

# Khảo sát sự ảnh hưởng của khí quyển đến cặp ảnh Radar SAR trong xác định biến dạng địa hình

Trần Văn Anh<sup>1</sup>, Trần Quốc Cường<sup>2</sup>, Đặng Vũ Khắc

<sup>1</sup> Khoa Trắc địa-Trường Đại học Mỏ - Địa chất- Hà Nội

<sup>2</sup> Viện Địa chất- Viện hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

<sup>3</sup> Trường Đại học Sư phạm Hà nội I

## Tóm tắt

Như chúng ta đã biết Radar giao thoa được ứng dụng ngày càng nhiều và mang lại kết quả đáng tin cậy trong đó có xác định mô hình số địa hình, xác định biến dạng bề mặt trái đất theo chiều thẳng đứng và chiều ngang... Tất cả những ứng dụng này của radar giao thoa đều dựa trên việc phân tích sự lệch pha của radar giao thoa mà nó được hình thành bởi một cặp ảnh phức radar được ghi nhận từ hai vị trí của một vùng địa hình mà tín hiệu có cùng biên độ, cùng tần số, bước sóng nhưng khác pha.

Độ cao địa hình hoặc biến dạng địa hình được xác định bằng cách đó đôi khi gặp những rủi ro do không tạo được giao thoa cho các cặp ảnh do mất tương quan (coherence) của một cặp ảnh. Nguyên nhân chính là do ảnh hưởng của yếu tố địa hình và khí quyển. Ảnh hưởng của khí quyển tới việc thu nhận dữ liệu radar đã được nghiên cứu từ lâu bởi các nhà khoa học như Goldstein hay Zebker và nó đã là một vấn đề mà không thể bỏ qua khi làm việc với dữ liệu Radar, những yếu tố chủ yếu trong khí quyển thường gây ra sự sai lệch cho pha ghi nhận đó là hơi nước và áp suất.

Sự sai lệch của pha ghi nhận của ảnh radar khi đi qua khí quyển được thể hiện ở những sai số trực tiếp khi chúng ta đo khoảng cách giữa vệ tinh và trái đất do thời gian trễ gây ra khi sóng được truyền trong sự nhiễu loạn của tầng đối lưu và tầng điện ly. Một số sự không đồng nhất trong khí quyển sẽ tạo ra pha nhiễu cho pha kết quả và nó sẽ làm giảm chất lượng của ảnh giao thoa. Nghiên cứu của chúng tôi tập trung vào việc xác định ảnh hưởng của khí quyển đến dữ liệu ảnh Envisat ASAR và Terra SAR X khu vực Hà Nội.

**Keywords**—Envisat ASAR, Terra SAR X, ảnh hưởng khí quyển

## I. MỞ ĐẦU

Trước đây, việc xác định thay đổi bề mặt địa hình được thực hiện bằng việc đo thủy chuẩn và tính toán giá trị độ cao giữa các chu kỳ quan trắc. Việc quan trắc như vậy chỉ thực hiện cho các công trình mang tính chất cục bộ mà không xác định được sự thay đổi ở khu vực rộng lớn. Trong những năm gần đây, Radar độ mở tổng hợp SAR (Synthetic Aperture Radar) được phát triển khá mạnh với ưu thế cho phép thu ảnh có độ phân giải cao và từ ba ảnh thu được bởi kỹ thuật SAR, có thể xác định được sự thay đổi bề mặt địa hình dựa trên việc sử dụng thông tin pha của tín hiệu Radar.

