

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหว Tarlay ขนาด Mw 6.8 ปี 2011
ด้วยเทคนิค Time-Series InSAR
Post-Seismic Displacement Measurement of 2011 Mw 6.8 Tarlay Earthquake
using Time-series InSAR Techniques.

ปัทมา พอดี

อิทธิ ตรีสิริสัตยวงค์

ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนุเผ่า ออบแพทย์

ศูนย์ปฏิบัติการดาวเทียมภาคพื้นดิน (ลาดกระบัง)

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและ

ภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

Pattama Phodee

Itthi Trisirisatayawong

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Anuphao Aobpaet

Earth Observation Center (Lad Krabang)

The Geo-Informatics and Space Technology

Development Agency (Public Organization)

บทคัดย่อ

จากข้อมูล Co-seismic Motion หรือการเคลื่อนตัวของแผ่นดินขณะเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวของแผ่นดินไหวขนาด Mw 6.8 บริเวณเมือง Tarlay ประเทศพม่าเมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 ซึ่งตรวจวัดโดยเทคนิค 2-pass DInSAR ด้วยภาพจากดาวเทียม ALOS-PALSAR ในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งขาขึ้น (Ascending) และขาลง (Descending) แสดงให้เห็นถึงรอยแตกตามแนวรอยเลื่อนเป็นทางยาวมากกว่า 20 กิโลเมตรและพบการเคลื่อนตัวของแผ่นดินประมาณ 1.2 เมตรตามแนวรอยเลื่อน Nam Ma ซึ่งเป็นรอยเลื่อนเหลื่อมซ้าย (Left-lateral) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตาม Post-seismic Motion หรือการเคลื่อนตัวของแผ่นดินหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวด้วยเทคนิค Time-series InSAR โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือภาพจากดาวเทียม Radarsat-2 ตั้งแต่ช่วงเดือนมิถุนายน 2011 ถึง

พฤษภาคม 2013 ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวของแผ่นดินบริเวณทางฝั่งทิศเหนือของรอยเลื่อน Nam Ma มีความเร็ว 24.4 มิลลิเมตรต่อปีในทิศทางเข้าหาระบบเรดาร์ ในขณะที่ทางฝั่งทิศใต้ของแนวรอยเลื่อนมีการเคลื่อนตัวด้วยความเร็ว 34.5 มิลลิเมตรต่อปีในทิศทางออกจากระบบเรดาร์ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลที่ได้จาก Co-seismic Motion เพื่อหาพฤติกรรมของรอยเลื่อนนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาบอุบัติซ้ำ (Recurrence Period) ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: Time-series InSAR, การเคลื่อนตัวของแผ่นดินหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว, รอยเลื่อน Nam Ma

Abstract

From the co-seismic motion of Mw = 6.8 Tarlay earthquake of March 24th, 2011 in Myanmar, it

can be detected by using 2-pass DInSAR techniques with ALOS-PALSAR images for both ascending and descending orbits, and reveals the rupture of more than 20 kilometers with approximately 1.2 meters offset in Nam Ma fault on left-lateral sense. This study aims to monitor the characteristics of post-seismic motion of Tarlay earthquake and using Time-Series InSAR Techniques. Radarsat-2 data acquired from June 2011 to May 2013 have been processed and showed the results of 24.4 mm/year in northern part of Nam Ma fault in moving toward the sensor direction, while southern part is 34.5 mm/year in moving away from the sensor direction. The results of this study can be applied together with co-seismic motion to determine fault behavior of this particular recurrence period in the future.

