00 LT). Biên độ biến thiên ngày đêm của TEC tại các trạm có sự khác biệt rõ rệt: đối với các trạm ở vùng vĩ độ thấp (PHUT, BAKO) có biên độ lớn hơn so với các trạm gần xích đạo (BACL, ANMG). Chúng ta có thể quan sát được điều này một cách rõ rệt hơn khi thành lập sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ cho khu vực Đông Nam Á. Nguyên nhân làm cho TEC đạt cực đại vào ban ngày là do quá trình quang ion hóa của bức xạ mặt trời diễn ra mạnh mẽ vào ban ngày dẫn đến TEC tăng lên và đạt cực đại. Tuy nhiên, cực đại TEC lại không xuất hiện vào thời điểm giữa trưa địa phương (12:00 LT) như lý thuyết của Chapman đã chỉ ra mà xảy ra vào khoảng 13:00-15:00 LT (sau thời điểm giữa trưa địa phương), điều này chứng tỏ các yếu tố ảnh hưởng lên tầng điện ly không chỉ có quá trình quang ion hóa của Mặt Trời mà còn bao gồm các yếu tố khác như: gió trong tầng điện ly, từ trường Trái Đất.... Ảnh hưởng của các yếu tố này có thể được làm sáng tỏ trong phần nghiên cứu về các đặc trưng biến thiên của đỉnh EIA. Mặc dù vào ban đêm, khi bức xạ mặt trời không còn đóng góp phần quan trọng trong quá trình tạo ion và khi mà quá trình sinh ion tạm thời dừng lại, quá trình va chạm và tái hợp ion chiếm ưu thế, tuy nhiên giá trị TEC vẫn được duy trì suốt đêm. Nguyên nhân của việc tồn tại TEC suốt đêm có thể là do gió khí quyển trung hòa trong mặt phẳng kinh tuyến. Ở vĩ độ trung bình, nhìn chung gió khí quyển trung hòa thổi về phía cực vào ban ngày, và thổi về phía xích đạo vào ban đêm. Do vậy, vào ban đêm, sự va chạm giữa các phần tử trung hòa và các ion sinh ra một lực đẩy plasma hướng lên phía trên dọc theo đường sức trường từ. Điều này cho phép duy trì plasma điện ly ở những độ cao lớn hơn, tại đó hệ số mất mát điện tử là đủ nhỏ để duy trì sự tồn tại mật độ điện tử ở những mức nào đó.

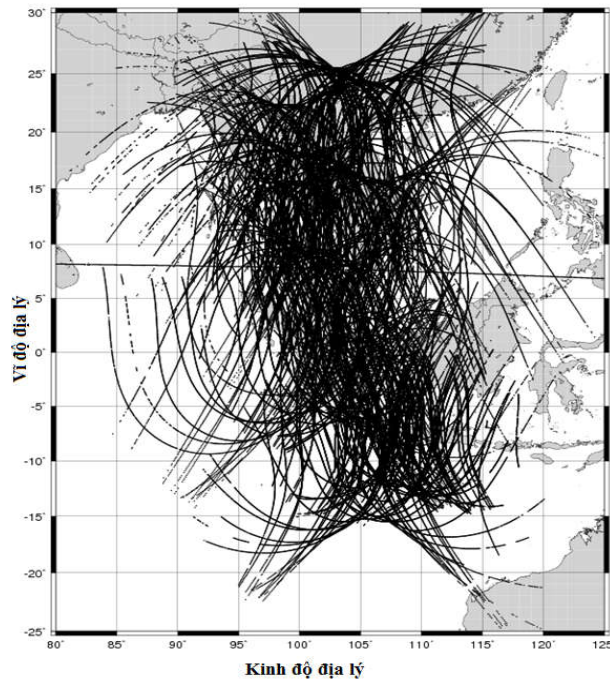
3.2. Đặc trưng dị thường ion hóa xích đạo khu vực Đông Nam Á

3.2.1. Các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ

Các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ hàng ngày được thành lập với mục đích quan sát được bức tranh phân bố TEC khu vực Đông Nam Á và nghiên cứu đặc trưng biến thiên theo thời gian của EIA.

Hình 3.2 biểu diễn vết của các vệ tinh GPS ở độ cao 400 km quan sát được từ

mạng lưới trạm GPS ở khu vực Đông Nam Á vào ngày 027/2021 (27/01/2021). Hình vẽ chỉ ra vết của các vệ tinh bao trùm khoảng rộng vĩ độ từ 25°S tới 30°N xung quanh khoảng kinh độ 105°E. Tại mỗi thời điểm quan sát mạng lưới các trạm GPS (hình 2.1) cho giá trị TEC ở khoảng 100 điểm, với số điểm thưa thớt như vậy việc thành lập sơ đồ TEC theo kinh vĩ độ sẽ có độ tin cậy không cao. Hơn nữa, nếu chúng ta sử dụng loại sơ đồ TEC theo kinh vĩ độ thì dữ liệu thời gian (có trong tính toán TEC) sẽ không được tận dụng một cách tối ưu.



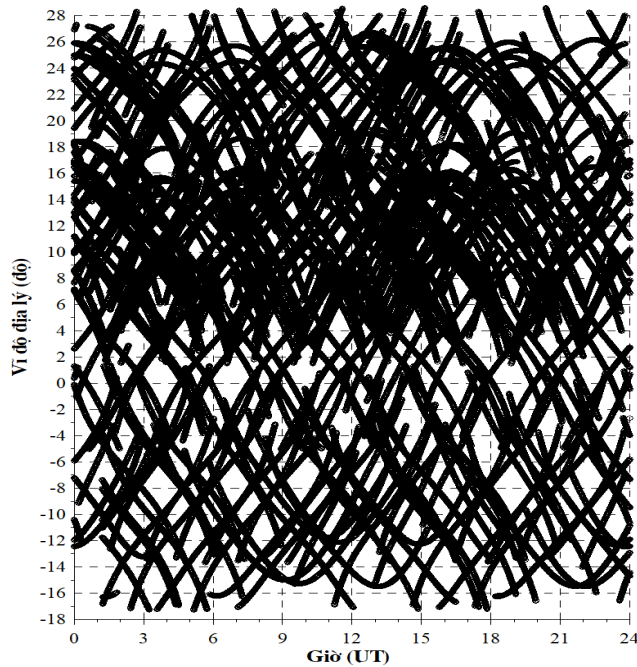
Hình 3.2. Vết của các vệ tinh ở độ cao 400 km nhìn từ mạng lưới trạm GPS khu vực Đông Nam Á (hình 2.1) vào ngày 027/2021 (27/01/2021).

Hình 3.3 biểu diễn phân bố vết vệ tinh cho 1 ngày theo thời gian và vĩ độ với góc nhìn vệ tinh $\alpha \geq 20^\circ$, cho thấy vết vệ tinh được phân bố đều hơn và dày đặc hơn trong khoảng vĩ độ từ 20°S tới 30°N. Do đó, chúng ta hoàn toàn có thể thành lập được các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ cho từng ngày từ số liệu của mạng lưới trạm GPS liên tục ở khu vực Đông Nam Á. Các sơ đồ được tạo ra như thế này sẽ có độ phân giải tốt hơn so với sơ đồ tạo ra theo kinh vĩ độ. Ngoài ra, từ các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ có thể xác định được thời gian xuất hiện của các đỉnh EIA. Các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ được thành lập theo các bước như sau:

1) Loại bỏ các giá trị TEC âm và các giá trị TEC tương ứng với góc nhìn vệ tinh $< 20^\circ$ (loại bỏ hiệu ứng đa đường) thu được tệp số liệu cho từng ngày đối với từng trạm dưới dạng 3 cột: thời gian, vĩ độ, TEC.

2) Gộp các tệp số liệu ở tất cả các trạm GPS trong cùng một ngày để tạo thành một tệp dữ liệu cho tất cả các trạm.

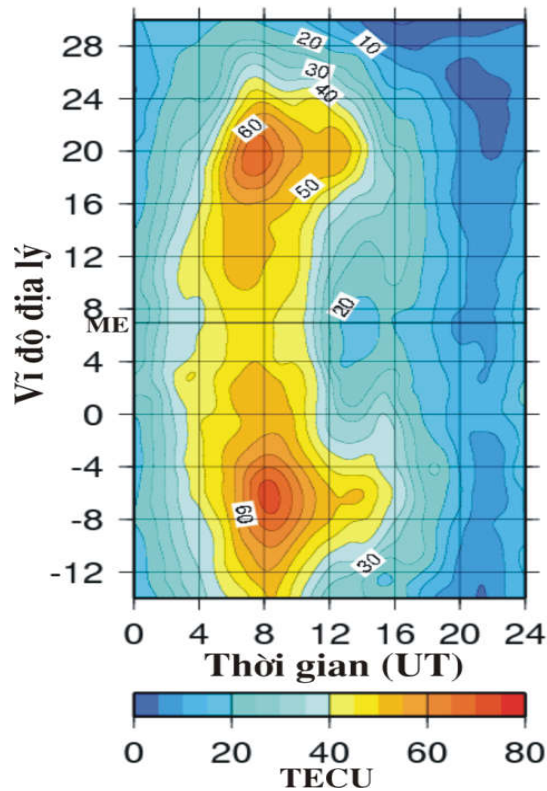
3) Do phân bố theo thời gian và vĩ độ của các điểm số liệu TEC không đều nên phương pháp trung bình trượt theo cửa sổ được sử dụng để tạo ra lưới số liệu gần vuông trước khi thực hiện việc lưới hóa bằng các phần mềm đồ họa.



Hình 3.3. Phân bố vết vệ tinh theo thời gian và vĩ độ quan sát được từ mạng lưới trạm GPS liên tục ở khu vực Đông Nam Á ngày 27/01/2021, góc nhìn vệ tinh $\geq 20^\circ$.

Bản chất của phương pháp trung bình trượt theo cửa sổ là sử dụng một lưới kích thước $m \times n$ (m là thời gian, n là vĩ độ) chuyển động trượt từ trái sang phải (0h \rightarrow 24h) và từ dưới lên trên (vĩ độ nhỏ nhất \rightarrow vĩ độ lớn nhất) với các bước (x) và (y). Trong mỗi một lần trượt, giá trị của thời gian, vĩ độ và TEC là giá trị trung bình được tính toán từ tất cả dữ liệu bên trong cửa sổ. Mỗi giá trị trung bình này đại diện cho một ô lưới trong toàn bộ lưới dữ liệu. Trong khuôn khổ của luận án, NCS sử dụng lưới kích thước là $1^\circ \times 1h$ với bước trượt thời gian $x=0.75h$, vĩ độ $y=0.75^\circ$. Sau khi đã lưới hóa được lưới số liệu, các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ được vẽ bằng các phần mềm đồ họa. Hình 3.4 là một ví dụ về sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ ngày 27/01/2021 được thành lập theo phương pháp trình bày ở trên. Hình này cho thấy rõ hình thái cấu trúc dị thường ion hóa xích đạo [1,2] với hai đỉnh gần như đối xứng qua xích đạo từ. Các đỉnh này được đặc trưng bởi các tham số: thời gian xuất hiện, vị trí (vĩ độ), biên độ TEC của các đỉnh EIA và do đó nó có thể được sử dụng để nghiên cứu

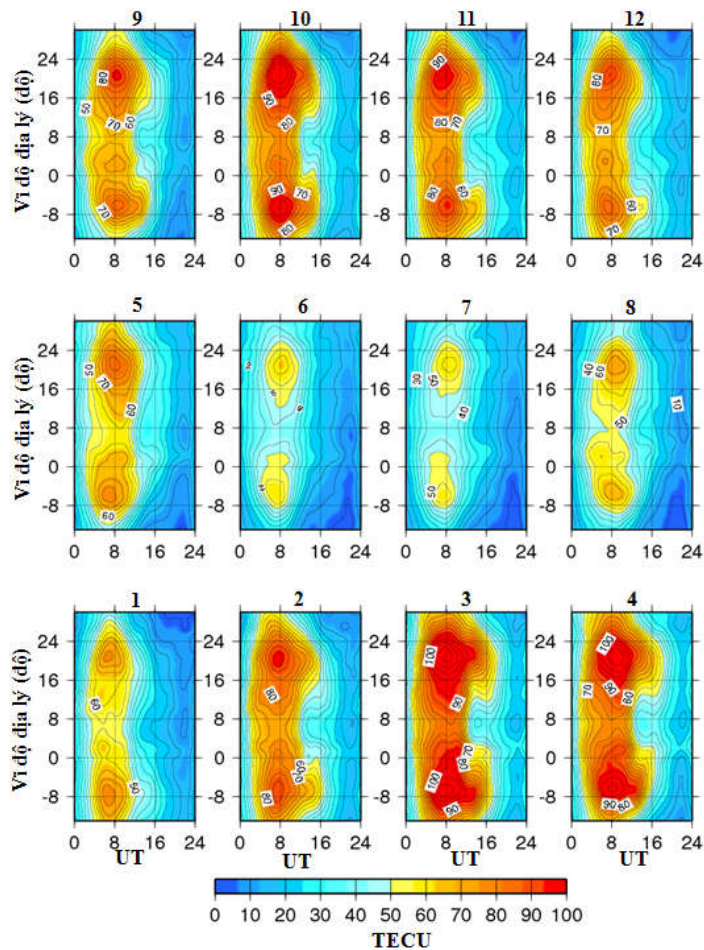
đặc trưng các đỉnh EIA. Từ các sơ đồ TEC hàng ngày hoàn toàn có thể xây dựng các sơ đồ TEC trung bình tháng, trung bình năm... phục vụ các nghiên cứu tiếp theo. NCS đã xây dựng các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ hàng ngày cho cả chuỗi thời gian nghiên cứu 2008-2021.



Hình 3.4. Sơ đồ VTEC theo thời gian và vĩ độ ngày 30/10/2021 ở khu vực Đông Nam Á. Kí hiệu ME: xích đạo từ.

Hình 3.5 biểu diễn các sơ đồ TEC trung bình tháng theo thời gian và vĩ độ trong năm 2014. Các tháng được đánh số tăng dần theo thứ tự từ trái sang phải và từ dưới lên trên. Trục hoành biểu diễn thời gian theo giờ UT ($LT=UT+7$), trục tung biểu diễn vĩ độ địa lý, khoảng cách giữa các đường đẳng trị là 5 TECU. Xích đạo từ ở vào khoảng $7^{\circ}N$ theo mô hình IGRF2015. Các sơ đồ TEC được vẽ cùng một thang màu để có thể dễ dàng so sánh sự biến đổi từ tháng này qua tháng khác. Hình 3.5 chỉ ra rõ ràng TEC có hai đỉnh cực đại ở hai phía của xích đạo từ, cụ thể ở phía Bắc xích đạo từ cực đại vào khoảng $17-23^{\circ}N$ còn ở phía Nam xích đạo từ vào khoảng $5-7^{\circ}S$. Kết quả nghiên cứu này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Rama Rao et al. (2006) [56] về đỉnh EIA ở khu vực Ấn Độ và nghiên cứu của Lê Huy Minh et al. (2014) [149] về TEC ở khu vực Đông Nam Á trong giai đoạn 2006-2011. Các kết quả tính toán TEC hàng ngày ở tất cả các trạm và các sơ đồ TEC khu vực được lưu trữ trong các thư mục

máy tính, hoàn toàn có thể sử dụng cho các nghiên cứu tiếp theo.



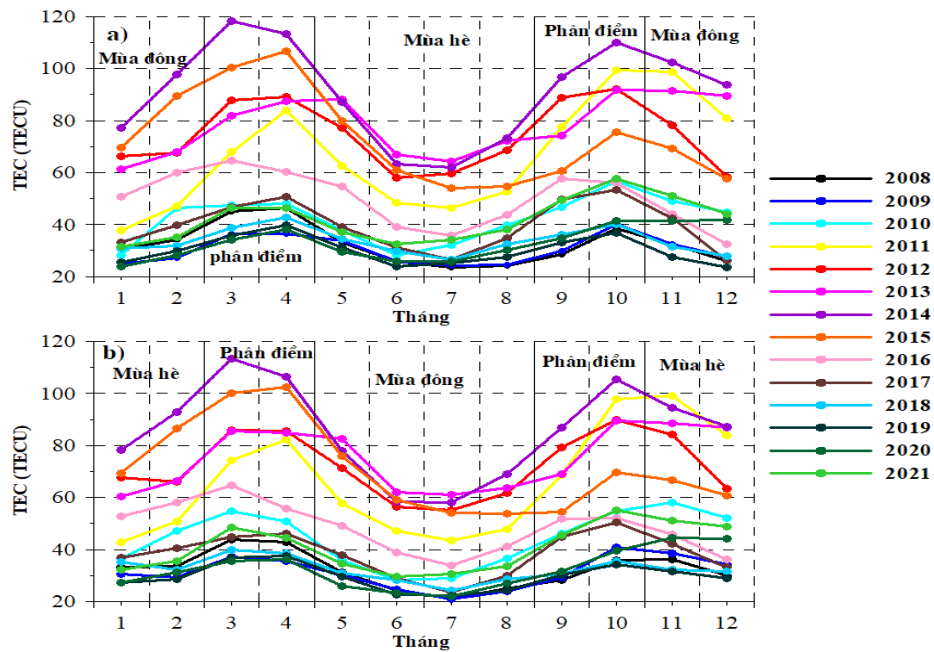
Hình 3.5. Sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ trung bình tháng năm 2014, khoảng cách giữa các đường đẳng trị là 5 TECU.

EIA quan sát được ở hình 3.5 được hình thành bởi cơ chế vòi phun. Cơ chế này được giải thích như sau: trong vùng xích đạo, đường sức trường từ Trái Đất gần như nằm ngang, vào ban ngày do nung nóng của bức xạ mặt trời và các dao động triều trong phần thấp của tầng điện ly làm cho plasma chuyển động lên trên cắt ngang các đường sức từ trường, quá trình này đã tạo nên một bản dòng trong lớp E của tầng điện ly. Do tương tác với trường từ nằm ngang đã buộc các plasma điện ly tiếp tục chuyển động lên trên đi vào vùng F của tầng điện ly. Sau đó dưới tác dụng của gradient áp suất và trọng lực chúng khuếch tán về phía cực dọc theo các đường sức từ trường và tập trung ở khoảng $\pm 15^{\circ}$ - 20° tính từ xích đạo từ, các đỉnh dị thường điện ly xích đạo được hình thành. Biến động hình thái cấu trúc EIA phụ thuộc vào nhiều yếu tố: hoạt tính mặt trời, trường từ Trái Đất, gió trung hòa trong tầng điện ly..., do vậy nghiên cứu những đặc trưng của các đỉnh EIA sẽ cho chúng ta hiểu biết về mối quan hệ giữa cấu

trúc EIA với các yếu tố đã nêu. Như trên đã nói các đỉnh EIA được đặc trưng bởi 3 tham số: biên độ, vĩ độ và thời gian xuất hiện. Đặc trưng biến thiên của chúng sẽ được trình bày ở phần tiếp theo.

3.2.2. Biến thiên theo mùa và biến thiên theo hoạt tính mặt trời

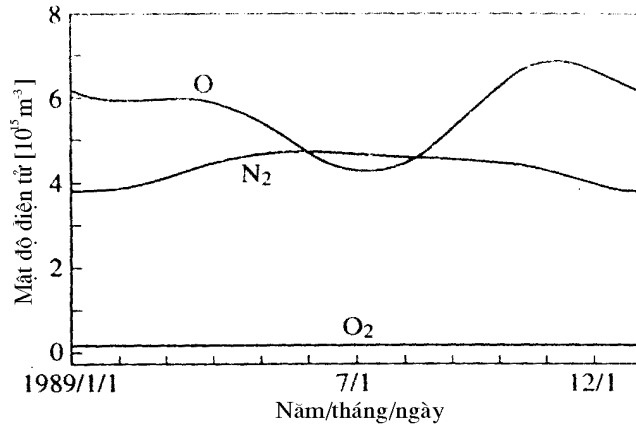
Để nghiên cứu đặc trưng biến thiên mùa của 2 đỉnh EIA, các tham số trung bình tháng của các đỉnh được biểu diễn theo thời gian và theo các mùa trong năm, kết quả được thể hiện trên các hình 3.6, 3.7, 3.8, 3.9.



Hình 3.6. Biến thiên trung bình hàng tháng biên độ TEC của 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2008- 2021: a) đỉnh bắc, b) đỉnh nam.

Hình 3.6 biểu diễn biến thiên của biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA trong giai đoạn từ 2008- 2021, biên độ TEC của 2 đỉnh EIA đều đạt cực đại vào các tháng phân điểm (tháng 3, 4, 9, 10), đạt cực tiểu vào các tháng mùa hè/mùa đông (tháng 5, 6, 7, 8) ở đỉnh Bắc/đỉnh Nam. Đặc trưng quan sát này được gọi là dị thường mùa của EIA. Đây là một đặc trưng quan trọng trong tầng điện ly vùng vĩ độ thấp và xích đạo. Theo lý thuyết về hợp phân ion, sự gia tăng của oxy nguyên tử tỉ lệ thuận với sự tăng ion, sự gia tăng của nito phân tử tỉ lệ thuận với sự tái tổ hợp ion- tỉ lệ nghịch với sự gia tăng ion; tỉ số O/N_2 tăng cũng đồng nghĩa với việc oxy nguyên tử tăng và nito phân tử giảm dẫn đến mật độ điện tử cao [20]. Sử dụng mô hình điện ly toàn cầu MSIS-86 (hình 3.7) để nghiên cứu biến thiên mùa của các hợp phân khí trong tầng điện ly Ondoh et al. (2001) [191] đã chỉ ra rằng vào mùa hè mật độ nguyên tử khí oxy giảm trong khi đó

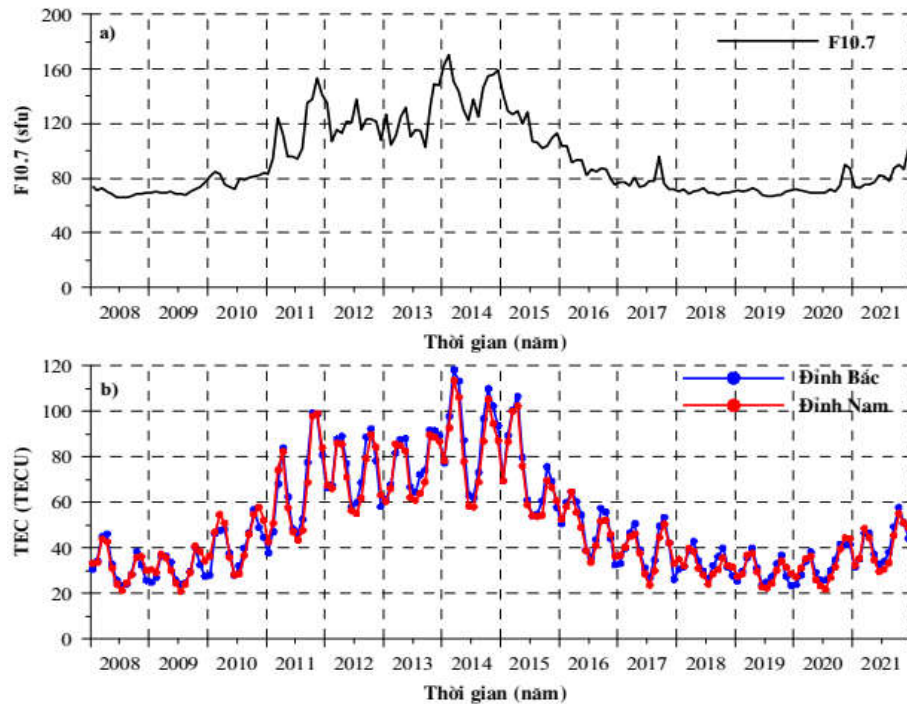
mật độ phân tử khí nitơ lại gia tăng; vào thời kỳ phân điểm mật độ nguyên tử khí O tăng và mật độ phân tử khí N₂ giảm. Do đó, vào mùa hè tốc độ sinh ion giảm kết hợp với tốc độ tái tổ hợp ion tăng dẫn đến TEC tại 2 đỉnh EIA giảm và đạt cực tiểu, vào thời kỳ phân điểm TEC tại 2 đỉnh EIA gia tăng và đạt cực đại.



Hình 3.7. Biến thiên mùa của các thành phần khí trung hòa theo mô hình MSIS-86 (Ondoh et al. [191]).

Để nghiên cứu biến thiên theo hoạt tính mặt trời của các đỉnh EIA, NCS biểu diễn thông lượng mặt trời F10.7 và biên độ TEC hàng tháng tại 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021 trên hình 3.8a, b. Hình 3.8 cho thấy biên độ TEC ở 2 đỉnh EIA phụ thuộc vào hoạt động mặt trời rất rõ rệt, biên độ TEC giảm dần khi hoạt động mặt trời giảm và ngược lại. Trong giai đoạn 2008-2021 có 2 chu kỳ hoạt động mặt trời: chu kỳ thứ 24 (2008-2018) và chu kỳ thứ 25 (2019 trở đi). Trong giai đoạn 2008-2009 rơi vào pha cực tiểu của hoạt động mặt trời, biên độ TEC của 2 đỉnh EIA nhỏ. Vào năm 2010, thông lượng mặt trời bắt đầu gia tăng và cho đến năm 2014 nó đạt cực đại, trong giai đoạn này biên độ TEC của EIA ở cả 2 đỉnh cũng gia tăng và lớn nhất vào năm 2014. Trong khoảng thời gian từ 2016-2018, hoạt động mặt trời tiến vào pha giảm, biên độ TEC của các đỉnh EIA là nhỏ. Sang đến chu kỳ thứ 25, năm 2019-2020 là thời kỳ hoạt tính mặt trời cực tiểu, cuối 2020 bắt đầu ở giai đoạn đi lên của hoạt tính mặt trời, biên độ TEC ở cả hai đỉnh EIA có giá trị nhỏ và sau đó có xu thế tăng lên. Xu thế biến thiên của các giá trị TEC của 2 đỉnh EIA phù hợp với chu kỳ 11 năm hoạt động mặt trời cũng dễ hiểu do khi hoạt tính mặt trời gia tăng, quá trình quang ion hóa gia tăng, mật độ điện tử tạo thành trong tầng điện ly cũng gia tăng và ngược lại. Hệ số tương quan giữa biên độ TEC của cả 2 đỉnh EIA và thông lượng mặt trời ~ 0.90 . Kết quả tính tương quan của NCS cũng khá phù hợp với kết quả trong công bố của Le Huy Minh et

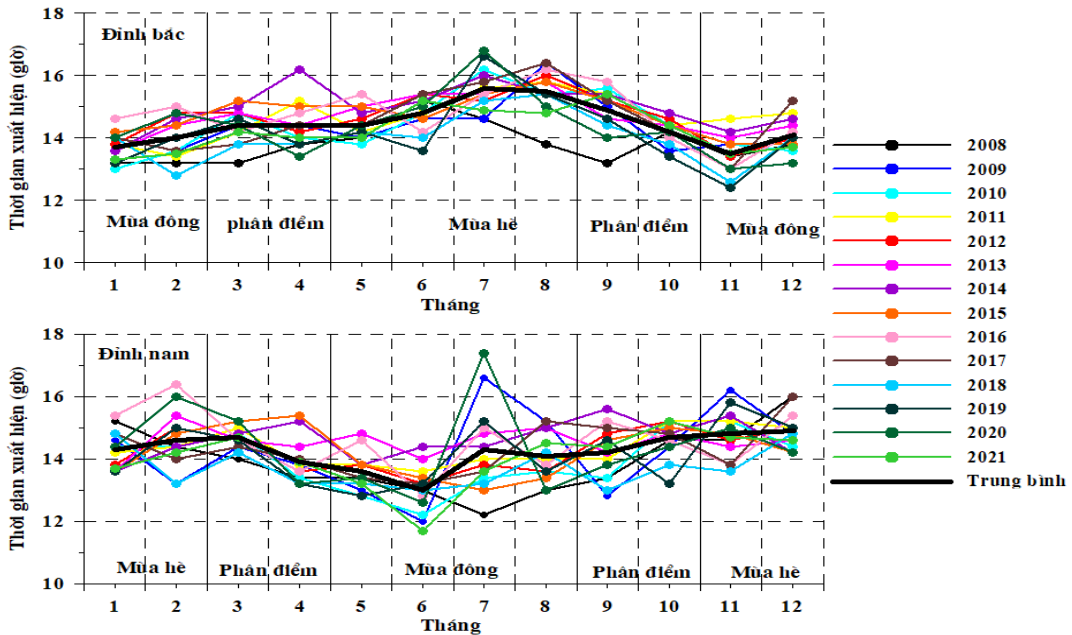
al. (2016a) [6] khi tính hệ số tương quan giữa biên độ của 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2006-2013 với số vết đen mặt trời bằng ~ 0.9 . Mỗi tương quan giữa biên độ TEC tại các đỉnh EIA với thông lượng mặt trời F10.7 dường như tốt hơn một chút so với mối tương quan giữa tần số tới hạn của lớp F₂ tại Phú Thụy (Hà Nội)- vị trí gần đỉnh Bắc EIA- và số vết đen mặt trời bằng 0.84 [147].



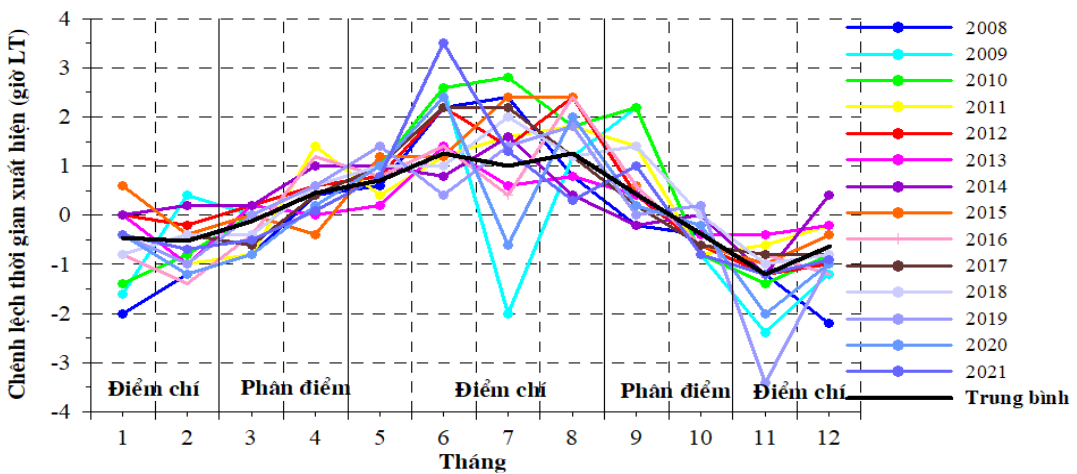
Hình 3.8. Biến thiên hàng tháng của các tham số giai đoạn 2008-2021: a) thông lượng mặt trời F10.7, b) biên độ TEC của 2 đỉnh EIA.

Ngoài đặc trưng biến thiên mùa và biến thiên theo hoạt tính mặt trời như đã nêu ở trên, biên độ TEC tại các đỉnh EIA còn thể hiện sự bất đối xứng phân điểm. Trong năm 2008, Mặt Trời hoạt động cực tiểu, biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA vào thời kỳ xuân phân (tháng 3, 4) lớn hơn thu phân (tháng 9, 10). Trong pha đi lên của hoạt động mặt trời (2009-2013, 2020-2021), biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA vào thời kỳ thu phân lớn hơn xuân phân. Trong pha đi xuống của hoạt động mặt trời (2014-2019) thì ngược lại, biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA vào thời kỳ xuân phân lớn hơn thu phân. Những quan sát này chứng tỏ biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA vào thời kỳ phân điểm thay đổi theo mức độ hoạt động mặt trời. Những kết quả này của luận án phù hợp với những kết quả nghiên cứu của Le Huy Minh et al. [6,149]. Ngoài ra NCS cũng nhận thấy đặc trưng biến thiên mùa của biên độ TEC tại hai đỉnh EIA cũng tương tự đặc trưng của tần số tới hạn của lớp F₂ (f_oF_2) quan sát được tại Phú Thụy [148]. Bất đối xứng của các biên độ EIA ở

hai phân điểm thường được cho là liên quan với bất đối xứng của gió trung hòa ở hai phân điểm [192], tuy nhiên tính toán của Maruyama et al. [192] mới chỉ thực hiện đối với pha đi xuống của hoạt tính mặt trời, cũng cần phải kiểm nghiệm điều này đối với pha đi lên. Ngoài ra còn một số yếu tố khác ảnh hưởng tới sự bất đối xứng giữa hai phân điểm: trường điện thể hiện qua trôi dạt plasma ($\vec{E} \wedge \vec{B}$), nhiệt độ nhiệt quyển và tỷ số O/N_2 đã nêu ở trên [193].



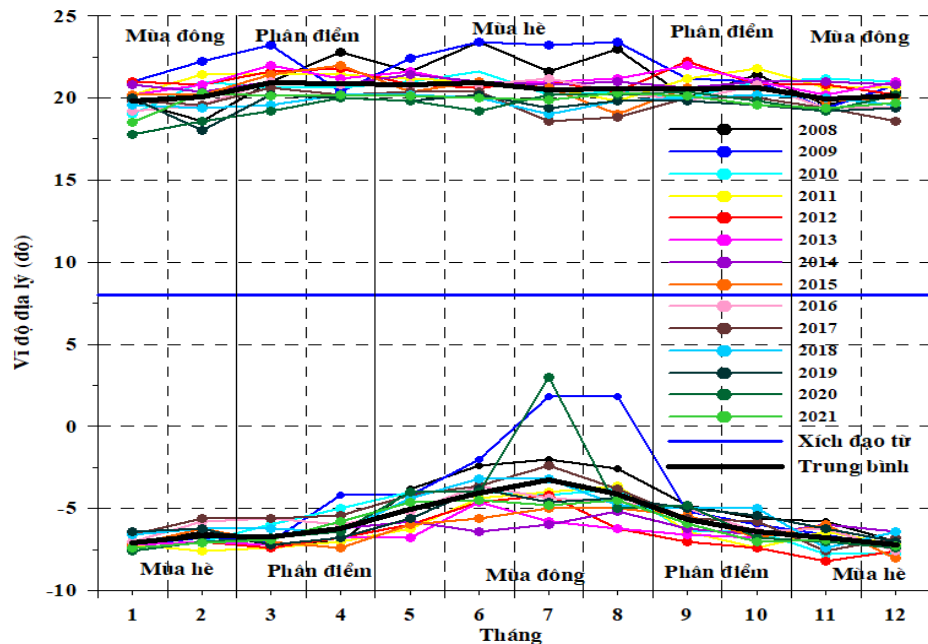
Hình 3.9. Thời gian xuất hiện 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2008- 2021.



Hình 3.10. Chênh lệch thời gian giữa 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008- 2021.

Hình 3.9 biểu diễn thời gian xuất hiện của 2 đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, cả 2 đỉnh EIA có xu thế xuất hiện sớm hơn vào mùa đông so với các mùa khác trong năm. *Hình 3.10* chỉ ra chênh lệch thời gian giữa các đỉnh EIA, vào các tháng mùa hè của bán cầu Bắc (hay các tháng mùa đông của bán cầu Nam: tháng 5, 6, 7, 8), $\Delta t > 0$

điều đó chứng tỏ rằng đỉnh Bắc xuất hiện muộn hơn đỉnh Nam; vào các tháng mùa đông của bán cầu Bắc (tháng 1, 2, 11, 12) (hay các tháng mùa hè của bán cầu Nam), $\Delta t < 0$ điều đó chứng tỏ rằng đỉnh Bắc xuất hiện sớm hơn so với đỉnh Nam.



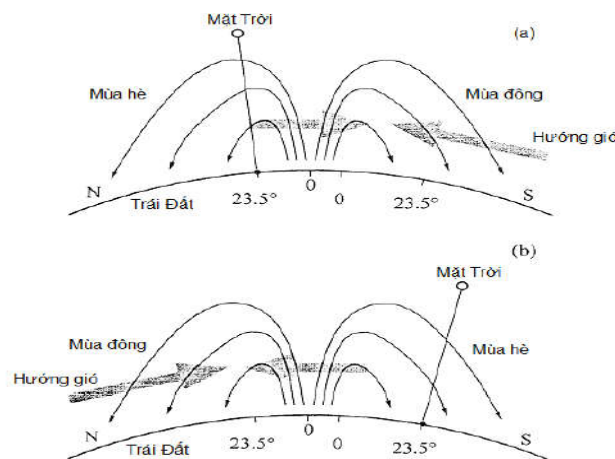
Hình 3.11. Vĩ độ các đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021, đỉnh Bắc ở phía trên và đỉnh Nam ở phía dưới.

Hình 3.11 chỉ ra vị trí xuất hiện của các đỉnh EIA, chúng có xu thế tiến về phía xích đạo vào mùa đông và tiến về phía cực vào mùa hè và phân điểm, xu thế biến thiên này thể hiện ở đỉnh Nam rõ ràng hơn so với đỉnh Bắc.

Những kết quả nghiên cứu về đặc trưng biến thiên theo mùa của các tham số vĩ độ và thời gian xuất hiện của các đỉnh EIA trong luận án phù hợp với những nghiên cứu trước đó [6,52].