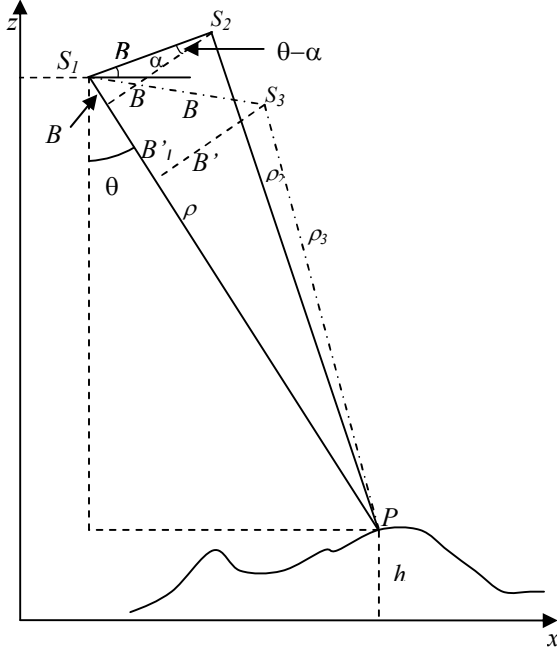
Trong trường hợp phân tích độ cao của địa hình chúng ta có thể xác định đường đáy ảnh chính là khoảng cách giữa hai lần ghi nhận ảnh và xác định giao thoa của cặp ảnh để tính ra độ cao địa hình. Trong những trường hợp khác như xác định biến dạng bề mặt đất thì có thể sử dụng 2 ảnh hoặc 3 ảnh để tạo thành hai cặp giao thoa, trong đó có một cặp giao thoa địa hình còn cặp giao thoa kia có chứa địa hình và sự biến dạng địa hình. Biến dạng địa hình sẽ được xác định bằng cách loại bỏ phần giao thoa địa hình hoặc giảm nhỏ đến mức không còn đáng kể ở trên cặp giao thoa có chứa biến dạng. Phương pháp này người ta gọi là phương pháp Radar giao thoa vi phân (DInSAR). Tuy nhiên đối với phương pháp này đòi hỏi chúng ta phải tạo ra ít nhất là 1 cặp ảnh có giao thoa nếu trong trường hợp sử dụng phương pháp “2 pass” là gồm 1 cặp giao thoa có biến dạng địa hình và DEM lấy từ nguồn khác (từ bản đồ địa hình, từ ảnh vệ tinh quang học ...) còn không thì phải có 2 cặp ảnh giao thoa trong đó 1 cặp chứa biến dạng địa hình còn cặp kia chứa DEM. Việc tạo giao thoa của các cặp ảnh là một việc không phải dễ dàng, đôi khi có hàng chục tấm ảnh nhưng vẫn không tạo được giao thoa, hoặc tạo giao thoa được nhưng lại bị ảnh hưởng của một số yếu tố như điều kiện khí quyển hay địa hình thay đổi làm cho pha giao thoa bị sai lệch. Trong bài báo này chúng tôi muốn tìm hiểu ảnh hưởng của yếu tố khí quyển đến cặp ảnh Radar trong việc xác định lún của khu vực Hà Nội nhằm chứng minh sự ảnh hưởng này là hiện hữu chứ không như mọi người vẫn nghĩ là ảnh Radar không bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết, mây hay mưa.

## II. KỸ THUẬT DINSAR VÀ SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA KHÍ QUYỂN ĐẾN CẶP ẢNH RADAR

### A. Phương pháp DInSAR

Kỹ thuật InSAR là công nghệ xử lý tín hiệu có thể liên kết hai ảnh được ghi nhận ở hai thời điểm khác nhau của cùng một khu vực để tạo thành pha giao thoa. Pha giao thoa đó sẽ bao gồm pha địa hình, pha tham chiếu và pha biến động. Vì vậy để có thể xác định được sự biến đổi của địa hình ta cần phải tìm cách nào đó để tách riêng pha biến động ra. Có một số phương pháp để tách riêng pha biến động (hay còn gọi là pha dịch chuyển của địa hình) ví dụ như các phương pháp Two-

pass, Three-pass hay Four-pass. Phương pháp Two-pass sử dụng 1 DEM và 1 cặp ảnh giao thoa (thời điểm trước khi biến động và thời điểm sau biến động), phương pháp Three-pass là phương pháp sử dụng 3 ảnh ở 3 thời kỳ khác nhau trong đó có hai ảnh tạo thành cặp giao thoa dùng để tạo DEM, còn phương pháp Four-pass sử dụng 4 ảnh ở 4 thời điểm khác nhau. Dưới hình 1 biểu diễn nguyên lý xác định biến dạng địa hình bằng Three-pass.



