

XÁC ĐỊNH LƯỢNG HƠI NƯỚC TÍCH TỤ (PWV) BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH VỊ ĐIỂM GPS CHÍNH XÁC

Nguyễn Ngọc Lê - Đại học Bách Khoa, Thành phố. Hồ Chí Minh

Lượng hơi nước tích tụ trong khí quyển (PWV-Precipitable Water Vapour) rất cần thiết cho công tác dự báo thời tiết. Chỉ số này có thể xác định một cách chính xác bằng công nghệ GPS với chi phí rẻ hơn nhiều so với các công nghệ khác. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày cơ sở lý thuyết và thuật toán xác định PWV từ trị đo pha GPS theo phương pháp định vị điểm chính xác kết hợp với phương pháp lọc nhiễu. Độ lệch trung bình giữa kết quả từ thuật toán của chúng tôi và kết quả của tổ chức IGS tại trạm đo Côn Minh, Trung Quốc khoảng 1 cm. Chúng tôi cũng đã áp dụng thuật toán này để xác định PWV tại một số trạm đo GPS trên lãnh thổ Việt Nam và phân tích mối quan hệ của nó với thời tiết diễn ra trên khu vực.

1. Giới thiệu

PWV (Precipitable Water Vapour) đóng một vai trò quan trọng trong động lực học khí quyển. Do nhiệt lượng tiềm ẩn khổng lồ liên quan với sự thay đổi pha của nước, kiến thức về sự phân bố của hơi nước cho ta biết tính ổn định của khí quyển theo độ cao, cấu trúc và sự tiến triển của các hệ thống bão khí quyển. PWV thường được đo bằng máy thám không vô tuyến (radiosonde) nhưng thiết bị này rất đắt tiền và cung cấp độ bao phủ giới hạn. Phóng xạ kế hơi nước (Water Vapour Radiometer) có thể đo PWV và cả lượng nước trong mây. Tuy nhiên, vì là thiết bị đặt trên mặt đất, nó bị giới hạn bởi độ bao phủ nghèo nàn, đắt tiền và hoạt động không ổn định dưới trời mưa lớn.

Một kỹ thuật mới được phát triển gần đây là dùng tín hiệu GPS để đo PWV thông qua độ trễ của nó khi đi qua tầng đối lưu [4, 5, 6, 8, 9]. Độ trễ của tín hiệu xảy ra ở tầng đối lưu nhận được từ việc xử lý GPS có thể tách ra thành 2 thành phần: độ trễ khô thiên đỉnh (ZHD – Zenith Hydrostatic Delay, ký hiệu là T_h^z) và độ trễ ướt thiên đỉnh (ZWD – Zenith Wet Delay, ký hiệu là T_w^z). Mặt khác, PWV là số lượng toàn bộ hơi nước tại một điểm trên bề mặt trái đất được biểu diễn là độ cao của một cột chất lỏng tương đương, do đó mối quan hệ của nó theo ZWD là [2]:

$$PWV = \Pi^* T_w^z \quad (1)$$

trong đó Π có giá trị trung bình là 0.159 và có thể được tính theo nhiệt độ đo ở bề mặt.

Qua nghiên cứu của một vài tác giả [4, 5, 6] cho thấy, kỹ thuật mới này có thể cung cấp PWV rất phù hợp với kết quả đo bằng những dụng cụ khác như máy thám không vô tuyến và phóng xạ kế hơi nước (khoảng 1-2 mm). Gần đây, Wang và Zang [15] đã tính toán PWV từ TSD của 539 trạm đo GPS và so sánh với dữ liệu từ máy thám không vô tuyến, phóng xạ kế hơi nước và dữ liệu vệ tinh. Kết quả cho độ lệch trung bình nhỏ hơn 3 mm.

Tại Việt Nam, chúng tôi đã có những nghiên cứu đầu tiên từ năm 2004 để xác định PWV tại các trạm thu GPS thường trực theo phương pháp xử lý tương đối [11]. Từ năm 2007-2008, chúng tôi tham gia vào đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ do Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ tiến hành [16].

Trong bài báo này, chúng tôi sẽ tóm tắt ưu, nhược điểm của các phương pháp xác định độ trễ đối lưu thiên đỉnh và PWV từ trị đo pha GPS. Thuật toán mà chúng tôi chọn lựa dựa trên phương pháp định vị tuyệt đối chính xác sẽ được trình bày ở phần 3. Phần 4 và 5 là các kết quả xử lý từ thuật toán tại trạm đo IGS và một số trạm đo tại Việt Nam.