Đặc trưng biến thiên mùa của 2 đỉnh EIA không chỉ được quan sát ở tham số biên độ TEC mà còn thể hiện ở tham số vị trí và thời gian xuất hiện của chúng. Mô hình tổng quát là sự tổ hợp của lý thuyết gió trung hòa thổi qua xích đạo, vị trí điểm dưới mặt trời và gió trung hòa thổi từ cực về phía xích đạo vào thời kỳ điểm chí (hình 3.12) được xem xét để giải thích biến thiên mùa của 2 tham số thời gian và vĩ độ của 2 đỉnh EIA (Tsai et al., 2001 [52]). Hình 3.12 mô tả vị trí xích đạo từ (điểm O ở giữa), vị trí xích đạo địa lý (điểm O bên phải) và đường chí tuyến chỉ điểm dưới mặt trời, hướng của gió trung hòa thổi qua xích đạo (mũi tên ở giữa hình) và hướng gió thổi từ vùng cực về phía xích đạo một cách tương ứng (mũi tên phía bên phải), hiệu ứng vòi phun trong tầng điện ly (các đường vòng cung có đánh dấu các mũi tên) đối với 2 trường

hợp khi bán cầu Bắc vào mùa hè (hình 3.12a) và khi bán cầu Bắc vào mùa đông (hình 3.12b). Gió trung hòa thổi qua xích đạo theo cơ chế vật lý như sau: khi gió trung hòa thổi từ bán cầu mùa hè sang bán cầu mùa đông sẽ vận chuyển các ion từ bán cầu mùa hè sang bán cầu mùa đông, điều này là nguyên nhân cản trở đỉnh dị thường ở bán cầu mùa hè và làm gia tăng đỉnh dị thường ở bán cầu mùa đông. Ngoài ra, theo lý thuyết gió trung hòa thổi từ vùng cực về phía xích đạo ở bán cầu mùa đông sẽ giúp duy trì mật độ điện tử cho đỉnh dị thường ở bán cầu mùa đông và đẩy đỉnh dị thường về phía xích đạo. Những cơ chế tác động này là nguyên nhân chúng ta quan sát được vị trí đỉnh dị thường nằm gần xích đạo hơn vào mùa đông.



Hình 3.12. Mô hình tổ hợp lý thuyết gió trung hòa thổi qua xích đạo, vị trí điểm gần mặt trời và gió thổi từ vùng cực về phía xích đạo vào thời kỳ điểm chí:

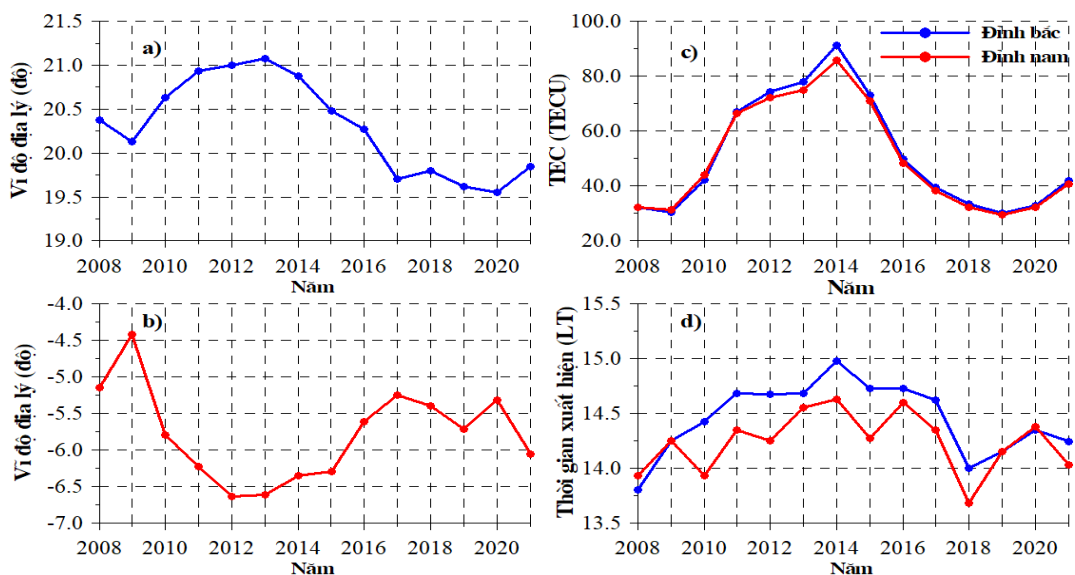
a) hạ chí nằm ở bán cầu Bắc, b) hạ chí nằm ở bán cầu Nam (Tsai et al. [52]).

Hình 3.12 cũng chỉ ra rằng ở bán cầu Bắc, vào mùa hè vị trí điểm dưới Mặt Trời gần với xích đạo từ và vào mùa đông nó xa xích đạo từ. Khi điểm dưới mặt trời nằm ở vĩ độ trung bình và không gần với xích đạo từ (mùa đông ở bán cầu Bắc) khi đó quá trình quang ion hóa và quá trình vận chuyển plasma tầng điện ly xích đạo chiếm ưu thế và thời điểm đạt cực đại sẽ vào khoảng giữa trưa địa phương (12:00 LT). Mặt khác khi điểm gần mặt trời gần với xích đạo từ (mùa hè ở bán cầu Bắc) làm tăng quá trình khuếch tán dẫn đến quá trình tái tổ hợp các ion và electron gia tăng điều này làm suy giảm đáng kể giá trị TEC. Quá trình khuếch tán chiếm ưu thế hơn so với quá trình quang ion hóa mặt trời và quá trình vận chuyển plasma xích đạo tầng điện ly trong vùng này, thời điểm xuất hiện đỉnh EIA sẽ muộn hơn so với mùa đông.

3.2.3. Biến thiên hàng năm của các đỉnh EIA

Để nghiên cứu biến thiên hàng năm của 2 đỉnh EIA, các tham số biên độ, thời

gian, vĩ độ của 2 đỉnh EIA được tính trung bình hàng năm, kết quả được minh họa trên hình 3.13. Các hình 3.13a,b chỉ ra rằng, vào các năm 2008, 2009, 2019 và 2020 là các năm mặt trời hoạt động cực tiểu, 2 đỉnh EIA có xu thế dịch chuyển về phía xích đạo. Trong giai đoạn 2010-2015 là giai đoạn mặt trời hoạt động cực đại, cả 2 đỉnh có xu thế dịch chuyển về phía cực. Sang đến năm 2016 bắt đầu vào pha đi xuống của chu kỳ hoạt động mặt trời thứ 24, cả 2 đỉnh EIA lại có xu thế tiến về phía xích đạo trong giai đoạn từ 2016-2018. Tiếp đến chu kỳ thứ 25 của hoạt động mặt trời, trong giai đoạn từ 2019-2020 mặt trời hoạt động yếu, xu thế dịch chuyển về phía xích đạo ở cả 2 đỉnh EIA vẫn tiếp diễn. Hoạt động mặt trời bắt đầu gia tăng vào năm 2021, một lần nữa 2 đỉnh EIA lại có xu thế dịch chuyển về phía cực. Hình 3.13c chỉ ra biên độ TEC biến thiên hàng năm tại 2 đỉnh dị thường, xu thế biến thiên hàng năm của chúng cũng thể hiện rõ quy luật phụ thuộc vào chu kỳ hoạt động mặt trời. Vào những năm Mặt Trời hoạt động mạnh 2010- 2016 biên độ lớn và đạt cực đại vào năm 2014, vào những năm Mặt Trời hoạt động yếu 2008, 2009, 2018, 2019, biên độ TEC nhỏ. Hình 3.13d chỉ ra thời gian xuất hiện 2 đỉnh EIA, ở hầu hết các năm, đỉnh Nam có xu thế xuất hiện muộn hơn đỉnh Bắc; vào những năm mặt trời hoạt động cực tiểu (2008, 2009, 2019, 2020) 2 đỉnh có xu thế xuất hiện cùng thời điểm.



Hình 3.13. Biến thiên hàng năm của các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021:

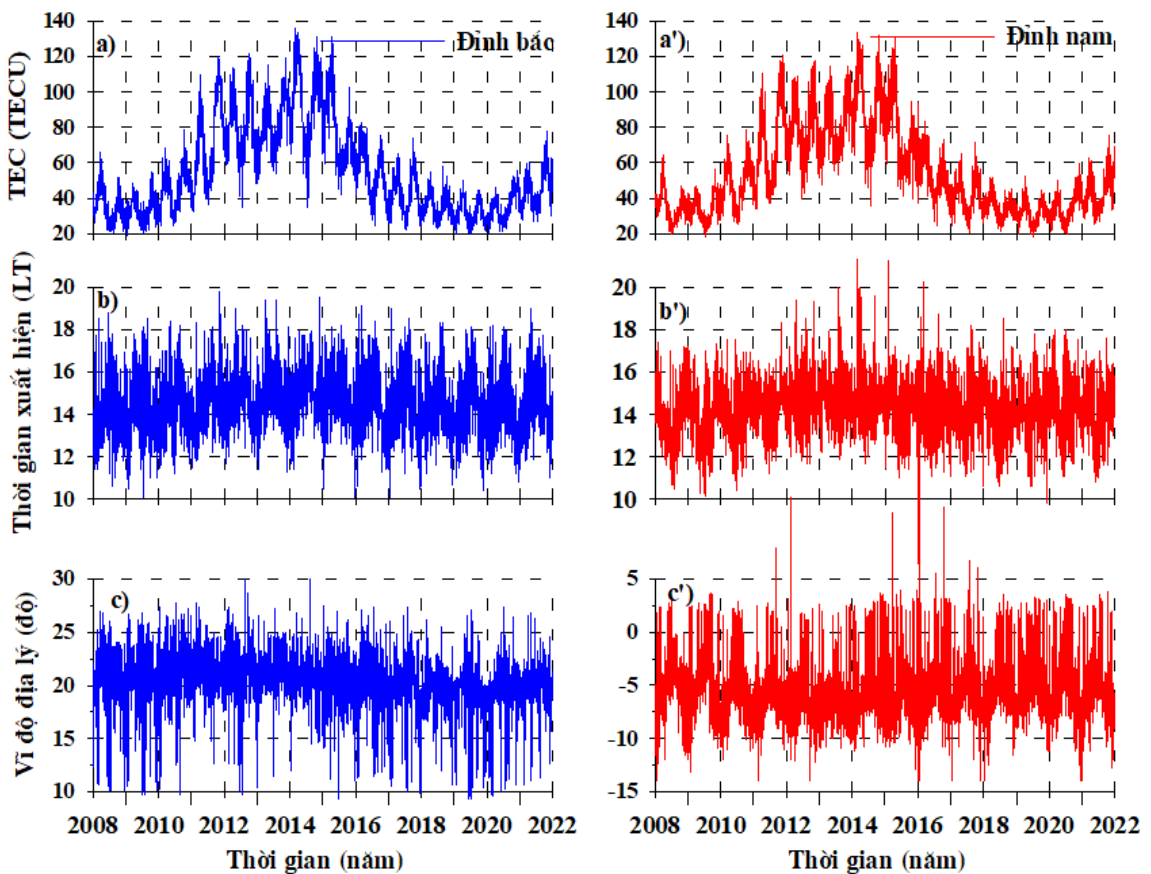
a, b) vĩ độ đỉnh Bắc, đỉnh Nam, c) biên độ, d) thời gian xuất hiện.

Để nghiên cứu chi tiết hơn về đặc trưng dao động theo thời gian của các tham số đỉnh EIA, NCS tiến hành phân tích phổ chuỗi thời gian của các tham số đỉnh và nghiên cứu đặc trưng biến đổi theo thời gian của các dao động ở các chu kỳ cơ bản

tương ứng.

3.3. Các dao động tuần hoàn của các đỉnh EIA khu vực Đông Nam Á

Trong phần này chuỗi thời gian hàng ngày của các tham số: biên độ, vĩ độ và thời gian xuất hiện các đỉnh EIA (*hình 3.14*) được sử dụng. Trong phần lớn các ngày 2 đỉnh EIA hoàn toàn phân biệt. Tuy nhiên cũng có một số ngày EIA bị suy biến đỉnh Nam hoàn toàn biến mất chỉ tồn tại đỉnh Bắc, ví dụ ở ngày đầu tiên trong pha hồi phục của trận bão từ tháng 03/2015 (18/03/2015) [150], trong trường hợp đó các tham số đỉnh Nam được lấy như là các tham số đỉnh Bắc. Những trường hợp như vậy rất ít xảy ra nên không ảnh hưởng tới các kết quả phân tích dưới đây. Bên cạnh đó chuỗi số liệu F10.7 hàng ngày giai đoạn 2008-2021 (*hình 3.15*) cũng được sử dụng.



Hình 3.14. Biến thiên hàng ngày của các tham số 2 đỉnh giai đoạn 2008-2021: a, a') lần lượt là biên độ đỉnh Bắc, đỉnh Nam; b, b') lần lượt là thời gian xuất hiện đỉnh Bắc, đỉnh Nam; c, c') lần lượt là vĩ độ đỉnh Bắc, đỉnh Nam.

Để xác định các chu kỳ dao động trong chuỗi số liệu các tham số đỉnh EIA các bước xử lý sau được thực hiện (Mo et al., 2014 [194]):

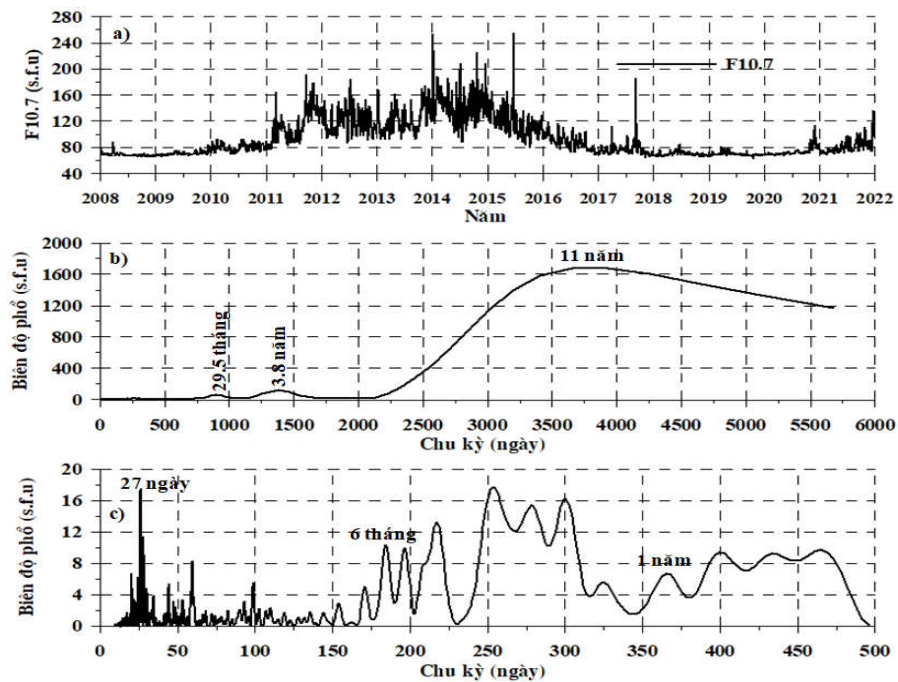
1) Xấp xỉ chuỗi thời gian bằng một đường thẳng, sau đó lấy chuỗi thời gian gốc trừ đi chuỗi thời gian đã xấp xỉ và thu được phần dư. Sử dụng phương pháp biểu đồ

chu kỳ Lomb-Scargle đối với phần dư để tìm ra các chu kỳ.

2) Sử dụng phương pháp trung bình trượt đối với chuỗi phần dư thứ nhất với cửa sổ trượt bằng chu kỳ cần nghiên cứu với mục đích là để làm trơn chuỗi số liệu.

3) Tìm phần dư thứ hai bằng cách lấy chuỗi số liệu phần dư thứ nhất trừ đi chuỗi số liệu phương pháp trung bình trượt thu được ở bước trên.

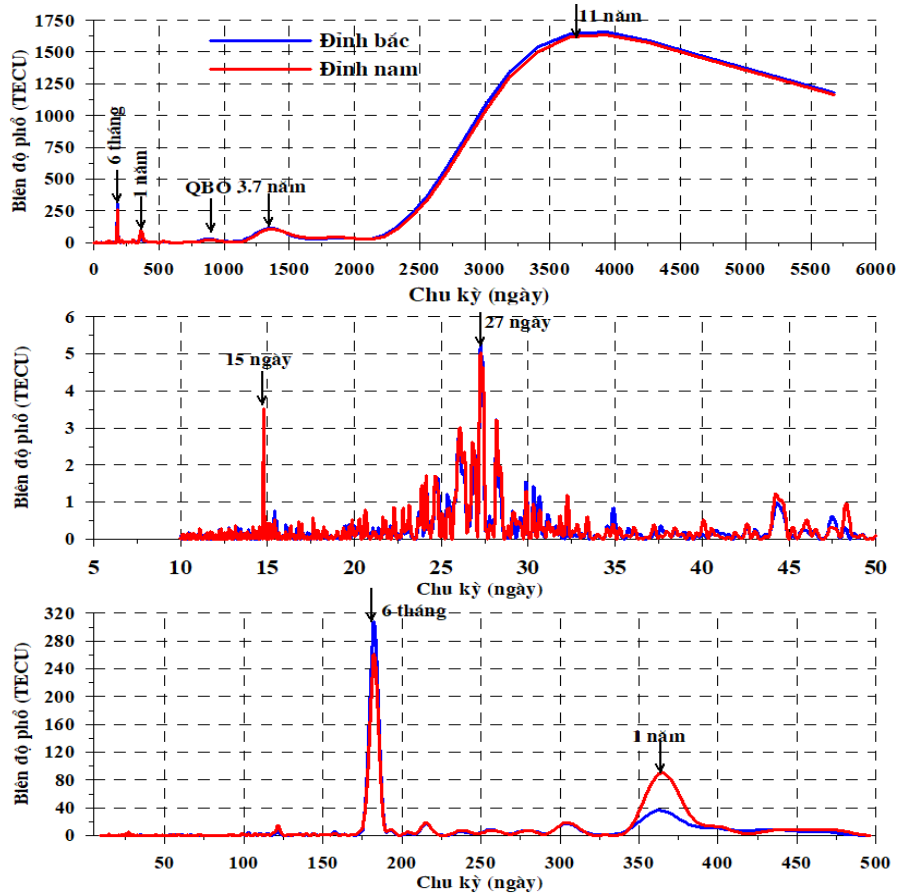
4) Sử dụng bộ lọc dải đối với chuỗi số liệu phần dư thứ hai để tách ra các dao động có chu kỳ mong muốn với một nguyên tắc chung: sử dụng chu kỳ trung tâm bằng chu kỳ cần tách, độ rộng cửa sổ được chọn thích hợp để bao trùm chu kỳ cần tách.



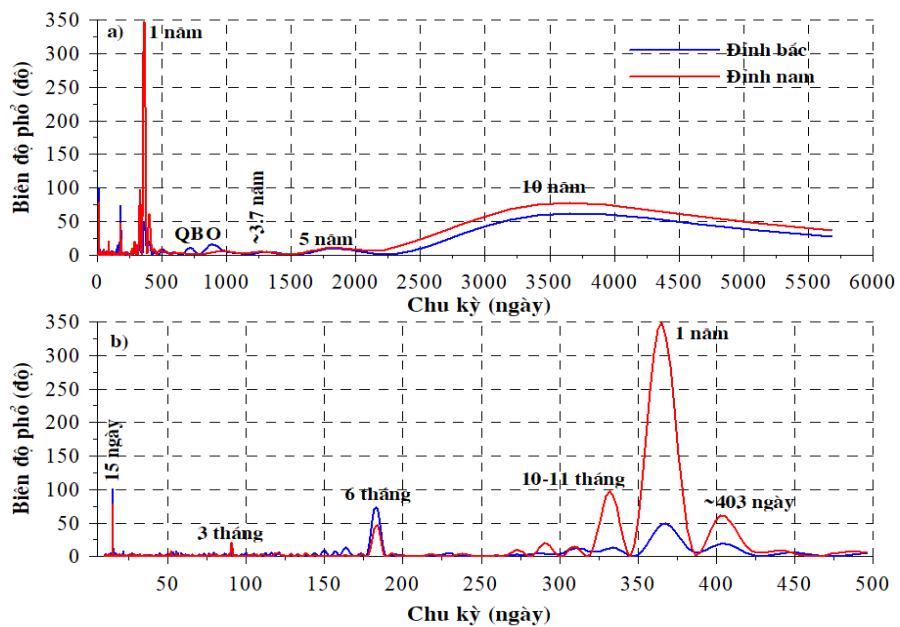
Hình 3.15. a) Thông lượng mặt trời F10.7 trung bình ngày giai đoạn 2008-2021, b) biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle của F10.7, c) phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.

Các kết quả phân tích phổ bằng phương pháp biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle đối với các tham số thông lượng mặt trời F10.7 và các tham số của 2 đỉnh EIA: biên độ, vĩ độ và thời gian xuất hiện được biểu diễn lần lượt trên các hình 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 và được thống kê trong bảng 3.1. Hình 3.15 cho thấy chu kỳ 11 năm ở hoạt tính mặt trời có biên độ lớn nhất, tiếp đến chu kỳ 3,8 năm và chu kỳ 29,5 tháng (QBO); đỉnh phổ chu kỳ 27 ngày thể hiện rất rõ ràng, trong khi các đỉnh phổ ở chu kỳ 6 tháng và 1 năm không nổi trội trong dải chu kỳ từ 150 ngày đến 470 ngày. Các hình 3.16-3.18 chỉ ra biên độ phổ của tham số biên độ các đỉnh EIA đạt cực đại ở chu kỳ 15 ngày. Ở chu kỳ 6 tháng biên độ phổ của biên độ đỉnh Bắc lớn hơn đỉnh Nam, ở chu kỳ 1 năm biên độ phổ của đỉnh Nam lớn hơn rất nhiều so với đỉnh Bắc. Thời gian xuất hiện ở cả 2 đỉnh

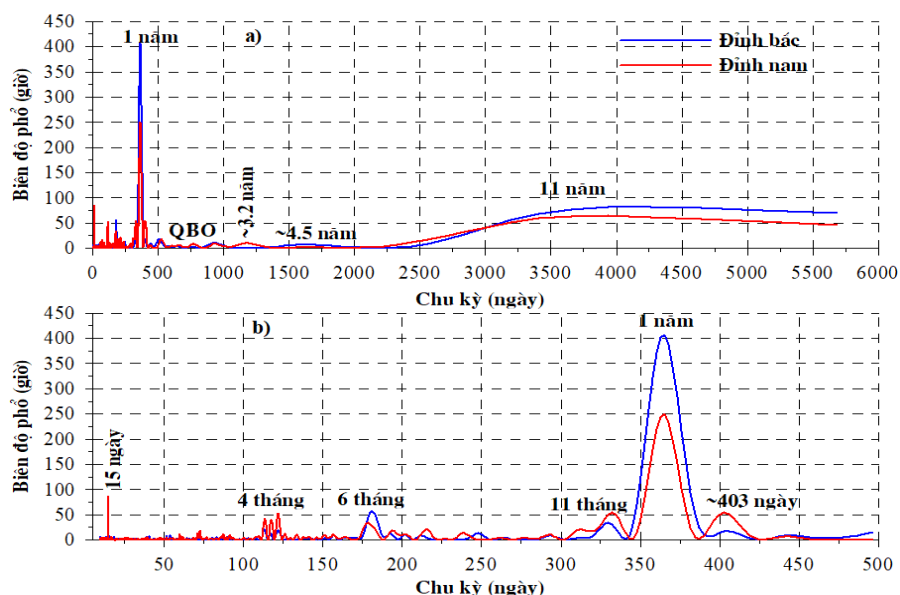
có biên độ phổ ở chu kỳ 1 năm là lớn nhất.



Hình 3.16. a) Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle của biên độ TEC các đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, b) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 50 ngày, c) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.



Hình 3.17. a) Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle của vĩ độ các đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, b) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.



Hình 3.18. a) Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle thời gian xuất hiện các đỉnh EIA trong giai đoạn 2008-2021, b) Phóng đại trong dải chu kỳ nhỏ hơn 500 ngày.

Bảng 3.1. Các chu kỳ dao động chính ở tham số F10.7 và các tham số của 2 đỉnh EIA: biên độ, vĩ độ, thời gian xuất hiện trong giai đoạn 2008-2021.

Chu kỳ	F10.7	Biên độ		Vĩ độ		Thời gian	
		Đỉnh bắc	Đỉnh nam	Đỉnh bắc	Đỉnh nam	Đỉnh bắc	Đỉnh nam
15 ngày	No	O	O	O	O	O	O
27 ngày	O	O	O	No	No	No	No
3-4 tháng		o	o	o	o	o	O
Nửa năm	Ngoài các chu kỳ 6 tháng và 1 năm còn nhiều chu kỳ khác giữa 150 và 500 ngày	O	O	O	O	O	O
10- 11 tháng		o	o	O	O	O	O
1 năm		O	O	O	O	O	O
~403 ngày		No	No	o	o	o	o
QBO	29.5 tháng	O	O	O	O	O	O
11 năm và các hài điều hòa		O	O	O	O	o	O

Kí hiệu chữ **O** thể hiện các chu kỳ xuất hiện ở các tham số với biên độ phổ lớn, No: không xuất hiện, o: xuất hiện chu kỳ nhưng biên độ phổ nhỏ hơn so với đỉnh chính lân cận hoặc kém rõ ràng.

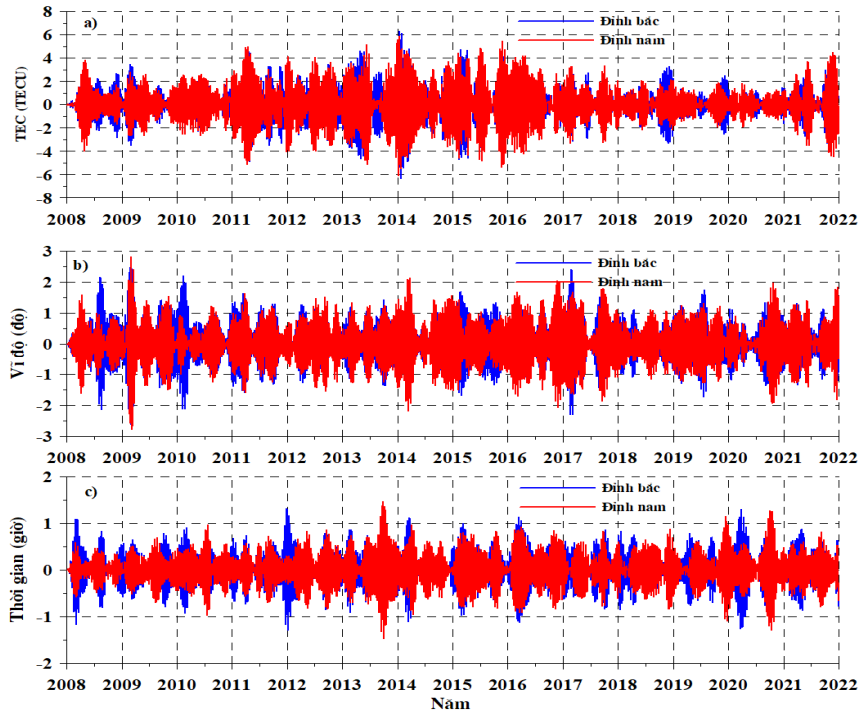
3.3.1. Dao động chu kỳ ~15 ngày

Hình 3.16, 3.17, 3.18 và bảng 3.1 cho thấy cả ba tham số đỉnh EIA đều xuất hiện dao động có chu kỳ ~15 ngày. Chu kỳ ~15 ngày ở tham số vĩ độ đỉnh EIA thường được gọi là chu kỳ biến thiên tựa 16 ngày. Như trên đã nêu chúng ta không quan sát được biến thiên chu kỳ ~15 ngày ở thông lượng mặt trời F10.7 (*hình 3.15*). Do đó, có thể kết luận rằng thành phần dao động chu kỳ ~15 ngày của các tham số ở các đỉnh EIA không liên quan tới hoạt tính mặt trời.

Biến thiên dao động chu kỳ ~15 ngày ở 3 tham số tại 2 đỉnh EIA được cho là gây bởi sóng hành tinh. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra dấu hiệu về tác động của sóng hành tinh lên tầng điện ly, dấu hiệu đầu tiên có lẽ phải kể đến là biến thiên hàng ngày trong trường địa từ [195,196]. Vào thời điểm đó, các tác giả đã không kết nối trực tiếp mối quan hệ giữa biến thiên hàng ngày của hoạt động địa từ với hoạt động của sóng hành tinh, nhưng đã thừa nhận rằng sự biến thiên hàng ngày trong hoạt động địa từ có khả năng liên quan tới các biến thiên hàng ngày của gió trung hòa. Chỉ cho đến khi các nghiên cứu dựa trên quan sát và mô hình đã tìm thấy các sóng hành tinh có biên độ lớn trong vùng quyển giữa và nhiệt quyển bên dưới (MLT: Mesosphere and Lower Thermosphere), điều này nói lên tầm quan trọng của khí quyển bên dưới đối với sự biến đổi của tầng điện ly. Một số nghiên cứu quan sát trên một vài tham số trong các phép đo khác nhau đối với tầng điện ly như electrojet xích đạo, độ cao đỉnh lớp F (hmF2) và mật độ đỉnh F (NmF2) nhận thấy chúng biến thiên có tính chất chu kỳ do ảnh hưởng của các sóng hành tinh [84,197,198,199,200,201,202]. Cho đến nay, một số nghiên cứu dựa trên quan sát và mô hình đã chứng minh rằng sóng hành tinh có thể tác động đáng kể đến sự biến thiên theo thời gian của tầng điện ly. Cơ chế vật lý mà các sóng hành tinh này ảnh hưởng đến tầng điện ly vẫn chưa được hiểu biết một cách đầy đủ và chi tiết. Pogoreltsev et al. (2007) [203] đã nghiên cứu sự lan truyền theo phương thẳng đứng của các sóng hành tinh và nhận thấy rằng chúng không lan truyền lên trên độ cao ~100-110 km. Do đó, sóng hành tinh không thể tác động lên tầng điện ly một cách trực tiếp mà cần phải có một cơ chế gián tiếp để nó có thể tác động đến tầng điện ly. Sóng hành tinh là các dao động có quy mô toàn cầu với chu kỳ dao động từ khoảng 2-20 ngày. Các chu kỳ sóng hành tinh chiếm ưu thế tương ứng với các dao động riêng trong khí quyển và được tập trung xung quanh 2, 5, 19 và 16 ngày [204]. Các dao động có tính chu kỳ trong khí quyển do tác động của sóng hành tinh đầu tiên được tìm thấy ở tầng đối lưu và tầng bình lưu. Thảo luận chi tiết về các quan

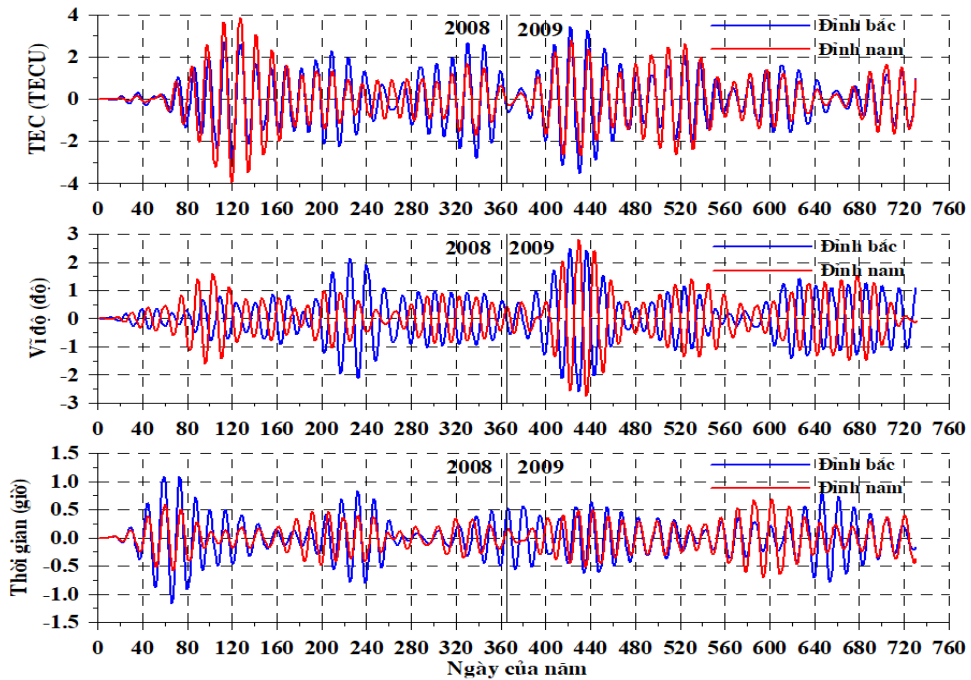
sát và lý thuyết về các sóng hành tinh trong tầng đối lưu và tầng bình lưu có thể tham khảo trong các xuất bản bởi Madden (1979) [205] và Salby (1984) [206]. Các quan sát tiếp theo về gió ở MLT (80-150 km) chỉ ra sự có mặt của các sóng hành tinh ở độ cao này [204,207,208] và chúng có biên độ lớn trong vùng MLT. Sự giống nhau về dao động của các sóng hành tinh ở MLT và trong tầng đối lưu và tầng bình lưu cho thấy rằng các sóng hành tinh này truyền theo phương thẳng đứng, điều đó chứng tỏ rằng các sóng hành tinh trong vùng MLT có nguồn gốc trong tầng đối lưu. Sự truyền theo phương thẳng đứng của các sóng hành tinh và sự liên kết giữa các sóng hành tinh trong tầng đối lưu và vùng MLT được hỗ trợ bởi một vài nghiên cứu mô hình số [203,209,210]. Các sóng hành tinh có nguồn gốc từ tầng đối lưu sau đó lan truyền theo phương thẳng đứng đến quyển giữa và nhiệt quyển bên dưới và bị giới hạn ở độ cao ~100-150 km. Những nghiên cứu trước đó và kết quả của luận án khẳng định sự hiện diện dao động chu kỳ 16 ngày của các sóng hành tinh tác động đến tầng điện ly thông qua một cơ chế gián tiếp nào đó. Những hiểu biết hiện nay cho rằng các sóng hành tinh có thể ảnh hưởng đến các gió vùng E và lần lượt điều chỉnh trường điện vĩ độ thấp được sinh ra bởi cơ chế dynamo [203,211]. Các sóng hành tinh điều biến gió triều vùng E dẫn đến dao động quy mô sóng hành tinh trong vận tốc dịch chuyển của plasma theo phương thẳng đứng ở tầng điện ly xích đạo [212]. Sự tồn tại của biến thiên chu kỳ 16 ngày trong vùng MLT ở vĩ độ thấp đã được xác minh bằng những quan sát trực tiếp trong MLT hoặc thông qua các biến thiên của EEJ [194]. Vineeth et al. (2007) [202], Mo et al. (2014) [194]. Pedatella & Forbes (2009) [213] đã chỉ ra rằng sự biến thiên chu kỳ 16 ngày trong trường điện xích đạo vĩ hướng có thể được liên kết với sóng hành tinh cùng chu kỳ và/hoặc những sự biến đổi của triều mặt trăng. Sự biến thiên của trường điện có chu kỳ 16 ngày này làm thay đổi sự phân bố mật độ điện tử ở vùng vĩ độ thấp thông qua trôi dạt $\vec{E} \wedge \vec{B}$ và quá trình khuếch tán dọc theo đường sức trường từ dẫn tới sự chuyển động theo phương kinh tuyến với chu kỳ ~16 ngày của 2 đỉnh EIA mà chúng ta quan sát được trong các tham số tại 2 đỉnh. Forbes et al. (2018) [214] thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm số với mô hình hoàn lưu tổng quát điện động lực-quyển giữa-tầng điện ly-nhiệt quyển (TIME-GCM) đã phát hiện ra sự tác động của các sóng hành tinh lên các dao động của tầng điện ly là do 2 cơ chế: 1) trôi dạt thẳng đứng $\vec{E} \wedge \vec{B}$, 2) gió trung hòa tại chỗ trong lớp E điện ly do sự truyền theo phương thẳng đứng của các dao động triều điều biến các sóng hành tinh. Nghiên

cứ từ mô hình này đã khẳng định những giải thích trước đó về các yếu tố thúc đẩy sự thâm nhập của các sóng hành tinh vào tầng điện ly và gây ra dao động chu kỳ ~16 ngày ở đỉnh EIA.



Hình 3.19. Dao động chu kỳ 15 ngày ở các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021:

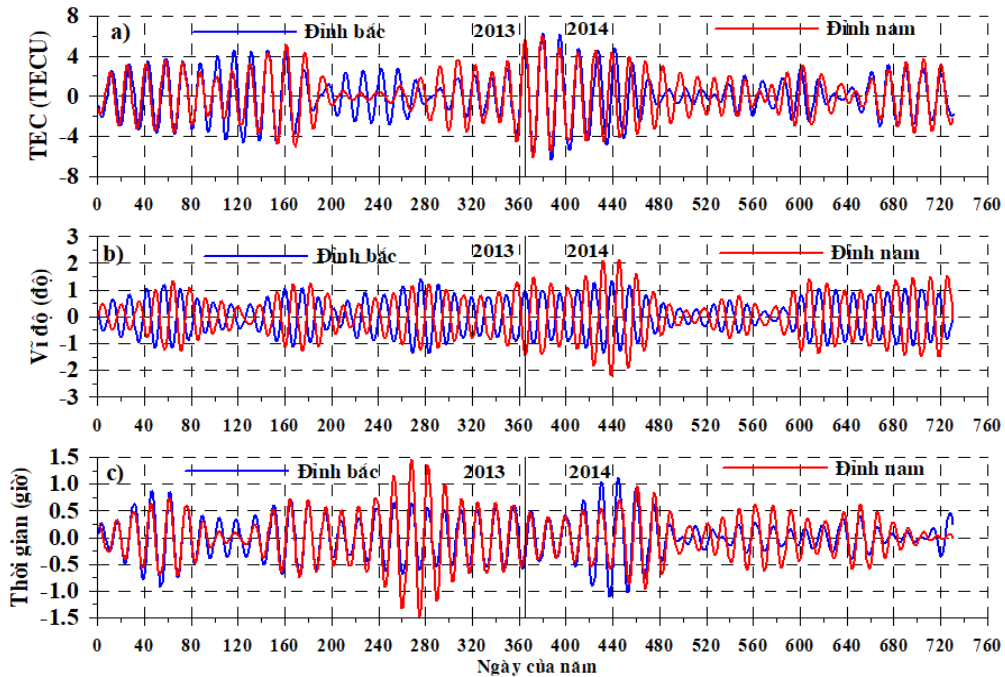
a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.



Hình 3.20. Dao động chu kỳ 15 ngày ở các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2009:

a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.