Hình 1: Nguyên lý của phương pháp InSAR vi phân Three-pass

Phương pháp InSAR vi phân Three-pass lần đầu tiên được đề xuất bởi Zebker và cộng sự [1]. Trên hình 1 S1, S2, S3 là ba thời điểm ghi nhận ảnh của vệ tinh Radar. Từ 3 ảnh ghi nhận này chúng ta có thể tạo được ra 2 cặp giao thoa. Giả sử rằng chỉ có một cặp giao thoa bị ảnh hưởng bởi dịch chuyển của địa hình, ví dụ như pha  $\phi_{1-2}$  là pha giao thoa chỉ chứa yếu tố địa hình (bởi vì thời gian ghi nhận ảnh của hai thời điểm này rất gần nhau, còn  $\phi_{1-3}$  là pha có chứa sự thay đổi của địa hình.

Pha địa hình sẽ nhận được bằng việc trừ hai pha giao thoa tạo được từ 3 ảnh được thu nhận tại 3 thời điểm nêu ở trên.

$$\phi_{1-2} = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (1)$$

$$\phi_{1-3} = -\frac{4\pi}{\lambda} B' \sin(\theta - \alpha') + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = -\frac{4\pi}{\lambda} (B'_{\parallel} - \Delta r) \quad (2)$$

Trong đó:  $\phi_{1-2} = \Phi_1 - \Phi_2$  chứa pha địa hình và không có sự thay đổi địa hình

$\phi_{1-3} = \Phi_1 - \Phi_3$  có chứa pha biến đổi địa hình

$\alpha$  là góc nghiêng của đường đáy ảnh B

$\alpha'$  là góc nghiêng của đường đáy ảnh B'

$B_{\parallel}$  là hình chiếu của B trên hướng nhìn

$B'_{\parallel}$  là hình chiếu của B' trên hướng nhìn

$\Delta r$  là thành phần dịch chuyển song song với nguồn phát radar

Nếu gọi  $\Delta\phi$  là pha thay đổi của địa hình ta sẽ có công thức

$$\Delta\phi = \phi_{1-3} - \left(\frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}}\right) \phi_{1-2} \quad (3)$$

Sau đó ta sẽ có được mối quan hệ giữa pha thay đổi  $\Delta\phi$  và khoảng thay đổi địa hình do vậy chúng ta thu được  $\Delta r$  như sau:

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi = \left(\frac{\lambda}{2}\right) \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi}\right) \quad (4)$$

### B. Giao thoa và ảnh hưởng khí quyển

Như chúng ta đã nêu ở trên SAR giao thoa (InSAR) là công nghệ xử lý tín hiệu mà nó liên kết hai ảnh SAR của cùng một khu vực với nhau để tạo ra hai thành phần là ảnh cường độ và ảnh giao thoa. Hay nói cách khác InSAR hoạt động trên nguyên tắc là trích ra pha thay đổi giữa hai ảnh của cùng một khu vực nhưng được ghi nhận có thể cùng thời điểm (nếu vệ tinh có hai bộ thu và phát), hoặc là hai thời điểm khác nhau và vị trí tâm chụp khác nhau. Pha thay đổi này thường dựa vào sự thay đổi khoảng cách từ vệ tinh đến đối tượng quan sát mà nó sẽ liên quan đến địa hình của khu vực chụp hoặc sự biến dạng bề mặt tại vị trí quan sát. Độ chính xác xác định sự thay đổi pha này có thể nhỏ hơn 1 bước sóng.