Keyword: Time-series InSAR, Post-seismic motion, Nam Ma fault

1. บทนำ

แผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ยากต่อการคาดเดาและสร้างความเสียหายให้กับชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ จากข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี (2551) พบว่ารอยเลื่อนในประเทศไทยที่ยังคงมีการเคลื่อนตัวอยู่ทั้งสิ้นประมาณ 13 แนว สำหรับในเขตภาคเหนือตอนบนมีรอยเลื่อนหนึ่งที่น่าสนใจได้แก่ รอยเลื่อนแม่จันเนื่องจากรอยเลื่อนแม่จันรวมถึงรอยเลื่อนมีพลังอื่นๆในบริเวณใกล้เคียงเป็นรอยเลื่อนเหลี่ยมซ้ายเช่นเดียวกับรอยเลื่อน Nam Ma ในประเทศพม่าและวางตัวเกือบจะขนานกัน เหตุการณ์แผ่นดินไหว Tarlay ขนาด Mw 6.8 เมื่อวันที่ 24 มีนาคม

2011 มีจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ทางตะวันตกของรอยเลื่อน Nam Ma ลึกจากพื้นดินประมาณ 10 กิโลเมตร (McCaughey and Tapponnier, 2011) ทำให้พื้นที่ทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยได้รับความเสียหายและรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนเพราะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวเพียงประมาณ 50 กิโลเมตร ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณรอยเลื่อนแม่จันและใกล้เคียงจึงมีทิศทางที่มีความเสี่ยงมากขึ้น

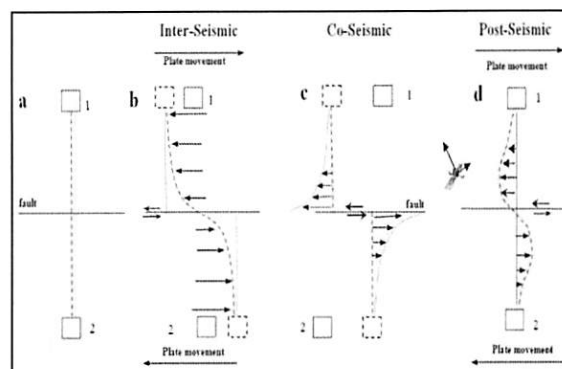
จากผลการศึกษาของ Trisirisatayawong et al. (2011) โดยใช้ภาพจากดาวเทียม ALOS-PALSAR จำนวนทั้งสิ้น 4 ภาพในแนวการโคจรของดาวเทียมทั้งขาขึ้นและขาลงด้วยเทคนิค 2-pass DInSAR (Differential InSAR) เพื่อตรวจสอบ Co-seismic Motion ของเหตุการณ์แผ่นดินไหว Tarlay ซึ่งพบลักษณะของการเคลื่อนตัวที่แสดงอยู่ในรูปแบบของ Fringe ดังภาพที่ 1 ลักษณะของ Fringe จากแถบสีโดสหนึ่งไปยังแถบสีเดียวกันแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระยะทางเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเรดาร์เช่นในระบบ PALSAR L-band คือประมาณ 12.8 เซนติเมตร ดังนั้น Co-seismic Motion ระหว่าง 2 ฝั่งของรอยเลื่อนซึ่งเป็นรอยเลื่อนเหลี่ยมซ้ายจึงมีการขยับตัวไปประมาณ 1.2 เมตรในทิศทางของเรดาร์ จากภาพแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของแผ่นดินที่กระจายออกจากบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหวไปทางเหนือของรอยเลื่อนเข้าไปในประเทศพม่า สำหรับทางใต้บริเวณรอยเลื่อนแม่จันไม่อยู่ในรูปแต่อาจอนุมานได้จากข้อมูลเบื้องต้นที่ว่าน่าจะได้รับผลกระทบด้วยเช่นกัน

การศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการเกิดแผ่นดินไหวมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของวงจรแผ่นดินไหว ตัวอย่างงานวิจัยที่เป็นกรณีศึกษาในเรื่องนี้ได้ก็คือแผ่นดินไหวในประเทศตุรกีซึ่งมีการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่หลายครั้งโดยมีขนาด $M_w \geq 6.7$ เริ่มต้นจากปี