Để tách ra dao động chu kỳ ~ 15 ngày và so sánh sự tương quan pha của chu kỳ này ở 2 đỉnh dị thường NCS sử dụng bộ lọc thông dải với chu kỳ trung tâm ~ 15 ngày và các điểm nửa phổ là 13 ngày và 17 ngày, độ rộng cửa sổ là 80 ngày. Vì chuỗi số liệu phân tích tương đối dài nên NCS biểu diễn chu kỳ này trong khoảng thời gian 4 năm cho 2 giai đoạn: giai đoạn mặt trời hoạt động yếu (2008-2009) và giai đoạn mặt trời hoạt động mạnh (2013-2014), kết quả được thể hiện trên các hình 3.19, 3.20, 3.21.



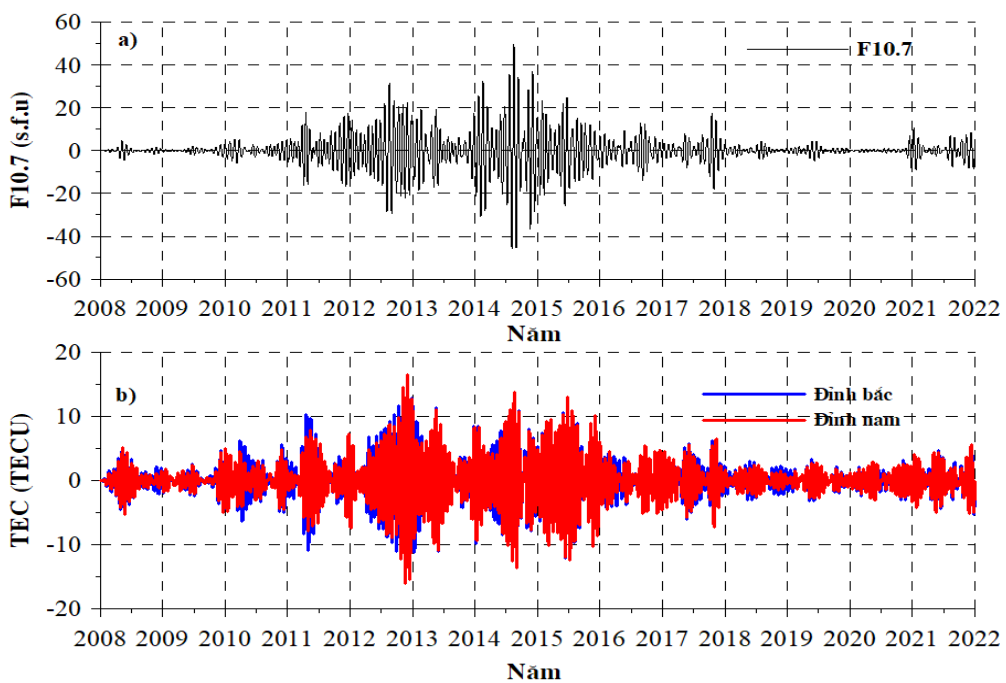
Hình 3.21. Tương tự hình 3.20 nhưng cho giai đoạn 2013-2014.

Hình 3.20 và 3.21 cho thấy mối quan hệ về pha của 3 tham số giữa 2 đỉnh EIA: biên độ giữa 2 đỉnh có mối quan hệ gần như đồng pha và hệ số tương quan giữa chúng là 0,78, thời gian xuất hiện giữa 2 đỉnh cũng có mối quan hệ gần như đồng pha và hệ số tương quan giữa chúng là 0,74, vĩ độ 2 đỉnh có mối quan hệ gần như ngược pha và hệ số tương quan giữa chúng là -0,82. Mối quan hệ pha của các tham số ở giữa các đỉnh EIA ở 2 giai đoạn hoạt động mặt trời là như nhau. Quan hệ ngược pha ở tham số vĩ độ 2 đỉnh EIA có thể là do cơ chế vật lý tác động của sóng hành tinh lên dao động chu kỳ ~ 15 ngày ở 2 đỉnh là khác nhau, dẫn đến chúng có sự dịch chuyển theo phương kinh tuyến sớm và trễ pha so với nhau. Để giải thích về tương quan pha như đã quan sát được trong luận án là một vấn đề rất phức tạp và cần phải có nhiều nghiên cứu quan sát cũng như các nghiên cứu mô hình.

3.3.2. Dao động chu kỳ 27 ngày

Quá trình quang hóa và hấp thụ ánh sáng do bức xạ mặt trời gây ra ảnh hưởng

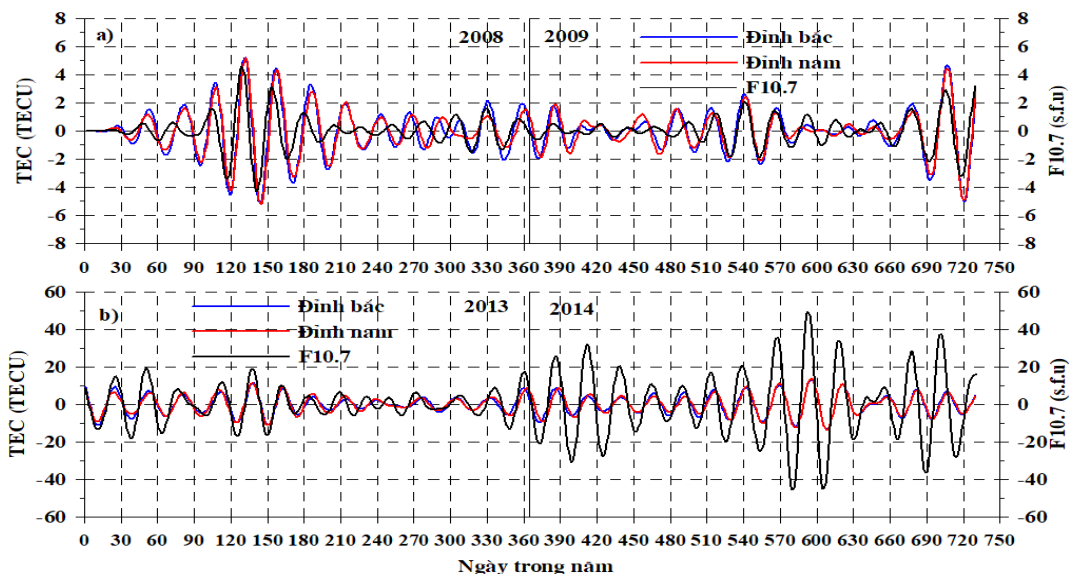
trực tiếp đến nồng độ plasma của tầng điện ly. Trong phần 3.2.2, NCS đã chỉ ra biến thiên của các đỉnh EIA phụ thuộc nhiều vào hoạt động mặt trời, cụ thể là phụ thuộc vào chu kỳ 11 năm hoạt động mặt trời. Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào đánh giá những ảnh hưởng của hoạt động mặt trời lên tầng điện ly và khí quyển bên trên thông qua chu kỳ quay mặt trời [204,215,216]. Ở đây NCS đã tìm ra được dao động chu kỳ ~ 27 ngày ở tham số thông lượng mặt trời F10.7 (*hình 3.15*) và biên độ 2 đỉnh EIA (*Hình 3.16*). Chu kỳ ~ 27 ngày gắn với sự quay của Mặt Trời [217], tuy nhiên chu kỳ ~ 27 ngày không xuất hiện trên tham số vĩ độ và thời gian xuất hiện 2 đỉnh EIA (*hình 3.17, 3.18*).



Hình 3.22. Dao động chu kỳ ~ 27 ngày giai đoạn 2008-2021: a) F10.7, b) biên độ các đỉnh EIA.

Để so sánh mối quan hệ giữa chu kỳ ~ 27 ngày ở F10.7 (*hình 3.15*) và biên độ 2 đỉnh EIA (*hình 3.16*) NCS đã sử dụng bộ lọc thông dải để tách dao động ở chu kỳ này với chu kỳ trung tâm là 27 ngày, các điểm nửa phổ là 26 ngày và 28 ngày, độ rộng của số là 80 ngày, kết quả được thể hiện trên *hình 3.22* và *hình 3.23*. Do chuỗi số liệu dài nên để thuận tiện cho việc theo dõi và so sánh NCS biểu diễn dao động chu kỳ ~ 27 ngày cho toàn bộ chuỗi số liệu (*hình 3.22*), trong thời kỳ hoạt động mặt trời yếu (2008-2009: *hình 3.23a*) và trong thời kỳ hoạt động mặt trời mạnh (2013-2014: *hình 3.23b*). Dao động chu kỳ 27 ngày ở biên độ 2 đỉnh EIA tuân theo chu kỳ hoạt động mặt trời, trong những năm hoạt tính mặt trời yếu tín hiệu có biên độ nhỏ và tín hiệu có biên độ

lớn trong những năm hoạt động mặt trời mạnh. Tín hiệu dao động ~ 27 ngày ở biên độ 2 đỉnh và F10.7 có mối quan hệ gần như đồng pha, hệ số tương quan giữa chúng lần lượt là 0,73 và 0,69 đối với đỉnh Bắc và đỉnh Nam; hệ số tương quan của các dao động này ở biên độ hai đỉnh là 0,95. Vì TEC bị ảnh hưởng phần lớn bởi quá trình quang ion hóa từ Mặt Trời, do đó những quan sát của NCS chỉ ra ở trên là hoàn toàn hợp lý. Chúng ta có thể khẳng định rằng chu kỳ quay ~ 27 ngày của Mặt Trời có vai trò điều biến sự biến đổi trong tầng điện ly. Các kết quả nghiên cứu trong luận án cũng phù hợp với những nghiên cứu trước đó của Ma et al. (2012) [218] đã sử dụng các phép đo thăm dò thẳng đứng tầng điện ly và đã chỉ ra rằng bức xạ mặt trời và hoạt động địa từ có đóng góp đến những biến thiên ~ 27 ngày ở mật độ điện tử cực đại lớp F2 (NmF2); biến thiên của mật độ điện tử toàn cầu cũng được điều biến bởi chu kỳ 27 ngày của Mặt Trời một cách rõ rệt [219].



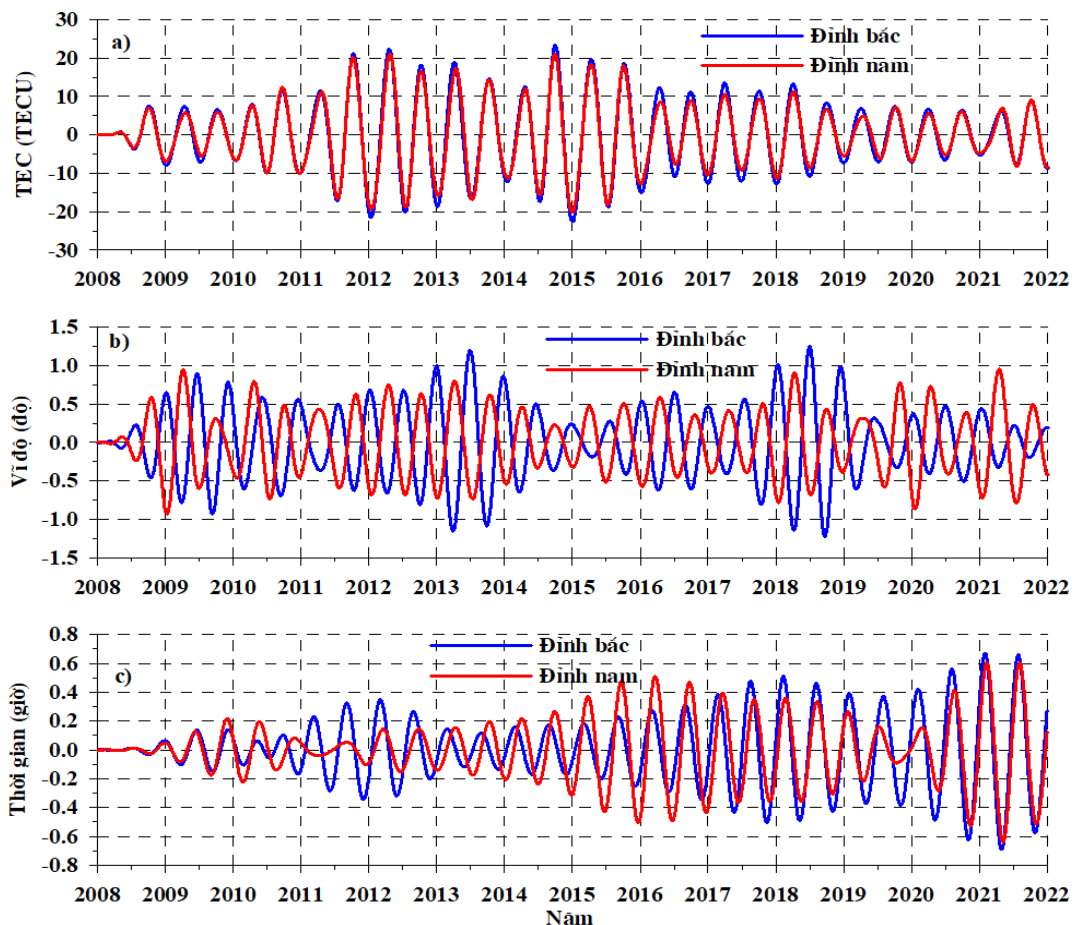
Hình 3.23. Dao động chu kỳ 27 ngày của F10.7 và biên độ các đỉnh EIA:

a) giai đoạn 2008-2009, b) giai đoạn 2013-2014.

3.3.3. Dao động chu kỳ 6 tháng

Hình 3.16, 3.17, 3.18 ở phần trên cũng chỉ ra chu kỳ 6 tháng (~ 182 ngày) và 1 năm (~ 365 ngày) của các tham số đỉnh dị thường. Hình 3.15b chỉ ra trong khoảng chu kỳ 150-500 ngày biên độ phổ F10.7 khá phức tạp, bên cạnh vạch phổ chu kỳ 6 tháng và 1 năm còn có nhiều vạch phổ khác có biên độ lớn hơn hoặc nhỏ hơn. Trong khi đó biên độ phổ chu kỳ 6 tháng và 1 năm ở các tham số đỉnh EIA là rất rõ ràng. Do vậy có thể nói rằng dao động của các tham số đỉnh EIA ở chu kỳ 6 tháng và 1 năm có thể bị ảnh hưởng bởi các yếu tố khác ngoài hoạt tính mặt trời.

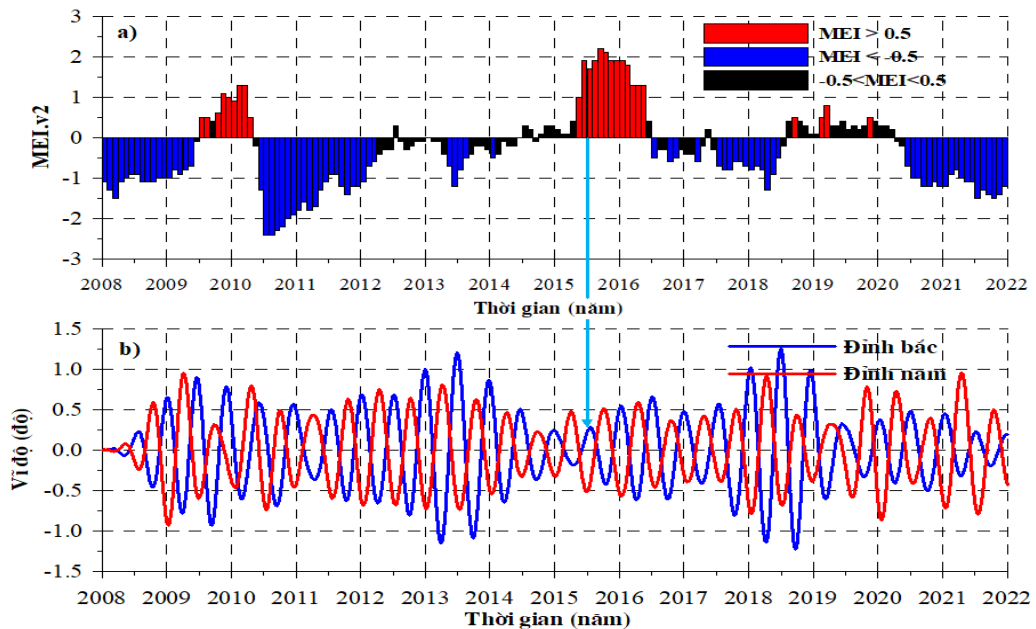
Sử dụng các bộ lọc thông dải với chu kỳ trung tâm 182,5 ngày, các điểm nửa phổ là 178 ngày và 187 ngày, độ rộng của số là 730 ngày, NCS thu được các dao động chu kỳ 6 tháng cho các tham số đỉnh, kết quả được trình bày trên hình 3.24. So sánh hình 3.24a với hình 3.15a cho thấy rằng dao động nửa năm ở biên độ TEC ít nhiều phụ thuộc vào hoạt động mặt trời, đối với những năm mặt trời hoạt động mạnh tín hiệu dao động có biên độ lớn và ngược lại. Tuy nhiên, dao động chu kỳ này của biên độ đỉnh có bất thường trong giai đoạn hoạt động mặt trời cực đại 2013-2014, biên độ dao động lại nhỏ hơn so với các năm trước và sau đó. Các hình 3.24b và 3.24c cho thấy rằng dao động chu kỳ 6 tháng ở vĩ độ và thời gian xuất hiện các đỉnh hầu như không tương quan với hoạt tính mặt trời. Hình 3.24 cũng chỉ ra mối quan hệ pha của các tham số giữa 2 đỉnh. Biên độ giữa 2 đỉnh có mối quan hệ gần như đồng pha, hệ số tương quan là 0,99. Mối quan hệ gần như đồng pha cũng được thể hiện ở tham số thời gian xuất hiện, hệ số tương quan là 0,75. Vĩ độ 2 đỉnh có mối quan hệ gần như ngược pha, hệ số tương quan là -0,77.



Hình 3.24. Dao động chu kỳ 6 tháng ở các tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021:

a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.

Để tìm hiểu tác động có thể của yếu tố khác đến dao động chu kỳ 6 tháng, *hình 3.25* trình bày biến đổi theo thời gian chỉ số ENSO (MEI.v2- chỉ số ENSO đa biến phiên bản 2), các thanh màu xanh chỉ ra pha lạnh ENSO ($MEI.v2 \leq -0.5$) hay La Niña, các thanh màu đỏ chỉ ra pha ấm ENSO ($MEI.v2 \geq 0.5$) hay El Niño, các thanh màu đen chỉ ra pha trung tính ($-0.5 < MEI.v2 < 0.5$). MEI.v2 là chuỗi thời gian kết hợp từ 5 biến số khác nhau: áp suất mực nước biển, nhiệt độ mực nước biển, các thành phần kinh vĩ hướng của gió bề mặt và bức xạ sóng dài trên lưu vực nhiệt đới Thái Bình Dương ($30^{\circ}S- 30^{\circ}N$ và $100^{\circ}E- 70^{\circ}W$). *Hình 3.25* cho thấy rằng biên độ dao động chu kỳ 6 tháng ở vĩ độ 2 đỉnh EIA ít nhiều phụ thuộc vào hoạt động ENSO, vào thời kỳ El Niño biên độ dao động 6 tháng bị giảm đi đáng kể so với các khoảng thời gian khác trong giai đoạn nghiên cứu.

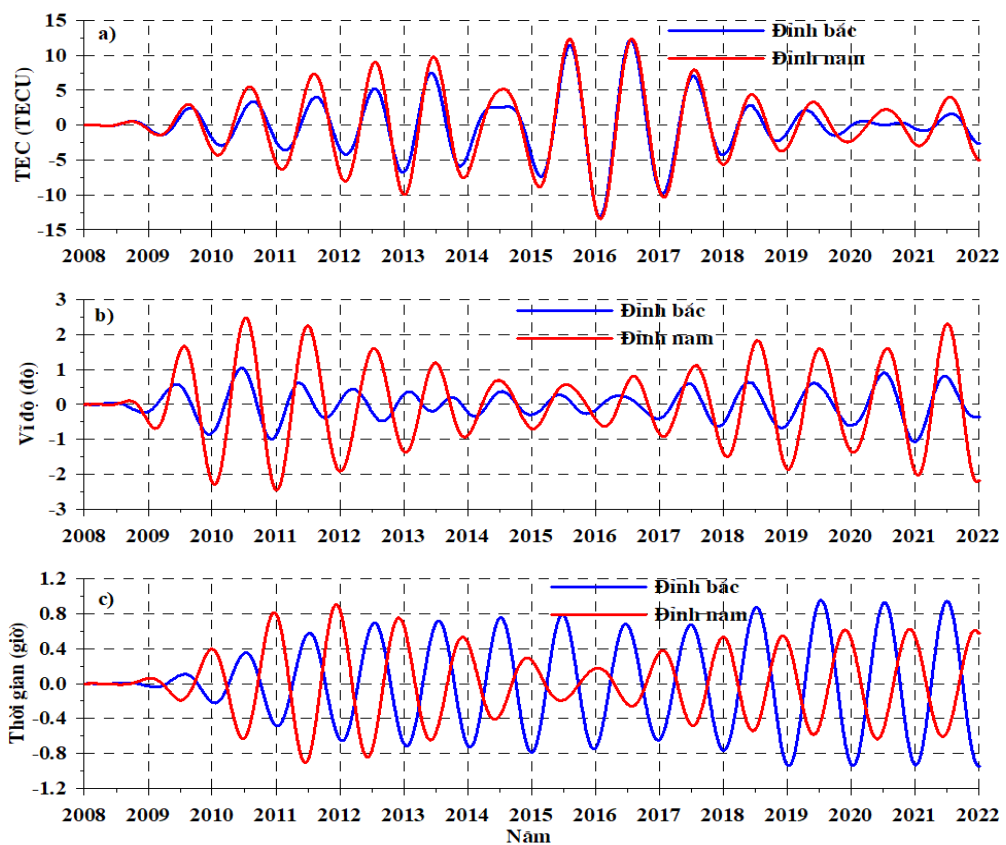


Hình 3.25. a) Chỉ số MEI.v2 và b) dao động chu kỳ 6 tháng ở tham số vĩ độ 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021.

3.3.4. Dao động chu kỳ 1 năm

Dao động chu kỳ 1 năm ở các tham số 2 đỉnh EIA cũng được tách ra bằng phương pháp lọc dải với chu kỳ trung tâm là 365 ngày, các điểm nửa phổ là 358 và 372 ngày, độ rộng cửa sổ là 1095 ngày (~ 3 năm), các kết quả được trình bày ở trên *hình 3.26*. *Hình 3.26a* cho thấy biên độ dao động chu kỳ 1 năm ở tham số biên độ 2 đỉnh EIA phụ thuộc vào ít nhiều vào hoạt động mặt trời. Tuy nhiên, cũng giống như dao động chu kỳ nửa năm, dao động chu kỳ 1 năm của biên độ đỉnh cũng xuất hiện dị thường vào năm 2014. Năm 2014 là năm mặt trời hoạt động cực đại, nhưng biên độ

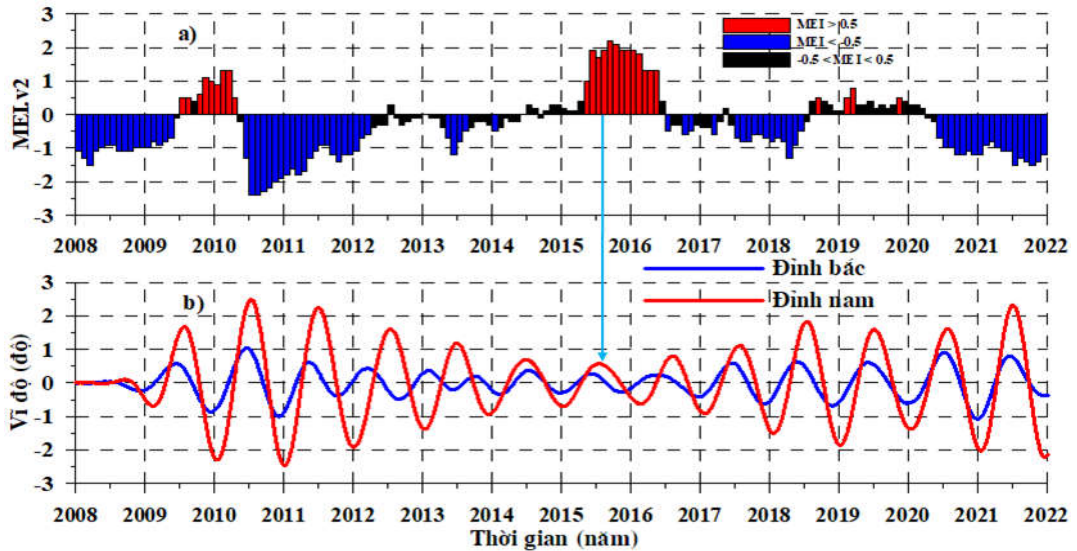
dao động nhỏ hơn đáng kể so với các giai đoạn khác trong khoảng thời gian nghiên cứu. *Hình 3.26b, c* chỉ ra biên độ dao động chu kỳ 1 năm ở tham số vĩ độ và thời gian xuất hiện 2 đỉnh không phụ thuộc vào hoạt tính mặt trời. *Hình 3.26* cũng cho chúng ta biết mối quan hệ về pha của các tham số giữa 2 đỉnh: gần như đồng pha đối với biên độ 2 đỉnh với hệ số tương quan là 0,96, vĩ độ giữa 2 đỉnh cũng có mối quan hệ gần như đồng pha với hệ số tương quan là 0,68, quan hệ gần như ngược pha được thể hiện ở tham số thời gian xuất hiện 2 đỉnh với hệ số tương quan là -0,77. Như vậy mối tương quan giữa vị trí đỉnh 2 đỉnh EIA và thời gian xuất hiện các đỉnh ở dao động chu kỳ 1 năm ngược với ở dao động chu kỳ 6 tháng.



Hình 3.26. Dao động chu kỳ 1 năm ở 3 tham số 2 đỉnh EIA giai đoạn 2008-2021: a) biên độ, b) vĩ độ, c) thời gian xuất hiện.

Hình 3.27 biểu diễn chỉ số ENSO MEI.v2 và dao động chu kỳ 1 năm của tham số vĩ độ. *Hình 3.27* cho thấy dao động chu kỳ 1 năm ở tham số vĩ độ có sự phụ thuộc rõ rệt vào MEI.v2. Trong các thời kỳ El Niño biên độ dao động 1 năm của vĩ độ các đỉnh giảm rõ rệt so với các giai đoạn khác, trong giai đoạn La Niña biên độ dao động tăng lên rõ rệt. Trong thời kỳ 2015-2016, hoạt động El Niño xảy ra mạnh mẽ, biên độ dao động có sự suy giảm hơn so với các giai đoạn khác. Điều này có thể cho phép

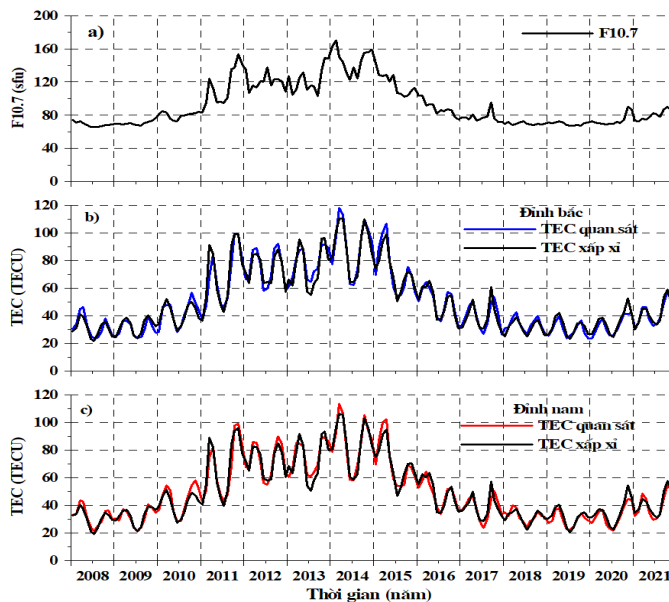
khẳng định rằng hoạt động ENSO có ảnh hưởng đến dao động chu kỳ 1 năm ở tham số vĩ độ của 2 đỉnh EIA, đặc biệt là đối với đỉnh Nam.



Hình 3.27. a) Chỉ số MEI.v2 và b) biên độ dao động chu kỳ 1 năm của tham số vĩ độ 2 đỉnh giai đoạn 2008-2021.

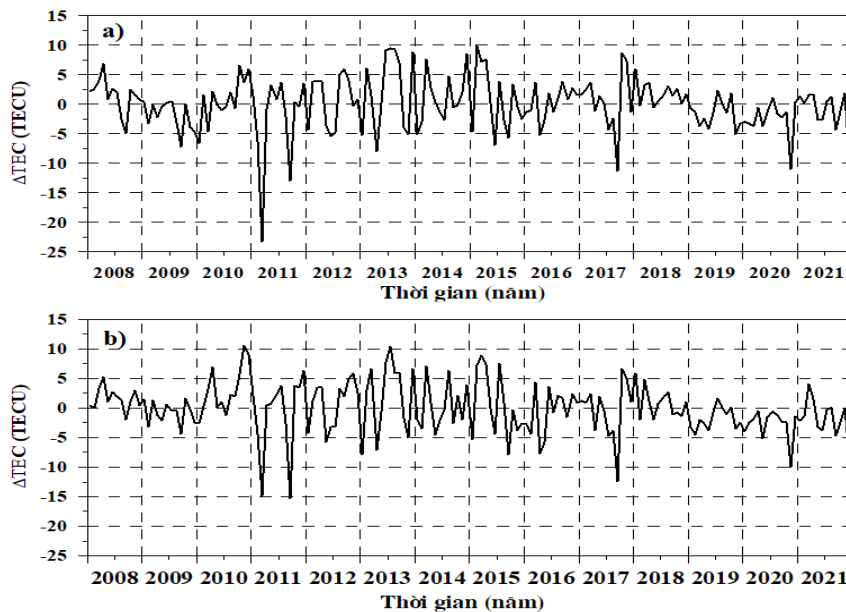
3.3.5. Dao động chu kỳ tựa 2 năm (QBO)

Trong các phân trước NCS đã tìm ra các dao động chu kỳ ~15 ngày, ~27 ngày, 6 tháng và 1 năm ở các tham số 2 đỉnh EIA. Ở phần tiếp theo đây NCS sẽ trình bày kết quả nghiên cứu dao động chu kỳ gần 2 năm ở tham số biên độ 2 đỉnh EIA và đánh giá mối quan hệ của nó với dao động QBO khí quyển.



Hình 3.28. a) Thông lượng mặt trời F10.7, biến thiên biên độ TEC trung bình hàng tháng giai đoạn 2008-2021: b) đỉnh Bắc, c) đỉnh Nam.

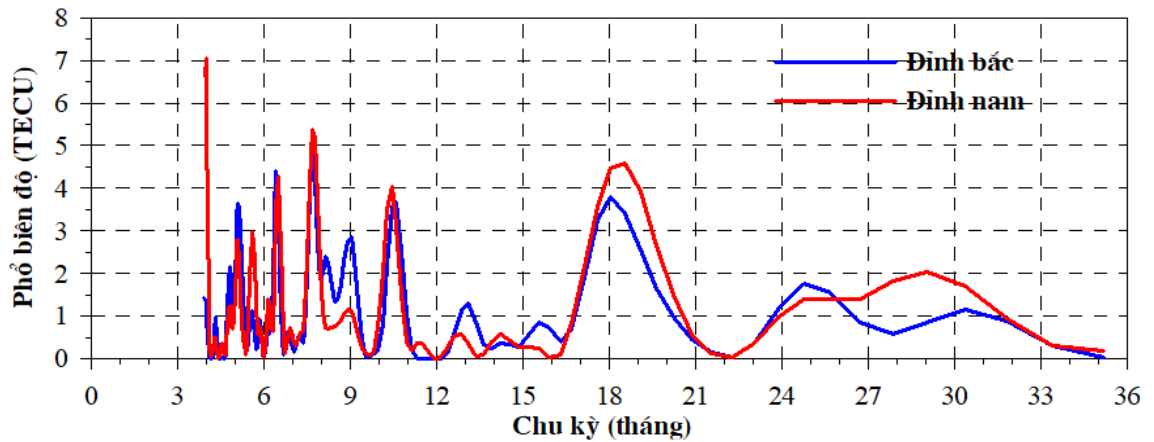
Vì biên độ 2 đỉnh EIA hầu như phụ thuộc vào chu kỳ 11 năm hoạt động mặt trời nên NCS đã xấp xỉ chuỗi số liệu TEC trung bình hàng tháng với thông lượng mặt trời F10.7 và các dao động chu kỳ 6 tháng và 1 năm (phương pháp như đã được trình bày trong chương 2 của luận án), kết quả được biểu diễn trên *hình 3.28*. Các *hình 3.28b, c* cho thấy sự khá phù hợp giữa biên độ hai đỉnh quan sát được và các đường cong xấp xỉ. Tiếp theo NCS tính phần dư ΔTEC giữa biên độ TEC quan sát và biên độ TEC xấp xỉ, kết quả được biểu diễn trên *hình 3.29a, b* lần lượt tương ứng với đỉnh Bắc và đỉnh Nam. Biên độ cực đại của phần dư vào khoảng 23 TECU đối với đỉnh Bắc và 15 TECU đối với đỉnh Nam (các giá trị phần dư TEC đã được lấy theo giá trị tuyệt đối). Biên độ phần dư cực đại này bằng khoảng 20% của biên độ đỉnh Bắc và 13% của biên độ đỉnh Nam.



Hình 3.29. Phần dư ΔTEC giai đoạn 2008-2021: a) đỉnh Bắc, b) đỉnh Nam.

Để tìm ra các tín hiệu QBO ở biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA, các phần dư ΔTEC đã được phân tích bằng phương pháp biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle [186,187]. *Hình 3.30* biểu diễn phổ Lomb-Scargle với chu kỳ từ khoảng 4 tới 36 tháng của ΔTEC đỉnh Bắc (đường màu xanh) và đỉnh Nam (đường màu đỏ). Có một vài đỉnh phổ trong dải chu kỳ QBO: 18, 25 và 29-30 tháng. Biên độ phổ của chu kỳ 18 tháng lần lượt là 3,8 và 4,6 TECU đối với đỉnh Bắc và đỉnh Nam; bằng khoảng 16,5% và 30% phần dư ΔTEC cực đại, các giá trị này lớn hơn biên độ phổ thu được bởi Tang et al. (2014) [91] (khoảng 10%). Bởi vì các biến thiên hàng năm và nửa năm của các đỉnh EIA đã bị loại trừ bằng phương pháp làm khớp, vì vậy các đỉnh phổ của chu kỳ 6 tháng và 12 tháng

vắng mặt trong đồ thị phổ. Nhưng một số chu kỳ như 4, 8 và 10 tháng vẫn tồn tại trong phần dư, điều này sẽ được phân tích trong nghiên cứu khác.

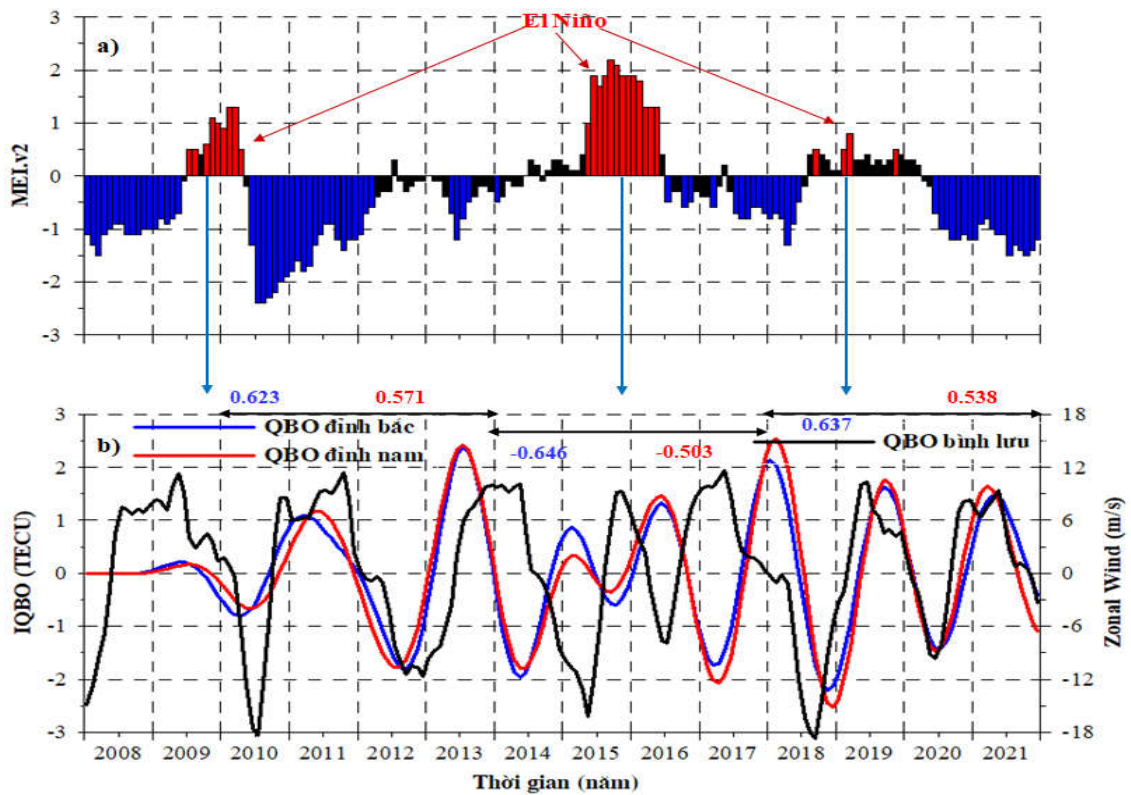


Hình 3.30. Biểu đồ chu kỳ Lomb-Scargle đối với các biến thiên Δ TEC tại 2 đỉnh EIA.

Để thu được tín hiệu QBO ở biên độ TEC của đỉnh EIA (IQBO: Ionosphere QBO), NCS đã áp dụng bộ lọc thông dải đối với các phần dư Δ TEC với chu kỳ trung tâm bằng 25 tháng, có các điểm nửa phổ là 17 và 33 tháng, kết quả được trình bày ở hình 3.31b. Trên hình 3.31b cũng biểu diễn dao động QBO khí quyển (SQBO: Stratosphere QBO) được đặc trưng bởi tham số gió trung bình vĩ hướng ở 50 hPa (độ cao ~20 km). Để tiện giải thích tín hiệu IQBO quan sát được, trên hình 3.31a NCS trình bày chỉ số MEI.v2 như đã nêu ở trên.