Theo như hình vẽ hệ thống ghi ảnh Radar S1 sẽ tạo ra ảnh chính hay còn gọi là ảnh tham chiếu và S2 sẽ tạo ra ảnh phụ thuộc sẽ ghi ảnh ở cùng một vị trí trên bề mặt đất. B là khoảng cách giữa hai antenna và được gọi là đường đáy ảnh,  $\theta$  là góc nhìn,  $\rho_1$  và  $\rho_2$  là khoảng cách từ vệ tinh đến một đối tượng trên mặt đất,  $\alpha$  là góc giữa đường đáy ảnh và đường nằm ngang.

Nếu không có sự dịch chuyển của địa hình giữa hai lần thu ảnh thì tín hiệu pha thu nhận được từ ảnh chính sẽ là  $\Phi_1$  và  $\Phi_2$  là pha tương ứng của ảnh phụ thuộc tại vị trí của pixel tương ứng với điểm P và nó được biểu diễn bằng tổng của một số thành phần:

[1] Pha trễ do quá trình tín hiệu được truyền đi và quay về bộ thu nhận và nó tương đương với hai lần quãng

đường từ vệ tinh đến đối tượng  $2\rho_1$  hoặc  $2\rho_2$  đối với bộ cảm  $A_1$  hoặc  $A_2$

[2] Pha gây ra do sự biến đổi của khí quyển  $\Phi_{atm1}$ ,  $\Phi_{atm2}$ ,

[3] Pha tán xạ  $\Phi_{scat1}$ ,  $\Phi_{scat2}$  gây ra do tác động của xung đến nhiều đối tượng cùng một lúc xung quanh điểm đến

[4] Nhiễu cộng  $\Phi_{noise}$ .

Do vậy với hình vẽ biểu diễn như hình 1 thì chúng ta sẽ thu được thành phần pha của hai ảnh:

$$\begin{cases} \Phi_1 = -\left(\frac{2\rho_1}{\lambda}\right)2\pi + \Phi_{atm1} + \Phi_{scat1} + \Phi_{noise} \\ \Phi_2 = -\left(\frac{2\rho_2}{\lambda}\right)2\pi + \Phi_{atm2} + \Phi_{scat2} + \Phi_{noise} \end{cases} \quad (5)$$

Giả sử rằng hai ảnh được ghi nhận trong cùng một điều kiện khí quyển, sự tán xạ giống nhau,  $\Phi_{atm1} = \Phi_{atm2}$  and  $\Phi_{scat1} = \Phi_{scat2}$ . Thì pha giao thoa sẽ có thể nhận được như công thức dưới đây:

$$\phi = \Phi_1 - \Phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(\rho_1 - \rho_2) = -\frac{4\pi}{\lambda}\delta\rho \quad (6)$$

Trong đó  $\delta\rho$  là sự khác biệt giữa khoảng cách  $\rho_1$  và  $\rho_2$

Nếu như khoảng cách  $\rho$  từ vệ tinh đến điểm quan sát lớn hơn rất nhiều so với đường đáy ảnh B thì tia chiếu coi như là song song thì lúc đó

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) \quad (7)$$

Hoặc  $\delta\rho = B_{II}$

$B_{II}$  là phần đường đáy song song theo hướng nhìn.

Tuy nhiên trên thực tế thì mỗi thời điểm khác nhau khí quyển sẽ thay đổi, đặc biệt là độ ẩm, áp suất khí quyển sẽ là tác nhân gây ra pha cộng vào với pha trễ của giao thoa làm giá trị này thay đổi và nó sẽ làm thay đổi cả việc xác định độ cao khi ứng dụng làm DEM hay xác định biến dạng địa hình trong ứng dụng xác định lún hay động đất.