ภาพที่ 1 wrapped Interferograms ซ้ายมือเป็นภาพในแนวการโคจรของดาวเทียมซาซึน และขวามือเป็นภาพในแนวขาลง (Trisirisatayawong et al., 2011)

1939 บริเวณแนวรอยเลื่อน North Anatolian ต่อเนื่องมาจนกระทั่งมีเหตุการณ์ที่สำคัญคือแผ่นดินไหว Izmit ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันตกของประเทศตุรกีเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 1999 นับเป็นครั้งที่ 11 สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวในรอยเลื่อนนี้ (UGSG, 2013) ก่อให้เกิดรอยแตกตามแนวรอยเลื่อนเป็นระยะทาง 130 กิโลเมตร ลักษณะการเกิดแผ่นดินไหวที่ซ้ำๆและต่อเนื่องกันจึงเป็นข้อมูลที่สำคัญในการวิเคราะห์และนำไปสู่แบบจำลองวงจรแผ่นดินไหว Reid's Elastic Rebound คิดค้นโดย Harry Fielding Reid จากการสังเกตพฤติกรรมของแผ่นดินไหวที่ San Francisco เมื่อปี 1906 ในบริเวณรอยเลื่อน San Andreas ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับรอยเลื่อน North Anatolian ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (Wright, 2002) เมื่อนำแบบจำลอง Reid's Elastic Rebound มาดัดแปลงให้สอดคล้องตามการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน Nam Ma ซึ่งเป็นรอยเลื่อนเหลี่ยมซ้ายและสอดคล้องกับแนวการโคจรของดาวเทียมซาซึนของภาพจากดาวเทียม Radarsat-2 สามารถอธิบายขั้นตอนการเกิดแผ่นดินไหวได้ดังภาพที่ 2 เริ่มต้นจากภาพที่ 2a เส้นประสีแดงคือเส้นสมมติที่แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวระหว่างทางทิศเหนือและใต้



ภาพที่ 2 การเคลื่อนตัวทางราบในแต่ละขั้นตอนของวงจรการเกิดแผ่นดินไหวซึ่งอธิบายด้วยแบบจำลอง Reid's Elastic Rebound (ดัดแปลงภาพจาก Wright, 2002 และ Thatcher, 1993)

จากแนวรอยเลื่อนในขั้นตอนนี้สมมติให้ยังไม่มีแรงใดๆที่มากระทำ ภาพที่ 2b แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวในช่วง Inter seismic หรือการเคลื่อนตัวของแผ่นดินระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งชี้ให้เห็นถึงการสะสมแรงเค้น (Stress Accumulation) ที่อยู่ในบริเวณรอยเลื่อน ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของแผ่นดินในทิศทางตรงข้ามกันคือทางทิศเหนือของรอยเลื่อนจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายและในขณะเดียวกันทางทิศใต้จะเคลื่อนที่ไปทางขวาสังเกตได้จากเส้นประสีแดงที่โค้งงอขึ้นเนื่องจากมาจากแรงเค้นที่มากระทำ เมื่อการสะสมแรงเค้นถึงในระดับหนึ่งก็จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแผ่นดินไหวดังภาพที่ 2c แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวในช่วง Co-seismic ทำให้แผ่นดินสิ้นไกล (Slipped) ออกมาในทิศทางตรงข้ามกันอันเนื่องมาจากการเกิดแผ่นดินไหว เส้นสีน้ำเงินเริ่มโค้งงอชี้ให้เห็นถึงระยะทางที่เคลื่อนตัวไป หลังจากนั้นแรงเค้นที่สะสมตัวถูกปลดปล่อยและลดขนาดลง (Earthquake and Partial Relaxation) ในขั้นตอนนี้เรียกว่าการเคลื่อนตัวในช่วง Post-seismic ดังภาพที่ 2d หมายความว่า การเคลื่อนตัวของแผ่นดิน ณ ตำแหน่งใหม่ก็ยังคงมีทิศทางใน