2. Các phương pháp xác định độ trễ đối lưu thiên đỉnh

Trị đo pha GPS trên hai tần số sóng tải từ máy thu i đến vệ tinh k có dạng sau [1, 2]

$$\Phi_{i2}^k(t) = \rho_i^k(t) - I_{i2}^k(t) + T_i^k(t) + \delta m_{i2}^k \quad (2a)$$

$$+ c[d\tau_i(t) - d\tau_i^k(t - \tau_i^k)] + \lambda_1 N_{i2}^k + \varepsilon_{i2}^k$$

Người đọc phản biện: TS. Nguyễn Kiên Dũng

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

Trong đó:

- $\rho_i^k(t)$ 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 trên tần số L1 và L2;
- $\delta m_{i,1}^k$ là độ trễ đối lưu theo đường truyền tín hiệu;
- $\delta m_{i,2}^k$ và $\delta m_{i,2}^k$ là ảnh hưởng của đa đường trên trị đo pha tần số L1 và L2;
- $d m_{i,1}^k$ và $d m_{i,2}^k$ 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;
- $d_t(t)$ là sai số đồng hồ máy thu ở thời điểm thu t;
- $d_t^k(t - \tau_i^k)$ 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;
- $\varepsilon_{i,1}^k$ và $\varepsilon_{i,2}^k$ là sai số đo của trị đo giả cự ly trên 2 tần số.

Để loại bỏ ảnh hưởng trễ xảy ra tầng điện ly, ta thành lập trị đo L3 bằng cách kết hợp L1 và L2:

$$\Phi_{i,3}^k(t) = \alpha_1 \Phi_{i,1}^k - \alpha_2 \Phi_{i,2}^k = \rho_i^k(t) + T_i^k + \delta m_{i,3}^k + c[d_t(t) - d_t^k(t - \tau_i^k)] + \lambda_{i,3}^k + \varepsilon_{i,3}^k \quad (3)$$

trong đó $\alpha_1 = \frac{f_{L_1}^2}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}$, $\alpha_2 = \frac{f_{L_2}^2}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}$ và tham số đa trị $b_{i,3}^k = \alpha_1 N_{i,1}^k - \alpha_2 N_{i,2}^k$ không còn là số nguyên.

Độ trễ đối lưu dọc theo đường truyền tín hiệu GPS được thể hiện bằng công thức sau [2]:

$$T = T_h^z m_h + T_w^z m_w \quad (4)$$

trong đó m_h là hàm ánh xạ khô và m_w là hàm ánh xạ ướt.

Trong thực tế, hàm ánh xạ khô và ánh xạ ướt thường rất gần nhau khi góc cao vệ tinh trên 15° nên người ta thường tính xấp xỉ:

$$T = m (T_h^z + T_w^z) = m T^z \quad (5)$$

Trong đó m có thể là hàm ánh xạ ướt hay khô và Tz là độ trễ đối lưu thiên đỉnh toàn bộ (TZD – Tropospheric Zenith Delay).

Các phương pháp xác định độ trễ đối lưu Tz từ trị đo pha GPS có thể chia thành hai nhóm: tương đối và tuyệt đối.

Phương pháp tương đối

Phương pháp này được phát triển đầu tiên dựa trên cách xử lý tương đối dùng trị đo L3 ở dạng hiệu đôi (hiệu giữa hai vệ tinh và hai máy thu) [4, 5, 6]. Từ (3), ta có thể viết phương trình L3 hiệu đôi giữa hai vệ tinh k, l và hai máy thu i, j như sau [2]:

$$\nabla \Delta \Phi_{i,j}^{kl}(t) = \nabla \Delta \rho_{i,j}^{kl}(t) + \Delta m_{i,j}^{kl} T_i^z(t) - \Delta m_{j,j}^{kl} T_j^z(t) + \nabla \Delta \delta m_{i,j}^{kl} + \lambda_1 \nabla \Delta b_{i,j}^{kl} + \varepsilon_{i,j}^{kl} \quad (6)$$

Nếu tọa độ hai máy thu và tọa độ vệ tinh biết trước với độ chính xác cần thiết, đồng thời bỏ qua ảnh hưởng của đa đường thì các ẩn số còn lại trong phương trình trên là độ trễ đối lưu T_i^z , T_j^z của hai trạm đo và tham số đa trị $\nabla \Delta b_{i,j}^{kl}$. Ưu điểm của phương pháp là không bị ảnh hưởng bởi các sai số đồng hồ, trong khi các nguồn sai số khác bị giảm thiểu đáng kể do ở dạng hiệu đôi, đặc biệt là sai số quỹ đạo. Do đó, tham số đa trị có thể giải thành công để cung cấp độ chính xác cao nhất. Mặt khác, do có thể sử dụng bản lịch phát tín nên phương pháp có thể hoạt động ở thời gian thực.