Theo [Zebker 1997][2] thì pha trễ do tầng đối lưu sẽ làm thay đổi sự đo đạc các yếu tố trên mặt đất. Tuy nhiên sự biến thiên của áp suất theo thời gian tại một điểm quan sát thường nhỏ nếu không có tín hiệu của mưa hay bão. Thông thường thì sai số trung phương (rms) sẽ biến thiên trong khoảng 0.5 đến 1.0 mbar ở những vùng nhiệt đới và 1-1.5 mbar ở những vùng có nhiệt độ cao hơn, kết quả từ việc di chuyển của các trung tâm áp suất [3]. Theo như [4] thì 1 mbar tương đương với sự thay đổi khoảng 2.3 mm và rất nhỏ so với sự ảnh hưởng của hơi nước mà chúng ta sẽ thảo luận ở phần tiếp theo.

Không giống như khi tầng đối lưu ở trạng thái khô, độ ẩm cao và biến đổi trong khí quyển là nguyên nhân gây nên pha nhiễu cao. Mô hình giả định là hơi nước không đồng đều và đôi khi có đông đá trong khí quyển dẫn tới sự biến thiên cả về không gian lẫn thời

gian[5]. Khi ảnh được ghi nhận ở những thời điểm khác nhau thì sự phân bố hơi nước trong khí quyển không còn là hằng số thì lúc đó độ lớn của pha trễ do ảnh hưởng này sẽ gây ra sai số khoảng 30 cm cho sóng truyền theo 1 chiều [6]. Những vùng khô hơn sẽ có ảnh hưởng ít hơn hẳn so với những vùng có độ ẩm cao.

Qua những chứng minh ở trên thì chúng ta thấy rằng pha trễ ảnh hưởng bởi áp suất khí quyển nhỏ hơn rất nhiều so với ảnh hưởng của hơi nước trong khí quyển.

### III. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

#### A. Khu vực nghiên cứu và tư liệu sử dụng

Nằm chệch về phía tây bắc của trung tâm vùng đồng bằng châu thổ sông Hồng, Hà Nội có vị trí từ 20°53' đến 21°23' vĩ độ Bắc và 105°44' đến 106°02' kinh độ Đông, tiếp giáp với các tỉnh Thái Nguyên, Vĩnh Phúc ở phía Bắc; Hà Nam, Hòa Bình phía Nam, Bắc Giang, Bắc Ninh và Hưng Yên phía Đông; Hòa Bình cùng Phú Thọ phía Tây.

Địa hình Hà Nội nghiêng thấp dần từ tây bắc xuống phía Đông Nam, đó cũng là hướng dốc chung của vùng sườn núi Ba Vì và Tam Đảo. Nếu không kể vùng đồi - núi thuộc dãy Tam Đảo và Ba Vì thì bề mặt Hà Nội chủ yếu là địa hình vùng đồng bằng thấp, trong đó khu vực trung tâm thành phố có địa hình khá thấp.

Hà nội những năm gần đây do lượng người ở các tỉnh đổ về rất đông nên nhu cầu nước sinh hoạt tăng cao, các giếng nước ngầm khai thác hết công suất dẫn đến hiện tượng sụt lún đất ở nhiều khu vực trong đó có khu vực Thành Công, Phương Mai, Hạ Đình, Pháp Vân...

Tư liệu sử dụng trong nghiên cứu là ảnh Envisat ASAR được chụp trong các năm 2003 và 2004. Ảnh Terra SAR X chụp năm 2012 và 2013 được cung cấp bởi đề tài NCKH cấp Nhà nước mã số ĐTĐL.2012-T/28.

