

TRÍCH LỘC CHỈ SỐ TEC TỪ TRỊ ĐO GPS

TS. NGUYỄN NGỌC LÂU

Bộ môn Địa Tin học

Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh

Tóm tắt:

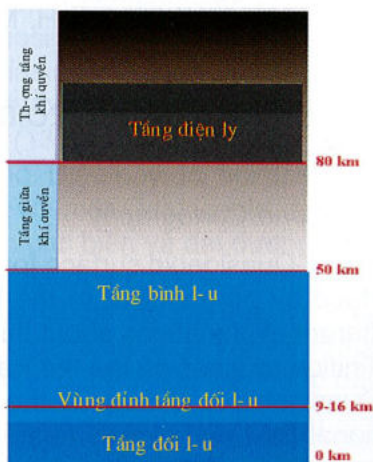
TEC (Total Electron Content) là một tham số thời tiết quan trọng đặc trưng cho trạng thái và động học của plasma trong tầng điện ly. Trong bài báo này chúng tôi trình bày cơ sở lý luận và thuật toán để trích lọc TEC từ trị đo GPS. Độ lệch trung bình giữa giá trị TEC xác định bằng thuật toán và giá trị TEC từ tổ chức IGS tại một số trạm đo IGS khoảng 4-10 TECU.

Abstract:

TEC (Total Electron Content) is an important parameter for weather prediction. It stands for plasma status and dynamic in ionosphere. In this paper, we present the theoretical basis and algorithms which allow for the extraction TEC from GPS measurements. The mean deviation between TEC values from our algorithm and IGS's TEC values at some IGS stations is about 4-10TECU.

1. GIỚI THIỆU

Tầng điện ly là vùng khí quyển trái đất trong đó bức xạ ion hóa (chủ yếu từ tia cực tím và tia X từ mặt trời) tạo nên các điện tử ảnh hưởng vào việc truyền sóng radio. Định nghĩa này cho thấy không có các giới hạn cụ thể về độ cao của tầng điện ly. Tầng điện ly bắt đầu khoảng 50 km đến hơn 1000 km. Các ion tự do được sinh ra làm cho tín hiệu radio khi truyền trong môi trường này bị phân tán và khúc xạ một cách không tuyến tính. Sự phân tán và khúc xạ của tín hiệu đã ảnh hưởng vào sai số đo khoảng cách bằng công nghệ GPS. Sai số này lại phụ thuộc vào tần số của tín hiệu. Tần số của tín hiệu càng cao thì ảnh hưởng của tầng điện ly càng nhỏ và ngược lại.



Hình 1: Cấu trúc khí quyển trái đất

TEC là mật độ electron tích phân dọc theo đường truyền tín hiệu. TEC là một tham số thời tiết quan trọng đặc trưng cho trạng thái và động học của plasma trong tầng điện ly. TEC thay đổi một cách đáng kể trong các sự kiện mặt trời như bão từ và phản ánh tính động học của các quá trình trong môi trường không gian của trái đất. TEC biến động nhiều theo không gian và thời gian. Sự biến động chủ yếu là ngày đêm. Cũng có chu kỳ mặt trời và chu kỳ mùa cũng như những biến động chu kỳ ngắn trên 100 phút. Các giá trị điển hình của TEC vào thời gian ban ngày tại vĩ độ trung bình là 100 TECU, ban đêm là 10 TECU (1 TECU = 10^{16} electron m^{-2}). Đặc biệt ở vùng vành đai xích đạo giá trị ban ngày có thể vượt ban đêm đến 2 lần hay hơn nữa.

Bằng công nghệ GPS, người ta có thể xác định TEC thông qua việc khảo sát độ trễ điện ly thiên đỉnh I^z theo quan hệ sau [3]

$$I^z = \frac{\alpha \times VTEC}{f^2} 10^{16} \quad [m] \quad (1)$$

Trong đó $\alpha = 40.30 \text{ m}^3/\text{s}^2$; VTEC là giá trị của TEC ở hướng thiên đỉnh (TECU), f là tần số của sóng tải GPS (Hz).