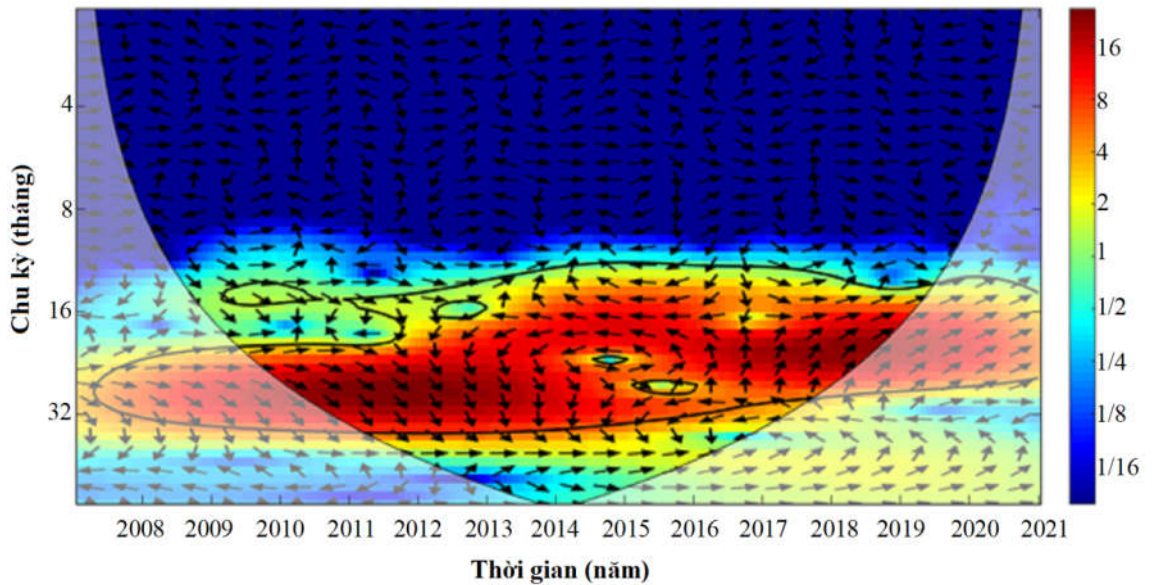
Hình 3.31b cho thấy rằng trong năm 2008, tín hiệu IQBO không rõ ràng, giai đoạn 2009-2021, tín hiệu IQBO ở 2 đỉnh EIA rất rõ ràng. Khi phân tích tín hiệu QBO điện ly giai đoạn 1999-2011 từ biên độ TEC toàn cầu ở $\pm 15^\circ$ và 0° vĩ độ từ Tang et al. [91] cho rằng các năm 2006-2009 trong giai đoạn mặt trời hoạt động cực tiểu tín hiệu QBO điện ly không quan sát được. Trong khoảng thời gian khảo sát của NCS (2008-2021) thời kỳ hoạt động mặt trời cực tiểu có 2 giai đoạn 2008-2009 và 2019-2020 thì tín hiệu IQBO trong giai đoạn 2019-2020 là rất rõ ràng, do vậy chúng ta có thể khẳng định rằng hoạt tính mặt trời không ảnh hưởng tới IQBO.

Hình 3.31b cho thấy mối quan hệ giữa SQBO và IQBO tương đối phức tạp. Trong năm 2008, IQBO không rõ ràng như đã đề cập ở trên, giai đoạn 2010-2013 và 2018-2021 SQBO và IQBO đồng pha, nhưng lại ngược pha trong giai đoạn 2014-2017. Các hệ số tương quan giữa chúng trong các khoảng thời gian nói trên lần lượt là: 0,623, 0,637, -0,646 đối với đỉnh Bắc, và 0,571, 0,538 và -0,530 đối với đỉnh Nam một cách tương ứng; hệ số tương quan đối với đỉnh Bắc lớn hơn một chút so với đỉnh Nam.

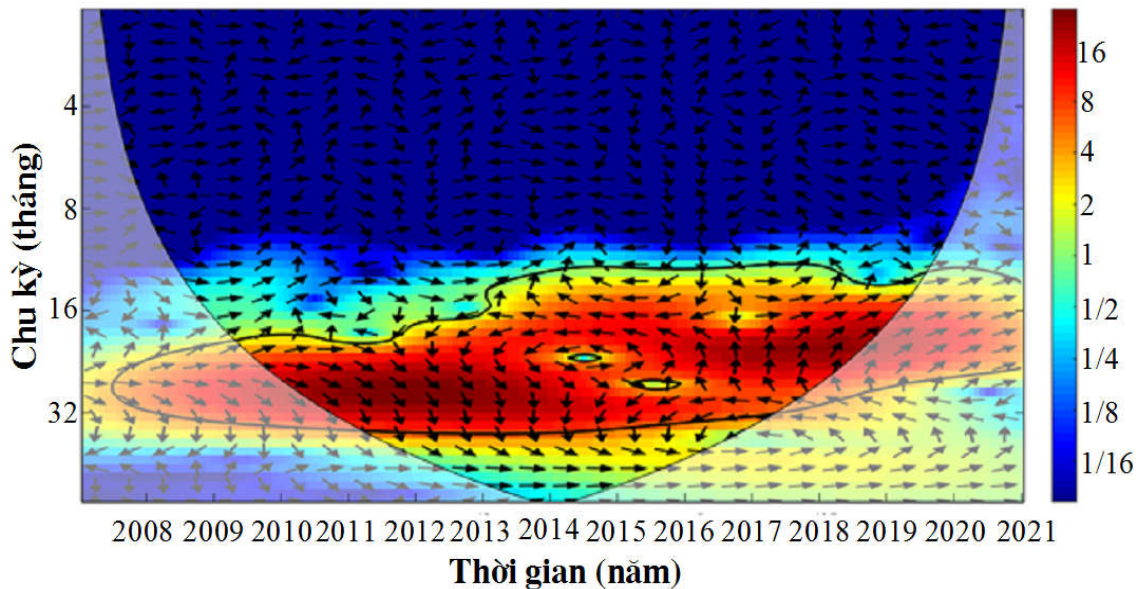


Hình 3.31. a) Chỉ số MEI.v2, b) dao động chu kỳ QBO của Δ TEC tại 2 đỉnh EIA và QBO tầng bình lưu.

Hình 3.31 cũng chỉ ra rằng vào các thời kỳ El Niño 2009-2010, 2015-2016, 2018-2020 biên độ IQBO giảm so với các thời kỳ lân cận. Đặc biệt trong khoảng thời gian 2015-2016, giai đoạn El Niño mạnh nhất trong khoảng thời gian nghiên cứu, tín hiệu SQBO bị rút ngắn lại, chu kỳ của nó ~ 1.5 năm, chúng ta cũng quan sát sự rút ngắn lại của chu kỳ IQBO ở 2 đỉnh EIA. Trong nghiên cứu của Sun et al. (2022) [220] đã chỉ ra rằng ENSO kiểm soát QBO tầng bình lưu và trong pha ấm ENSO QBO tầng bình lưu có sự rút ngắn lại và chu kỳ của nó $\sim 1,5$ năm. NCS đã tính toán hệ số tương quan giữa SQBO và IQBO cho giai đoạn này và nhận thấy rằng chúng có mối tương quan âm với hệ số tương quan lần lượt là $-0,631$ đối với đỉnh Bắc và $-0,521$ đối với đỉnh Nam. So sánh giữa các quan sát TEC lọc bằng bộ lọc thông dải (QBO tầng điện ly) ở vĩ độ từ 15°N , 0° , 15°S và gió trung bình vĩ hướng như một đại diện cho QBO tầng bình lưu trong giai đoạn 1999-2011, Tang et al. [91] đã chỉ ra rằng QBO tầng điện ly tồn tại trong giai đoạn 1999-2005 và 2 năm sau năm 2009. Trong giai đoạn 1999-2005, tác giả đã chỉ ra mối tương quan dương giữa QBO bình lưu và QBO điện ly đồng thời đưa ra hệ số tương quan giữa chúng là $0,704$, giá trị này khá gần với các giá trị hệ số tương quan thu được trong luận án.



Hình 3.32. Biến đổi Wavelet chéo giữa IQBO của đỉnh Bắc và SQBO. Độ tin cậy 95% được chỉ ra bằng đường bao quanh đậm; nón ảnh hưởng (COI, cone of influence) nơi các hiệu ứng biên có thể làm biến dạng hình ảnh được hiển thị dưới dạng vùng sáng hơn. Mối quan hệ tương đối được hiển thị bằng các mũi tên (cùng pha chỉ về bên phải, ngược pha chỉ về bên trái).



Hình 3.33. Tương tự như hình 3.32 nhưng đối với đỉnh Nam.

Để có cái nhìn rõ hơn về tương quan pha giữa SQBO và IQBO ở 2 đỉnh EIA, NCS đã sử dụng biến đổi wavelet chéo, cơ sở phương pháp đã được trình bày trong chương 2. Hình 3.32 và hình 3.33 chỉ ra các kết quả biến đổi wavelet chéo giữa SQBO và các tín hiệu IQBO thu được. Biểu diễn màu trong hình 3.32 và hình 3.33 cho biết năng lượng wavelet, dải màu đỏ cho biết năng lượng wavelet mạnh tương ứng với chu

kỳ 16-34 tháng phản ánh dài chu kỳ IQBO và SQBO. Trong khoảng thời gian các năm 2010-2013 ở 2 đỉnh EIA, các mũi tên có xu hướng quay sang phải, điều này chứng tỏ rằng trong giai đoạn này IQBO và SQBO là cùng pha. Trong năm 2014, các mũi tên có sự đổi chiều từ từ, từ xu hướng nghiêng sang phải nghiêng dần sang trái cho đến cuối năm 2017, điều này cho thấy mối quan hệ ngược pha giữa IQBO và SQBO trong giai đoạn 2014-2017. Trong khoảng thời gian từ 2018 đến 2021, các mũi tên hướng sang phải, điều này chứng tỏ mối quan hệ giữa SQBO và IQBO tại 2 đỉnh EIA là cùng pha. Kết quả biến đổi wavelet chéo giữa SQBO và IQBO tại 2 đỉnh EIA phù hợp với kết quả phân tích mối tương quan giữa chúng như đã đề cập bên trên.

Những kết quả của luận án phần nào phù hợp với những kết quả đã được đưa ra trước đó bởi Tang et al. [91] cho thấy IQBO bị ảnh hưởng bởi SQBO. Ngoài ra trong giai đoạn 2015-2016, NCS nhận thấy SQBO và IQBO ở 2 đỉnh EIA bị rút ngắn lại, chu kỳ $\sim 1,5$ năm. Hình 6 trong nghiên cứu của Tang et al. [91] cho thấy trong khoảng thời gian 2006-2007, tín hiệu QBO tầng bình lưu có chu kỳ khoảng $\sim 1,5$ năm, biên độ QBO tầng điện ly nhỏ và có mối quan hệ ngược pha với QBO tầng bình lưu. Giai đoạn 2006-2007 cũng là pha âm ENSO [221]. Sự giống nhau của các tín hiệu IQBO trong giai đoạn 2006-2007 và 2015-2016 có thể chỉ ra rằng trong khoảng thời gian pha âm ENSO, chu kỳ SQBO đã bị rút ngắn lại, chu kỳ IQBO cũng bị ngắn lại, biên độ giảm và ngược pha với SQBO.

Những kết quả ở trên khẳng định có sự tồn tại của QBO điện ly ở tham số biên độ của 2 đỉnh EIA. Các biểu hiện biến thiên của QBO điện ly khẳng định rằng QBO tầng bình lưu là yếu tố chính ảnh hưởng đến QBO điện ly thông qua liên kết thẳng đứng giữa tầng bình lưu và tầng điện ly.

Kết luận chương 3

Trong chương này, đặc trưng của dị thường ion hóa xích đạo khu vực Đông Nam Á và các dao động chu kỳ chính của nó đã được nghiên cứu một cách chi tiết. Các kết quả có thể được tóm tắt như sau:

- Sơ đồ TEC trung bình tháng theo thời gian và vĩ độ trong giai đoạn 2008-2021 thể hiện rõ 2 cực đại ở vào 2 phía của xích đạo từ. Cực đại ở phía Bắc nằm ở vĩ độ khoảng $17-22^{\circ}\text{N}$, cực đại ở phía Nam nằm ở vĩ độ khoảng $5^{\circ}\text{S}-7^{\circ}\text{S}$. Đặc trưng này gọi là dị thường ion hóa xích đạo của tầng điện ly (EIA).
- Biên độ các đỉnh EIA thể hiện biến thiên mùa rõ rệt, đạt hai cực đại vào thời kỳ

phân điểm, cực tiểu vào các tháng mùa đông và mùa hè.

- Biên độ các đỉnh EIA thể hiện sự bất đối xứng phân điểm theo pha hoạt động mặt trời. Trong pha hoạt động mặt trời đi xuống biên độ vào thời kỳ xuân phân lớn hơn thu phân, trong pha hoạt động mặt trời đi lên biên độ vào thời kỳ thu phân lớn hơn xuân phân.

- Thời gian xuất hiện các đỉnh EIA trong khoảng từ 5:00-7:00 UT (12:00-14:00 LT). Các đỉnh EIA có xu thế xuất hiện hầu như sớm hơn vào mùa đông so với các mùa khác trong năm.

- Vĩ độ các đỉnh EIA phụ thuộc vào mùa trong năm, ở phía Nam bán cầu đỉnh EIA có xu thế di chuyển về phía xích đạo vào mùa đông và vào mùa hè nó có xu thế di chuyển về phía cực. Đỉnh Bắc cũng có xu thế như vậy nhưng biểu hiện kém rõ ràng hơn. Trái với biên độ 2 đỉnh EIA vị trí xuất hiện các đỉnh EIA không thể hiện sự phụ thuộc vào mức độ hoạt động mặt trời.

- Biên độ ở 2 đỉnh EIA biến đổi theo quy luật 11 năm chu kỳ hoạt động mặt trời, đối với các năm mặt trời hoạt động yếu biên độ TEC nhỏ và các năm mặt trời hoạt động mạnh biên độ TEC lớn và đạt cực đại trong giai đoạn 2013-2014. Hệ số tương quan giữa thông lượng mặt trời F10.7 và biên độ TEC trung bình tháng tại 2 đỉnh $\sim 0,9$, điều này chứng tỏ hoạt động mặt trời là nguồn chính ảnh hưởng đến biến thiên TEC ở các đỉnh EIA.

- Chu kỳ ~ 15 ngày tồn tại ở các tham số đỉnh dị thường liên quan đến hoạt động của các sóng hành tinh ở tầng khí quyển bên dưới.

- Chu kỳ ~ 27 ngày xuất hiện ở tham số biên độ đỉnh EIA liên quan đến chu kỳ quay ~ 27 ngày của Mặt Trời. Dao động chu kỳ ~ 27 ngày ở tầng điện ly thể hiện tương quan dương với chu kỳ ~ 27 ngày vòng quay mặt trời. Trong chu kỳ này, hệ số tương quan giữa F10.7 với biên độ đỉnh Bắc và đỉnh Nam lần lượt là 0,73 và 0,69 và hệ số tương quan giữa biên độ 2 đỉnh là 0,95.

- Các dao động chu kỳ 6 tháng và 1 năm ở biên độ 2 đỉnh EIA thể hiện phụ thuộc ít nhiều vào hoạt động mặt trời và có mối quan hệ gần như đồng pha. Các chu kỳ này cũng hiện diện trong tham số thời gian xuất hiện và vĩ độ đỉnh nhưng dường như không thể hiện sự phụ thuộc vào mức độ hoạt động mặt trời. Ở tham số vĩ độ đỉnh tín hiệu dao động của 2 chu kỳ này thể hiện phụ thuộc phần nào vào hoạt động ENSO.

- QBO hiện diện ở tham số biên độ TEC tại các đỉnh EIA với chu kỳ nằm trong

khoảng từ 18-34 tháng. Mối quan hệ giữa QBO điện ly và QBO khí quyển khá phức tạp, chúng cùng pha trong giai đoạn 2010-2013, 2018-2021 và ngược pha trong giai đoạn 2014-2017. Hệ số tương quan trong các giai đoạn nói trên lần lượt là: 0,623, 0,637, -0,646 đối với đỉnh Bắc và 0,571, 0,538 và -0,530 đối với đỉnh Nam. Ngoài ra cũng quan sát được sự rút ngắn chu kỳ QBO khí quyển cũng như QBO điện ly trong giai đoạn 2015- 2016, chu kỳ của chúng $\sim 1,5$ năm.

Tầng điện ly vùng vĩ độ thấp và xích đạo tồn tại những đặc trưng quan trọng như dị thường ion hóa xích đạo đã được trình bày. Bên cạnh đó tầng điện ly cũng tồn tại những trạng thái bất thường gây ảnh hưởng lớn đến các tín hiệu vệ tinh. Trong chương sau NCS sẽ trình bày những đặc trưng bất thường điện ly ban đêm khu vực Đông Nam Á.

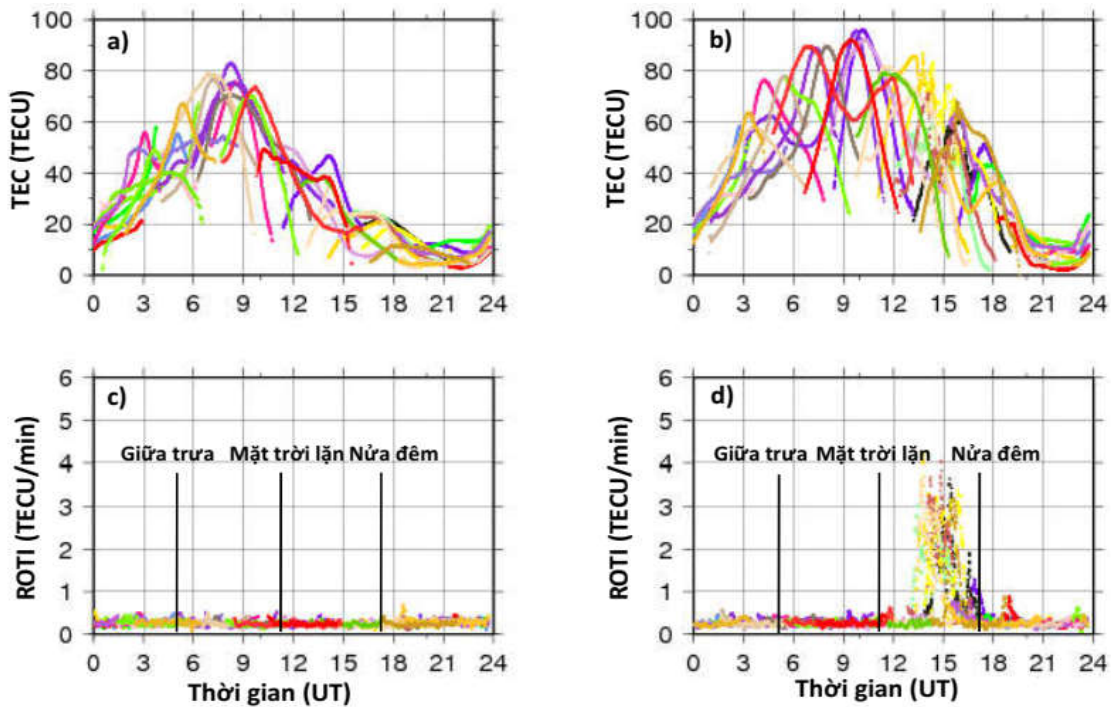
CHƯƠNG 4

BẤT THƯỜNG ĐIỆN LY BAN ĐÊM KHU VỰC ĐÔNG NAM Á

Khi tín hiệu vệ tinh GPS truyền qua vùng bất thường điện ly sẽ gây ra sự dao động pha ghi được trên mặt đất thể hiện ở tham số chỉ số dao động pha ROTI. Do đó, trong chương này chỉ số dao động pha ROTI được sử dụng để đánh giá đặc trưng xuất hiện các bất thường điện ly ở khu vực Đông Nam Á giai đoạn 2008-2018. Số liệu của 17 trạm trong số 30 trạm đã liệt kê trong chương 2 được sử dụng. Do số liệu của một số trạm tương đối ngắn: 10 trạm ở khu vực đứt gãy Sông Hồng bắt đầu từ cuối 2017 hoặc đầu 2018, trạm HCMC hoạt động từ tháng 02/2018, trạm DLAT bắt đầu hoạt động từ tháng 11/2014-10/2017, 07/2018-12/2018, và trạm BACL bắt đầu hoạt động từ tháng 05/2015. 13 trạm này ở phía Bắc xích đạo, do đó số lượng máy thu khá dày so với ở phía Nam và để có được sơ đồ phân bố chỉ số ROTI không quá khác biệt ở hai bán cầu, nên chuỗi số liệu của 13 trạm này không được sử dụng trong chương.

4.1. Biến thiên ngày đêm của chỉ số tốc độ biến đổi TEC

Các giá trị TEC nhận được từ các máy thu GPS liên tục ở Việt Nam và khu vực lân cận có độ phân giải 30 giây. Chỉ số tốc độ biến đổi TEC (ROTI) thu được bằng cách sử dụng phương pháp tính đã trình bày trong chương 2. Khi tầng điện ly tồn tại các bất thường, các giá trị TEC có sự dao động nhanh về pha, điều này được thể hiện trên các giá trị ROTI. *Hình 4.1* là một ví dụ về biến thiên TEC và ROTI ngày đêm khi có và không có sự xuất hiện bất thường điện ly vào ngày 02/01/2015 và ngày 15/02/2015 quan sát được tại trạm PHUT. Các vạch thẳng đứng tương ứng chỉ các thời điểm giữa trưa, mặt trời lặn và nửa đêm theo thời gian địa phương. Các *hình 4.1a, b* chỉ ra các giá trị TEC hàng ngày là cao vào ban ngày và thấp vào ban đêm. Từ *Hình 4.1b* chúng ta quan sát thấy các dao động TEC mạnh vào ban đêm sau khi mặt trời lặn khoảng 12:00 UT (19:00 LT), những điều này được gây ra bởi dao động mạnh của mật độ điện tử tầng điện ly. *Hình 4.1* cho thấy giá trị ROTI là thấp và ổn định trong khoảng thời gian ban ngày ở cả 2 ngày. *Hình 4.1c* cho thấy vào ngày 02/01/2015, ROTI có giá trị nhỏ và ổn định trong suốt cả ngày. Bên cạnh đó, *hình 4.1d* chỉ ra vào ngày 15/02/2015, ROTI có giá trị lớn trong khoảng thời gian sau khi mặt trời lặn từ 12:00 UT-19:00 UT (19:00 LT-02:00 LT). Giá trị ROTI lớn tương ứng với dao động đột ngột của các giá trị TEC, do đó ROTI thường được sử dụng để xác định sự xuất hiện của các bất thường điện ly.



Hình 4.1. Biến thiên hàng ngày của TEC và ROTI nhận được tại trạm PHUT, các vạch thẳng đứng chỉ các thời điểm giữa trưa, mặt trời lặn và nửa đêm một cách tương ứng: a, c) ngày 02/01/2015; b, d) ngày 15/02/2015.

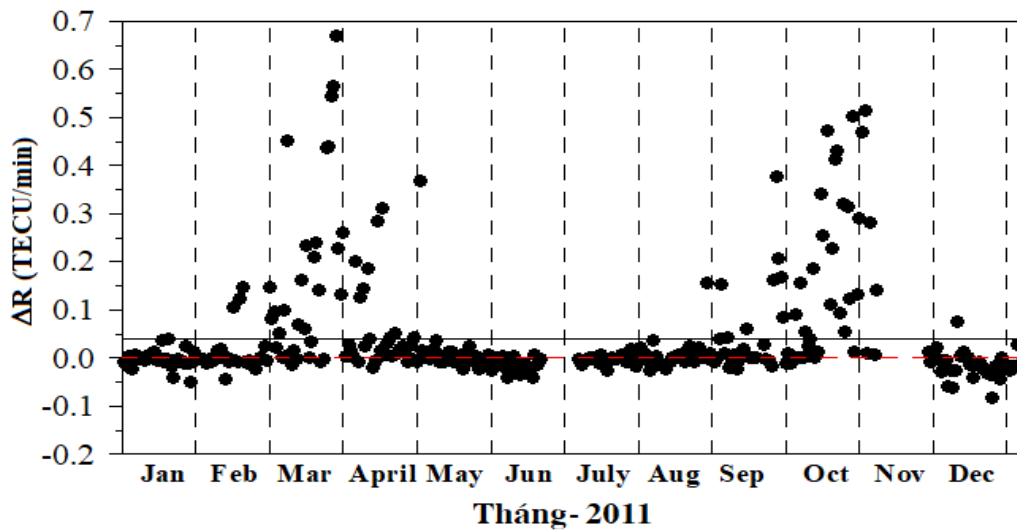
4.2. Tần suất xuất hiện các bất thường điện ly

Theo nghiên cứu bởi Nishioka et al. (2008) [123], sự chênh lệch các giá trị ROTI giữa thời gian ban ngày và ban đêm được sử dụng để xác định các sự kiện bất thường điện ly một cách tự động. Các bước để xác định các sự kiện bất thường điện ly ban đêm cho một ngày đối với bất kỳ một trạm nào đó như sau:

1. Tính trung bình các giá trị ROTI trong khoảng thời gian từ 12:00 UT đến 19:00 UT (19:00 LT-02:00 LT) (khoảng thời gian các bất thường được cho là xuất hiện mạnh nhất) được gọi là R_{ev} .
2. Tính trung bình các giá trị ROTI trong khoảng thời gian khoảng thời gian từ 05:00-08:00 UT (12:00-15:00 LT) (khoảng thời gian TEC đạt cực đại), gọi là R_{day} .
3. Độ chênh lệch, $\Delta R = R_{ev} - R_{day}$, được sử dụng như là một chỉ số của hoạt động bất thường cho một ngày tại một trạm. Nishioka et al. [123] đã lựa chọn giá trị 0.075 TECU/min là giá trị ngưỡng để xác định ngày có bất thường điện ly.

Hình 4.2 biểu diễn biến thiên ΔR tại PHUT năm 2011, đường nằm ngang chỉ mức ROTI ở 0.00 TECU/min (đường màu đỏ, nét đứt) và 0.04 TECU/min (đường màu

đen, nét liền). Đường nằm ngang ở mức 0.04 TECU/min chỉ ra ngưỡng để phát hiện bất thường điện ly. Hình này chỉ ra biến thiên ΔR có hai đỉnh vào thời kỳ phân điểm (tháng 3, 4, 9, 10). Từ hình 4.2 ta thấy rằng hầu hết các giá trị ΔR thay đổi trong phạm vi ± 0.03 TECU/min có thể là do nhiễu nhiệt không liên quan tới bất thường điện ly. Các giá trị ΔR lớn hơn 0.03 TECU/min được cho là do bất thường điện ly gây ra. NCS xác định các sự kiện bất thường điện ly bằng cách cộng thêm 0.01 TECU/min vào các giá trị ΔR lớn hơn 0.03 TECU/min để loại trừ các biến thiên TEC không được sinh ra bởi bất thường điện ly. Cuối cùng NCS đã lựa chọn ngưỡng của ΔR là 0.04 TECU/min là ngày có sự kiện bất thường điện ly xảy ra. Mức chọn ngưỡng để phát hiện bất thường trong luận án là 0.04 TECU/min khác với nghiên cứu của Nishioka là do, nếu NCS lựa chọn mức ngưỡng bằng 0.075 TECU/min thì sẽ vô tình bỏ qua một số những ngày bất thường.



Hình 4.2. Biến thiên ΔR tại PHUT vào năm 2011.

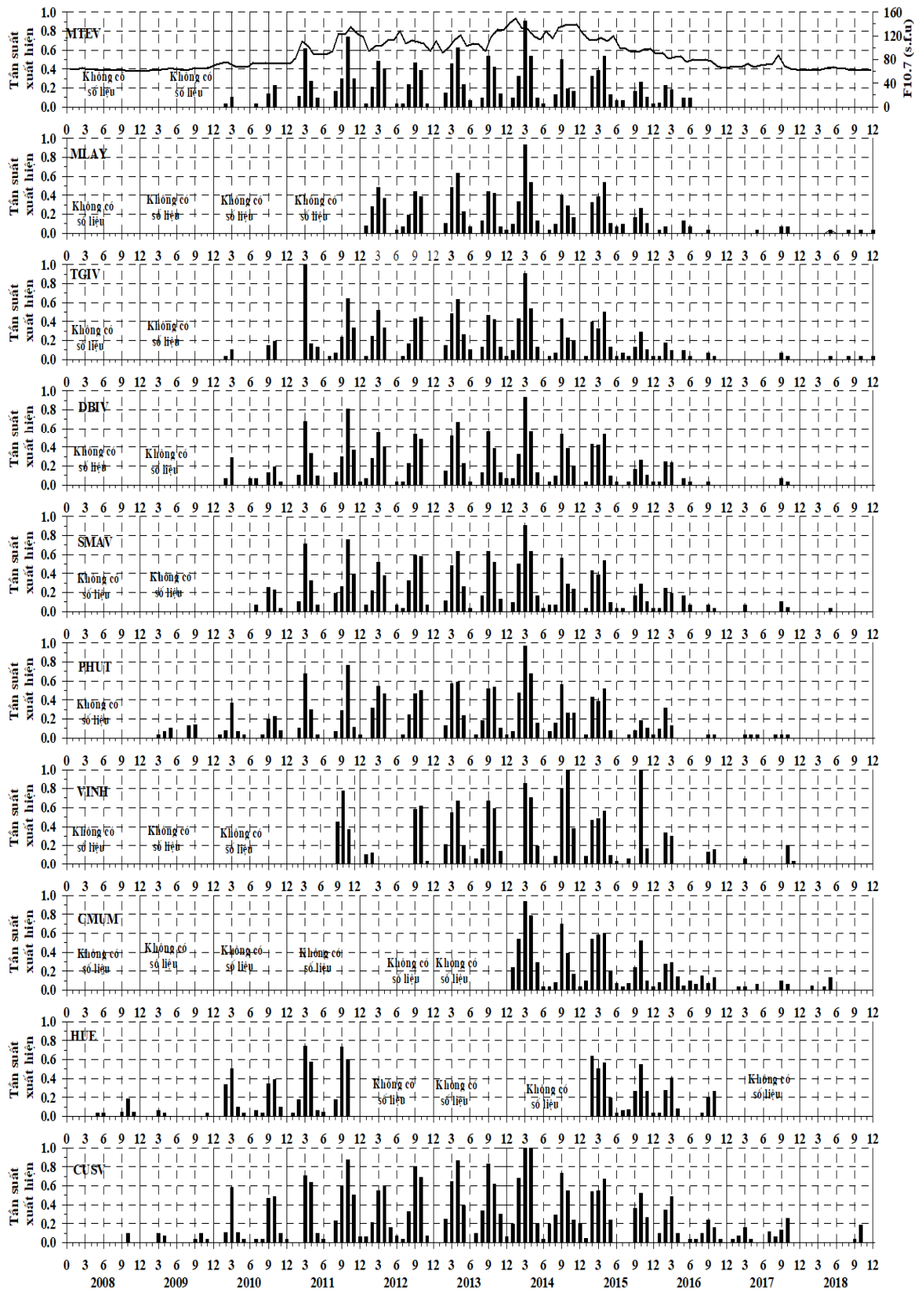
Sau khi tính được ΔR hàng ngày, NCS tính tần suất xuất hiện bất thường điện ly hàng tháng là tỉ số giữa các ngày bất thường với các ngày quan sát trong một tháng tại một trạm, kết quả được biểu diễn trên hình 4.3 và hình 4.4. Các hình này chỉ ra ở tất cả các trạm, tần suất xuất hiện bất thường điện ly hàng tháng đạt cực đại vào các tháng phân điểm (tháng 3, 4, 9, 10) và có giá trị nhỏ vào thời kỳ mùa hè (tháng 5, 6, 7, 8) và thời kỳ mùa đông (tháng 1, 2, 11, 12). Ở mỗi hình có ghi rõ tên trạm ở góc trên cùng bên trái, thứ tự trạm từ trên xuống theo vĩ độ cao đến vĩ độ thấp ở hình 4.3 và từ vĩ độ thấp đến vĩ độ cao ở hình 4.4. Chồng lên chuỗi thời gian của tần suất xuất hiện hàng tháng của bất thường điện ly ở trạm MTEV ở trên cùng là giá trị F10.7 trung bình

tháng. Kết quả này là phù hợp với những nghiên cứu trước đó dựa vào các phương pháp khác nhau trong các chu kỳ hoạt động mặt trời cao và thấp [22,222,223]. Nhiều nghiên cứu đã đưa ra biến thiên theo mùa của các bong bóng plasma bằng cách sử dụng hiện tượng nhấp nháy tín hiệu vô tuyến truyền từ các vệ tinh. Tran et al. (2017) [159] đã phân tích các nhấp nháy biên độ (được xác định bởi hệ số S_4) trong giai đoạn 2006-2014 bằng cách sử dụng số liệu GPS tại 3 trạm PHUT, HUES và HOCM ở Việt Nam và nhận thấy rằng cực đại của hoạt động nhấp nháy xuất hiện trong thời gian các tháng phân điểm và cực tiểu vào các tháng mùa hè và mùa đông.

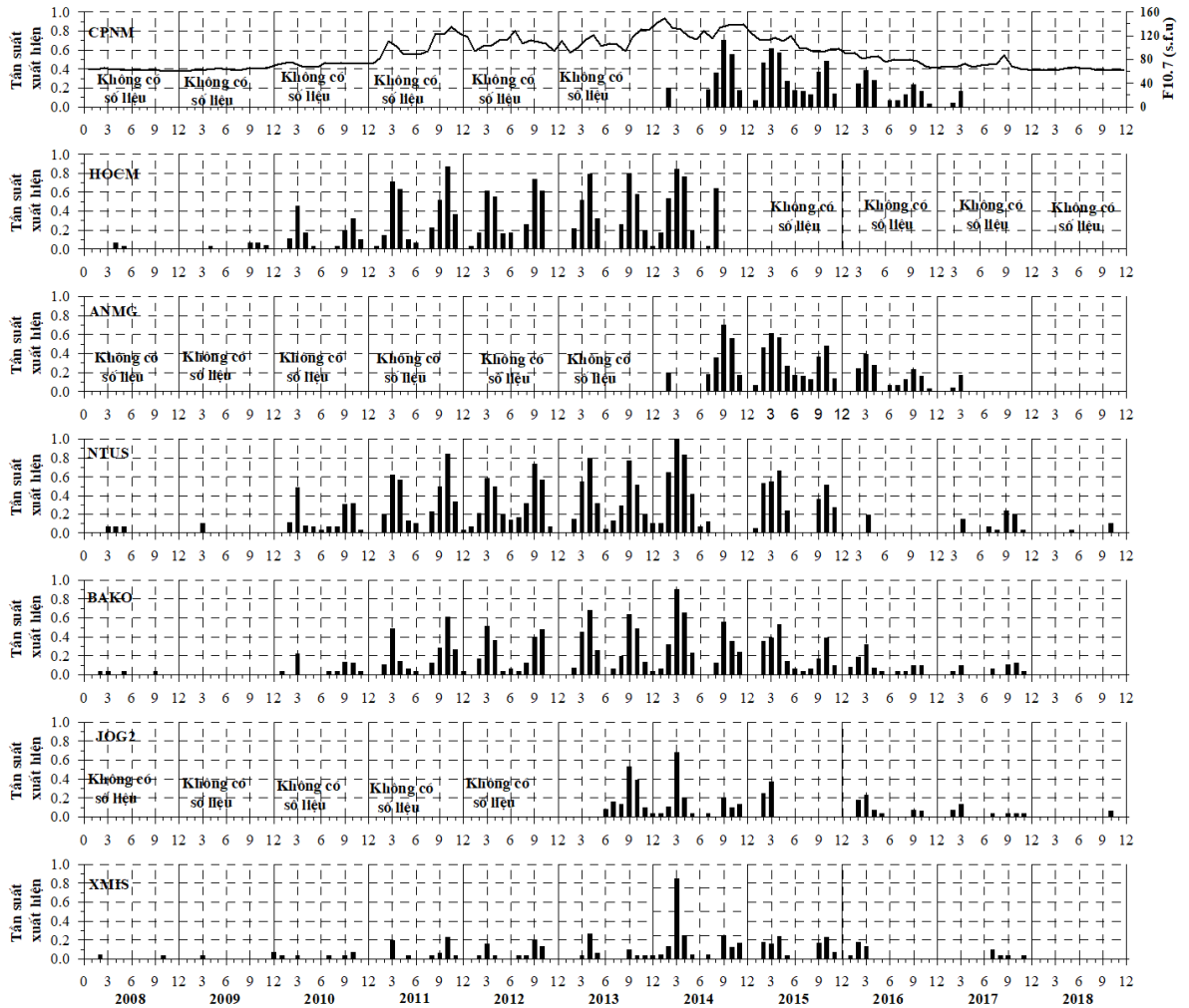
Sự xuất hiện cực đại của các nhấp nháy điện ly vào các tháng phân điểm được tìm thấy bởi nhiều tác giả trên thế giới như: Aarons (1993) [224], Chandra et al. (2003) [225], Burke et al. (2004) [100], Nishioka et al. (2008) [123], Abadi et al. (2014) [125], Liu et al. (2015) [226] cho khu vực châu Á; Huang et al. (2002) [227], Makela et al. (2004) [228] cho khu vực Thái Bình Dương; Wiens et al. (2006) [229], Portillo et al. (2008) [230], Okoh et al. (2017) [231], Abiriga et al. (2020) [232] cho khu vực châu Phi.