Khi hai trạm đo i và j gần nhau thì hệ số $\Delta m_{i,j}^{kl}$ và $\Delta m_{j,j}^{kl}$ rất tương tự nhau dẫn đến phương trình chuẩn sẽ bị suy biến, đòi hỏi khoảng cách giữa hai trạm đo từ 500 km-2000 km [5, 6]. Tuy nhiên, ở khoảng cách này lại phát sinh nhiều vấn đề khó khăn khác như số lượng vệ tinh chung giảm, sai số quỹ đạo tăng, tham số đa trị không thể giải thành công, ... làm cho phương pháp không còn hiệu quả.

Phương pháp tuyệt đối

Đây là phương pháp được ra đời sau khi có các sản phẩm chính xác của tổ chức IGS (International Geodynamic Service) về tọa độ và số cải chính đồng hồ vệ tinh. Nhờ những sản phẩm này, chúng ta có thể tính toán chính xác các số hạng $\rho_i^k(t) - d^k(t - \tau)$ và loại chúng ra khỏi phương trình (3)

$$\Phi_{i,3}^k(t) = m_i^k T^z(t) + c d_i(t) + \lambda_{i,3} b_{i,3}^k + \varepsilon_{i,3}^k \quad (7)$$

NGHIÊN CỨU & TRAO ĐỔI

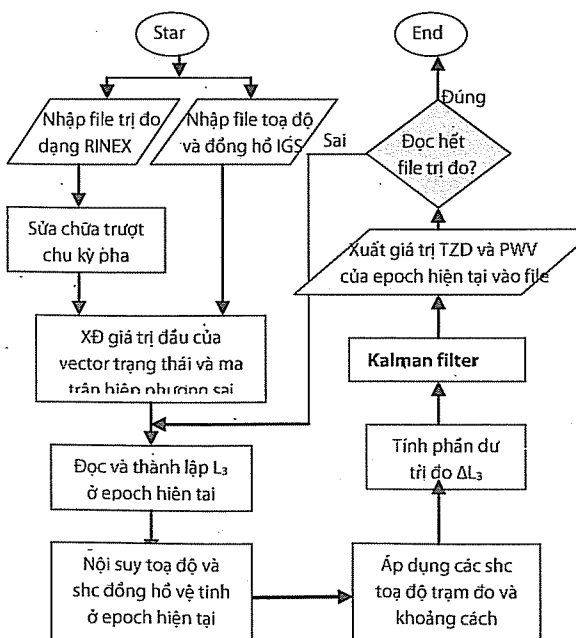
Các ẩn số còn lại bao gồm độ trễ đối lưu T^k , sai số đồng hồ máy thu $d(t)$ và tham số đa trị b_3^k . Sai số đồng hồ máy thu có thể khử đi bằng cách lấy hiệu giữa hai vệ tinh:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{3}^k(t) &= \Phi_{3}^k(t) - \Phi_{1}^k(t) \\ &= \Delta m_{3}^k T^z(t) + \lambda_3 \Delta b_3^k + \varepsilon_3^k \end{aligned} \quad (8)$$

Phương pháp này có ưu điểm là chỉ cần một máy thu duy nhất, mô hình xử lý đơn giản hơn phương pháp tương đối do có số ẩn số và số trị đo ít hơn. Nhược điểm của phương pháp là phụ thuộc hoàn toàn vào các sản phẩm chính xác của IGS, mà những sản phẩm này phải mất từ vài giờ đến hai tuần mới có sẵn. Tổ chức IGS cũng sử dụng phương pháp này để cung cấp sản phẩm độ trễ đối lưu tại các trạm đo IGS từ năm 2007 [3, 12].