Theo (1), để xác định VTEC với độ chính xác ± 1 TECU, thì độ trễ điện ly thiên đỉnh cần xác định với độ chính xác $\pm 0.16\text{m}$. Tuy nhiên theo thông báo của IGS, độ chính xác cao nhất của TEC mà tổ chức này cung cấp chỉ đạt độ chính xác 2-8 TECU ($\sim 0.32 - 1.28\text{m}$) và đây có thể được coi là độ chính xác giới hạn xác định TEC bằng công nghệ GPS.

Tại Việt Nam từ năm 2006, chúng tôi đã có những nghiên cứu đầu tiên về tác động của độ trễ điện ly vào việc sử dụng các máy thu một tần số [5], và khảo sát độ trễ điện ly từ trị đo pha GPS tại một số trạm đo ở thành phố Hồ Chí Minh [6]. Từ năm 2007-2008 chúng tôi tham gia vào đề tài nghiên cứu khoa học "Nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn của việc sử dụng công nghệ GPS để theo dõi trạng thái của tầng điện ly và đối lưu" do Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ tiến hành [18].

Trong bài báo này, chúng tôi sẽ trình bày các vấn đề liên quan đến thuật toán xác định TEC từ dữ liệu đo GPS. Chúng tôi cũng kiểm nghiệm thuật toán này bằng cách xác định TEC tại một số trạm đo IGS và so sánh với kết quả của IGS.

2. CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH ĐỘ TRỄ ĐIỆN LY

Các vệ tinh GPS truyền tín hiệu trên 2 băng sóng tải L1 và L2 với tần số 1575.42 MHz và 1227.60 MHz. Các trị đo mà một máy thu GPS 2 tần số có thể cung cấp bao gồm trị đo giả cự ly và trị đo pha tích hợp trên cả hai tần số. Các trị đo này được mô hình như sau [1, 2]:

$$\Phi_{i,1}^k(t) = \rho_i^k(t) - I_{i,1}^k + T_i^k + \delta m_{i,1}^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda_1 N_{i,1}^k + \varepsilon_{i,1}^k \quad (2a)$$

$$\Phi_{i,2}^k(t) = \rho_i^k(t) - I_{i,2}^k + T_i^k + \delta m_{i,2}^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda_2 N_{i,2}^k + \varepsilon_{i,2}^k \quad (2b)$$

$$P_{i,1}^k(t) = \rho_i^k(t) + I_{i,1}^k + T_i^k + dm_{i,1}^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + e_{i,1}^k \quad (3a)$$

$$P_{i,2}^k(t) = \rho_i^k(t) + I_{i,2}^k + T_i^k + dm_{i,2}^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + e_{i,2}^k \quad (3b)$$

Trong đó:

- * $\Phi_{i,1}^k(t)$ và $\Phi_{i,2}^k(t)$ là trị đo pha trên tần số L1 và L2 giữa máy thu i và vệ tinh k ở thời điểm thu t
- * $P_{i,1}^k(t)$ và $P_{i,2}^k(t)$ là trị đo giả cự ly trên tần số L1 và L2 giữa máy thu i và vệ tinh k ở thời điểm thu t
- * $\rho_i^k(t)$ là khoảng cách hình học giữa máy thu i và vệ tinh k ở thời điểm thu t
- * $I_{i,1}^k$ và $I_{i,2}^k$ là độ trễ điện ly (theo đường truyền tín hiệu) trên tần số L1 và L2
- * T_i^k là độ trễ đối lưu theo đường truyền tín hiệu
- * $\delta m_{i,1}^k$ và $\delta m_{i,2}^k$ là ảnh hưởng của đa đường trên trị đo pha tần số L1 và L2
- * $dm_{i,1}^k$ và $dm_{i,2}^k$ là ảnh hưởng của đa đường trên trị đo giả cự ly tần số L1 và L2
- * $c = 299792.458$ km/s là vận tốc của ánh sáng trong chân không
- * $dt_i(t)$ là sai số đồng hồ máy thu ở thời điểm thu t
- * $dt^k(t - \tau_i^k)$ là sai số đồng hồ vệ tinh ở thời điểm phát
- * $N_{i,1}^k$ và $N_{i,2}^k$ là tham số đa trị trên 2 tần số
- * λ_1 và λ_2 là bước sóng của tần số L1 và L2; $\lambda_i = \frac{c}{f_{L_i}}$
- * $\varepsilon_{i,1}^k$ và $\varepsilon_{i,2}^k$ là sai số đo của trị đo pha trên 2 tần số
- * $e_{i,1}^k$ và $e_{i,2}^k$ là sai số đo của trị đo giả cự ly trên 2 tần số