Tsunoda (1985) [118] đã sử dụng lý thuyết sự thẳng hàng của kinh tuyến từ và đường ranh giới ngày đêm để giải thích cho sự xuất hiện của các bất thường điện ly xích đạo đạt cực đại vào thời kỳ phân điểm. Vào thời kỳ phân điểm, đường ranh giới ngày đêm mặt trời được sắp xếp thẳng hàng với kinh tuyến từ, ở hai phía của xích đạo từ hoàng hôn ở lớp E liên kết xảy ra đồng thời. Độ dẫn của lớp E là thấp, trong khi đó tầng điện ly xích đạo vẫn được nâng lên theo độ cao. Do đó, sự gia tăng trường điện hướng Đông xung quanh thời điểm hoàng hôn diễn ra mạnh mẽ và tạo điều kiện thuận lợi cho việc phát sinh các bất thường ở tầng điện ly. Theo lý thuyết này, hai thời kỳ phân điểm là cùng một điều kiện, tuy nhiên, NCS đã quan sát thấy sự bất đối xứng giữa cực đại tần suất xuất hiện bất thường vào tháng 3, 4 và 9, 10. Từ năm 2014-2016 trong pha đi xuống của hoạt động mặt trời, tần suất xuất hiện vào phân điểm tháng 3 là lớn hơn phân điểm tháng 9. Vào năm 2011, trong pha đi lên của hoạt động mặt trời, tỉ lệ xuất hiện vào tháng 9 ở hầu hết các trạm là lớn hơn vào tháng 3. Nishioka et al. (2008) [123] đã chỉ ra rằng, ở khu vực châu Á và Đông Thái Bình Dương, trong năm 2005 và 2006, tỉ lệ xuất hiện bong bóng plasma vào tháng 3 phân điểm là lớn hơn vào tháng 9 phân điểm. Thực tế, trong các năm 2005 và 2006 rơi vào pha đi xuống của hoạt động mặt trời, vì vậy những quan sát của NCS là phù hợp với những quan sát của

Nishioka et al. cho khu vực châu Á.



Hình 4.3. Tần suất xuất hiện hàng tháng bất thường điện ly từ 2008-2018 tại các trạm: MTEV, MLAY, TGIV, DBIV, SMAV, PHUT, VINH, CMUM, HUE, CUSV.



Hình 4.4. Tần suất xuất hiện hàng tháng của bất thường điện ly từ 2008-2018 tại các trạm: CPNM, HOCM, ANMG, NTUS, BAKO, JOG2, XMIS.

Để giải thích sự bất đối xứng cực đại tần suất xuất hiện bất thường vào thời kỳ phân điểm, NCS xem xét các tham số kiểm soát, một vài cơ chế có thể có như sau: 1) sự thay đổi theo mùa thời gian đảo ngược của trường điện từ hướng về phía Đông sang hướng về phía Tây vào buổi tối sau khi mặt trời lặn [233]; 2) các trường điện quy mô nhỏ sinh ra trong lớp E có thể được ánh xạ tới lớp F và từ quyển dọc theo các đường sức trường từ do tính bất đối xứng bán cầu của gió trong vùng dynamo [234]; 3) thành phần gió nhiệt quyển thổi qua xích đạo làm thay đổi độ dẫn Pedersen được lấy tích phân dọc theo các đường sức từ trường [121]; 4) gradient theo phương kinh tuyến trong vùng độ dẫn Pedersen lớp E tích phân kiểm soát bởi độ từ thiên và vĩ độ địa lý của xích đạo từ ở một kinh tuyến nhất định [118]; 5) thành phần Đông-Tây của vận tốc trôi dạt plasma có thể liên quan tới sự phát triển của các bất thường plasma gây ra các nhấp nháy xuyên suốt cơ chế làm gia tăng trường điện hướng về phía Đông trước khi

đảo ngược [235].

Ảnh hưởng của gió thổi qua xích đạo dường như là đẩy (depress) lớp F xuống ở phía bán cầu khuất gió và nâng lớp F lên ở phía bán cầu có gió; sự phân bố bất đối xứng của ion hóa có thể dẫn tới sự gia tăng độ dẫn Pedersen tích phân (intergrated) theo trường từ làm ngăn chặn sự phát triển tính bất ổn định Rayleigh-Taylor và hoạt động bất thường tầng điện ly. Sử dụng dữ liệu từ 2 máy thăm dò thẳng đứng tầng điện ly gần các điểm liên hợp từ tại Chiang Mai, Thái Lan (18.8°N , 98.8°E , vĩ độ từ 13.0°) và Kototabang, Indonesia (0.2°S , 100.3°E , vĩ độ từ -10.0°) vào phân điểm tháng 9 năm 2004 và phân điểm tháng 3 năm 2005, Maruyama et al. (2009) [192] đã tìm thấy biên độ của gió theo phương kinh tuyến vào phân điểm tháng 9 năm 2004 là lớn hơn phân điểm tháng 3 năm 2005, tần suất xuất hiện của các bất thường xích đạo vào tháng 9/2004 là thấp hơn tháng 3/2005. Những quan sát này phù hợp với giả thuyết gió thổi qua xích đạo ngăn chặn tính bất ổn định Rayleigh-Taylor và do đó làm suy giảm các bất thường điện ly vào ban đêm [121]. Đây là một bằng chứng rõ ràng cho thấy gió theo phương kinh tuyến kiểm soát các bất thường điện ly. Maruyama et al. [192] đã tính toán mô hình gió nhiệt quyển trong giai đoạn 2004-2005 vào pha giảm của hoạt động mặt trời và xác nhận tính bất đối xứng phân điểm sự xuất hiện bất thường điện ly trong pha đi xuống. Mô hình gió nhiệt quyển trong pha đi lên cần phải được nghiên cứu sâu hơn nữa. Gần đây, Hu et al. (2020) [236] đã thống kê các đặc trưng xuất hiện các bong bóng plasma dựa vào các quan sát radar VHF ở Sanya vào thời kỳ phân điểm trong giai đoạn 2011-2016. Tác giả nhận thấy các kiểu đối ngược nhau về tính bất đối xứng phân điểm sự xuất hiện của các chùm bong bóng trong năm 2011 (trong pha đi lên của hoạt động mặt trời) và trong năm 2015 (trong pha đi xuống của hoạt động mặt trời) phù hợp tốt với các kiểu đối ngược nhau về sự gia tăng độ cao biểu kiến ($h'F$) của lớp F hoàng hôn trong năm 2011 và 2015. Từ những quan sát này, tác giả đã đề xuất rằng tính bất đối xứng phân điểm sự xuất hiện chùm bong bóng vào năm 2011 và 2015 có thể chủ yếu được gây ra bởi tính bất đối xứng độ cao của lớp F hoàng hôn, yếu tố kiểm soát tốc độ phát triển của tính bất ổn định R-T.

Như vậy từ những điều đã trình bày ở trên có thể kết luận rằng sự bất đối xứng phân điểm ở tần suất xuất hiện bất thường là do gió thổi qua xích đạo và sự bất đối xứng phân điểm của độ cao lớp F hoàng hôn.

Hình 4.3 và 4.4 biểu diễn biến thiên hàng tháng của chỉ số thông lượng mặt trời

F10.7 cùng với tần suất xuất hiện bất thường điện ly hàng tháng trong giai đoạn 2008-2018. Các hình vẽ cũng chỉ ra rằng các bất thường điện ly phụ thuộc vào hoạt động mặt trời. Trong các năm Mặt Trời hoạt động mạnh 2012-2014, tần suất xuất hiện bất thường hàng tháng lớn. Trong các năm 2008, 2009, 2018 hoạt động mặt trời là cực tiểu, tần suất xuất hiện bất thường là rất nhỏ thậm chí có một vài trạm không ghi được bất thường như: PHUT, VINH, MTEV, SMAV, XMIS và BAKO.

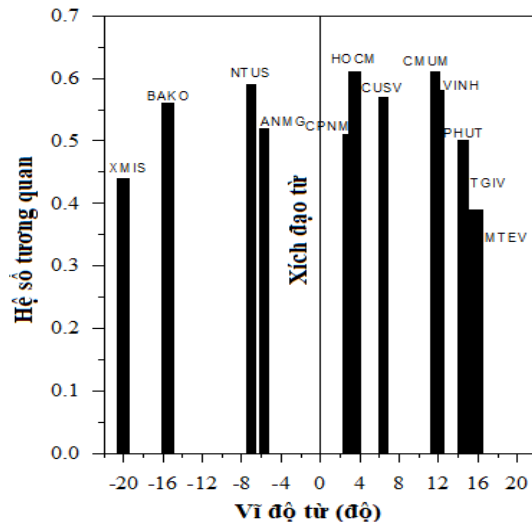
Để đánh giá ảnh hưởng của hoạt động mặt trời lên bất thường điện ly, hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường và F10.7 hàng tháng cho một vài trạm được tính toán, các kết quả được liệt kê trong *bảng 4.1* và biểu diễn trên *hình 4.5*.

Bảng 4.1. Hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường điện ly và thông lượng mặt trời F10.7 hàng tháng.

STT	Tên trạm	Vĩ độ từ	Khoảng thời gian	Hệ số tương quan
1	MTEV	15,92	2010-2018	0,39
2	MLAY	15,54	2012-2018	0,49
3	TGIV	15,06	2010-2018	0,39
4	DBIV	14,84	2010-2018	0,51
5	SMAV	14,49	2010-2018	0,49
6	PHUT	14,49	2009-2018	0,50
7	VINH	11,91	2011-2018	0,58
8	CMUM	11,61	2014-2018	0,61
9	CUSV	6,43	2008-2018	0,57
10	HOVM	3,47	2008-2014	0,61
11	CPNM	2,8	2015-2018	0,51
12	ANMG	-5,73	2014-2018	0,52
13	NTUS	-7,05	2008-2018	0,59
14	BAKO	-15,52	2008-2018	0,56
15	JOG2	-16,75	2013-2018	0,47
16	XMIS	-19,99	2008-2018	0,44

Từ *bảng 4.1* nhận thấy rằng các hệ số tương quan có thể được chia thành 3 nhóm với các khoảng giá trị khác nhau: 1) đối với các trạm CPNM và ANMG gần xích đạo từ, hệ số tương quan lần lượt là: 0,51, 0,52; 2) đối với các trạm ở các vùng đỉnh EIA như VINH, CMUM, CUSV và HOVM ở bán cầu bắc và BAKO, NTUS ở bán cầu nam, nằm trong khoảng 0,56÷0,61; 3) đối với các trạm ở phía ngoài vùng đỉnh EIA như MTEV, MLAY, TGIV ở bán cầu bắc và JOG2, XMIS ở bán cầu nam, nằm trong khoảng 0,39÷0,49. Do đó, hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường

hàng tháng và hệ số thông lượng mặt trời F10.7 ở những trạm gần vùng đỉnh EIA về phía xích đạo cao hơn ở những trạm tại xích đạo từ và các trạm ở vùng đỉnh EIA hướng về phía cực.



Hình 4.5. Hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường điện ly và F10.7 hàng tháng tại một số trạm.

Các nghiên cứu trước đó đã chỉ ra rằng các bất thường điện ly ở khu vực EIA chủ yếu liên quan tới các bong bóng plasma xích đạo (EPB) [58,125,237,238]. Khi xuất hiện các EPB, vùng đáy lớp F trở nên bất ổn định tại xích đạo từ sau khi mặt trời lặn, TEC bị suy giảm mạnh. Các EPB này thường gây ra nhấp nháy tín hiệu GPS và được sinh ra do tính bất ổn định plasma Rayleigh-Taylor. Những nghiên cứu trước đó [56,114,119,239,240] đã nhận thấy rằng EPB kéo dài từ xích đạo từ tới vùng đỉnh EIA. Các vùng xung quanh đỉnh EIA có mật độ điện tử cao hơn vùng xích đạo từ. Beniguel et al. (2009) [241] và Abadi et al. (2014) [125] nhận thấy rằng các nhấp nháy mạnh tập trung ở các vùng đỉnh EIA. Vì cường độ của nhấp nháy biên độ tỉ lệ thuận với mật độ điện tử nên các nhấp nháy mạnh được mong đợi ở vùng đỉnh EIA nơi có mật độ điện tử là cao [126]. Valladares et al. (2004) [122] chỉ ra rằng các nhấp nháy đạt cực đại ở hầu hết những vùng vĩ độ thấp hơn ranh giới của đỉnh EIA ở khu vực kinh tuyến châu Mỹ. Các nhấp nháy mạnh tập trung tại các trạm gần các vùng đỉnh EIA ở về phía xích đạo như: VINH, CMUM, CUSV, HOCM, BAKO, và NTUS, hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện bất thường và hệ số thông lượng mặt trời F10.7 hàng tháng tại các trạm này là cao hơn so với các trạm ở vị trí gần xích đạo và các trạm gần vùng đỉnh nhưng ở về phía cực. Các hệ số tương quan này nhỏ hơn tương quan giữa biên độ TEC tại 2 đỉnh EIA và thông lượng mặt trời F10.7 như đã chỉ ra trong chương 3. Điều

này có thể là do mật độ điện tử tầng điện ly chủ yếu bị tác động bởi hoạt động mặt trời, trong khi đó bất thường điện ly phụ thuộc vào các điều kiện phức tạp hơn như tầng điện ly, hoạt động từ, hoạt động mặt trời.

Ngoài ra các bất thường điện ly tại các khu vực đỉnh EIA cũng được gây ra bởi các bất thường điện ly dịch chuyển quy mô trung bình (MSTID). Đưa vào mô hình SAMI3/ESF một MSTID là một sóng điện trường di chuyển để nghiên cứu phản ứng của tầng điện ly với MSTID, Krall et al. (2011) [242] đã chỉ ra rằng sự liên kết giữa MSTID ở những vĩ độ thấp-trung bình và lớp F xích đạo dẫn tới sự phát triển của bong bóng plasma xích đạo. Lakshmi Narayanan et al. (2014) [141] đã chỉ ra ranh giới xuất hiện MSTIDs có thể tồn tại xung quanh đỉnh dị thường ion hóa xích đạo và đỉnh này có liên quan đến việc ngăn cản sự di chuyển MSTIDs đến các vĩ độ thấp hơn và xích đạo. Lakshmi Narayanan et al. [141] cũng chỉ ra rằng phình áp suất xích đạo lúc nửa đêm liên quan tới MSTID và đóng vai trò ngăn chặn MSTID di chuyển tới những vĩ độ thấp hơn. Taori et al. (2015) [142] đã chỉ ra MSTID ở vĩ độ thấp và EPB tại xích đạo xuất hiện đồng thời ở khu vực Ấn Độ. Các tác giả đã cho rằng sự xuất hiện MSTID như đã quan sát được có thể là mầm mống để kích thích sự hình thành EPB ở xích đạo và các EPB này lan truyền lên vùng vĩ độ thấp. Hisao et al. (2018) [143] đã quan sát được các sự kiện EPB khi có sự xuất hiện của MSTID mà không có những điều kiện thuận lợi cho việc nâng lên của lớp F ở khu vực Nam Mỹ. Nghiên cứu cũng kết luận rằng các MSTID có thể là một trong những mầm mống để sinh ra các EPB. Le Huy Minh et al. (2016b) [150] đã quan sát được MSTID trong thời gian bão từ vào tháng 3 năm 2015 ở khu vực Đông Nam Á. MSTID này được sinh ra vào thời điểm sau khi Mặt Trời lặn ở đỉnh bắc EIA và di chuyển hướng về phía xích đạo với vận tốc khoảng 210m/s. Do đó, các MSTID di chuyển về phía xích đạo và chúng là một trong những nguồn để các EPB hình thành có thể cũng làm cho các hoạt động của các bất thường điện ly tại những trạm gần các vùng đỉnh EIA về phía xích đạo là cao.

4.3. Sự phân bố của bất thường điện ly theo vĩ độ và thời gian

Để quan sát sự phân bố bất thường điện ly theo vĩ độ và thời gian, NCS thành lập sơ đồ các giá trị $ROTI \geq 0.5$ TECU/min [179] theo thời gian và vĩ độ tại tất cả các trạm GPS ở Việt Nam và khu vực lân cận trong khoảng thời gian 2008-2018, những kết quả này được trình bày ở hình 4.6. Hình này được phân chia thành 1 lưới với kích thước $0.5h$ (UT) \times 0.5° (vĩ độ địa lý) cho tất cả các ngày. NCS quan sát thấy sự phân

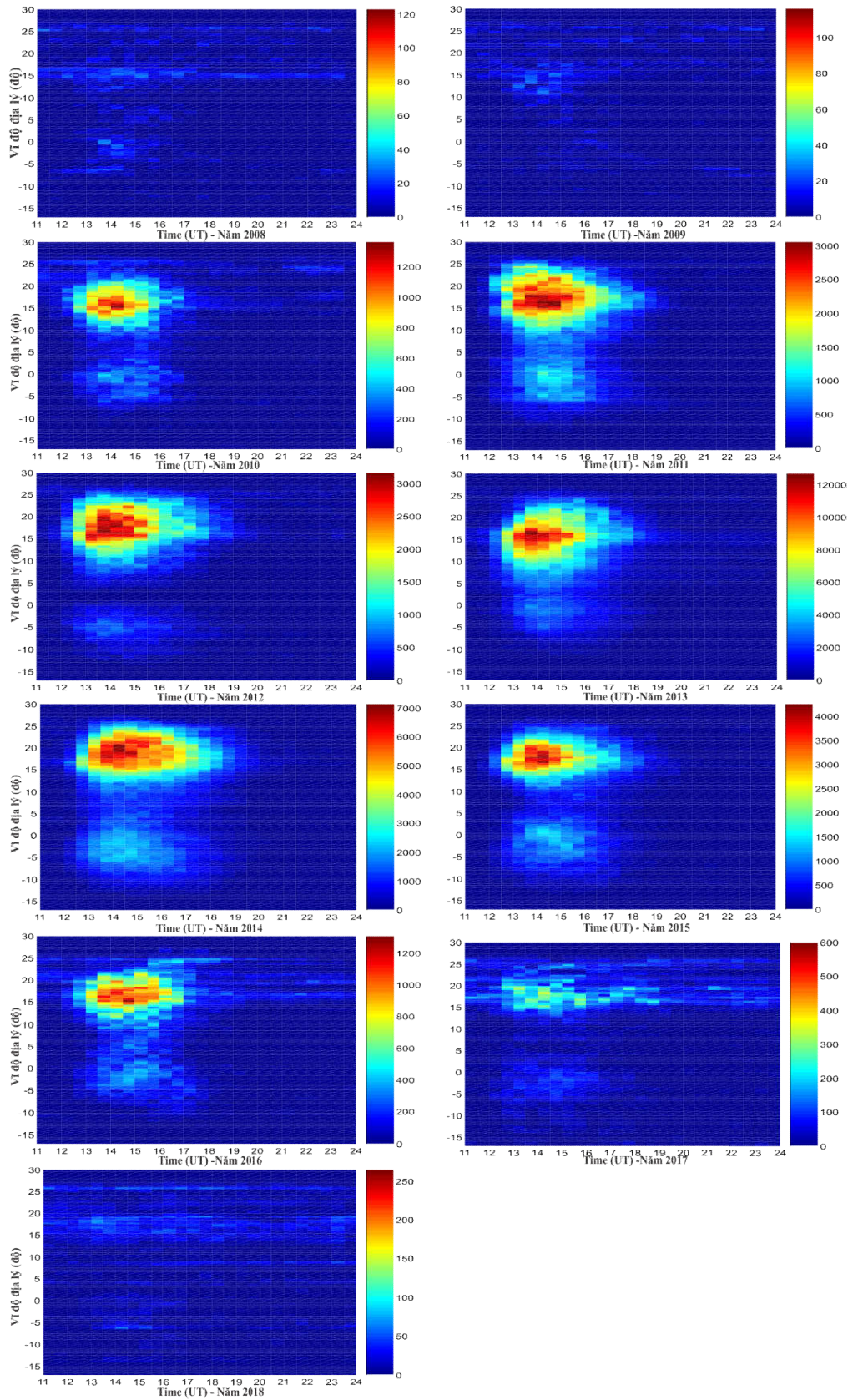
bỏ bất thường theo thời gian và vĩ độ có những nét đặc trưng sau:

- (1) Hầu hết các bất thường điện ly xuất hiện sau khi mặt trời lặn cho tới trước nửa đêm (từ 18:00-24:00 LT);
- (2) Hoạt động bất thường đạt cực đại vào khoảng từ 20:30-22:00 LT;
- (3) Có rất ít bất thường xuất hiện vào các giờ sau nửa đêm.

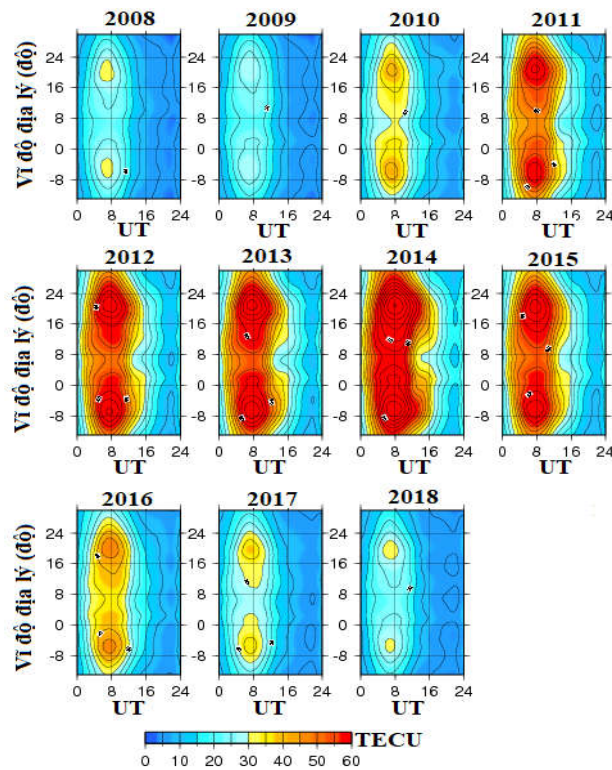
Ngoài các đặc trưng kể trên NCS cũng quan sát được sự tập trung của các bất thường điện ly ở các vĩ độ địa lý vào khoảng 15° - 22° N (8° - 15° vĩ độ địa từ). Vào các năm 2008-2009 và 2017-2018, hoạt động mặt trời yếu vì thế sự phân bố của các bất thường điện ly không rõ ràng. Ngoài ra, ở bán cầu Nam có ít trạm quan sát và do đó sự phân bố bất thường điện ly ở Nam bán cầu ít rõ ràng hơn ở Bắc bán cầu.

Để có thể quan sát rõ ràng hơn vị trí xuất hiện cực đại bất thường điện ly ban đêm với vị trí đỉnh EIA ban ngày, NCS đã thành lập các sơ đồ TEC trung bình hàng năm theo thời gian và vĩ độ khu vực Đông Nam Á giai đoạn 2008-2018 (*hình 4.7*). Hình này chỉ ra các giá trị TEC trung bình năm có 2 cực đại rõ rệt ở về 2 phía của xích đạo từ. Đỉnh Bắc được quan sát ở khoảng vĩ độ 20° - 22° N., tức là ở phần phía Bắc của lãnh thổ Việt Nam, đỉnh Nam được quan sát ở 5° - 7° S. Với sự phân bố các bất thường đã chỉ ra ở trên (*hình 4.6*) cùng với vị trí của các đỉnh EIA chỉ ra ở đây, NCS kết luận rằng sự phân bố các bất thường điện ly xuất hiện xung quanh đỉnh Bắc EIA hơn là ở xích đạo từ. Một vài nghiên cứu trước đây như Valladares et al. (2004) [122], Rama Rao et al. (2006) [56] về bất thường điện ly thông qua dữ liệu nhấp nháy điện ly cũng tìm thấy sự tập trung của hoạt động nhấp nháy xung quanh các đỉnh EIA.

Hình 4.7 cũng cho thấy trong khoảng thời gian các năm mặt trời hoạt động yếu (từ 2008-2009 và từ 2017-2018), biên độ của các đỉnh dị thường là nhỏ, có mật độ điện tử xung quanh thấp, vì vậy hoạt động bất thường là yếu. Từ năm 2010 đến năm 2016 mặt trời hoạt động mạnh, mật độ điện tử xung quanh cao, hoạt động bất thường mạnh. Tại những vĩ độ thấp, sự sắp xếp của các bất thường này thông qua các đường sức trường từ phụ thuộc vào độ cao mà các bất thường điện ly đạt tới. Khi các bất thường này được ánh xạ xuống các vùng đỉnh EIA, các khu vực này có mật độ điện tử xung quanh cao hơn so với khu vực xích đạo, chính vì thế các bất thường ở khu vực gần các vùng EIA mạnh hơn so với khu vực xích đạo [159,238]. Do vậy, việc quan sát được sự xuất hiện hoạt động bất thường điện ly ở khu vực gần đỉnh EIA cao hơn khu vực xích đạo là phù hợp với các nghiên cứu đã đưa ra trước đây.



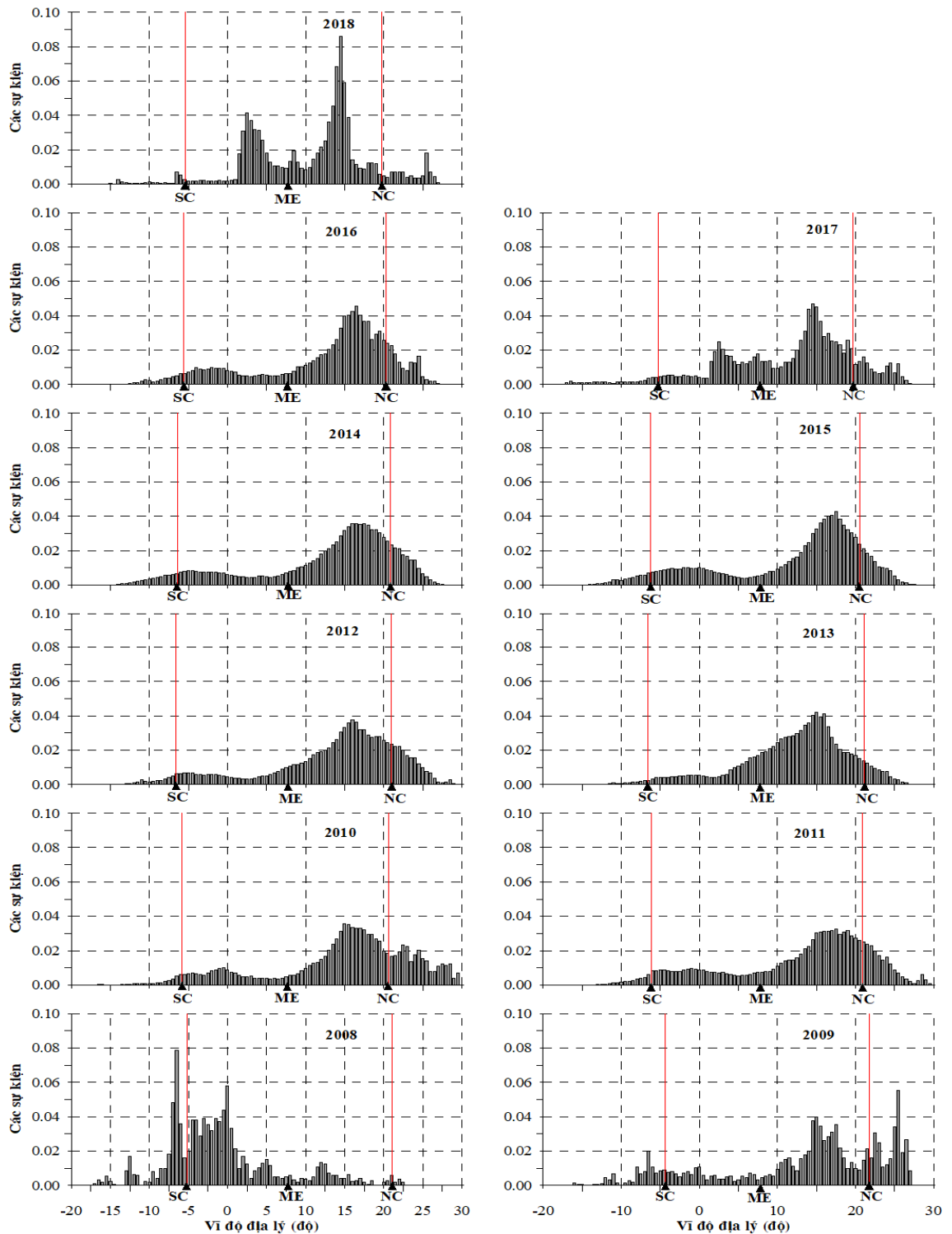
Hình 4.6. Sơ đồ các giá trị ROTI $\geq 0,5$ TECU/min theo vĩ độ và thời gian quốc tế trong giai đoạn 2008-2018 khu vực Đông Nam Á.



Hình 4.7. Sơ đồ TEC trung bình hàng năm theo thời gian và vĩ độ ở khu vực Đông Nam Á trong giai đoạn 2008-2018. Khoảng các đường đồng mức: 5TECU.

Vị trí xuất hiện bất thường cực đại được chỉ ra một cách định tính bằng cách tính sự phân bố của các bất thường theo vĩ độ ($ROTI \geq 0,5$ TECU/min), kết quả được biểu diễn trên *hình 4.8*, các đường thẳng đứng màu đỏ biểu diễn vị trí các đỉnh EIA, kí hiệu ME: xích đạo từ, NC: đỉnh Bắc, NS: đỉnh Nam. *Hình 4.8* chỉ ra rằng các bất thường điện ly tập trung ở khu vực gần đỉnh EIA hơn xích đạo từ, nhưng đỉnh của sự xuất hiện bất thường không trùng với đỉnh EIA ban ngày. *Hình 4.9* chỉ ra vĩ độ địa lý của các đỉnh EIA ban ngày và sự xuất hiện cực đại bất thường ban đêm ở cả 2 bán cầu từ 2010-2017, vĩ độ cực đại của các bất thường ở cả 2 bán cầu hầu hết ở những vĩ độ thấp hơn vĩ độ của các đỉnh EIA, bất thường đạt cực đại xuất hiện ở vị trí cách các đỉnh dị thường khoảng 4° - 5° về phía xích đạo.

Moraes et al. (2018) [5] đã phân tích dữ liệu từ 4 trạm GPS trên lãnh thổ Brazil (một trạm gần xích đạo từ, hai trạm ở gần vùng đỉnh Bắc EIA, và một trạm ở về phía cực của đỉnh EIA), kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự xuất hiện nhấp nháy cao ở gần đỉnh EIA. Những phát hiện mới của NCS chỉ ra mối quan hệ cụ thể hơn giữa các đỉnh EIA (*hình 4.8*) và đỉnh ROTI, các đỉnh ROTI hơi hướng về phía xích đạo của các đỉnh EIA Bắc và Nam bán cầu. Phát hiện mới này có thể được giải thích như sau:



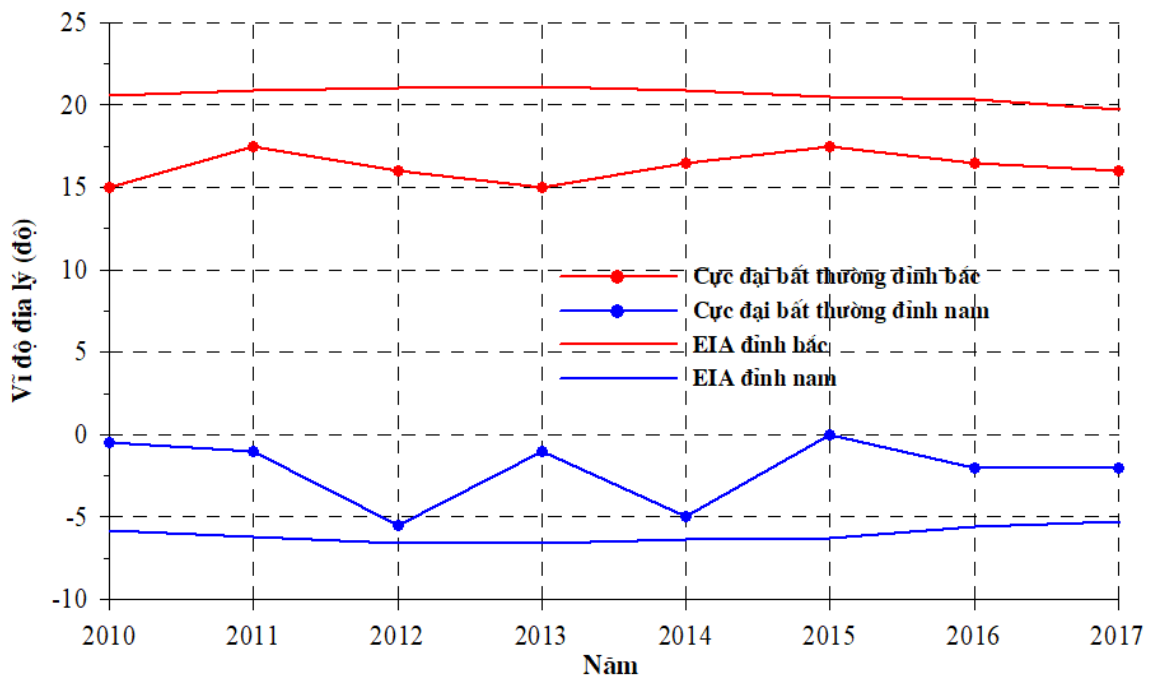
Hình 4.8. Thống kê các sự kiện bất thường điện ly ($ROTI \geq 0,5$ TECu/min) theo vĩ độ địa lý trong giai đoạn 2008-2018. Các kí hiệu: ME: xích đạo từ; SC: đỉnh Nam; NC: đỉnh Bắc.

(1) ROTI có giá trị cao hơn khi mật độ điện tử nền có giá trị cao bởi vì các sự kiện bất thường điện ly thường là các bất thường liên quan tới mật độ nền và tỉ lệ thuận với

mật độ nền. Trong khi đó mật độ điện từ nền có giá trị cao ở xung quanh các đỉnh EIA do đó sự xuất hiện của ROTI sẽ có giá trị cao ở khu vực này;

(2) Ở vùng vĩ độ thấp các bất thường điện ly thường đi kèm với các bong bóng plasma và chúng có nguồn gốc từ khu vực xích đạo từ, và không phải tất cả chúng đều đạt tới các đỉnh EIA, tức là, nguồn xuất hiện của các sự kiện bất thường ở khu vực xích đạo là cao hơn;

(3) Kết hợp của hai yếu tố ảnh hưởng, mật độ nền và nguồn xuất hiện các sự kiện, sự xuất hiện các sự kiện với các giá trị ROTI cao hơn một ngưỡng nhất định sẽ đạt cực đại gần đỉnh EIA theo hướng về phía xích đạo.



Hình 4.9. Vĩ độ địa lý của các đỉnh EIA ban ngày và vĩ độ địa lý vị trí nơi mà sự xuất hiện bất thường điện ly là cực đại trong giai đoạn 2010-2017.

Kết luận chương 4

Sử dụng mạng lưới dữ liệu GPS liên tục ở khu vực Đông Nam Á trong khoảng thời gian 2008-2018, các đặc trưng xuất hiện bất thường điện ly đã được nghiên cứu như: tần suất xuất hiện hàng tháng và tương quan của nó với thông lượng mặt trời F10.7, sự phân bố theo vĩ độ và thời gian của bất thường. Các kết quả có thể được tóm tắt như sau:

- Tần suất xuất hiện bất thường hàng tháng ở tất cả các trạm đạt cực đại trong các tháng phân điểm (tháng 3, 4, 9, 10) và phụ thuộc vào hoạt tính mặt trời.
- Tần suất xuất hiện bất thường thể hiện sự bất đối xứng phân điểm, trong pha

đi xuống của hoạt động mặt trời (2014-2016) tần suất xuất hiện vào xuân phân (tháng 3) cao hơn vào thu phân (tháng 9), trong pha đi lên của hoạt động mặt trời (2011) tần suất xuất hiện vào thu phân (tháng 9) lớn hơn vào xuân phân (tháng 3).

- Hệ số tương quan giữa tần suất xuất hiện hàng tháng của các bất thường điện ly và thông lượng mặt trời F10.7 hàng tháng tại các trạm gần khu vực đỉnh EIA về phía xích đạo là cao hơn khu vực xích đạo và khu vực đỉnh EIA về phía cực.

- Hoạt động bất thường chiếm ưu thế vào khoảng thời gian trước nửa đêm và đạt cực đại vào khoảng 20:30-22:00 LT. Hoạt động bất thường điện ly tập trung tại các vĩ độ địa lý vào khoảng 15°-22°N (8°-15° vĩ độ từ). Các sự kiện bất thường đạt cực đại hầu hết ở vĩ độ thấp hơn khoảng 4-5° so với sự xuất hiện cực đại EIA về phía xích đạo. Vì vậy, có thể kết luận rằng hoạt động bất thường điện ly xuất hiện ở khu vực đỉnh EIA về phía xích đạo cao hơn ở khu vực xích đạo và khu vực đỉnh EIA về phía cực.

CHƯƠNG 5

MÔ HÌNH HÓA TEC QUAN SÁT BẰNG CÁC HÀM TRỰC GIAO THỰC NGHIỆM VÀ SO SÁNH VỚI CÁC MÔ HÌNH TEC TOÀN CẦU

Nghiên cứu tầng điện ly không chỉ dựa trên các nghiên cứu quan sát mà còn cả những nghiên cứu mô hình. Nghiên cứu tầng điện ly bằng mô hình sẽ giúp chúng ta hiểu biết hơn về các cơ chế vật lý cũng như các đặc trưng hình thái của tầng điện ly. Với việc ra đời của mô hình điện ly toàn cầu IRI đã giúp ích phần lớn cho cộng đồng các nhà nghiên cứu điện ly dự đoán được khí hậu học không gian. Đặc trưng tầng điện ly phụ thuộc vào: kinh độ, vĩ độ, thời gian địa phương, chu kỳ mặt trời, hoạt động địa từ,... Chính vì thế ở những vùng có kinh vĩ độ khác nhau tầng điện ly cũng sẽ có những đặc trưng khác nhau. Do đó, các mô hình điện ly toàn cầu không thể phản ánh được đầy đủ các đặc trưng địa phương cho một khu vực cụ thể nào đó. Hơn nữa, Việt Nam là quốc gia nằm trong vùng EIA và tồn tại các bất thường điện ly ban đêm như đã được đề cập trong các chương trước của luận án. EIA và các bất thường điện ly thay đổi theo vị trí, hoạt động mặt trời và theo mùa, thậm chí là hàng ngày. Những biến thiên này gây khó khăn cho việc dự đoán các đặc điểm của tầng điện ly ở vùng vĩ độ thấp bằng các nghiên cứu mô hình. Chính vì thế, việc tiêm cận để xây dựng một mô hình điện ly cho riêng khu vực Việt Nam là cần thiết. Phương pháp EOF được sử dụng rộng rãi trong khoa học khí quyển [243] và trong nghiên cứu mô hình điện ly [244,245,246]. Trong chương này, NCS sẽ sử dụng phương pháp phân tích hàm trực giao thực nghiệm đã được đề cập đến trong chương 2 để bước đầu tiêm cận việc mô hình hóa các giá trị TEC ở Việt Nam cụ thể là đối với trạm Phú Thụy và Bạc Liêu. NCS cũng so sánh các giá trị TEC nhận được từ mô hình IRI, mô hình GIM/CODG, phân tích bằng phương pháp hàm trực giao thực nghiệm (EOF- Experimental Orthogonal Function) và TEC quan sát được từ các máy thu GPS tại Việt Nam. Các giá trị TEC nhận được từ: máy thu GPS, mô hình IRI-2016, mô hình CODG, phân tích EOF được gọi lần lượt là GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC.