3. Thuật toán xác định độ trễ đối lưu bằng định vị điểm chính xác

Chúng tôi áp dụng phương pháp tuyệt đối với trị đo (8). Trong các ẩn số, chỉ có tham số đa trị là hằng số, còn độ trễ đối lưu thiên đỉnh thay đổi theo không gian và thời gian. Để xử lý tham số này, chúng tôi dùng bộ lọc Kalman, trong đó mô hình hóa tham số TZD bằng quá trình bước ngẫu nhiên (Random Walk Process). Thuật toán được thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Thuật toán xác định TZD và PWV

Để nâng cao độ chính xác xác định TZD và PWV, chúng tôi sử dụng sản phẩm final của IGS cho tọa độ vệ tinh với độ chính xác 5cm, số hiệu chỉnh đồng hồ vệ tinh với độ chính xác 0.1 nano giây.

Quá trình sửa chữa trượt chu kỳ trên trị đo pha GPS xin được tham khảo đến tài liệu [13].

Các số hiệu chỉnh vào tọa độ trạm đo bao gồm: địa triều, thủy triều, cực triều, độ lệch tâm pha anten máy thu. Các số hiệu chỉnh vào khoảng cách bao gồm: định hướng anten, biến động tâm pha anten vệ tinh và máy thu. Để tính PWV từ TZD, chúng tôi sử dụng công thức sau:

$$PWV = \Pi(T^z - T_h^z) \quad (9)$$

trong đó T_h^z được tính chính xác đến mm theo các trị đo khí tượng bề mặt [10].

Thuật toán sử dụng trị đo hiệu đơn ΔL_3 giữa các vệ tinh. Tuy nhiên, thành phần các vệ tinh có mặt trên bầu trời máy thu lại thay đổi theo thời gian, dẫn đến thay đổi tổ hợp trị đo ΔL_3 . Để tránh tình trạng gián đoạn trong kết quả xử lý do thay đổi thành phần vệ tinh, chúng tôi áp dụng phương pháp xử lý liên tục đã được đề nghị trong tài liệu [14]

4. So sánh với kết quả IGS tại trạm đo Côn Minh

Để kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán và chương trình, chúng tôi đã xử lý dữ liệu GPS tại trạm đo IGS Côn Minh, Trung Quốc (KUNM) từ ngày 23 đến 29/09/2007. Chúng tôi chọn trạm đo này vì những lý do sau đây:

- Là trạm IGS ở gần Việt Nam nhất nên phần nào thể hiện tính chất biến động TZD và PWV tương tự như trên lãnh thổ Việt Nam.
- Dữ liệu đo GPS ở trạm này được thu bằng máy thu GPS chất lượng cao tốc độ 30s và tọa độ của nó đã biết với độ chính xác cao trong hệ tọa độ ITRF2005.
- Sản phẩm TZD của trạm đo này có sẵn cho khoảng thời gian trên với độ chính xác khoảng 4 mm và được cho 5phút/ 1 giá trị.

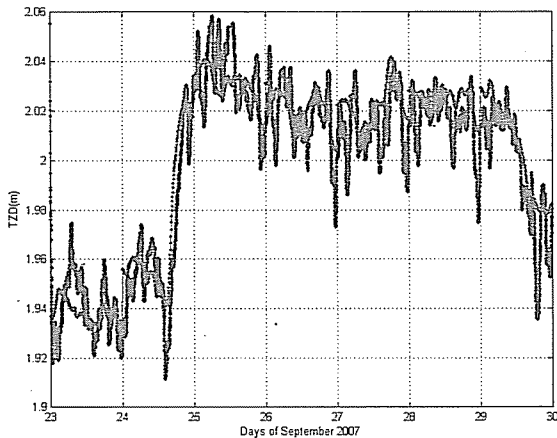
Để tiện so sánh kết quả từ thuật toán của chúng tôi với kết quả IGS, chúng tôi cài đặt các thông số sau tương tự như IGS [3]:

* Góc cao vệ tinh giới hạn là 7 độ.

• Sử dụng hàm ánh xạ Niell khô và ướt [7]

• Thời gian cập nhật cho tham số TZD là 5 phút với phương sai 3 mm.

Kết quả từ việc xử lý theo thuật toán và kết quả của IGS được cho ở hình 2.