Từ các trị đo trên 2 tần số, ta có thể thành lập trị đo L4 như sau

$$\Phi_{i,4}^k(t) = \Phi_{i,1}^k(t) - \Phi_{i,2}^k(t) = -I_{i,4}^k + \delta m_{i,4}^k + \lambda_1 b_{i,4}^k + \varepsilon_{i,4}^k \quad (5a)$$

trong đó $I_{i,4}^k = I_{i,1}^k - I_{i,2}^k$; $\delta m_{i,4}^k = \delta m_{i,1}^k - \delta m_{i,2}^k$; $b_{i,4}^k = N_{i,1}^k - \frac{f_{L_1}}{f_{L_2}} N_{i,2}^k$; và $\varepsilon_{i,4}^k = \varepsilon_{i,1}^k - \varepsilon_{i,2}^k$

Một cách tương tự, ta cũng có tổ hợp P4 cho trị đo giả cự ly

$$P_{i,4}^k(t) = I_{i,4}^k + dm_{i,4}^k + e_{i,4}^k \quad (5b)$$

trong đó $dm_{i,4}^k = dm_{i,1}^k - dm_{i,2}^k$; và $e_{i,4}^k = e_{i,1}^k - e_{i,2}^k$

Vì độ trễ điện ly tỷ lệ nghịch với bình phương tần số nên ta có

$$f_{L_1}^2 I_{i,1}^k = f_{L_2}^2 I_{i,2}^k \quad \text{hay} \quad I_{i,4}^k = -I_{i,1}^k (f_{L_1}^2 / f_{L_2}^2 - 1) \quad (6)$$

Ký hiệu $I_{i,1}^-$ là độ trễ điện ly hướng thiên đỉnh của sóng tải L1, ta có

$$I_{i,1}^k = m_i^k I_{i,1}^- \quad (7)$$

Trong đó m_i^k là hàm ánh xạ điện ly, được tính phụ thuộc theo góc cao vệ tinh

Thay (5) và (6) vào các phương trình (4a) và (4b), ta có

$$\Phi_{i,4}^k(t) = \frac{m_i^k}{\alpha_2} I_{i,1}^z + \delta m_{i,4}^k + \lambda_1 b_{i,4}^k + \varepsilon_{i,4}^k \quad (8a)$$

$$P_{i,4}^k(t) = -\frac{m_i^k}{\alpha_2} I_{i,1}^z + dm_{i,4}^k + e_{i,4}^k \quad (8b)$$

Trong đó

$$\alpha_2 = \frac{f_{I_2}^2}{f_{I_1}^2 - f_{I_2}^2} = 1 / (f_{I_1}^2 / f_{I_2}^2 - 1)$$

Các phương trình (8) không chứa ảnh hưởng đối lưu và khoảng cách hình học. Vì vậy ta có thể dùng chúng để khảo sát độ trễ điện ly thiên đỉnh mà không cần biết thông tin về tọa độ trạm đo và vệ tinh. Phương pháp này do đó có thể cung cấp giá trị của TEC ở thời gian thực. Một ưu điểm khác của việc dùng (8a) là nó có ảnh hưởng của đa đường và sai số đo rất nhỏ nên có thể cung cấp TEC với độ chính xác cao [8, 12, 13, 14]. Nhược điểm của phương pháp này là chỉ có thể áp dụng cho các máy thu hai tần số.