5.1. Mô hình hóa TEC bằng phương pháp EOF

5.1.1. Phép phân tích EOF dữ liệu TEC

Sử dụng các giá trị TEC trung bình giờ theo ngày ($TEC(d,h)$: trong đó: d là ngày quan sát, h là giờ trong ngày) quan sát được tại trạm Phú Thụy để thực hiện phép phân tích EOF cho giai đoạn 2008-2018. Các dữ liệu gốc $TEC(d,h)$ được thể hiện dưới

dạng tổ hợp tuyến tính của một số lượng nhỏ các hàm cơ sở [247]:

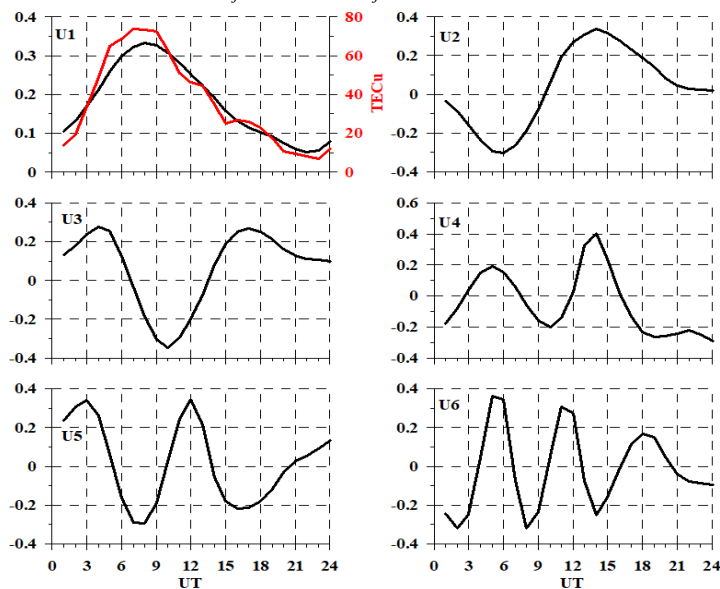
$$TEC(d, h) = \sum_{j=1}^n U_j(h) \times C_j(d) \quad (5.1)$$

trong đó $C_j(d)$ là hệ số của vec-tơ cơ sở $U_j(h)$ với chỉ số j chạy từ 1 tới n (số các mode EOF được giữ lại). NCS đã sử dụng phương pháp phân tách giá trị suy biến (SVD–singular value decomposition) để xác định các mode EOF cho phép giải thích cho hầu hết tính biến đổi trong dữ liệu TEC. Ma trận M dữ liệu TEC được phân tách thành các vec-tơ cơ sở bên phải U và bên trái V , cùng với ma trận các giá trị suy biến S theo phương trình:

$$M = USV^T \quad (5.2)$$

Các hệ số C được tính theo phương trình sau:

$$C_j(d) = S \times V_j^T \quad (5.3)$$

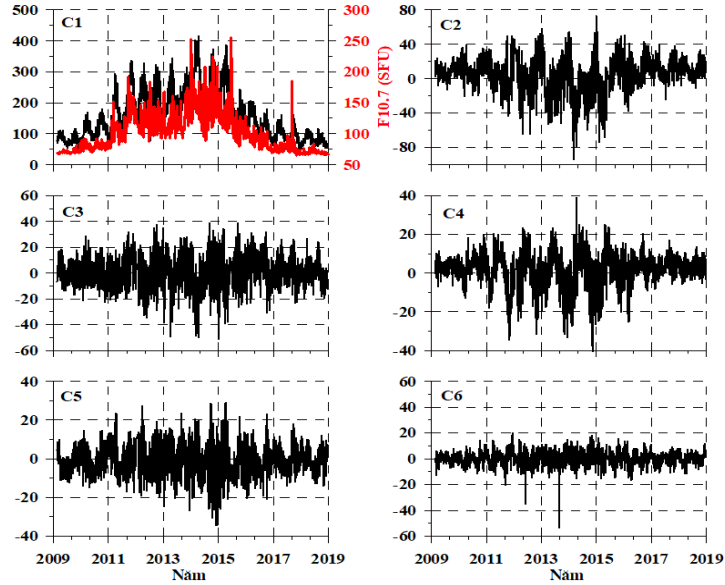


Hình 5.1. Sáu hàm cơ sở đầu tiên mô tả biến thiên ngày đêm. Vector cơ sở U_1 được so sánh với giá trị TEC trung bình ngày đêm tại trạm Phú Thụy.

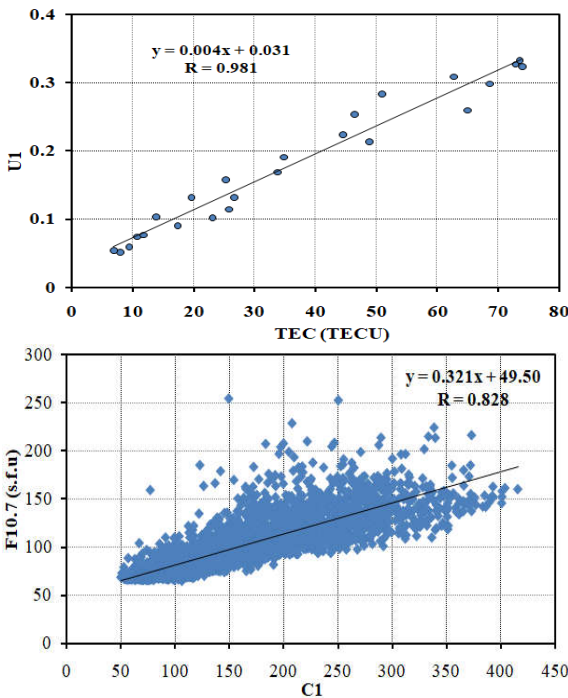
Các vec-tơ cơ sở của 6 mode đầu tiên trong ma trận U và các hệ số tương ứng C của chúng thu được bằng cách sử dụng phương trình (5.2) và (5.3) được chỉ ra ở hình 5.1 và hình 5.2. Hình 5.1 chỉ ra sáu hàm cơ sở đầu tiên mô tả đặc trưng biến thiên ngày đêm của TEC, vec-tơ cơ sở U_1 được so sánh với các giá trị TEC biến thiên ngày đêm ở khu vực Phú Thụy. Xu thế biến thiên của U_1 khá giống với xu thế biến thiên ngày đêm của TEC điều này chứng tỏ vec-tơ cơ sở U_1 phản ánh tốt biến thiên ngày đêm của TEC. Hình 5.1 cũng chỉ ra rằng biến thiên TEC ngày đêm (đường cong màu đỏ) ở Phú Thụy có một cực tiểu vào lúc rạng sáng khoảng 23:00 UT (06:00 LT), một cực đại vào khoảng 07:00-09:00UT (14:00-16:00 LT) và một sự gia tăng từ 23:00 UT (06:00 LT)

cho đến sáng ngày hôm sau 24:00 UT (07:00 LT).

Hình 5.2 chỉ ra sáu hệ số C_i tương ứng với sáu vectơ cơ sở U_i đầu tiên trong phân tích EOF. Hệ số C_1 được so sánh với thông lượng mặt trời F10.7 (đường cong màu đỏ), C_1 thể hiện xu thế biến thiên chu kỳ dài, theo chu kỳ hoạt động mặt trời.



Hình 5.2. Sáu hệ số tương ứng với sáu hàm cơ sở và thông lượng mặt trời F10.7



Hình 5.3. Tương quan giữa vectơ cơ sở U_1 với TEC tại trạm Phú Thụy (trung bình giờ trong giai đoạn 2008-2018).

Hình 5.4. Tương quan giữa hệ số C_1 của vec-tơ cơ sở đầu tiên U_1 với thông lượng bức xạ mặt trời F10.7.

Phân tích mối tương quan giữa độ lớn vec-tơ cơ sở U_1 với giá trị TEC từng giờ trong ngày (hình 5.3) cho thấy một mối tương quan dương cao với hệ số tương quan là 0,981. Mối tương quan cao này là dấu hiệu cho thấy vec-tơ cơ sở U_1 tái tạo hiệu quả các giá trị biến thiên TEC ngày đêm. Hình 5.4 là kết quả phân tích mối tương quan

giữa hệ số C_I của vec-tơ cơ sở U_I với F10.7, kết quả phân tích chỉ ra một mối tương quan dương cao với hệ số tương quan đạt tới 0,828, điều này cho thấy nó tái tạo tốt các đặc trưng biến thiên TEC chu kỳ dài và các biến thiên nửa năm và hàng năm.

5.1.2. Phân tích các hệ số EOF

Do sự hội tụ nhanh chóng của các hàm cơ sở, NCS đã sử dụng 6 mode EOF đầu tiên [247] để mô hình hóa TEC ở khu vực Phú Thọ và Bạc Liêu. Đối với một mô hình TEC hiệu quả, việc lựa chọn các tham số đầu vào để mô hình hóa những sự phụ thuộc của TEC vào hoạt động mặt trời và hoạt động từ rất quan trọng.

Bảng 5.1. Tỷ lệ phần trăm các hệ số tương quan giữa 6 hệ số EOF đầu tiên với các chỉ số hoạt động mặt trời và chỉ số hoạt động từ.

Các hệ số EOF	Các hệ số Mặt trời			Các chỉ số hoạt động từ		
	Số vết đen Mặt trời	F10.7	F10.7 _{av}	Kp	AE	Dst
C1	71.2	75.8	79.1	19.0	15.6	-23.1
C2	36.6	35.0	37.2	9.5	12.1	-5.5
C3	16.9	16.7	16.4	4.2	4.6	-4.1
C4	4.4	7.5	8.1	17.8	20.1	-13.3
C5	5.8	6.9	7.0	2.3	1.3	-6.8
C6	0.2	1.9	1.8	1.8	3.9	-4.4

Bảng 5.1 cho thấy các hệ số tương quan được biểu thị bằng tỷ lệ phần trăm giữa 6 hệ số EOF đầu tiên với một vài chỉ số năng lượng mặt trời và hoạt động từ thường được sử dụng trong việc mô hình hóa TEC, các tham số này nhận được từ Omniweb [162]. Trong số các chỉ số về hoạt động mặt trời, các hệ số EOF đầu tiên cho thấy một sự tương quan cao với chỉ số F10.7_{av} [248,249], trong đó F10.7_{av} được tính theo công thức:

$$F10.7_{av} = \frac{1}{2}(F10.7 + F10.7_{81}) \quad (5.4)$$

trong đó F10.7₈₁ là giá trị trung bình của F10.7 trong khoảng 81 ngày tập trung vào ngày quan tâm, tức là nếu chúng ta cần phân tích ngày thứ 41 thì ngày 41 sẽ được cho là ngày ở giữa trong khoảng thời gian 81 ngày lấy trung bình. Đối với các chỉ số hoạt động từ, 6 hệ số EOF đầu tiên cho thấy mối tương quan cao nhất với Dst, tiếp theo là Kp và sau đó là AE. Dựa trên thống kê về các hệ số tương quan trong bảng 5.1, NCS sử dụng tham số F10.7_{av} và Dst làm đầu vào để mô hình hóa sự phụ thuộc TEC vào hoạt động mặt trời và hoạt động từ. Do các tham số Dst và F10.7_{av} thay đổi theo ngày

trong năm, vì thế tham số đầu vào thứ ba là số ngày (DOY). Sau đó, các hệ số EOF được biểu diễn là tổng của các hàm tuyến tính và hài điều hòa theo Zhang et al. (2009) [246] như sau:

$$C_j(d) = B_{j1}(d) + B_{j2}(d) + B_{j3}(d) \quad (5.5)$$

Số hạng $B_{j1}(d)$ biểu diễn biến thiên tuyến tính của các hệ số EOF với các hoạt động mặt trời và hoạt động từ và được cho bởi.

$$B_{j1}(d) = a_{j1} + b_{j1}F107_{av}(d) + c_jDst(d) \quad (5.6)$$

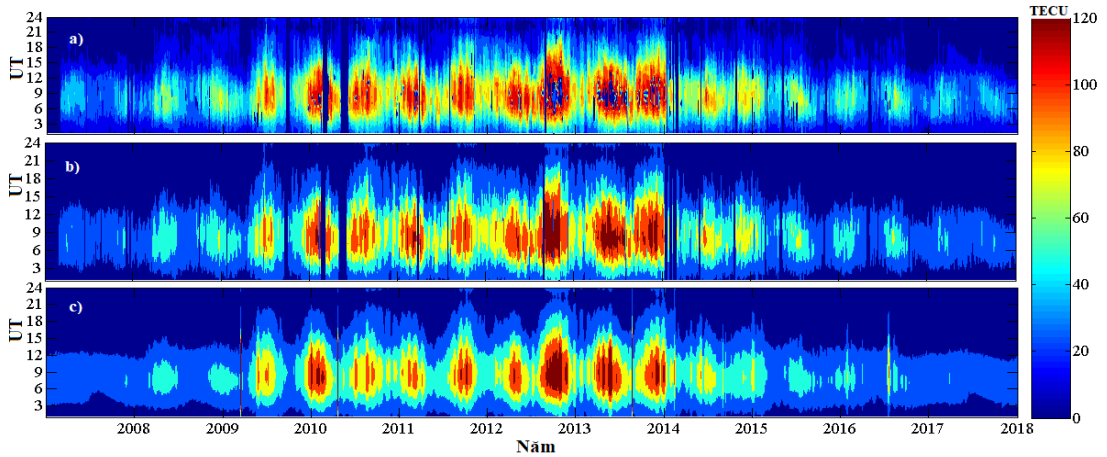
Các biến thiên nửa năm và hàng năm trong các hệ số EOF được biểu diễn trong biểu thức (5.5) theo các số hạng điều hòa $B_{j2}(d)$ và $B_{j3}(d)$ trong khoảng thời gian nửa năm và 1 năm (365,25 ngày) tương ứng, được biểu diễn bằng phương trình sau:

$$B_{j2}(d) = \left[a_{j2} + b_{j2}F107_{av}(d) + c_{j2}Dst(d) \right] \cos\left(\frac{2\pi d}{365.25}\right) + \left(d_{j2} + e_{j2}F107_{av}(d) + f_{j2}Dst(d) \right) \sin\left(\frac{2\pi d}{365.25}\right) \quad (5.7)$$

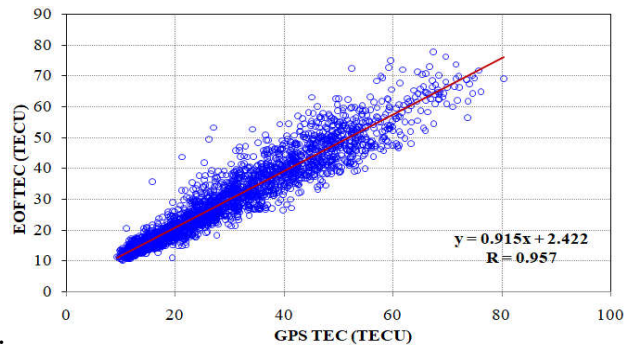
$$B_{j3}(d) = \left[a_{j3} + b_{j3}F107_{av}(d) + c_{j3}Dst(d) \right] \cos\left(\frac{4\pi d}{365.25}\right) + \left(d_{j3} + e_{j3}F107_{av}(d) + f_{j3}Dst(d) \right) \sin\left(\frac{4\pi d}{365.25}\right) \quad (5.8)$$

Các hệ số a_{j1} tới f_{j3} trong phương trình (5.6)- (5.8) được xác định bằng phương pháp bình phương tối thiểu. Sau khi tính được các hệ số a_{j1} tới f_{j3} chúng ta sẽ tính được các hệ số $C_j(d)$ trong phương trình (5.5) để phân tích lại các giá trị TEC theo các tham số đầu vào Dst và F10.7_{av}. Thay các hệ số $C_j(d)$ vào phương trình (5.1) từ đó tính được các giá trị TEC đã được mô hình hóa với các tham số đầu vào là Dst và F10.7_{av}. Biến thiên TEC quan sát từ GPS, TEC xây dựng lại từ sáu mode EOF đầu tiên không có tham số đầu vào và TEC được phân tích bằng việc sử dụng các hệ số EOF với tham số đầu vào là F10.7_{av}, chỉ số Dst được biểu diễn ở hình 5.5 và 5.7 lần lượt cho hai khu vực Phú Thọ và Bạc Liêu. Quan sát các hình 5.5a, b và hình 5.7a, b có thể thấy rằng 6 mode EOF là đủ để tái tạo biến thiên TEC. Hình 5.5c) và hình 5.7c) cho thấy việc phân tích TEC bằng 6 hệ số EOF cùng với các tham số đầu vào là Dst và F10.7_{av} đã thu được các đặc trưng biến thiên mùa và biến thiên theo hoạt động mặt trời của TEC là tương đối tốt ở Phú Thọ và Bạc Liêu. Phân tích tương quan giữa GPS TEC và EOF TEC cho thấy mối tương quan dương cao (hình 5.6 và hình 5.8), với hệ số tương quan 0,957 ở Phú Thọ và 0,802 ở Bạc Liêu. Các hệ số tương quan cao là một dấu hiệu cho thấy phương pháp phân tích EOF có khả năng tái tạo những nét đặc trưng của tầng

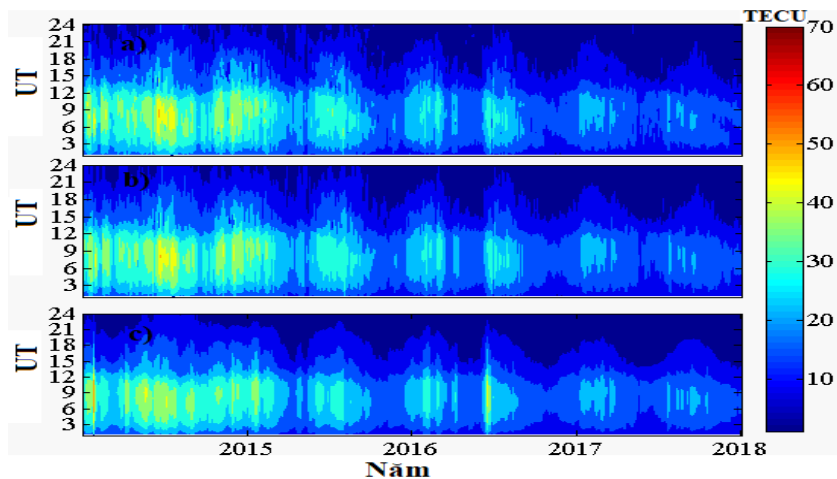
điện ly ở đỉnh EIA (Phú Thụy) cũng như vùng đáy EIA (Bạc Liêu).



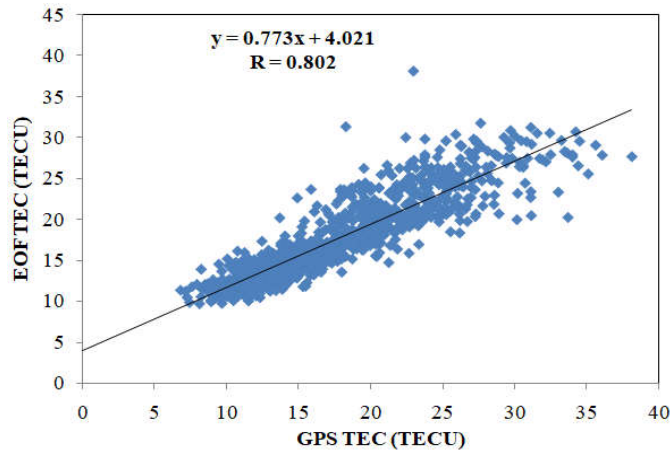
Hình 5.5. a) TEC từ các máy thu GPS, b) TEC xây dựng lại bằng phương pháp EOF, c) TEC phân tích bằng phương pháp EOF với các tham số đầu vào là $F10.7_{av}$ và chỉ số Dst tại Phú Thụy giai đoạn 2008-2018.



Hình 5.6. Tương quan giữa giá trị TEC quan sát bằng GPS và TEC đã được phân tích bằng EOF tại Phú Thụy giai đoạn 2008-2018.



Hình 5.7. a) TEC từ các máy thu GPS, b) TEC được xây dựng lại bằng phương pháp EOF, c) TEC phân tích bằng phương pháp EOF với tham số đầu vào là $F10.7_{av}$ và chỉ số Dst tại Bạc Liêu giai đoạn 2015-2018.



Hình 5.8. Tương quan giữa giá trị TEC quan sát bằng GPS và TEC đã được phân tích bằng EOF tại Bạc Liêu trong giai đoạn 2015-2018.

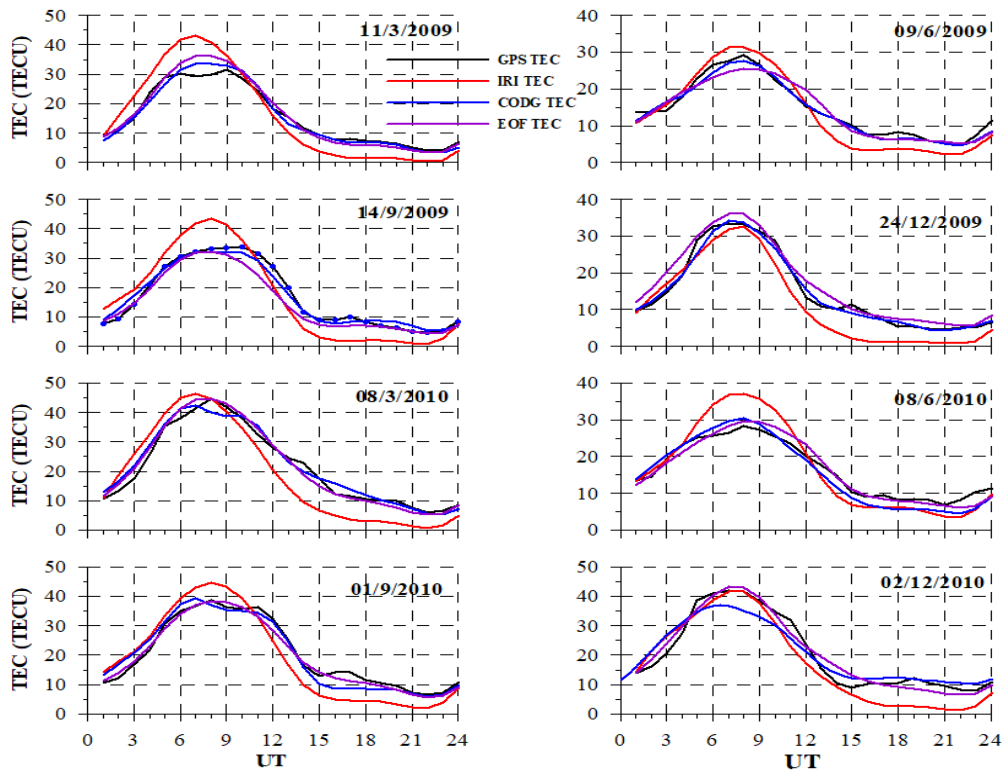
Tiếp theo NCS sẽ thử nghiệm việc áp dụng phương pháp EOF trong việc mô hình hóa TEC ở khu vực Phú Thụy và Bạc Liêu với các điều kiện yên tĩnh và bão từ.

5.2. So sánh TEC quan sát với TEC từ các mô hình

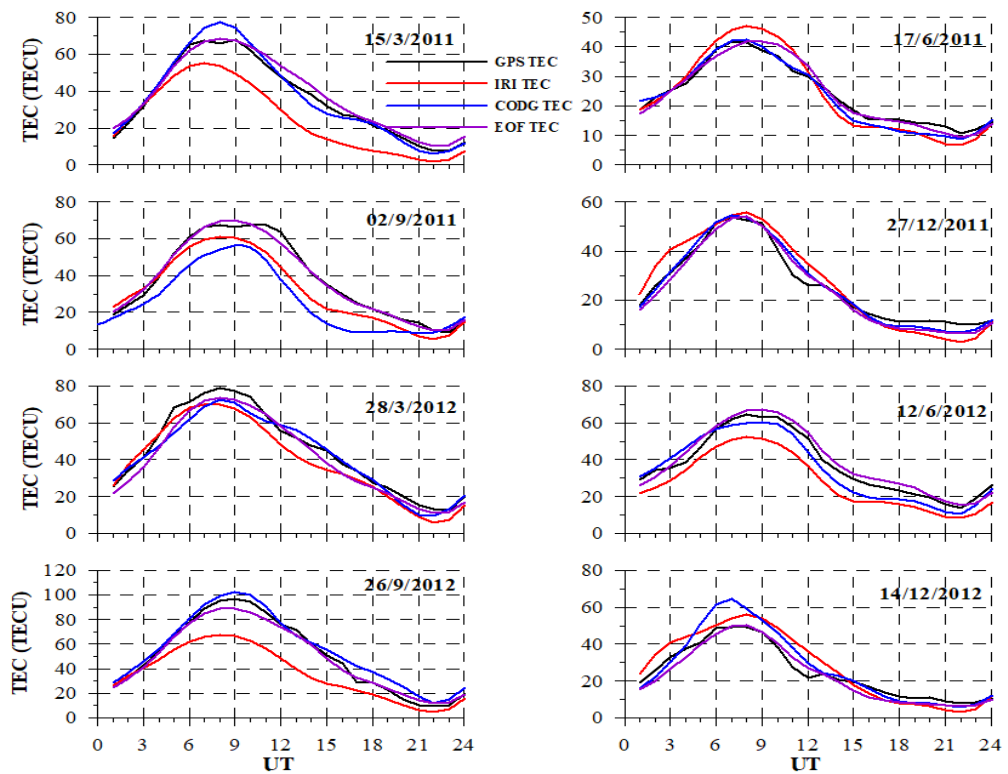
Để đánh giá hiệu quả của việc mô hình hóa TEC dựa trên phương pháp EOF NCS đã so sánh kết quả TEC nhận được từ phương pháp phân tích EOF với TEC nhận được từ mô hình điện ly toàn cầu IRI-2016 và mô hình TEC toàn cầu GIMs/CODG. Để chọn những ngày yên tĩnh và nhiễu loạn NCS sử dụng hai chỉ số Kp và chỉ số Dst. Một ngày được coi là yên tĩnh nếu $K_p \leq 3$ (nT) trong 3 giờ liên tiếp trong một ngày.

5.2.1. Đối với các ngày yên tĩnh

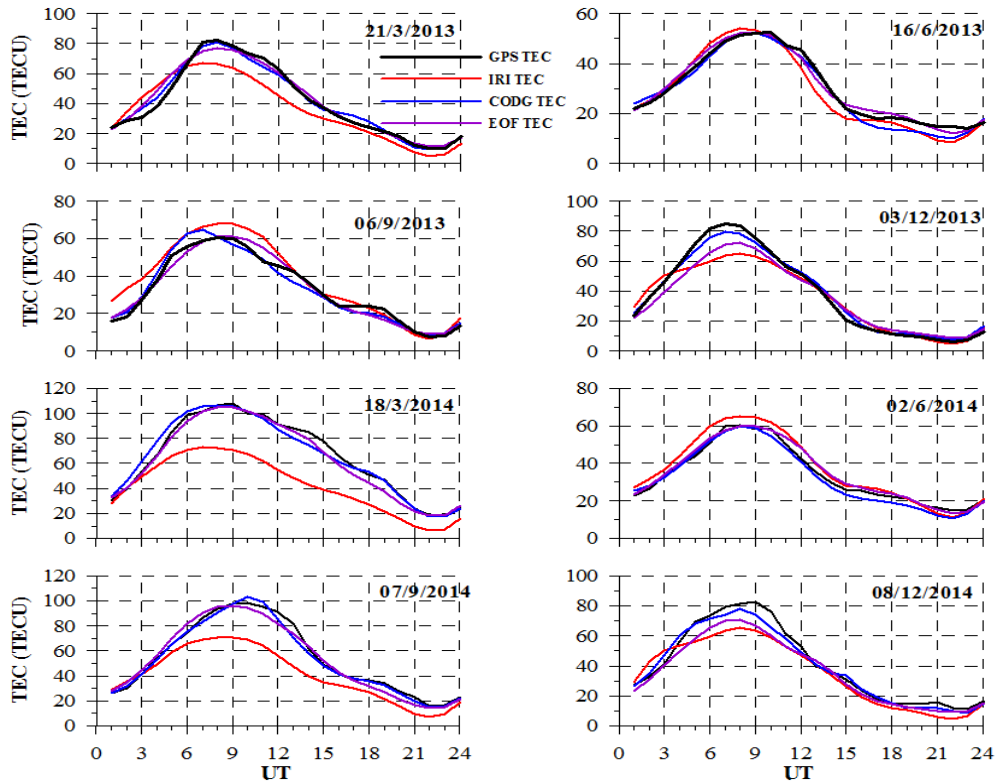
Lựa chọn các ngày trường từ yên tĩnh vào các tháng phân điểm (tháng 3 và tháng 9) và các tháng chí điểm (tháng 6 và tháng 12) dựa trên chỉ số hoạt động từ $K_p < 3$ và chỉ số Dst để tính biến thiên ngày đêm của TEC bằng phương pháp EOF. Trong quá trình phân tích các ngày được chọn sẽ được xóa đi khỏi tập dữ liệu để tạo ra các hệ số của phương pháp, kết quả được biểu diễn trên *hình 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13* đối với trạm Phú Thụy giai đoạn 2008-2018 và các *hình 5.14-5.15* đối với trạm Bạc Liêu giai đoạn 2015-2018. Các *hình 5.9-5.15* chỉ ra rằng biến thiên ngày đêm của GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC đều có một xu thế biến thiên chung: TEC vào ban ngày lớn hơn vào ban đêm, bắt đầu gia tăng từ sáng sớm và đạt cực đại ở khoảng 07:00-09:00UT (14:00- 16:00 LT), sau cực đại TEC giảm dần và đạt cực tiểu ở khoảng thời gian từ 18:00-23:00 UT (01:00-06:00 LT), sau đó giá trị TEC lại bắt đầu tăng đến sáng hôm sau.



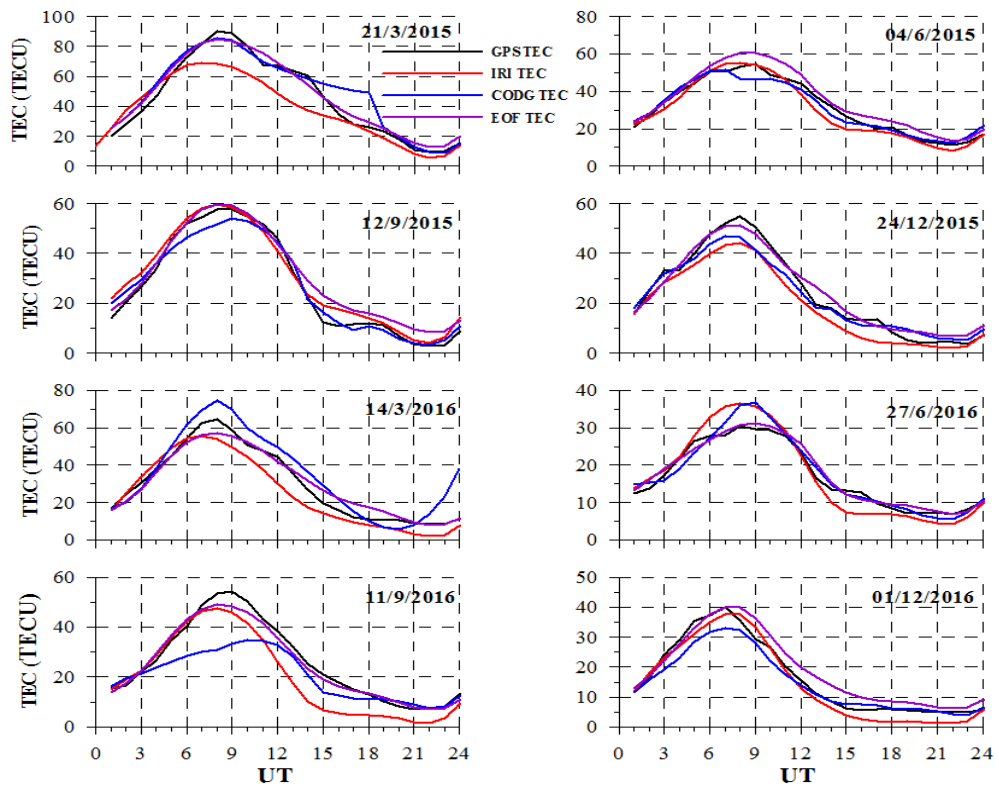
Hình 5.9. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2009-2010 tại Phú Thọ.



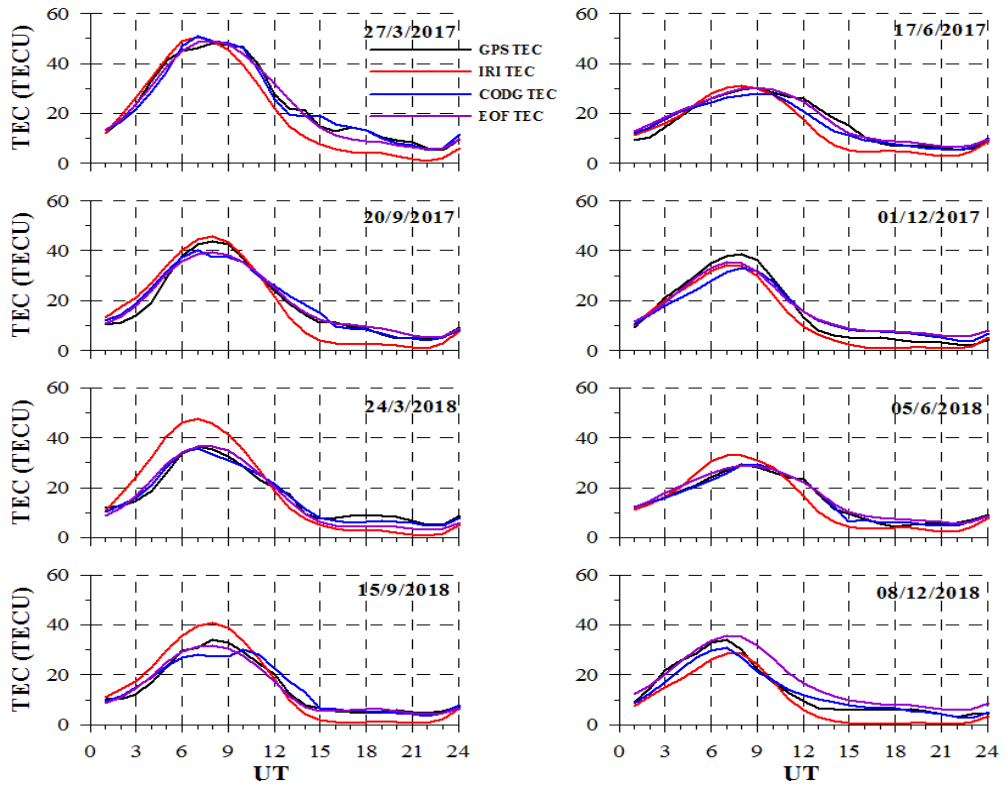
Hình 5.10. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2011-2012 tại Phú Thọ.



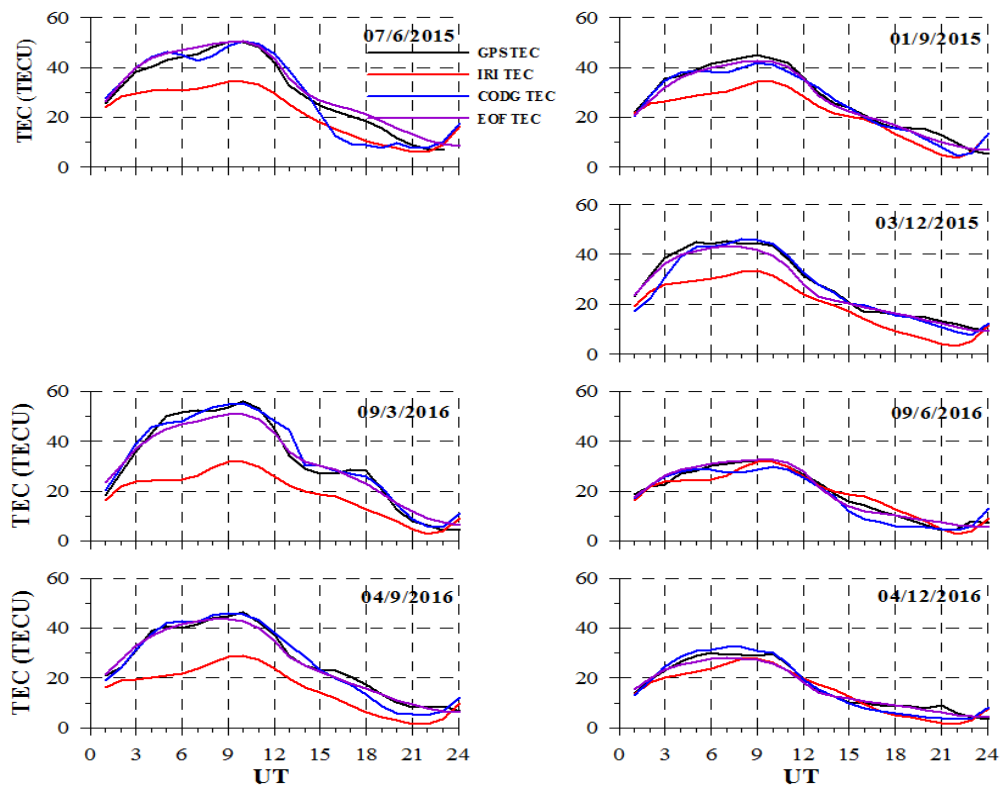
Hình 5.11. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2013-2014 tại Phú Thụy.