Bảng 1: Ảnh Envisat ASAR

STT	Ngày	
1	2003/12/06	} 1 <sup>st</sup> Pair
2	2004/1/10	
3	2004/4/24	} 2 <sup>nd</sup> Pair

Bảng 2: Ảnh Terra SAR X

STT	Ngày	
1	2012/04/10	} 1 <sup>st</sup> Pair

2	2012/06/26	} 2 <sup>nd</sup> Pair
3	2013/04/30	

**B. Kết quả xử lý**

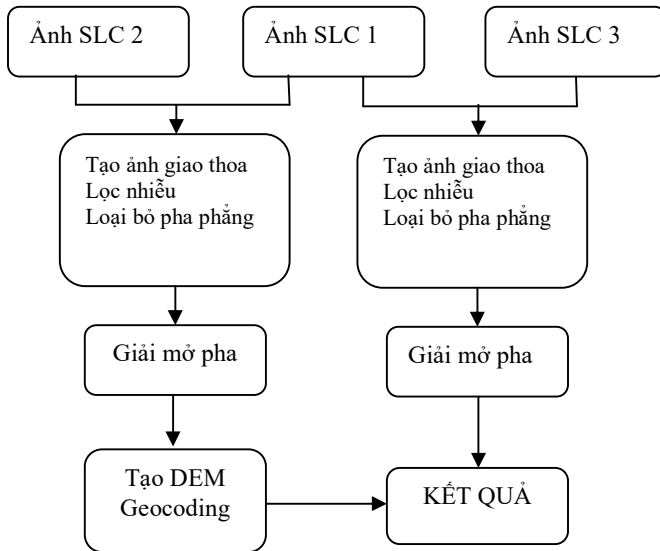
Việc xử lý ảnh được thông qua quy trình xử lý (hình 2). Trong đó đối với ảnh Envisat ASAR thì thời điểm tháng 12/2003 và tháng 1/2004 được sử dụng để làm DEM còn cặp 1/2004 và tháng 4/2004 được sử dụng để xác định sự thay đổi bề mặt địa hình. Đối với ảnh Terra SAR X cũng tương tự như vậy, thời điểm 4/2012 và 6/2012 là 1 cặp, cặp còn lại là 6/2012 và 4/2013.

Theo như quy trình xử lý ảnh biểu diễn ở hình 2 thì:

- Hai ảnh SAR kết hợp tạo ảnh SAR giao thoa để cung cấp thông tin về chiều thứ ba (độ cao) của vật thể và đo sự dịch chuyển của vật thể giữa các lần thu nhận ảnh.

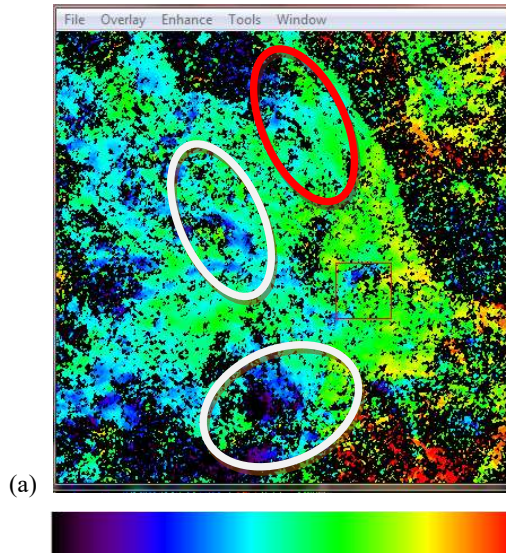
- Lọc nhiễu và làm phẳng pha cho ảnh giao thoa nhằm giúp cho việc giải bài toán mở pha dễ dàng hơn.

- Giải mở pha: khi giao thoa làm mất đi một số nguyên lần chu kỳ trong giá trị pha đo được, nên việc phục hồi chính xác số chu kỳ bị mất là vấn đề quan trọng cho các nghiên cứu về biến dạng, thành lập mô hình độ cao số, thành lập bản đồ địa hình... độ chính xác phụ thuộc vào phương pháp giải bài toán mở pha.