Cách thứ hai để xác định TEC là lấy hiệu giữa các phương trình (2a) và (3a), (2b) và (3b), ta được:

$$P\Phi_{i,1}^k(t) = P_{i,1}^k(t) - \Phi_{i,1}^k(t) = 2I_{i,1}^k + dm_{i,1}^k - \delta m_{i,1}^k - \lambda_1 \Delta N_{i,1}^k + e_{i,1}^k - \varepsilon_{i,1}^k \quad (9a)$$

$$P\Phi_{i,2}^k(t) = P_{i,2}^k(t) - \Phi_{i,2}^k(t) = 2 \frac{f_{I_1}^2}{f_{I_2}^2} I_{i,1}^k + dm_{i,2}^k - \delta m_{i,2}^k - \lambda_2 \Delta N_{i,2}^k + e_{i,2}^k - \varepsilon_{i,2}^k \quad (9b)$$

Phương trình (9a) và (9b) không có mặt khoảng cách hình học, các sai số đồng hồ và ảnh hưởng của đối lưu. Vì vậy phương pháp này có ưu điểm là có thể dùng được cho các máy thu GPS một tần số và có thể cung cấp giá trị TEC ở thời gian thực [9]. Tuy nhiên các trị đo (9) lại chứa đựng ảnh hưởng đa đường và sai số đo của trị đo giả cự ly vốn có độ lớn từ vài mét đến vài chục mét. Điều này có thể làm giá trị TEC xác định từ các phương trình (9) có sai số tương đối lớn. Để giảm ảnh hưởng của đa đường trong trị đo, các tác giả thường phải lọc nhiều trị đo trước khi sử dụng.

So sánh hai phương pháp xác định TEC đã trình bày trên, chúng tôi chọn phương pháp đầu để xử lý, vì nó cung cấp độ chính xác cao hơn và có thể đáp ứng cho đòi hỏi thời gian thực.

3. THUẬT TOÁN XÁC ĐỊNH ĐỘ TRỄ ĐIỆN LY THIÊN ĐỈNH VÀ VTEC THEO MÔ HÌNH LỚP ĐƠN CỦA TẦNG ĐIỆN LY

Như đã đề cập ở mục 1, độ trễ điện ly và TEC biến động theo không gian và thời gian. Vì vậy để khảo sát tham số này chúng tôi sử dụng bộ lọc Kalman. Thuật toán Kalman đã được trình bày trong nhiều sách tham khảo [4], ở đây chúng tôi chỉ đề cập đến việc thiết kế các thành phần cơ bản của bộ lọc Kalman như vector trạng thái, ma trận hệ số và ma trận chuyển vị.

Nếu ta chọn trị đo Φ_4 và P_4 ở phương trình (8a) và (8b) để xử lý thì vector trạng thái có thể được thiết kế như sau

$$x = (I^z \quad b_1 \quad \dots \quad b_n)^T \quad (10)$$

Nghiên cứu - Ứng dụng

Trong đó b_i là tham số đa trị ứng với vệ tinh thứ i ; I' là độ trễ đối lưu thiên đỉnh, đây là thành phần duy nhất trong vector trạng thái biến động theo thời gian.

Ma trận hệ số A ở một epoch có dạng sau

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_4^I}{\partial x} & \frac{\partial \Phi_4^I}{\partial x} & \dots & \frac{\partial P_4^{II}}{\partial x} & \frac{\partial \Phi_4^{II}}{\partial x} \end{pmatrix}^T \quad (11)$$

Trong đó $\frac{\partial P_4^I}{\partial x}$ và $\frac{\partial \Phi_4^I}{\partial x}$ là đạo hàm riêng phần của các trị đo P_4 và Φ_4 ứng với vệ tinh thứ i theo vector trạng thái x . Với thành phần vector trạng thái ở công thức (10), ta có

$$\frac{\partial P_4^I}{\partial x} = \begin{pmatrix} -\frac{m'}{\alpha_2} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (12a)$$