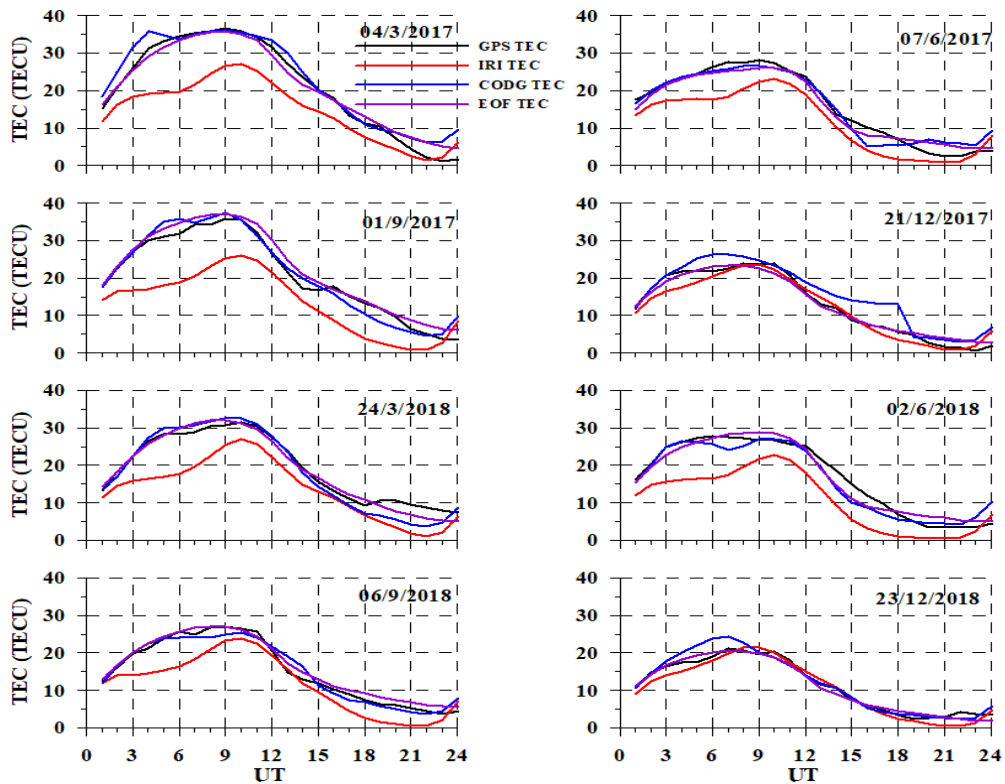
Hình 5.12. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2015-2016 tại Phú Thụy.



Hình 5.13. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2017-2018 tại Phú Thủy.



Hình 5.14. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2015-2016 tại Bạc Liêu.



Hình 5.15. Biến thiên ngày đêm các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC vào một số ngày yên tĩnh giai đoạn 2017-2018 tại Bạc Liêu.

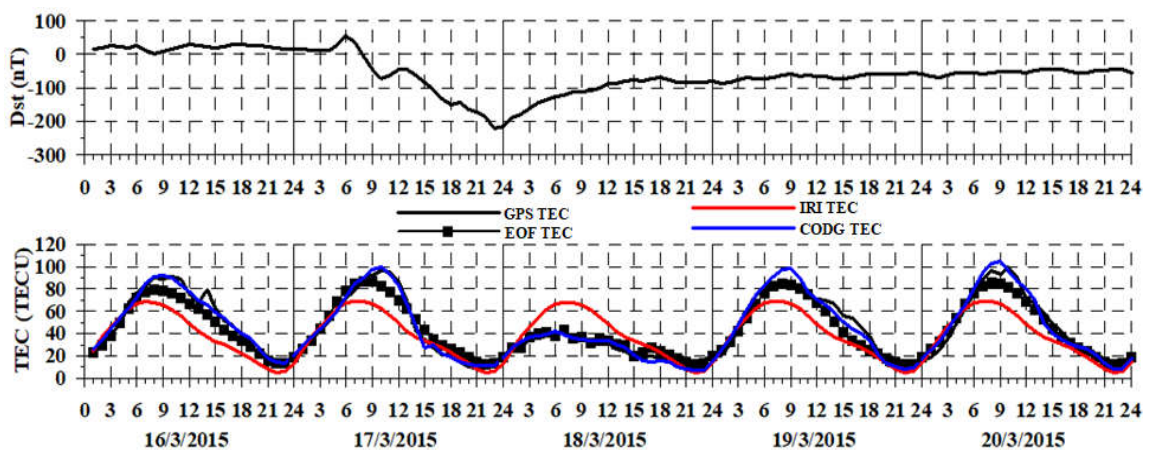
Từ hình 5.9 đến 5.13 cũng chỉ ra rằng ở Phú Thụy (vùng đỉnh EIA) các giá trị TEC nhận được từ IRI-2016 cao hơn GPS TEC trong năm hoạt động mặt trời yếu (năm 2009, 2018). Trong năm mặt trời hoạt động mạnh (2013, 2014), các giá trị IRI TEC hầu như thấp hơn nhiều so với các giá trị GPS TEC. Các hình 5.14 và 5.16 chỉ ra biến thiên ngày đêm TEC ở Bạc Liêu (vùng đáy EIA), các giá trị IRI TEC hầu như có giá trị nhỏ hơn GPS TEC trong các giai đoạn hoạt tính mặt trời mạnh và yếu. Việc mô hình IRI đánh giá ở mức quá cao hay quá thấp các giá trị TEC có thể là do số lượng trạm thăm dò thẳng đứng tầng điện ly phục vụ việc xây dựng mô hình IRI bị hạn chế ở khu vực Việt Nam nói riêng và khu vực xích đạo nói chung.

Các giá trị CODG TEC ở cả 2 trạm và trong các giai đoạn hoạt động mặt trời mạnh yếu khác nhau đều thể hiện mức không quá cao hay quá thấp so với GPS TEC. Các giá trị EOF TEC đã tái tạo tương đối tốt các giá trị GPS TEC ở cả 2 trạm và trong các giai đoạn hoạt tính mặt trời mạnh và yếu khác nhau.

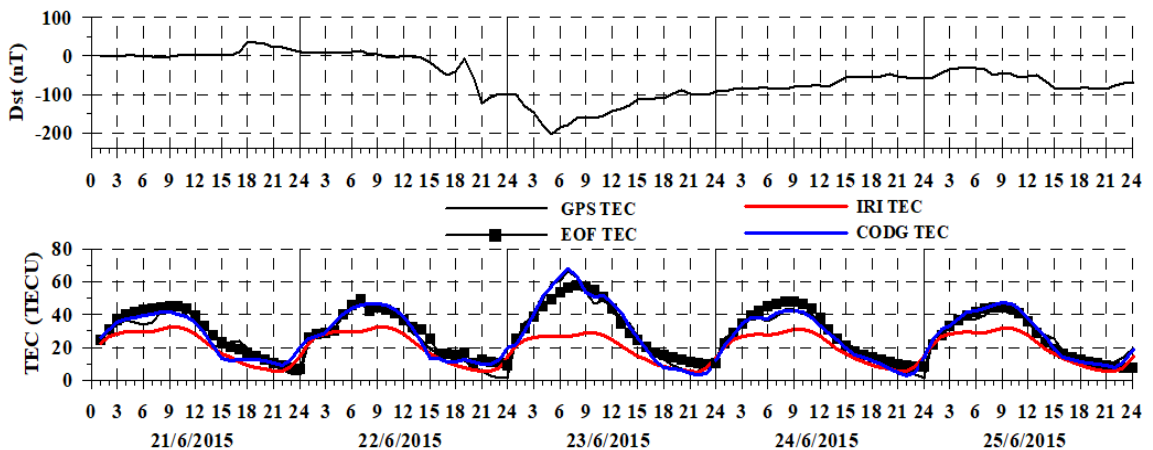
5.2.2. Đối với các ngày bão từ

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp EOF áp dụng vào phân tích các giá trị TEC trong thời gian bão từ, NCS đã mô phỏng TEC cho hai trận bão từ tiêu biểu ở 2

khu vực Phú Thọ và Bạc Liêu. Như đã nêu ở trên, các ngày thử nghiệm cho các trận bão từ đã bị loại trừ trong quá trình tính toán các hệ số trong phép phân tích EOF. Đối với trạm Phú Thọ NCS chọn trận bão từ 16/03-20/03/2015 kết quả được biểu diễn ở hình 5.16. Trong pha chính của bão vào ngày 17/03, biên độ GPS TEC gia tăng. Pha phục hồi bắt đầu từ ngày 18, biên độ biến thiên TEC suy giảm đáng kể khoảng 50 TECU so với ngày 17/03. Pha hồi phục kéo dài nhiều ngày sau đó từ 19-20/3. Mô hình IRI đã không dự đoán tốt các giá trị TEC trong trận bão từ này, trái lại mô hình CODG và EOF đã tái tạo tốt các giá trị TEC trong hiệu ứng của bão từ tác động đến tầng điện ly.



Hình 5.16. GPS TEC, EOF TEC, IRI TEC, CODG TEC vào thời gian bão từ ngày 16-20/3/2015 tại Phú Thọ.



Hình 5.17. GPS TEC, EOF TEC, IRI TEC, CODG TEC vào thời gian bão từ ngày 21-25/6/2015 tại Bạc Liêu.

Đối với trạm Bạc Liêu, trận bão từ 21/06-25/06/2015 được lựa chọn. Hình 5.17 chỉ ra các giá trị GPS TEC, IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC và giá trị Dst trong trận bão từ này, hiệu ứng của bão từ ảnh hưởng lên tầng điện ly là dương. Trong pha

chính của bão ngày 23/06, giá trị GPS TEC gia tăng. Pha hồi phục bắt đầu từ 05:00UT ngày 23/06, giá trị GPS TEC trong các ngày 24-25/06 trở về bằng với giá trị TEC ở mức ngày 21/6. Trong trận bão từ này các giá trị IRI TEC thấp hơn GPS TEC. Các giá trị CODG TEC, EOF TEC phù hợp với các giá trị GPS TEC và EOF TEC có vẻ phù hợp hơn cả.

5.3. Đánh giá sai số các mô hình

Từ việc phân tích TEC dựa trên EOF, NCS đã mô phỏng các giá trị TEC trung bình tháng trong các tháng 3, 6, 9, 12 đối với các năm cực tiểu hoạt động mặt trời (2009) và năm mặt trời hoạt động mạnh (2013) tại Phú Thuy. Vì dữ liệu TEC tại Bạc Liêu chỉ có từ năm 2015 đến 2018, vì thế NCS lựa chọn năm 2015 và 2018 để mô phỏng. Trong mỗi mô phỏng này, dữ liệu cho các tháng đã chọn đã được loại trừ khỏi dữ liệu được sử dụng để tạo ra các hệ số của phép phân tích. Cần lưu ý rằng trong việc tạo ra các hệ số, giả sử cho tháng 3 năm 2009, chỉ dữ liệu của tháng 3 năm 2009 đã bị loại trừ. Tham số sai số bình phương trung bình (RMSE: Root Mean Square Error) được sử dụng để đánh giá sự khác biệt giữa các giá trị TEC nhận được từ phép phân tích EOF, mô hình IRI, mô hình CODG với các giá trị TEC nhận được từ máy thu GPS tại Phú Thuy và Bạc Liêu. Các giá trị RMSE được tính theo công thức:

Đối với TEC nhận được từ phân tích EOF:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(GPSTEC)_i - (EOFTEC)_i]^2} \quad (5.9)$$

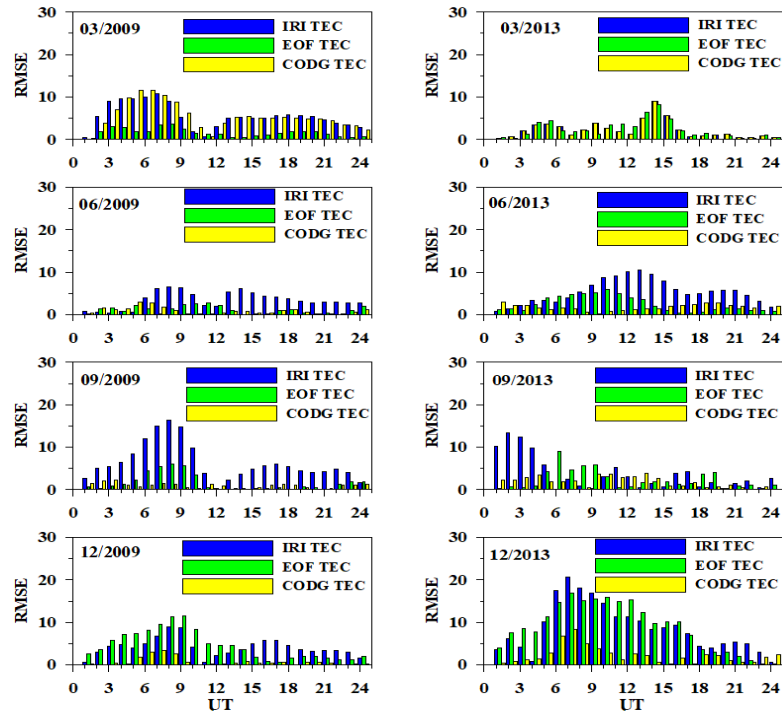
Tương tự đối với TEC từ mô hình IRI và từ mô hình CODG:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(GPSTEC)_i - (IRITEC)_i]^2} \quad (5.10)$$

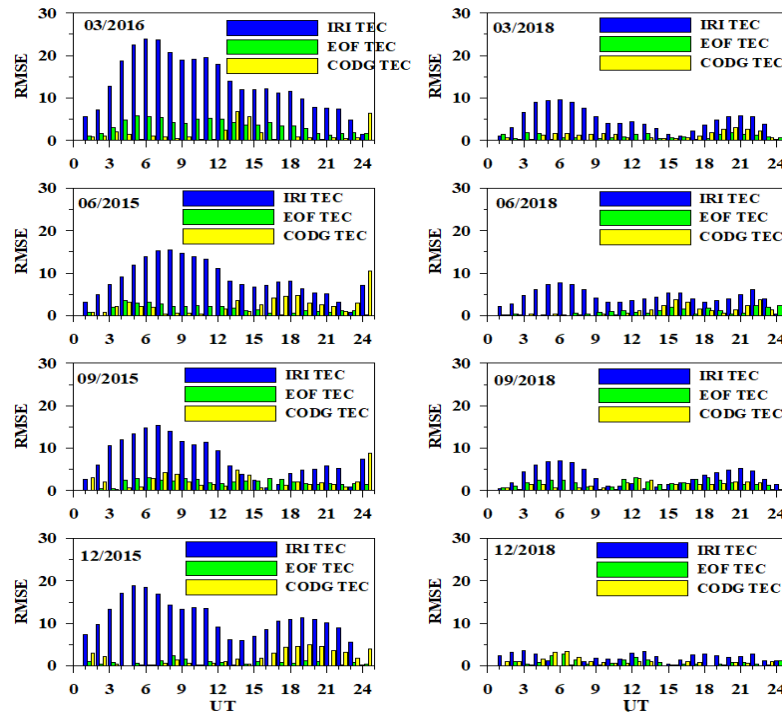
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(GPSTEC)_i - (CODGTEC)_i]^2} \quad (5.11)$$

N là tổng số giá trị TEC trung bình từng giờ trong từng tháng (N là số ngày trong tháng số liệu lựa chọn).

Biến đổi trong ngày của RMSE tại Phú Thuy vào năm 2009 (hoạt động mặt trời yếu) và năm 2013 (hoạt động mặt trời mạnh) được minh họa trên hình 5.18. Hình 5.18 cho thấy các giá trị RMSE năm 2013 lớn hơn năm 2009. Điều này có thể là do sự gia tăng của các quá trình điện động lực học ở xích đạo và các hiệu ứng liên quan, chẳng hạn như các bất thường điện ly xảy ra nhiều hơn trong những năm mặt trời hoạt động mạnh và ngược lại. Các tác động thứ cấp của các quá trình động lực học ở xích đạo có lẽ không được các mô hình nắm bắt tốt [247].



Hình 5.18. Biến thiên ngày đêm của sai số bình phương trung bình (RMSE) của IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC so với GPS TEC tại trạm Phú Thụy.



Hình 5.19. Biến thiên ngày đêm của sai số bình phương trung bình (RMSE) của IRI TEC, CODG TEC và EOF TEC so với GPS TEC tại trạm Bạc Liêu.

So sánh hiệu quả của các mô hình khác nhau đã chỉ ra rằng, CODG đã dự đoán TEC ở khu vực Phú Thụy với các giá trị RMSE thấp nhất ngoại trừ tháng 3 và sau đó

là mô hình EOF ngoại trừ tháng 12 trong năm 2009. Trong cùng năm này, IRI 2016 đã dự đoán TEC ở khu vực Phú Thọ với giá trị RMSE hầu như là cao nhất. Trong năm 2013, RMSE có giá trị cao nhất đối với IRI TEC và thấp nhất trong CODG TEC. Hình 5.19 chỉ ra biến đổi trong ngày của RMSE năm 2015 và năm 2018 (mặt trời hoạt động yếu) tại Bạc Liêu, các giá trị RMSE năm 2015 có giá trị cao hơn so với năm 2008. IRI đã dự đoán TEC ở Bạc Liêu với các giá trị RMSE cao nhất và thấp nhất là EOF.

Kết luận chương 5

- Phương pháp phân tích EOF với 6 vectơ cơ sở U_1 tới U_6 đã dự đoán tốt các giá trị TEC biến thiên ngày đêm ở khu vực Phú Thọ và Bạc Liêu. Trong khi đó, mô hình IRI đánh giá quá cao hoặc quá thấp các giá trị TEC biến thiên ngày đêm ở 2 khu vực nói trên; mô hình CODG đánh giá biến thiên ngày đêm của TEC tại hai vị trí tốt hơn mô hình IRI.

- Mô hình EOF phản ánh được biến thiên mùa và biến thiên theo hoạt động mặt trời của TEC ở Phú Thọ và Bạc Liêu trong giai đoạn 2008-2018.

- Mô hình EOF cũng phản ánh tốt sự biến thiên của TEC trong các trận bão từ, hơn là mô hình IRI.

- Các kết quả trên cho thấy rằng phương pháp EOF là phương pháp tốt có thể sử dụng trong mục đích dự báo ngắn hạn TEC ở từng trạm thu GPS.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Từ những kết quả đạt được của luận án khi nghiên cứu về đặc trưng dị thường ion hóa xích đạo và bất thường điện ly ban đêm khu vực Đông Nam Á sử dụng số liệu GPS liên tục ở Việt Nam và lân cận, NCS có thể rút ra một số kết luận sau:

1. Các sơ đồ TEC theo thời gian và vĩ độ trong khoảng thời gian 2008-2021 ở khu vực Đông Nam Á chỉ ra cấu trúc EIA 2 đỉnh rất rõ ràng, đỉnh Bắc ở vào khoảng $17-22^{\circ}\text{N}$, đỉnh Nam ở vào khoảng $5-7^{\circ}\text{S}$. Các quy luật biến đổi ngày đêm, biến đổi theo mùa, theo hoạt tính mặt trời tìm được trong luận án phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước về EIA ở khu vực vĩ độ thấp và xích đạo trên thế giới [49,53,63] cũng như ở khu vực Việt Nam và lân cận [6,147].

2. Các đỉnh EIA tồn tại các dao động chu kỳ cơ bản sau:

- Dao động chu kỳ ~ 15 ngày tồn tại ở cả ba tham số, biên độ và thời gian xuất hiện 2 đỉnh dao động đồng pha với hệ số tương quan 0,78 và 0,74, vĩ độ 2 đỉnh dao động ngược pha với hệ số tương quan -0,82, dao động này được cho là liên quan đến hoạt động của các sóng hành tinh truyền từ tầng khí quyển bên dưới.

- Dao động chu kỳ ~ 27 ngày xuất hiện chỉ ở tham số biên độ đỉnh EIA, liên quan đến chu kỳ quay ~ 27 ngày của Mặt trời, hệ số tương quan giữa dao động chu kỳ 27 ngày ở biên độ đỉnh Bắc (Nam) và ở F10.7 là 0,73 (0,69).

- Dao động chu kỳ 6 tháng có mặt ở cả ba tham số đỉnh. Biên độ các đỉnh thể hiện phụ thuộc ít nhiều vào hoạt tính mặt trời có dị thường vào 2013-2014, nhưng thời gian xuất hiện và vĩ độ đỉnh dường như không. Biên độ và thời gian xuất hiện hai đỉnh dao động đồng pha với hệ số tương quan là 0,99 và 0,75, vĩ độ hai đỉnh dao động ngược pha với hệ số tương quan -0,77. Vĩ độ hai đỉnh phụ thuộc vào hoạt động ENSO; trong giai đoạn El Niño dao động chu kỳ này của vĩ độ 2 đỉnh có biên độ giảm đáng kể.

- Dao động chu kỳ 1 năm cũng có mặt ở cả ba tham số đỉnh. Biên độ các đỉnh thể hiện phụ thuộc ít nhiều vào hoạt tính mặt trời có dị thường vào 2014, nhưng thời gian xuất hiện và vĩ độ đỉnh dường như không. Biên độ và vĩ độ có quan hệ đồng pha, với các hệ số tương quan 0,96 và 0,68, thời gian xuất hiện 2 đỉnh dao động ngược pha với hệ số tương quan -0,77. Vĩ độ hai đỉnh phụ thuộc rõ rệt vào hoạt động ENSO; trong giai đoạn El Niño dao động chu kỳ này của vĩ độ 2 đỉnh có biên độ giảm đáng

kê, đặc biệt đối với đỉnh Nam.

- QBO hiện diện ở tham số biên độ TEC tại các đỉnh EIA với chu kỳ nằm trong khoảng từ 18-34 tháng. QBO khí quyển là yếu tố cơ bản gây nên QBO điện ly.

3. Ở khu vực Đông Nam Á, tần suất xuất hiện bất thường điện ly đạt cực đại vào các tháng phân điểm và cực tiểu vào thời kỳ chí điểm. Hoạt động bất thường chiếm ưu thế vào thời gian trước nửa đêm và đạt cực đại vào khoảng 20:30-22:00 LT. Các bất thường điện ly ban đêm xuất hiện cực đại ở vĩ độ thấp hơn khoảng 4° - 5° về phía xích đạo so với vị trí đỉnh EIA ban ngày.

4. Phương pháp phân tích EOF đã dự đoán tốt biến thiên ngày đêm của TEC ở Phú Thọ và Bạc Liêu. Trong khi đó, mô hình IRI đánh giá quá cao hoặc quá thấp biến thiên ngày đêm của TEC ở 2 trạm. Mô hình EOF mô phỏng tốt các biến thiên theo mùa và theo hoạt tính mặt trời. Các hiệu ứng bão từ tác động đến các giá trị TEC tầng điện ly được phản ánh tốt bằng phân tích EOF hơn là mô hình IRI hay CODG.

KIẾN NGHỊ

Từ những kết quả đạt được trong đề tài, NCS đưa ra một số kiến nghị để tiếp tục triển khai các vấn đề nghiên cứu sau:

- Đánh giá dấu hiệu QBO ở các tham số vĩ độ cũng như thời gian xuất hiện đỉnh EIA.

- Nghiên cứu mối liên quan giữa biến đổi của các đỉnh EIA và hoạt tính của từ trường Trái Đất.

- Biến đổi theo thời gian của dị thường điện ly xích đạo phụ thuộc vào nhiều yếu tố: hoạt động mặt trời, trường từ Trái Đất, khí quyển bên dưới, do vậy cần sử dụng các mô hình hoàn lưu tổng quát kiểu TIE-GCM (Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model - Mô hình hoàn lưu tổng quát điện động lực- tầng điện ly- nhiệt quyển) để hiểu được nguồn gốc của sự biến đổi của các tham số đỉnh dị thường điện ly xích đạo quan sát được.

- Nghiên cứu các đặc trưng bất thường điện ly ở khu vực Đông Nam Á để có thể phân biệt được các bất thường điện ly ban đêm liên quan đến bong bóng plasma (nguồn từ vùng xích đạo) và các nhiễu loạn điện ly dịch chuyển quy mô trung bình (nguồn từ vùng vĩ độ trung bình).

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Dung Nguyen Thanh**, Minh Le Huy, Christine Amory-Mazaudier, Rolland Fleury, Susumu Saito, Thang Nguyen Chien, Thanh Le Truong, Hong Pham Thi Thu, Thanh Nguyen Ha, Mai Nguyen Thi, Que Le, 2022. Ionospheric quasi-biennial oscillation of the TEC amplitude of the equatorial ionization anomaly crests from continuous GPS data in the Southeast Asian region, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, <https://doi.org/10.15625/2615-9783/17490>. (Tạp chí scopus).
2. **Dung Nguyen Thanh**, Minh Le Huy, Christine Amory-Mazaudier, Rolland Fleury, Susumu Saito, Thang Nguyen Chien, Hong Pham Thi Thu, Thanh Le Truong, Mai Nguyen Thi, 2021. Characterization of ionospheric irregularities over Vietnam and adjacent region for the 2008-2018 period, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, **43(4)**, 465-484, doi:10.15625/2615-9783/16502. (Tạp chí scopus).
3. Hong Pham Thi Thu, Christine Amory-Mazaudier, Minh Le Huy, Susumu Saito, Kornyanat Hozumi, **Dung Nguyen Thanh**, Ngoc Luong Thi, 2022. Nighttime morphology of vertical plasma drifts over Vietnam during different seasons and phases of sunspot cycles, *Adv. Space Res.*, **70**, 411-426, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.010>. (Tạp chí SCIE).
4. Hong Pham Thi Thu, Christine Amory-Mazaudier, Minh Le Huy, **Dung Nguyen Thanh**, Hung Luu Viet, Ngoc Luong Thi, Kornyanat Hozumi, Thanh Le Truong, 2020. Comparison between IRI-2012, IRI-2016 models and F2 peak parameters in two stations of the EIA in Vietnam during different solar activity periods, *Adv. Space Res.*, **68**, 2076-2092, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.017> (Tạp chí SCIE).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Namba, K.I. Maeda, *Radio wave propagation*, Corona Publishing, 1939, Tokyo, p86.
- [2] E.V. Appleton, *Two anomalies in the ionosphere*, Nature, 1946, 157(3995), 691, doi:10.1038/157691a0.
- [3] S. Basu, and S. Basu, *Equatorial scintillation-a review*, J. Atmos. Terr. Phys., 1981, 43(5-6), 473-489. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90110-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90110-0).
- [4] X. Pi, A.J. Mannucci, U.J. Lindqwister and C.M. Ho, *Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network*, Geophys. Res. Lett., 1997, 24, N.18, 2283-2286.
- [5] A. de O. Moraes, B.C. Vani, E. Costa, et al., *Ionospheric scintillation fading coefficients for the GPS L1, L2 and L5 frequencies*, Radio Sci., 2018, 53, 1165-1174. Doi: 10.1029/2018RS006653.
- [6] Le Huy Minh, Tran Thi Lan, C. Amory- Mazaudier, et al., *Continuous GPS network in Vietnam and results of study on the total electron content in the South East Asian region*, Vietnam Journal of Earth Sciences, 2016a, 38 (2), 153-165.
- [7] G. Breit, M. A. Tuve, *A test of the existence of a conducting layer*, Phys. Rev., 1926, 20, 554- 4557.
- [8] H. Rishbeth, and O.K. Garriott, *Introduction to ionospheric physics*, Academic Press, 1969, New York.
- [9] R. W. Schunk, A. F. Nagy, *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, Cambridge University Press, 2009.
- [10] M. C. Kelly, *The Earth's Ionosphere, Plasma Physic and Electrodynamics*, Academic Press, Elsevier, 2009.
- [11] O. Tadanori, and M. Katsuhide, *Ionospheric radio propagation*, Science of Space Environment, 2001, 105-127.
- [12] C. Y. Johnson, *Ion and neutral composition of the ionosphere*, in Annals of the IQSY, 1969, Vol. 5: Solar-Terrestrial Physics: Terrestrial Aspects, edited by A. C. Strickland, MIT Press, Cambridge, MA.
- [13] W. G. Baker and D. F. Martyn, *Electric currents in the ionosphere I. The Conductivity*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1953, 246(913): 281–294 doi:

10.1098/rsta.1953.0016.

- [14] S. Chapman, *The electrical conductivity of the ionosphere: a review*, Nuovo Climento, 1956, Suppl. 4, X, 1385.
- [15] H. Rishbeth, *Polarization field produced by winds in the ionospheric F region*, Planet. Space Sci., 1971, 19, 357.
- [16] H. Rishbeth, *The ionospheric E-layer and F-layer dynamos-a tutorial review*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 1997, 59, 1873.
- [17] A. D. Richmond, S. Matsushita, and J.D. Tarpley, *On the production mechanism of electrical currents and fields in the ionosphere*, J. Geophys. Res., 1976, 81, 547.
- [18] R. A. Heelis, P.C. Kendall, R.J. Moffett, et al., *Electrical coupling of the E and F regions and its effect on F region drifts and winds*, Planet. Space Sci., 1974, 22, 743.
- [19] <http://www.everythingselectric.com/forum/index.php?topic=170.0>.
- [20] T. Maruyama, *Science of space environment, chapter 3, the ionosphere*, 2000.
- [21] R. T. Tsunoda, R.C. Livingston, J.P. McClure, and W.B. Hanson, *Equatorial plasma bubbles: vertically elongated wedges from the bottomside F layer*, J. Geophys. Res., 1982, 87, 9171-9180.
- [22] B. G. Fejer, L. Scherlies, E.R. de Paula, *Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F*, J. Geophys. Res., 1999, 104(A9), 19859-19869.
- [23] G. Haerendel, *Rayleigh-Taylor instability as cause of equatorial spread-F*, Trans. Am. Geophys. Union, 1972, 53(11), 1082.
- [24] G. Haerendel, *Theory of equatorial spread F*, Max-Planck Institute fur Physik und Astrophysik. Garching, West Germany, preprint, 1973.
- [25] S. L. Ossakow, *Ionospheric irregularities*, Rev. Geophys. Space Phys, 1979, 17, 521.
- [26] B. G. Fejer, and M.C. Kelley, *Ionospheric irregularities*, Rev. Geophys. and Space Phys., 1980, 18, 401.
- [27] M.A. Biondi, and D.P. Sipler, *Horizontal and vertical winds and temperatures in the equatorial thermosphere: measurements from Natal, Brazil, during August-September 1982*, Planet. Space Sci., 1985, 33, 817.

- [28] R. Raghavarao, S.P. Gupta, R. Sekar, et al., *In situ measurements of winds electric fields and electron densities at the onset of ESF*, J. Atmos. Terr. Phys., 1987, 49,485.
- [29] R. Sekar, and R. Raghavarao, *Role of vertical winds on the Rayleigh-Taylor mode instabilities of the nighttime equatorial ionosphere*, J. Atmos. Terr. Phys., 1987, 49, 981.
- [30] R. Raghavarao, W.R. Hoegy, N.W. Spencer, and L. Wharton, *Neutral temperature anomaly in the equatorial thermosphere- A source of vertical winds*, Geophys. Res. Lett., 1993, 20, 1023.
- [31] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, *Global positioning system, theory and practice*, Springer Link, 2001.
- [32] S. Schaer, *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global positioning system*, 1999, Ph.D. thesis, Bern University, Bern, Switzerland.
- [33] Đặng Nam Chinh, Đỗ Ngọc Đường, *Định vị vệ tinh*, 2012, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [34] G. Seeber, *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*, chapter 2, p.54, 1993.
- [35] J. Klobuchar, *Design and characteristics of the GPS ionospheric time-delay algorithm for single frequency users*, in Proceedings of PLANS'86- Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, Nevada, 280-286,4-7 November, 1986.
- [36] S. K. Mitra, *Geomagnetic control of region F2 of the ionosphere*, Nature, 1946, 158 (4019), 668- 669, doi: 10.1038/158668a0.
- [37] D. F. Martyn, *Theory of height and ionization density changes at the maximum of a Chapman-like region, taking account of ion production, decay, diffusion, and total drift*, 1955, In Proceedings, Cambridge Conference (pp. 254), London: Physical Society.
- [38] R. J. Moffett, and W.B. Hanson, *Effect of ionization transport on the equatorial F-region*, Nature, 1965, 206(4985), 705-706.
- [39] W. B. Hanson, and R.J. Moffett, *Ionization transport effects in the equatorial F region*, J. Geophys. Res., 1966, 71(23), 5559-5572, doi: 10.1029/JZ071i023p05559.

- [40] D.N. Anderson, *A theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-I. Theory*, Planet. Space Sci., 1973, 21(3), 409-419, doi: 10.1016/0032-0633(73)90040-8.
- [41] G. J. Bailey, and N. Balan, *A low latitude Ionosphere-plasmasphere model*, In R.W. Schunk (Ed.), STEP Hand Book of Ionospheric Models (pp. 173), 1996, Logan: Utah State University.
- [42] B. G. Fejer B.G., E.R. de Paula, S.A. Gonzáles, and R.F. Woodman, *Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca*, J. Geophys. Res., 1991, 96(A8), 13901-13906, doi: 10.1029/91JA01171.
- [43] A. E. Hedin, E.L. Fleming, A.H. Manson, et al., *Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere*, J. Atmos. Terr. Phys., 1996, 58(3), 1421-1447, doi: 10.1016/0021-9169(95)00122-0.
- [44] N. Balan, and G.J. Bailey, *Equatorial plasma fountain and its effects: possibility of an additional layer*, J. Geophys. Res., 1995, 100(A11), 21421-21432, doi: 10.1029/95JA01555.
- [45] N. Balan, G.J. Bailey, M.A. Abdu, et al., *Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer*, J. Geophys. Res., 1997, 102(A2), 2047-2056, doi: 10.1029/95JA02639.
- [46] G. Rajaram, *Structure of the equatorial F-region, topside and bottomside-A review*, J. Atmos. Terr. Phys., 1977, 39(9-10), 1125-1144, doi: 10.1016/0021-9169(77)90021-6.
- [47] R. J. Moffett, *The equatorial anomaly in the electron distribution of the terrestrial F-region*, Fund. Cosmic Phys., 1979, 4, 313.
- [48] R. J. Stening, *Modelling the low latitude F region*, J. Atmos. Terr. Phys., 1992, 54(11-12), 1387-1412, doi: 10.1016/0021-9196(92)90147-D.
- [49] N. Balan, T. Maruyama, A.K. Patra, and V.L. Narayanan, *A minimum in the latitude variation of spread-F at March equinox*, Prog. Earth Planet. Sci., 2018, 5, 27, doi: 10.1186/s40645-018-0180-y.
- [50] Y. N. Huang Y.N., K. Cheng, S.W. Chen, *On the equatorial anomaly of the ionospheric total electron content near the northern anomaly crest region*, J. Geophys. Res., 1989, 94, 13515.
- [51] Y. N. Huang, K. Cheng, *Solar cycle variation of equatorial ionospheric*

- anomaly in total electron content in the Asian region*, J. Geophys. Res., 1996, 101, 24513-24520.
- [52] H. F. Tsai, J.Y. Liu, W.H. Tsai and C.H. Liu., *Seasonal variations of the ionospheric total electron content in Asian equatorial anomaly regions*, J. Geophys. Res., 2001, 12/2001, vol 106, 30.363-30.369.
- [53] K. C. Yeh, S.J. Franke, E.S. Andreeva, V.E. Kunitsyn, *An Investigation of Motions of the Equatorial Anomaly Crest*, Geophys. Res. Lett., 2001, 28 (24), 4517-4520.
- [54] C. C. Wu, C.D. Fry, J.Y. Liu, et al., *Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during the solar minimum: September 1996-August 1997*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2004, 66, 199-207.
- [55] C. C. Wu, K. Liou, S.J. Shan, C.L. Tseng, *Variation of ionospheric total electron content in Taiwan region of the equatorial anomaly from 1994 to 2003*, Adv. Space. Res., 2008, 41, 611-616.
- [56] P. V. S. Rama Rao, S. Gopi Krishna, K. Niranjan, and D.S.V.V.D. Prasad, *Study of spatial and temporal characteristics of L-band scintillation over the Indian low latitude region and their possible effects on GPS navigation*, Ann. Geophys., 2006, 24, 1567-1580.
- [57] C. H. Lin, J.Y. Liu, T.W. Fang, et al., *Motions of the equatorial ionization anomaly crests imaged by FORMOSAT-3/COSMIC*, Geophys. Res. Lett., 2007, 34, L19101. <https://doi.org/10.1029/2001GL014562>.
- [58] S. Kumar, A. K. Singh, *Variation of ionospheric total electron content in Indian low latitude region of the equatorial anomaly during May 2007-April 2008*, Adv. Space Res., 2009, 43, 155-1562.
- [59] S. Kumar, A.K. Singh, J. Lee, *Equatorial Ionospheric Anomaly (EIA) and comparison with IRI model during descending phase of solar activity (2005-2009)*, Adv. Space. Res., 2014, 53, 724-733.
- [60] H. Takahashi, L.M. Lima, C.M. Wrasse, et al., *Ionospheric response to 2-day planetary wave in the equatorial and low latitude regions*, J. Atmos. Terr. Phys., 2012, 90-91:164-171.
- [61] R. G. Rastogi, J.A. Klobuchar, *Ionospheric electron content within the equatorial F2- layer anomaly belt*, J. Geophys. Res., 1990, 95, 19045.