Hình 2: Quy trình xử lý kỹ thuật xác định sự thay đổi địa hình

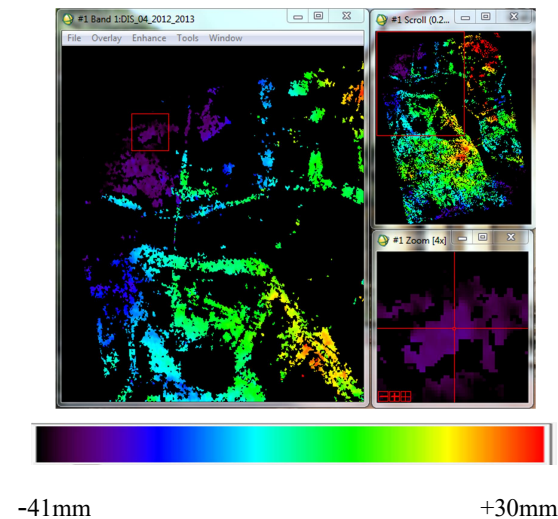
Kết quả xử lý cho các cặp ảnh Envisat ASAR được biểu diễn hình 3



Hình 3: Kết quả xác định lún bằng Envisat ASAR

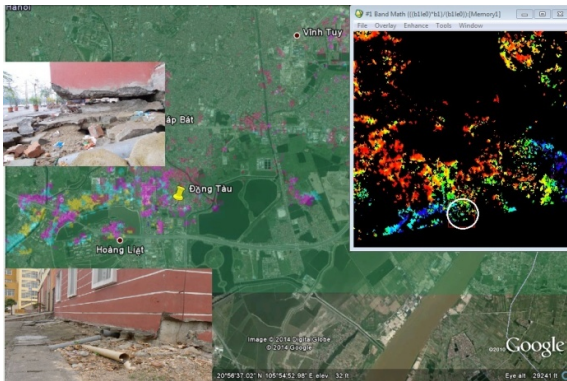
Nhìn vào hình 3 chúng ta dễ dàng nhận thấy những chỗ có màu xanh chàm biến đổi đến màu tím là nơi có lún. Những vị trí có đánh dấu hình elip màu trắng là khu vực Thành Công, hoặc khu vực phía tây nam như Hạ Đình có biểu hiện của lún được tìm thấy bằng ảnh Envisat ASAR, tuy nhiên ở khu vực phía bắc gần hồ Tây, nơi có hình elip màu đỏ chúng ta cũng thấy có một chút màu xanh chàm mà nơi đó theo kiểm tra thực địa thì không có biểu hiện của lún, điều đó chứng tỏ rằng đã có sự ảnh hưởng của khí quyển, có thể là mây tại thời điểm ghi nhận ảnh đã làm thay đổi giá trị pha tại vị trí đó.

Đối với các cặp ảnh Terra SAR X kết quả được biểu diễn ở hình 4



Hình 4: Kết quả xác định sự thay đổi bề mặt địa hình bằng ảnh Terra SAR X

Đối với kết quả xác định từ cặp ảnh Terra SAR X chúng tôi nhận thấy rằng ở phía nam thành phố cũng xác định được lún, đặc biệt là đã có những đối chứng với thực địa tại khu đô thị Đồng Tàu, kết quả đo lún ở đây năm 2012-2013 là 1,4 cm (hình 5). Tuy nhiên với loại ảnh này do bước sóng ngắn nên rất dễ bị ảnh hưởng bởi khí quyển, một số nơi có biểu hiện lún bằng loại ảnh này thể hiện tại những khu vực có nền đất ổn định như khu vực Bắc Thăng Long, chỗ có hình ô vuông màu đỏ, thể hiện lún đến 4,1cm/năm, điều này cũng chứng minh được sự ảnh hưởng của hơi nước hoặc mây trong khí quyển đến kết quả đo lún bằng DInSAR.