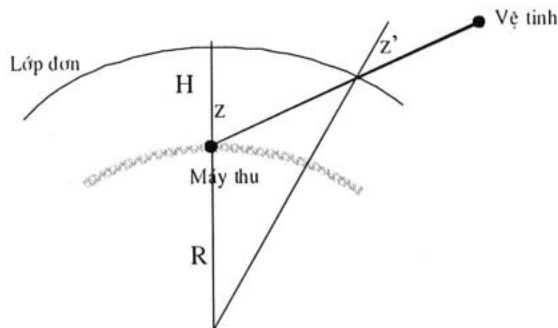
$$\frac{\partial \Phi_4^I}{\partial x} = \begin{pmatrix} +\frac{m'}{\alpha_2} & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (12b)$$

Trong đó m' là hàm ánh xạ lớp đơn của vệ tinh thứ i vào thời điểm xét. Nó được tính như sau [7]:

$$m' = \frac{1}{\cos z'} \quad (13)$$

Với

$$\sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z \quad (14)$$

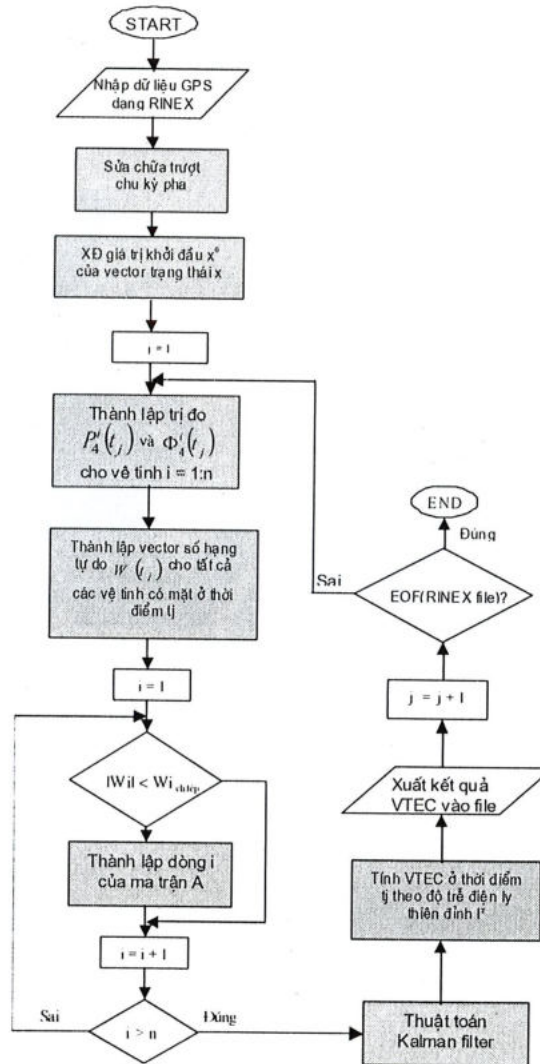


Hình 2: Hàm ánh xạ lớp đơn của tầng điện ly

Trong đó z , z' là góc thiên đỉnh của hướng truyền tín hiệu tại trạm đo và tại lớp đơn (xem hình 2); R là bán kính trung bình của trái đất (thường chọn là 6371km); và H là độ cao tầng điện ly so với mặt đất (thường chọn là 400km). (Xem hình 3)

Ma trận chuyển vị Φ ở mỗi thời điểm được thành lập như sau:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$



Hình 3: Sơ đồ khối xác định VTEC từ trị đo GPS

Hình 3 thể hiện sơ đồ khối của chương trình xác định VTEC, trong đó:

- * i là chỉ số của vệ tinh
- * j là chỉ số của epoch
- * n là số lượng vệ tinh quan sát được tại thời điểm t_j
- * $W_{i\text{chép}}$ là giá trị cho phép của số hạng tự do W_i , $W_{i\text{chép}}$ có thể tính theo công thức

$$W_{i\text{chép}} = k \times \sigma \sqrt{Q_W} \quad (16)$$

k nhận các giá trị 2, 2.5 hay 3 ứng với độ tin cậy 95.4%, 99% hay 99.7%; σ là sai số trung phương đơn vị trọng số

4. SO SÁNH KẾT QUẢ TẠI TRẠM ĐO IGS

Để kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán và chương trình, đồng thời để đánh giá độ chính xác xác định TEC, chúng tôi đã chọn dữ liệu đo GPS từ ba trạm IGS thường trực có tên là WUHN, KUNM và PIMO nằm tương đối gần với Việt Nam (xem hình 4).



Hình 4: Vị trí ba trạm WUHN, KUNM và PIMO

Các máy thu GPS đặt tại các trạm đo này là ASHTECH Z-XII3 và ROGUE SNR-8000, đều là máy thu 2 tần số có khả năng cung cấp các trị đo giả cự ly và trị đo pha trên hai tần số. Riêng máy thu tại WUHN còn có trang bị thêm chuẩn đồng hồ nguyên tử cesium bên ngoài nên cung cấp trị đo giả cự ly chất lượng cao. Anten trang bị là loại chokering có khả năng lọc nhiễu tốt và hạn chế đến mức tối đa ảnh hưởng đa đường.

Trị đo tại các trạm này được thu với tốc độ 30 giây, với góc cao vệ tinh giới hạn được cài là 5 độ. Vì thời gian có giới hạn nên chúng tôi chỉ chọn dữ liệu của một ngày đo là ngày 01-05-2007 cho việc đánh giá. Chúng tôi xử lý dữ liệu GPS của các trạm đo theo các cài đặt sau:

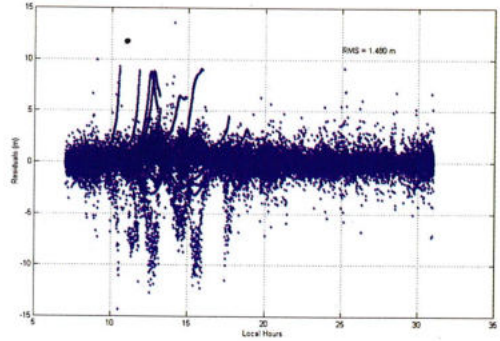
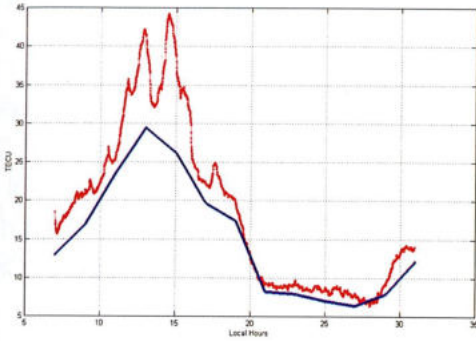
Bảng 1: Các cài đặt cho việc xác định VTEC

Nội dung	Giá trị cài đặt
Trị đo dùng trong xử lý	Trị đo pha L4 và trị đo mã P4
Góc ngưỡng vệ tinh	5°
Độ dài dữ liệu	24 giờ
Xử lý độ trễ điện ly thiên đỉnh	Random walk cập nhật 15 phút với độ biến động $2m\sqrt{t_{hour}}$
Hàm ánh xạ lớp đơn	$1/\cos(z')$
Độ trễ nhóm phụ thuộc vệ tinh	IGS
Độ trễ nhóm phụ thuộc máy thu	IGS