Hình 2. TZD từ thuật toán (chấm đen) và từ IGS (đường liền nét)

Từ hình 2 ta có một số nhận xét sau:

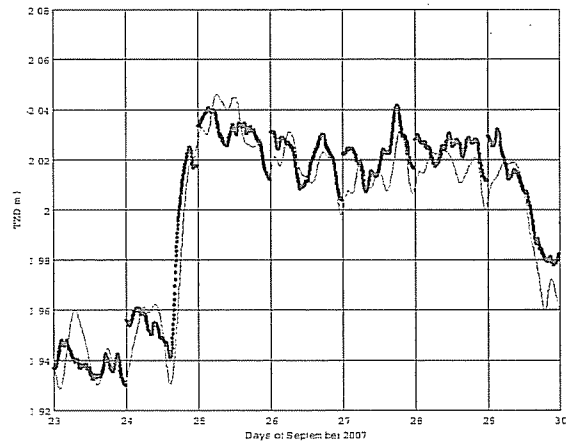
• Giá trị TZD của IGS có sự gián đoạn và chênh lệch lớn (~ 2 cm) ở thời điểm giữa hai ngày. Nhiều khả năng điều này là do việc nội suy tọa độ và số hiệu chỉnh đồng hồ vệ tinh được thực hiện theo từng ngày riêng biệt mà không có sự liên kết ở giữa hai ngày [12]. Sai số nội suy này làm cho giá trị TZD trở nên kém chính xác ở những thời điểm giữa hai ngày và vượt quá độ chính xác công bố (4 mm).

• Các kết quả từ việc xử lý vẫn đảm bảo tính liên tục giữa hai ngày vì chúng tôi áp dụng phương

pháp nội suy tọa độ và số hiệu chỉnh đồng hồ cho hai ngày liên tiếp. Giá trị của chúng lệch trung bình so với IGS là 13 mm và độ lệch lớn nhất là 45 mm.

Để giảm ảnh hưởng của nhiễu có trong các giá trị của TZD do ảnh hưởng sai số còn lại của quỹ đạo và đồng hồ vệ tinh, đa đường... ta có thể áp dụng các kỹ thuật lọc nhiễu. Kỹ thuật mà chúng tôi chọn ở đây là dùng đường cong spline bậc 3. Kết quả lọc được cho ở hình 3.

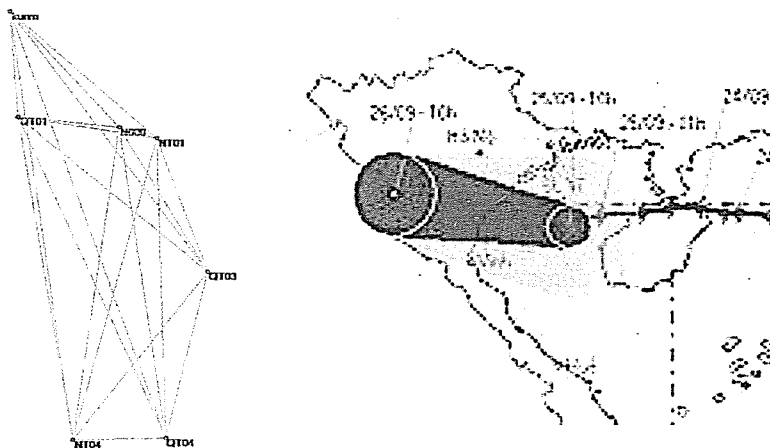
Độ lệch trung bình của kết quả lọc so với IGS là 9 mm, trong khi độ lệch lớn nhất giảm xuống chỉ còn 30 mm. Vì vậy chúng tôi kết luận rằng phương pháp định vị điểm chính xác kết hợp với kỹ thuật lọc cho kết quả phù hợp với IGS khoảng 1 cm.



Hình 3. TZD từ việc lọc nhiễu (liền nét) và từ IGS (chấm)

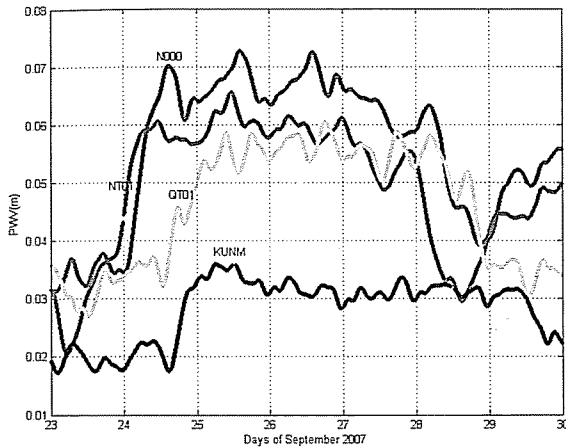
5. Kết quả xử lý tại một số trạm đo ở Việt Nam

Chúng tôi dùng tập dữ liệu đo GPS của mạng lưới Châu Á – Thái Bình Dương từ ngày 23 đến 29/09/2007. Có tất cả 6 điểm trong mạng lưới nằm trên lãnh thổ Việt Nam (xem hình 4).