Hình 5: So sánh với kết quả thực địa tại khu đô thị Đồng Tàu lún 14 mm năm 2012- 2013

#### Kết luận:

Bằng những chứng minh lí thuyết về sự ảnh hưởng của yếu tố khí tượng tới tín hiệu ảnh radar và radar giao thoa ở trên chúng tôi muốn khẳng định rằng những ảnh hưởng này là tồn tại. Sự ảnh hưởng của yếu tố khí tượng đến tín hiệu radar thường tạo thành pha nhiễu và được xác định bởi thời gian trễ khi tín hiệu truyền từ vệ tinh đến một điểm trên mặt đất. Những ảnh hưởng này thường khó phát hiện nếu chúng ta chỉ sử dụng một ảnh đơn và không sử dụng phần pha của ảnh nhưng nó sẽ thể hiện rất rõ khi ứng dụng radar trong việc tạo giao thoa của một cặp ảnh. Phần pha nhiễu này có thể sẽ làm cho kết quả xác định biến dạng bề mặt trái đất thay đổi một cách đáng kể khi sử dụng nó trong trường hợp tìm biến dạng địa hình.

Với những ảnh hưởng do khí quyển gây ra thì cũng rất khó loại bỏ. Nếu muốn giảm thiểu chúng cần phải thu thập đầy đủ thông tin về khí quyển tại thời điểm chụp ở nhiều khu vực khác nhau trên ảnh. Ngoài ra nếu chúng ta chọn cặp ảnh có điều kiện khí tượng giống nhau về độ ẩm, áp suất, nhiệt độ thì khi tạo giao thoa những sai số này có thể được loại bỏ đi phần nào. Thêm vào đó để nâng cao độ chính xác cho xác định giao thoa

của cặp ảnh thì việc chọn lựa kênh ảnh và đường đáy ảnh phù hợp cũng góp phần rất nhiều.

Với khu vực nghiên cứu là Hà Nội, khi sử dụng ảnh Envisat ASAR bước sóng là 5,6 cm chúng tôi nhận thấy có ít ảnh hưởng bởi khí quyển hơn so với các cặp ảnh Terra SAR X bước sóng 3,1cm. Đối với Envisat ASAR chỉ có 1 phần ảnh trên phía bắc gần hồ Tây có tồn tại ảnh hưởng, ngoài ra những vị trí như Thành Công trên cặp ảnh này cũng đã xác định được lún trong khi đối với ảnh Terra SAR X vị trí Thành Công đã không tìm được lún. Bên cạnh đó khu vực phía bắc thành phố nơi rất ổn định là Bắc Thăng Long lại xuất hiện lún trên cặp ảnh Terra SAR X. Điều này giúp cho chúng tôi khẳng định hơn về sự ảnh hưởng bởi khí quyển tác động nhiều hơn đến những bước sóng ngắn.

#### Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn đề tài cấp Nhà nước ĐTĐL.2012-T/28 do viện Địa chất – viện hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam chủ trì đã cung cấp tư liệu và cơ sở vật chất giúp cho bài báo được hoàn thiện.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Zebker, H. A., Werner, C. L., Rosen, P. L. and Hensley, S. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, pp. 823-836, 1994
- [2] Zebker, H.A., Rosen, P.A. and Hensley, S.. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical Research*, **102(B4)**, pp.7547-7563, 1997
- [3] Ahrens, C.D. Meteorology Today, 5<sup>th</sup> ed., West Publ., Minneapolis/St. Paul, Minn., 1994
- [4] Goldstein, R., Atmospheric limitations to repeat track radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **22** (18), 2517-2520, 1995
- [5] Davis, J. L., G. Elgered, A. E. Niell, and C. E. Kuehn, Ground-base measurement of gradients in “wet” radio refractivity of air *Radio Sci.*, **28(6)**, 1003-1018, 1993
- [6] Goldgirsh, J., and J.R. Rowland, A tutorial assessment of atmospheric height uncertainties for high-precision satellite altimeter missions to monitor ocean currents, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **GE-20(4)**, 418-433, 1982