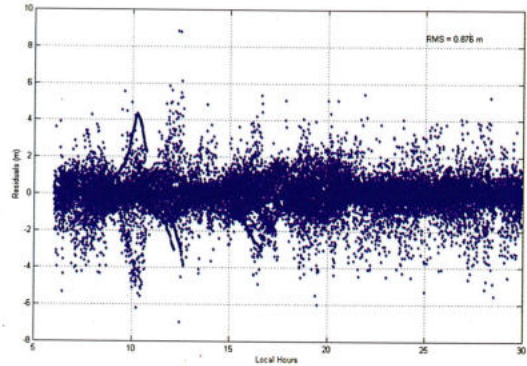
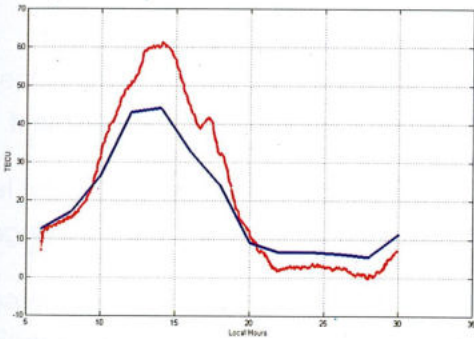
Kết quả xác định VTEC tại các trạm WUHN, KUNM và PIMO được so sánh với sản phẩm của IGS theo hình 5, 6, 7 và bảng 2. Trong đồ thị bên trái của các hình vẽ, màu đỏ thể hiện cho kết quả VTEC của chúng tôi, còn màu xanh thể hiện cho giá trị VTEC của tổ chức IGS.

Bảng 2: Độ lệch VTEC xác định từ thuật toán so với sản phẩm IGS

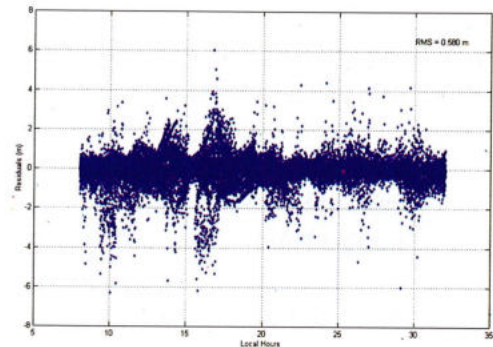
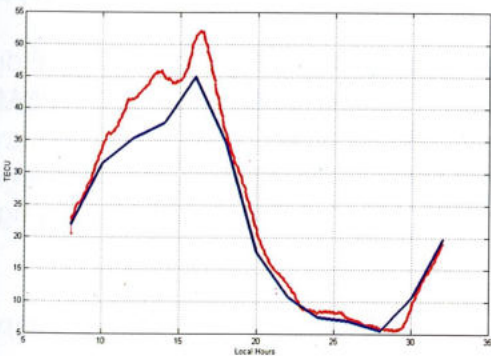
Trạm đo	Độ lệch (TECU)		
	min	TB	Max
WUHN	0.0	3.4	17.1
KUNM	0.0	6.3	18.8
PIMO	0.0	2.7	9.4



Hình 5: VTEC tại WUHN (trái) và phần dư trị đo (phải)



Hình 6: VTEC tại KUNM (trái) và phần dư trị đo (phải)



Hình 7: VTEC tại PIMO (trái) và phần dư trị đo (phải)

5. KẾT LUẬN

Từ kết quả xử lý của GUST trên 3 trạm đo IGS, ta có nhận xét sau:

* Độ lệch trung bình của VTEC xác định bằng thuật toán của chúng tôi khi so với sản phẩm IGS là 3-6 TECU. Độ lệch lớn nhất tại tất cả 3 trạm xảy ra vào lúc hoạt tính mặt trời cao nhất - xung quanh thời điểm 14-16 giờ địa phương. Độ lệch này có thể đạt đến giá trị lớn nhất khoảng 10-20 TECU. Điều này chúng tôi cũng đã chỉ ra trong bài báo [5] khi khảo sát TEC tại một điểm ở thành phố Hồ Chí Minh.

* Quan sát các phần dư của trị đo, ta thấy sai số trung phương của nó là 0.6 - 1.5m. Các phần dư có giá trị lớn cũng tập trung xung quanh thời điểm 10 - 16 giờ địa phương. Do đó kết quả xác định VTEC trong khoảng thời gian này có độ chính xác kém hơn các thời điểm khác trong ngày, lệch nhiều hơn khi so với sản phẩm IGS. Nếu sai số 1 TECU tương đương với 0.16m, thì sai số 0.6 - 1.5m của phần dư sẽ tương đương khoảng 4-10 TECU. Con số này phù hợp khi ta so sánh với IGS.