Hình 4. Mạng lưới GPS Châu Á – Thái Bình Dương (trái) và hướng di chuyển của cơn bão trong thời gian đo (phải)

Kết quả xác định PWV minh họa tại ba điểm NT01 (Quảng Ninh), N00 (Hà Nội) và QT01 (Điện Biên) được cho ở hình 5.



Hình 5. PWV tại trạm đo NT01, N00, QT01 và KUNM

Theo hình trên, ta thấy giá trị PWV tại ba trạm đo tương đối đồng dạng do khoảng cách giữa chúng chỉ khoảng 100 – 400 km. Mặt khác, tại điểm NT01 và N00 cho thấy có sự gia tăng giá trị của PWV đột ngột giữa hai ngày 23 và 24/9/2007, sau đó giảm xuống khoảng giữa ngày 28/9/2007. Tại điểm QT01 và KUNM cũng có diễn biến tương tự nhưng chậm hơn khoảng 0,5-1 ngày. Khi đối chiếu với thời tiết

trong khoảng thời gian trên có cơn bão số 4 di chuyển theo hướng Tây Tây Bắc kéo dài từ ngày 24-28/9/2007 (xem hình 4). Khi đến gần đất liền nó suy yếu trở thành áp thấp nhiệt đới. Bão, mưa lớn trên diện rộng làm cho độ ẩm tăng cao hoàn toàn phù hợp với giá trị PWV. Bão số 4 di chuyển gần trùng với hướng NT01-N00-QT01-KUNM với tốc độ 15-20 km/h, tức là thời gian bão di chuyển từ điểm NT01 đến QT01 mất khoảng 20 giờ. Điều này giải thích vì sao có sự lệch pha khoảng 20 giờ giữa đường biểu diễn PWV của NT01 và QT01.

6. Tóm tắt và kết luận

Chúng tôi đã tóm tắt hai phương pháp chủ yếu để trích lọc chỉ số PWV từ trị đo pha GPS. Phương pháp tuyệt đối được chúng tôi khai thác vì nó có một số ưu điểm nhất định. Kết quả so sánh với IGS tại trạm đo Côn Minh cho thấy mức độ thỏa thuận khoảng 1cm. Điều này là hợp lý vì giá trị TZD của IGS có thể sai đến 2 cm tại những thời điểm giữa hai ngày.

Chúng tôi cũng đã xử lý một số trạm đo GPS tại Việt Nam từ ngày 23-29/9/2007. Kết quả cho thấy có sự liên hệ chặt chẽ giữa giá trị PWV đo được và hướng di chuyển của cơn bão đi qua trong thời gian này.

Tài liệu tham khảo

1. Alfred Kleusberg and P.J.G. Teunissen, (1996), "GPS for Geodesy", Springer-Verlag, Berlin.
2. Paul Tregoning, ..., (1998), "Accuracy of absolute precipitable water vapour estimates from GPS observations", Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. D22, p 28701-28710.
3. Duan, ..., (1996), "Meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water", Journal of Applied Meteorology, 35, 830-838.
4. Saastamoinen, (1972), "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites", in the Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics Monograph, 15, AGU, Washington D.C.
5. Hà Minh Hòa và Nguyễn Ngọc Lâu, (2005), "Khả năng sử dụng các dữ liệu thu tín hiệu vệ tinh GPS trên các trạm thu thường trực để xác định độ ẩm của không khí ở tầng đối lưu", Tuyển tập báo cáo hội thảo khoa học lần thứ 9 của Viện Khí tượng Thủy văn – Bộ Tài nguyên Môi trường, Hà nội 12/2005, p 94-101.
6. Sung H. Byun and Yoaz E. Bar-Sever, (2009), "A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service", Journal of Geodesy, 83: 367-373.
7. Lau N. Nguyen, (2000), "Improving GPS results using continuous processing strategies", Ph.D thesis, University of Tasmania, Australia, unpublished.
8. Junhong Wang and Liangying Zang, (2009), "Climate application of a global, 2-hourly atmospheric precipitable water dataset derived from IGS tropospheric products", Journal of Geodesy, 83: 209-217.
9. Dương Chí Công, Nguyễn Ngọc Lâu và Hà Minh Hoà, (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 NCKH cấp Bộ do Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ tiến hành.