- [62] C. H. Lin, J.Y. Liu, H.F. Tsai, C.Z. Cheng, *Variations in the equatorial ionization anomaly peaks in the Western Pacific region during the geomagnetic storms of April 6 and July 15, 2000*, Earth Planets Space, 2001, 59, 401-405.
- [63] G. O. Walker, A.E. Strickland, *A comparison of the ionospheric equatorial anomaly in the eastern Asian and the American regions at sunspot minimum*, J. Atmos. Terr. Phys., 1981, 43 (5-6), 589-595.
- [64] E. Sagawa, T.J. Immel, H.U. Frey, S.B. Mende, *Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV*, J. Geophys. Res., 2005, 110, A11302.
- [65] S. Tulasi Ram, S.Y. Su, C.H. Liu, *FORMOSAT-3/COSMIC observations of seasonal and longitudinal variations of equatorial ionization anomaly and its interhemispheric asymmetry during the solar minimum period*, J. Geophys. Res., 2009, 114, A06311.
- [66] B. Zhao, W. Wan, L. Liu, Z. Ren, *Characteristics of the ionospheric total electron content of the equatorial ionization anomaly in the Asian-Australian region during 1996-2004*, Ann. Geophys., 2009, 27, 3861-3873.
- [67] L. F. Huang, J. Huang, J.S. Wang, et al., *Analysis of the north-south asymmetry of the equatorial ionization anomaly around 110°E longitude*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2013, 102, 354-361.
- [68] X. L. Luan, P. Wang, X.K. Dou, Y.C.M. Liu, *Interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstices observed by COSMIC during 2007-2012*, J. Geophys. Res. Space Phys., 2015, 120, 3059-3073.
- [69] T. Dang, X. Luan, J. Lei, et al., *A numerical study of the interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstices at solar minimum*, J. Geophys. Res. Space Physics, 2016, 121, 9099-9110, doi:10.1002/2016JA023012.
- [70] E. Romero-Hernandez, C.M. Denardini, H. Takahashi, et al., *Daytime ionospheric TEC weather study over Latin America*, J. Geophys. Res.: Space Phys., 2018, 123, 10,345- 10,357. [https://doi.org/ 10.1029/2018JA025943](https://doi.org/10.1029/2018JA025943).
- [71] S. Kumar S, *North-South asymmetry of equatorial ionospheric anomaly computed from the IRI model*, Ann. Geophys., 2020, 63, 3, DM330. <https://doi.org/10.4401/ag-8324>.
- [72] H. Huang, X. Lu, L. Liu, et al., *Transition of interhemispheric asymmetry of*

- equatorial ionization anomaly during solstices*, J. Geophys. Res. Space Phys., 2018, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JA026055>.
- [73] Y. Z. Su, G.J. Bailey, K.I. Oyama, N. Balan, *A modeling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 1997, 59 (11), 1299-1310.
- [74] T. J. Immel, E. Sagawa, S.L. England, et al., *Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides*, Geophys. Res. Lett., 2006, 33, L15108.
- [75] M. A. L. Dias, P.R. Fagundes, K. Venkatesh, et al., *Daily and monthly variations of the equatorial ionization anomaly (EIA) over the Brazilian sector during the descending phase of the Solar Cycle*, J. Geophys. Res.: Space Phys., 2020, 125, e2020JA027906, <https://doi.org/10.1029/2020JA027906>.
- [76] J. Liu, D. Zhang, X.H. Mo, et al., *Morphological differences of the northern equatorial ionization anomaly between the eastern Asian and American sectors*, J. Geophys. Res.: Space Phys., 2020, 125, <https://doi.org/10.1029/2019JA027506>.
- [77] R. J. Reed, W.J. Campbell, L.A. Rasmussen, R.G. Rogers, *Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere*, J. Geophys. Res., 1961, 66, 813-818.
- [78] R. A. Ebdon, R.G. Veryard, *Fluctuations in equatorial stratospheric winds*, Nature, 1961, 189, 791- 793.
- [79] J. R. Holton, and H.C. Tan, *The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb*, J. Atmos. Sci., 1980, 37, 2200-2208. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.04.002>.
- [80] K. Labitzke, H. van Loon, *Association between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere, part I. The troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in winter*, J. Atmos. Terr. Phys., 1988, 50, 197-206.
- [81] Y. Naito, I. Hirota, *Interannual variability of the northern winter stratospheric circulation related to the QBO and the solar cycle*, J. Meteorol. Soc. Jpn., 1997, 75, 925-937.
- [82] K. Hamilton, *Effect of an imposed quasi-biennial oscillation in a comprehensive troposphere-stratosphere-mesosphere general circulation model*, J. Atmos. Sci., 1998, 55, 2393-2418.
- [83] M.P. Baldwin, L.J. Gray, T.J. Dunkerton. et al, *The quasi-biennial oscillation*,

- Rev. Geophys., 2001, Vol. 39, pp. 179-229.
- [84] P. Chen, *Evidence of the ionospheric response to the QBO*, Geophys. Res. Lett., 1992, 19, 1089-1092.
- [85] A. Neumann, *QBO and solar activity effects on temperatures in the mesopause region*, J. Atmos. Terr. Phys., 1990, 52, 165-173.
- [86] E. Echer, *On the quasi-biennial oscillation (QBO) signal in the foF2 ionospheric parameter*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2007, 69, 621- 627.
- [87] H. Lu, L.J. Gray, M.P. Baldwin, M.J. Jarvis, *Life cycle of the QBO-modulated 11-year solar cycle signals in the Northern Hemispheric winter*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 2009, 135, 1030-1043.
- [88] E.M. Apostolov, *Quasi-biennial oscillation in sunspot activity*, Bull. Astron., 1985, 36, 97-102.
- [89] M. L. Chanin, P. Keckhut, A. Hauchecorne, K. Labitzke, *The solar activity-QBO, effect in the lower thermosphere*, Ann. Geophys., 1989, 32, 225- 230.
- [90] R. P. Kane, *Differences in the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics of the solar, interplanetary and terrestrial parameters*, J. Geophys. Res., 2005, 110, A01108.
- [91] W. Tang, X.H. Xue, J. Lei, X.K. Dou, *Ionospheric quasi-biennial oscillation in global TEC observations*, J. Atmos. Solar.-Terr. Phys., 2014, 107, 36-41.
- [92] H. G. Booker, and H.W. Wells, *Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere*, J. Geophys. Res., 1938, 43(3), 249-256, doi: 10.1029/TE043i003p00249.
- [93] R. F. Woodman, and C. La Hoz, *Radar observations of F region equatorial irregularities*, J. Geophys. Res., 1976, 81(31), 5447-5466, doi: 10.1029/JA081i031p05447.
- [94] E. J. Weber, J. Buchau, R.H. Eather, and S.B. Mende, *North-south aligned equatorial airglow depletions*, J. Geophys. Res., 1978, 83 (A2), 712-716, doi: 10.1029/JS083iA02p0072.
- [95] R. Cohen, H.W. Bowles, *Onset the nature of equatorial spread*, F. J. Geophys. Res., 1961, 66, 1081-1106.
- [96] A. J. Scannapieco, and S.L. Ossakow, *Nonlinear equatorial spread F*, Geophys. Res. Lett., 1976, 3(8), 451-454, doi: 10.1029/GL003i008p00451.

- [97] D. T. Farley, Balsley B.B., Woodman R.F., and McClure L.P., *Equatorial spread F: Implications of VHF radar observations*, J. Geophys. Res., 1970, 75(34), 7199-7216, doi: 10.1029/JA075i034p07199.
- [98] R. G. Rastogi, J.P. Mullen, and E. MacKenzie, *Effect of geomagnetic activity on equatorial radio VHF scintillations and spread F*, J. Geophys. Res., 1981, 86(A5), 3661-3664, doi:10.1029/JA086iA05p03661.
- [99] S. Tulasi Ram, P.V.S. Rama Rao, D.S.V.V.D. Prasad, et al., *Local time dependant response of postsunset ESF during geomagnetic storms*, J. Geophys. Res., 2008, 113(A7), A07310. <https://doi.org/10.1029/2007JA012922>.
- [100] W. J. Burke, L.C. Gentile, C.Y. Huang, et al., *Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1*, J. Geophys. Res., 2004, 109(A12), A12301, doi: 10.1029/2004JA010583.
- [101] S. Y. Su, C.H. Liu, H.H. Ho, and C.K. Chao, *Distribution characteristics of topside ionospheric density irregularities: equatorial versus midlatitude regions*, J. Geophys. Res., 2006, 111(A6), A06305, doi: 10.1029/2005JA011330.
- [102] C. Stolle, I. Michaelis, and J. Rauberg, *The role of high- resolution geomagnetic field models for investigating ionospheric currents at low Earth orbit satellites*, Earth Planets Space, 2016, 68, 110, doi: 10.1186/s40623-016-0494-1.
- [103] H. G. Booker, *Turbulence in the ionosphere with applications to meteortrails, radio-star scintillation, auroral radar echoes, and other phenomena*, J. Geophys. Res., 1956, 61(4), 673-705. <https://doi.org/10.1029/JZ061i004p00673>.
- [104] A. Bhattacharyya A., S. Basu, K.M. Groves, et al., *Dynamics of equatorial F region irregularities from spaced receiver scintillation observations*, Geophys. Res. Lett., 2001, 28(1), 119-122.
- [105] G. Z. Li, B.Q. Ning, and H. Yuan, *Analysis of ionospheric scintillation spectra and TEC in the Chinese low latitude region*, Earth Planets Space, 2007, 59(4), 279-285, doi: 10.1186/BF03353105.
- [106] S. Basu, K.M. Groves, S. Basu, and P.J. Sultan, *Specification and forecasting of scintillation in communication/navigation links: current status and future plans*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2002, 64(16), 1745-1754, doi:10.1016/s1364-6826(02)00124-4.
- [107] J. Aarons, M. Mendillo and R. Yantosca, *GPS phase fluctuation in the*

- equatorial region during sunspot minimum*, Radio. Sci, 1997, Vol. 32, N.4, pp 1535-1550.
- [108] L. Wanninger, *Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS*, GPS World, 1993, 48.
- [109] J. Seo, T. Walter, and P. Enge, *Correlation of GPS signals fades due to ionospheric scintillation for aviation applications*, Adv. Space. Res., 2011, 47, 1777-1788.
- [110] J. Aarons, H.E. Whitney, E. MacKenzie and S. Basu, *Microwave equatorial scintillation intensity during solar maximum*, Radio Sci., 1981, vol. 16, no. 05, pp. 939-945, Sept.-Oct. doi: 10.1029/RS016i005p00939.
- [111] S. Basu, E. MacKenzie, and S. Basu, *Ionospheric Constraints on VHF/UHF Communications Links During Solar Maximum and Minimum Periods*, Radio Sci., 1988, 23, 363-378.
- [112] P. J. Sultan, *Linear theory and modelling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of Equatorial Spread F*, J. Geophys. Res., 1996, 101, 26875- 26801.
- [113] J. Aarons, *Global morphology of ionospheric scintillation*, Proc. IEEE, 1982, 70, 360-378, doi: 10.1109/PROC.1982.12314.
- [114] M. Mendillo, & J. Baumgardner, *Airglow characteristics of equatorial plasma depletions*, J. Geophys. Res., 1982, 87(A9), 7641, doi:10.1029/ja087ia09p07641.
- [115] T. Ogawa, E. Sagawa, Y. Otsuka, et al., *Simultaneous ground- and satellite-based airglow observations of geomagnetic conjugate plasma bubbles in the equatorial anomaly*, Earth Planets Space, 2005, 57, 385-392.
- [116] T. Maruyama, K. Nozaki, M. Yamamoto, & S. Fukao, *Ionospheric height changes at two closely separated equatorial stations and implications in spread F onsets*, J. Atmos. Terr. Phys., 2002, 64 (12-14), 1557-1563, doi: 10.1016/s1364-6826(02)00093-7.
- [117] S. Saito, and T. Maruyama, *Ionospheric height variations observed ionosondes along magnetic meridian and plasma bubble onsets*, Ann. Geophys., 2006, 24, 2991-2996.
- [118] R. T. Tsunoda, *Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region*

- pedersen conductivity*, J. Geophys. Res., 1985, 90 (A1), 447-456.
- [119] S. Basu, S. Basu, J. Aarons, et al., *On the coexistence of kilometer and meter-scale irregularities in the nighttime equatorial F region*, J. Geophys. Res., 1978, 83 (A9), pp. 4219-4226.
- [120] S. Magdaleno, M. Herraiz, D. Altadill & B.A. de la Morena, *Climatology characterization of equatorial plasma bubbles using GPS data*, J. Space Weather Space Clim., 2017, 7, A3, 2017, doi: 10.1051/swsc/2016039.
- [121] T. Maruyama and N. Matuura, *Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles*, J. Geophys. Res., 1984, 89, 10903- 10912.
- [122] C. E. Valladares, J. Villalobos, R. Sheehan, and M. P. Hagan, *Latitudinal extension of low-latitude scintillations measures with a network of GPS receivers*, Ann. Geophys., 2004, 22, 3155-3175.
- [123] M. Nishioka, A. Saito, and T. Tsugawa, *Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global groundbased GPS receiver networks*, J. Geophys. Res., 2008, 113, A05301, doi:10.1029/2007JA012605.
- [124] Y. Otsuka, T. Ogawa, and Effendy, *VHF radar observations of nighttime F-region field-aligned irregularities over Kototabang, Indonesia*, Earth Planets Space, 2009, 61, 431-437.
- [125] P. Abadi, S. Saito, and W. Srigutomo, *Low-latitude scintillation occurrences around the equatorial anomaly crest over Indonesia*, Ann. Geophys., 2014, 32, 7-17.
- [126] P. Abadi, Y. Otsuka, T. Tsugawa, *Effects of pre-reversal enhancement of $E \times B$ drift on the latitudinal extension of plasma bubble in Southeast Asia*, Earth Planets Space, 2015, 67. Doi: 10.1186/s40623-015-0246-7.
- [127] K.K. Ajith, S.T. Ram, M. Yamamoto, et al., *Explicit characteristics of evolutionarytype plasma bubbles observed from Equatorial Atmosphere Radar during the low to moderate solar activity years 2010-2012*, J. Geophys. Res. Space Phys., 2015, 120(2), 1371-1382, doi:10.1002/2014JA020878.
- [128] C. O. Hines, *Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights*, Can. J. Phys., 1960, 38, 1441.
- [129] E.L. Afraimovich, E.I. Astafyeva, V.V. Demyanov, et al., *A review of*

- GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena*, J. Space Weather Space Clim., 2013, 3, A27, DOI:10.1051/swsc/2013049.
- [130] T. M. Georges, *HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances*, J. Atmos. Terr. Phys., 1968, 30, 735.
- [131] S. H. Francis, *A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances*, J. Geophys. Res., 1974, 79, No. 34, 5245-5260.
- [132] M. J. Davis, *On polar substorms as the source of large-scale traveling ionospheric disturbances*, J. Geophys. Res., 1971, 76, 4525.
- [133] G. H. Munro, 1958, *Travelling ionospheric disturbances in the F region*, Aust. J. Phys., 1958, 11, 91.
- [134] K. Davies and J.E. Jones, *Three-dimensional observations of traveling ionospheric disturbances*, J. Atmos. Terr. Phys., 1971, 33, 39.
- [135] A. Saito, S. Fukao, and S. Miyazaki, *High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan*, Geophys. Res. Lett., 1998, 25, 3079-3082.
- [136] K. Shiokawa, Y. Otsuka, M.K. Ejiri, et al., *Imaging observations of the equatorward limit of midlatitude traveling ionospheric disturbances*, Earth Planets Space, 2002, 54, 57-62.
- [137] E.L. Afraimovich, I.K. Edemskiy, S.V. Voeykov, et al., *The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator*, Ann. Geophys., 2009, 27, 1521-1525.
- [138] T. Tsugawa, Y. Otsuka, A.J. Coster and A. Saito, *Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America*, Geophys. Res. Lett., 2007, 34, L22101, doi:10.1029/2007GL031663.
- [139] C. Borries, N. Jakowski and V. Wilken, *Storm induced large scale TIDs observed in GPS derived TEC*, Ann. Geophys., 2009, 27, 1605-1612.
- [140] A. Shimeis, C. Borries, C. Amory-Mazaudier, et al., *TEC variations along an East Euro-African chain during 5th April 2010 geomagnetic storm*, Adv. Space Res., 2015, 55, 2239-2247.
- [141] V. L. Narayanan, K. Shiokawa, Y. Otsuka, & S. Saito, *Airglow observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from Yonaguni:*

- Statistical characteristics and low-latitude limit*, J. Geophys. Res., 2014, 119(11), 9268-9282, doi:10.1002/2014ja020368.
- [142] A. Taori, N. Parihar, R. Ghodpage, et al., *Probing the possible trigger mechanisms of an equatorial plasma bubble event based on multistation optical data*, J. Geophys Res., 2015, 120(10), 8835-8847.
- [143] T. Hisao, M.W. Cristiano, A.O.B.F. Cosme, et al., *Equatorial plasma bubble seeding by MSTIDs in the ionosphere*, Progress Earth Planets Sci., 2018, 5:32, doi: 10.1186/s40645-018-0189-2.
- [144] Phạm Văn Trì, T. H. Tiến, P. M. Hung, N. B. Mai, và C. K. Quỳnh, *Một số đặc điểm hình thái điện ly trên đài điện ly Hà Nội*, Thành tựu nghiên cứu vật lý địa cầu, 1997, 355-378.
- [145] Lê Huy Minh và Phạm Văn Trì, *Biến thiên theo thời gian của lớp E và lớp F điện ly quan sát được tại đài điện ly Phú Thụy*, Tạp chí Các Khoa học về Trái đất, 2001, 23(1), 56- 59.
- [146] Hoàng Thái Lan, *Cấu trúc các lớp điện ly tại khu vực phía Nam trong giai đoạn Mặt trời hoạt động mạnh*, Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, 2003, 222-228.
- [147] H. Pham Thi Thu, C. Amory-Mazaudier, M. Le Huy, *Time variations of the ionosphere at the northern tropical crest of ionization at Phu Thuy, Vietnam*, Ann. Geophys., 2011, 29(1), 197-207, doi:10.5194/angeo-29-197-2011.
- [148] Trần Thị Lan, *Nghiên cứu nồng độ điện tử tổng cộng, đặc trưng gradient tầng điện ly và ảnh hưởng của chúng tới quá trình truyền tín hiệu vệ tinh GPS ở khu vực Việt Nam*, luận án tiến sĩ, 2015.
- [149] Le Huy Minh, C. Amory-Mazaudier, R. Fleury, et al., *Time variations of the total electron content in the Southeast Asian equatorial ionization anomaly for the period 2006-2011*, Adv. Space Res., 2014, 54, 355-368, doi:10.1016/j.asr.2013.08.03.
- [150] Le Huy Minh, Tran Thi Lan, R. Fleury, et al., *TEC variations and ionospheric disturbances during the magnetic storm in March 2015 observed from continuous GPS data in the Southeast Asia region*, Vietnam Journal of Earth Sciences., 2016b, 38 (3), 267-285.
- [151] Trần Thị Lan, Lê Huy Minh, R. Fleury, và nnk., *Bước đầu nghiên cứu nồng độ điện tử tổng cộng và nhấp nháy điện ly sử dụng số liệu các trạm thu GPS liên tục ở*

- Việt Nam*, Tạp chí Các khoa học về Trái Đất, 2009, 31(3), 212-223.
- [152] Trần Thị Lan, Lê Huy Minh, 2011, *Biến thiên theo thời gian của nồng độ điện tử tổng cộng và nhấp nháy điện ly theo số liệu GPS liên tục ở Việt Nam*, Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, 2011, 33(4), 681-689.
- [153] Lê Huy Minh, Trần Thị Lan, Phạm Thị Thu Hồng, *Bão từ và bão điện ly ngày 6-7/04/2000 và ngày 31/03/2001 quan sát được tại Phú Thuy*, Tạp chí các khoa học về Trái đất, 2004, 26(2), 122-135.
- [154] Lê Huy Minh, Nguyễn Chiến Thắng, Trần Thị Lan, và nnk, *Ảnh hưởng của bão từ tới nồng độ điện tử tổng cộng vùng dị thường điện ly xích đạo Đông Nam Á quan sát được từ số liệu GPS*, Tạp chí các Khoa học Trái Đất, 2007, 29(2), 104-112.
- [155] Hoàng Thái Lan, Nguyễn Thu Trang, *Một số đặc điểm của spread F xích đạo quan trắc tại Việt Nam*, Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, 2009, 31 (4), 368-373.
- [156] Hoàng Thái Lan, Nguyễn Thu Trang, John Macdougall, *So sánh sự xuất hiện của spread F xích đạo từ trong năm Mặt trời hoạt động trung bình (2003) và hoạt động yếu (2005)*, Tạp chí các khoa học về Trái Đất, 2011, 33(2), 126-133.
- [157] Trần Thị Lan, Đào Thế Cường, *Một số đặc trưng xuất hiện Spread F xích đạo tại Phú Thuy trong hơn một chu kỳ hoạt động Mặt trời*, Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, 2013, 35(3), 258-264.
- [158] Trần Thị Lan, Lê Huy Minh, Fleury R., và nnk., *Đặc trưng xuất hiện nhấp nháy điện ly ở Việt Nam trong giai đoạn 2009- 2012*, Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, 2015, ISSN 0866- 7187, 37 (3), 264- 274.
- [159] T. L. Tran, L. H. Minh, C. Amory-Mazaudier, & R. Fleury, *Climatology of ionospheric scintillation over the Vietnam low-latitude region for the period 2006-2014*, Adv. Space. Res., 2017, 60(8), 1657-1669, doi:10.1016/j.asr.2017.05.005.
- [160] <http://celestrack.org/almanac/Yuma/>.
- [161] K. F. Tapping, *The 10.7 cm solar radio flux (F10.7)*, Space Weather, 2013, Vol. 11, pp. 394-406. doi:10.1002/swe.20064.
- [162] <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.
- [163] W. D. Gonzalez, J. A. Joselyn, Y. Kamide, et al., *What is a geomagnetic storm?*, J. Geophys. Res., 1994, Vol. 99, pp. 5771– 5792.
- [164] <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>.

- [165] <https://bnews.vn/ban-biet-gi-ve-el-nino-va-la-nina/175478.html>.
- [166] M. L'Heureux, *What is the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in a nutshell?* ENSO blog, 2014, in the website “Climate.gov” (Science & Information for a climate-smart nation). Climate (<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/what-el-niño-southern-oscillation-enso-nutshell>).
- [167] Bureau of Meteorology. “The Walker Circulation”. Common weather of Australia. Truy cập ngày 1 tháng 7 năm 2014. [Online].
- [168] https://vi.wikipedia.org/wiki/Dao_động_phương_Nam.
- [169] https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html.
- [170] D. Bilitza, *International reference ionosphere 1990*, National Space Science Data Center, Science Applications Research Lanham, Maryland 20706, USA, 1990.
- [171] K. Rawer and D. Bilitza, *International reference ionosphere plasma densities: status 1988*, Adv. Space Res., 1990, 10, 5-14.
- [172] D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, et al., *International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions*, Space Weather, 2017, 15(2), 418-429. doi:10.1002/2016SW001593.
- [173] https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php.
- [174] E. Y. Ji, Y.J. Moon, & E. Park, *Improvement of IRI global TEC maps by deep learning based on conditional Generative Adversarial Networks*, Space Weather, 2020, 18, <https://doi.org/10.1029/2019SW002411>.
- [175] <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/gim.gif>.
- [176] J. Y. Liu, H.F. Tsai, T.K. Jung, *Total electron content obtained using the global positioning system*, 1996, TAO 7(1), 07-17.
- [177] C. Carrano & K. Groves, *Ionospheric data processing and analysis*, Workshop on Satellite Navigation Science and Technology for Africa, 2009, The Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy.
- [178] C. Carrano & K. Groves, *Ionospheric data processing and analysis*, Workshop on Satellite Navigation Science and Technology for Africa, 2009, The Abdus Salam ICTP, Trieste, Italy.
- [179] G. Ma and T. Maruyama, *A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes*, Geophys. Res. Lett., 2006, 33, L21103,

doi:10.1029/2003JA009931.

- [180] D. Gabor, *Theory of communication*, J IEEE, 1946, 93(3), 429-457.
- [181] G. Kaiser, *A friendly guide to wavelets*, Cambridge, MA: Birkhauser Boston, 1994.
- [182] Dương Hiếu Đầu, *Phân tích tài liệu từ ở Nam Bộ bằng phép biến đổi wavelet*, luận án tiến sĩ vật lý, 2009.
- [183] G. M. Jenkins and D.G. Watts, *Spectral Analysis and Its Applications*, Holden-Day, San Francisco, 1968, 525pp.
- [184] C. Torrence, G. P. Compo, *A practical guide to wavelet analysis*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 1998, 79, 61-78.
- [185] F. J. M. Barning, *Bull. Astron. Inst*, Netherlands, 1963, 17, 22.
- [186] N. R. Lomb, *Least-squares frequency analysis of unequally spaced data*, Astrophys. Space Sci., 1976, 39, 447-462.
- [187] J. D. Scargle, *Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data*, Astrophys. J., 1982, 263, 835-853.
- [188] W. H. Press, G.B. Rybicki, *Fast Algorithm for Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data*, Astrophys. J., 1989, v.338, p.277.
- [189] E. N. Lorent, *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*, Cambridge, Massachussets, 1956.
- [190] Pham Dinh Khanh, *Machine learning lý thuyết tới thực hành*, phamdinhhkhanh.github.io/deepai-book/ch_intro/main_contents.html, 2021.
- [191] T. Ondoh and K. Marubashi, *Science of Space Environment*, 2001, IOS Press.
- [192] T. Maruyama, S. Saito, M. Kawamura, et al., *Equinoctial asymmetry of a low-latitude ionosphere-thermosphere system and equatorial irregularities: evidence for meridional wind control*, Ann. Geophys., 2009, Vol. 27, pp. 2027-2034.
- [193] A. Kherani A, E. De-Paula, J. Olusegun, *Observations and simulations of equinoctial asymmetry during low and high solar activities*, Presentation at a Proceeding of the Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Ja, 2013.
- [194] X. H. Mo, D.H. Zhang, L.P. Goncharenko, et al., *Quasi-16-day periodic meridional movement of the equatorial ionization anomaly*, Ann. Geophys, 2014, 32(2), 121-131, doi:10.5194/angeo-32-121.

- [195] S. Chapman and J. Bartels, *Geomagnetism*, Oxford University Press, 1940, Oxford, 1049 p.
- [196] M. Hasegawa, *On the position of the focus of the geomagnetic Sq current system*, J. Geophys. Res., 1960, 65(5), 1437-1447, doi:10.1029/JZ065i005p01437.
- [197] J. M. Forbes, S. Leveroni, *Quasi 16-day oscillation in the ionosphere*, J. Geophys. Res. Lett., 1992, 19(10), 981-984. doi:10.1029/92gl00399.
- [198] L. Yi, and P. R. Chen, *Long period oscillations in the equatorial ionization anomaly correlated with the neutral wind in the mesosphere*, J. Atmos. Terr. Phys., 1993, 55, 1317.
- [199] D. Altadill and E. M. Apostolov, *Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere/lower thermosphere winds*, J. Geophys. Res, 2003, 108(A11), 1403, doi:10.1029/2003ja010015.
- [200] D. Altadill, E. M. Apostolov, Ch. Jacobi, and N. J. Mitchell, *Six-day westward propagating wave in the maximum electron density of the ionosphere*, Ann. Geophys., 2003, 21, 1577-1588, <https://doi.org/10.5194/angeo-21-1577-2003>.
- [201] D. V. Pancheva, P.J. Mukhtarov, M.G. Shepherd., et al., *Two-day wave coupling of the low-latitude atmosphere-ionosphere system*, J. Geophys. Res., 2006, 111, A07313, doi:10.1029/2005JA011562.
- [202] C. Vineeth, T.K. Pant, C.V. Devasia, R. Sridharan, *Atmosphere-Ionosphere coupling observed over the dip equatorial MLTI region through the quasi 16-day wave*, Geophys. Res. Lett., 2007, 34(12), L12102, doi:10.1029/2007gl030010.
- [203] A. I. Pogoreltsev, A.A. Vlasov, K. Fröhlich, Ch. Jacobi, *Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2007, 69(17-18), 2083-2101. doi:10.1016/j.jastp.2007.05.014.
- [204] J. M. Forbes, *Tidal and planetary waves*. In: Johnson, R.M., Killeen, T.L. (Eds.), *The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory*, Geophys. Monogr. Ser., 1995, vol. 87. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 67-87.
- [205] R. A. Madden, *Observations of large-scale traveling Rossby waves*, Reviews of Geophysics and Space Physics, 1979, 17(8), 1935-1947, doi:10.1029/rg017i008p01935.

- [206] M. L. Salby, *Survey of planetary-scale traveling waves: The state of theory and observations*, Rev. Geophys. Space Phys., 1984, 22(2), 209-236.
- [207] A. H. Manson, C.E. Heek, & J.B. Gregory, *Winds and waves (10 min-30 day) in the mesosphere and lower thermosphere at Saskatoon (52°N, 107°W, L = 4.3) during the year, October 1979 to July 1980*, J. Geophys. Res., 1981, 86, 9615-9625.
- [208] R. A. Vincent, *Planetary and gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere*, Adv. Space Res., 1990, 10, 12 (CIRA-86), 93-101.
- [209] M. Salby, *Rossby normal modes in nonuniform background configurations, II, Equinox and solstice conditions*, J. Atmos. Sci., 1981a, 38, 1827-1840.
- [210] M. Salby, *The 2-day wave in the middle atmosphere: Observations and theory*, J. Geophys. Res., 1981b, 86, 9654-9660.
- [211] J. M. Forbes, *Planetary waves in the thermosphere-ionosphere system*, J. Geomagn. Geoelect., 1996, 48, 91-98.
- [212] M.A. Abdu, T.K. Ramkumar, I.S. Batista, et al., *Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere-ionosphere system, and mesosphere-E-and F-region coupling*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2006, 68, 509-522.
- [213] N. M. Pedatella, J.M. Forbes, *Modulation of the equatorial F-region by the quasi-16-day planetary wave*, Geophys. Res. Lett., 2009, 36(9), L09105, doi:10.1029/2009gl037809.
- [214] J. M. Forbes, A. Maute, X. Zhang, M.E. Hagan, *Oscillation of the Ionosphere at Planetary-Wave Periods*, J. Geophys. Res.: Space Physics, 2018, 123(9), 7634-7649. doi:10.1029/2018JA025720.
- [215] D. Pancheva, R. Schindler, J. Laštovička, *27-day fluctuations in the ionospheric D-region*, J. Atmos. Terr. Phys., 1991, 53:1145-1150. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90064-E](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90064-E).
- [216] E. A. Rhoden, J.M. Forbes, and F.A. Marcos, *The influence of geomagnetic and solar variabilities on lower thermosphere density*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2000, 62, 999-1013.
- [217] A. V. Oinats, K.G. Ratovsky, G.V. Kotovich, *Influence of the 27-day solar flux variations on the ionosphere parameters measured at Irkutsk in 2003-2005*, Adv.Space Res., 2008, 42(4), 639-644, doi:10.1016/j.asr.2008.02.009.

- [218] R. Ma, J. Xu, W. Wang, J. Lei, *The effect of ~27 day solar rotation on ionospheric region peak densities*, J. Geophys. Res, 2012, 117(A3), A03303, doi:10.1029/2011ja017190.
- [219] Y. Chen, L. Liu, H. Le, H. Zhang, *Discrepant responses of the global electron content to the solar cycle and solar rotation variations of EUV irradiance*, Earth Planets Space, 2015, 67-80, doi:10.1186/s40623-015-0251-x.
- [220] Y. Y. Sun, H. Liu, Y. Miyoshi, et al., *El Niño-Southern Oscillation effect on quasi-biennial oscillations of temperature diurnal tides in the mesosphere and lower thermosphere*, Earth Planets Space, 2018, 70-85, doi: 10.1186/s40623-018-0832-6.
- [221] M. J. McPhaden, *Evolution of the 2006-2007 El Niño: the role of intraseasonal to interannual time scale dynamic*, Adv. Geosci., 2008, 14, 219-230.
- [222] M.A. Abdu, J.H.A. Sobral, I.S. Batista, *Equatorial spread F statistics in the American longitudes: Some problems relevant to ESF description in the IRI scheme*, Adv. Space Res., 2000, 25(1), 113-124.
- [223] Y. Sahai, P.R. Fagundes, & J.A. Bittencourt, *Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects*, J. Atmos. Terr. Phys., 2000, 62(15), 1377-1383, doi:10.1016/s1364-6826(00)00179-6.
- [224] J. Aarons, *The longitudinal morphology of equatorial F-layer irregularities relevant to their occurrence*, Space Sci. Rev, 1993, 63(3-4), 209-243.
- [225] H. Chandra, S. Sharma, M.A. Abdu, I.S. Batista, *Spread-F at anomaly crest regions in the Indian and American longitudes*, Adv. Space Res., 2003, 31(3), 717-727, doi: 10.1016/s027.
- [226] K. Liu, G. Li, B. Ning, *Statistical characteristics of low-latitude ionospheric scintillation over China*, Adv. Space Res., 2015, 55(5), 1356-1365, doi: 10.1016/j.asr.2014.12.001.
- [227] C. Y. Huang, W.J. Burke, J.S. Machuzak, et al., *Equatorial plasma bubbles observed by DMSP satellites during a full solar cycle: Toward a global climatology*, J. Geophys. Res: Space Physics, 2002, 107(A12), SIA 7-1-SIA, 7-10, doi:10.1029/2002ja009452.
- [228] J. J. Makela, B.M. Ledvina, M.C. Kelley, *Analysis of the seasonal variations of equatorial plasma bubble occurrence observed from Haleakala, Hawaii*, Ann.

- Geophys., 2004, 22(9), 3109-3121, doi:10.5194/angeo-22-3109.
- [229] R. H. Wiens, B.M. Ledvina, P.M. Kintner, et al., *Equatorial plasma bubbles in the ionosphere over Eritrea: Occurrence and drift speed*, Ann. Geophys., 2006, 24, 1443-1453.
- [230] A. Portillo, M. Herraiz, S.M. Radicella, & L. Ciraolo, *Equatorial plasma bubbles studied using African slant total electron content observations*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2008, 70(6), 907- 917, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.019.
- [231] D. Okoh, B. Rabiou, K. Shiokawa, et al., *First Study on the Occurrence Frequency of Equatorial Plasma Bubbles over West Africa Using an All-Sky Airglow Imager and GNSS Receivers*, J. Geophys. Res., 2017, 122(12), doi:/10.1002/2017JA024602.
- [232] F. Abiriga, E.B. Amabayo, E. Jurua, & P.J. Cilliers, *Statistical characterization of equatorial plasma bubbles over East Africa*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2020, 105197, doi:10.1016/j.jastp.2020.105197.
- [233] R. G. Rastogi, *Seasonal variation of equatorial spread F in the American and Indian zones*, J. Geophys. Res., 1980, 85(A2), 722-726.
- [234] D. B. Muldrew, *The formation of ducts and spread F and the initiation of bubbles by field-aligned currents*, J. Geophys. Res., 1980, 85(A2), 613-625.
- [235] Y. Otsuka, K. Shiokawa, T. Ogawa, *Equatorial ionospheric scintillations and zonal irregularities drifts observed with closely-spaced GPS receivers in Indonesia*, J. Meteor. Soc. Jpn., 2006, 84A, 343-351.
- [236] L. Hu, X. Zhao, W. Sun, et al., *Statistical characteristics and correlation of low latitude F region bottom-type irregularity layers and plasma plumes over Sanya*, J. Geophys. Res.: Space Phys., 2020, <https://doi.org/10.1029/2020JA027855>.
- [237] S. Saito, T. Maruyama, M. Ishii, et al., *Observation of small to large scale ionospheric irregularities associated with plasma bubbles with a transequatorial HF propagation experiment and spaced GPS receivers*, J. Geophys. Res., 2008, 113(A12313), 1-10.
- [238] A. Bhattacharyya, B. Kakad, S. Sripathi, et al., *Development of intermediate scale structure near the peak of the F region within an equatorial plasma bubble*, J. Geophys. Res., 2014, 119, 3066-3076.
- [239] M. C. Kelley, & J.P. McClure, *Equatorial spread-F: A review of recent*

- experimental results*, J. Atmos. Terr. Phys., 1981, 43(5), 427-435.
- [240] M. A. Cervera, R.M. Thomas, *Latitudinal and temporal variation of equatorial ionospheric irregularities determined from GPS scintillation observations*, Ann. Geophys., 2006, 24(12), 3329-3341.
- [241] Y. Beniguel, V. Romano, L. Alfonsi, et al., *Ionospheric scintillation monitoring and modeling*, An. Geophys., 2009, 52(3-4), 391-416.
- [242] J. Krall, J.D. Huba, S.L. Ossakow, et al., *Modeling of equatorial plasma bubbles triggered by non-equatorial traveling ionospheric disturbances*, Geophys. Res. Lett., 2011, 38, L08103, doi: 10.1029/2011GL046890.
- [243] A. Hannachi, I. T. Jolliffe, and D. B. Stephenson, *Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science, A review*, Int. J. Climatol., 2007, 27, 1119-1152.
- [244] N. I. Dvinskikh, *Expansion of ionospheric characteristics fields in empirical orthogonal functions*, Adv. Space Res., 1988, 8, 179-187.
- [245] C. Liu, M. L. Zhang, W. Wan, L. Liu, and B. Ning, *Modeling M(3000)F2 based on empirical orthogonal function analysis method*, Radio Sci., 2008, 43, RS1003, <https://doi.org/10.1029/2007RS003694>.
- [246] M. L. Zhang, C. Liu, W. Wan, L. Liu, and B. Ning, *A global model of the ionospheric F2 peak height based on EOF analysis*, Ann. Geophys., 2009, 27, 3203–3212, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3203-2009>.
- [247] G. Andima, E. B. Amabayo, E. Jurua, & P. J. Cilliers, *Modeling of GPS total electron content over the African low-latitude region using empirical orthogonal functions*. Annales Geophysicae, 2019, 37(1), 65–76, doi:10.5194/angeo-37-65-2019.
- [248] P. G. Richards, J. A. Fennelly, and D.G. Torr, *IEUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations*, J. Geophys. Res., 1994, 26, 8981-8992.
- [249] L. Liu, W. Wan, B. Ning, et al., *Solar activity variations of the ionospheric peak electron density*, J. Geophys. Res., 2006, 111, A08304, <https://doi.org/10.1029/2006JA011598>.