Kết quả so sánh trên cho thấy các thuật toán và chương trình xác định TEC là đúng đắn và có thể xác định TEC với sai số khoảng 4-10 TECU.○

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. David Wells, N. Beck, ..., (1999), "Guide to GPS Positioning", Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.

[2]. Alfred Kleusberg and P.J.G. Teunissen, (1996), "GPS for Geodesy", Springer-Verlag, Berlin.

[3]. Alfred Leick, (2004), "GPS Satellite Surveying", John Wiley and Sons, Canada.

[4]. Krakiwsky, E. J., (1982), "A Synthesis of recent advances in the method of least squares", Division of Surveying Engineering, The University of Calgary, Canada, 125pp.

[5]. Nguyễn Ngọc Lâu và Hồ Nguyễn Hoàng Vũ, (2007), "Xây dựng mô hình độ trễ điện ly từ trị đo pha GPS", Hội nghị KH và công nghệ lần thứ 10 tại ĐH Bách Khoa TP HCM.

[6]. Nguyễn Ngọc Lâu, Hồ Nguyễn Hoàng Vũ và Dương Tuấn Việt, (2007), "Khảo sát cự ly giới hạn của máy thu GPS một tần số tại TP. Hồ Chí Minh", Hội nghị KH và công nghệ lần thứ 10 tại ĐH Bách Khoa TP HCM.

[7]. Stefan Schaer, (1997), "How to use CODE's Global Ionosphere Maps", Astronomical Institute, University of Berne.

- [8]. Claudio Brunini, ..., (2004), "A new ionosphere monitoring technology based on GPS", *Journal of Astrophysics and Space Science*, 290, p. 415-429.
- [9]. W. Oiu, G. Lachapelle and M.E. Cannon, (1995), "Ionospheric effect modelling for single frequency GPS user", *Manuscripta geodaetica*, 20, p 96-109.
- [10]. Zhizhao Liu and Yang Gao, (2004), "Ionospheric TEC predictions over local area GPS reference network", *GPS solution*, 8:23-29.
- [11]. Zhizhao Liu, ..., (2005), "Ionospheric modeling using GPS data", *GPS solution*, 9 63-66.
- [12]. Lao Sheng Lin and Chris Rizos, (1996), "An algorithm to estimate GPS satellite and receiver L1/L2 differential delays and its application to regional ionosphere modelling", *Geomatics Research Australasia*, No.65, p. 1-26.
- [13]. Giovanni Mirena, Federica Riguzzi and Enrico Zuccheretti, (1997), "Measurements of ionospheric TEC in the direction of GPS satellites and comparison with three ionospheric models", *Annali de Geofisica*, Vol XL, N 6, p 1527-1533.
- [14]. L. Ciruolo, ..., (2007), "Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS", *Journal of Geodesy*, 81: 111-120.
- [15]. William Rideout and Anthea Coster, (2006), "Automated GPS processing for global total electron content data", *GPS solution*, 10: 219-228.
- [16]. H.N. Royden, R.B. Miller and L.A. Buennagel, (1984), "Comparison of NAVSTAR satellite L band ionospheric calibrations with Faraday rotation measurements", *Radio Science*, Vol 19, N 3, p. 798.804.
- [17]. J. Miguel Juan, ..., (1997), "A two-layer model of the ionosphere using Global Positioning System data", *Geophysical Research Letters*, Vol 24, No 4, p 393-396.
- [18]. Dương Chí Công, Nguyễn Ngọc Lâu, Hà Minh Hoà và Vũ Thanh Ca (2008), "Nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn của việc sử dụng công nghệ GPS để theo dõi trạng thái của tầng điện ly và đối lưu", *Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ – Bộ Tài nguyên và Môi trường.*○