การเคลื่อนที่และสะสมแรงเค้นที่มากกระทำอยู่ภายในและเข้าสู่วงจรมันดินไหวในอนาคตได้อีก

ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับรอยเลื่อนเหลื่อมซ้าย ซึ่งเป็นประเภทเดียวกันกับรอยเลื่อน Nam Ma โดย Xiong et al. (2009) ศึกษาแนวโน้มของการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณรอยเลื่อน Kunlun ในบริเวณแถบที่ราบสูงทิเบตและพื้นที่ใกล้เคียงหลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด $M_w > 7$ จำนวน 6 ครั้ง โดยศึกษาจากทฤษฎี Coulomb Failure Stress ผลการศึกษาพบการสะสมตัวของแรงเค้นในระดับสูงและมีแนวโน้มที่จะเกิดแผ่นดินไหวในอนาคต นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับ Post-seismic Motion ของ Ryder et al. (2007) โดยใช้ภาพจากดาวเทียม ERS-2 จำนวน 26 ภาพในช่วงเวลา 4 ปีหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด $M_w 7.6$ ในปี 1997 บริเวณ Manyi ซึ่งอยู่ทางตอนเหนือของทิเบตด้วยเทคนิค Time-series InSAR ผลการศึกษาพบการเคลื่อนตัวของแผ่นดินมากกว่า 5 เซนติเมตรตามแนวรอยเลื่อนซ้าย Zhang et al. (2011) ใช้ภาพจากดาวเทียม ENVISAT ASAR จำนวน 14 ภาพเพื่อศึกษา Post-seismic Motion ของแผ่นดินไหว Kokoxili ขนาด $M_w 8.1$ ในปี 2001 ซึ่งอยู่ทางตะวันออกของรอยเลื่อน Kunlun ประเทศจีน พบการเคลื่อนตัวประมาณ 7-9 เซนติเมตร และ Song (2010) ใช้เทคนิค DInSAR ด้วยภาพจากดาวเทียม ALOS-PALSAR โดยใช้ภาพก่อนและหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวอย่างละ 4 ภาพเพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงหลังแผ่นดินไหว Wenchuan ขนาด $M_w 8.0$ ในปี 2008 ผลการศึกษาพบการเคลื่อนตัวประมาณ 0-20 เซนติเมตร

การเกิดวงจรมันดินไหวประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนสำคัญดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากพื้นที่นี้เคยมีการศึกษา Co-seismic Motion ไว้แล้วลำดับต่อไปจึงเป็นขั้นตอนของ Post-seismic Motion ฉะนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นต่อไปเพราะข้อมูลที่ได้จะเป็นกุญแจสำคัญที่อธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลง

ตามวงจรมันดินไหว จากการศึกษาของ Lacassin et al. (1998) เกี่ยวกับอัตราการเคลื่อนตัวในช่วง Inter seismic ด้วยวิธีการทางธรณีวิทยาบริเวณรอยเลื่อน Nam Ma และใกล้เคียงพบว่ามี การเคลื่อนตัวสูงสุดประมาณ 2.4 มิลลิเมตรต่อปี ข้อมูลนี้จึงเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการประมาณคาบอุบัติซ้ำ การนำเทคนิค InSAR มาใช้เนื่องจากสภาพพื้นที่โดยทั่วไปของพื้นที่ศึกษานี้ยากต่อการเข้าถึง เพราะปกคลุมไปด้วยพืชพรรณหนาแน่นและลักษณะพื้นที่เป็นภูเขาสูงชันชันอีกทั้งไม่มีสถานี GPS ที่รังวัดแบบต่อเนื่อง (Continuous GPS Station, CGPS) สำหรับใช้ตรวจวัดการเคลื่อนตัว ฉะนั้นเทคนิค InSAR นี้จึงเป็นเทคนิคการรังวัดเพียงทางเลือกเดียวที่ใช้ในบริเวณนี้ได้

บทความนี้แสดงผลการตรวจวัดจากการเคลื่อนตัวในช่วง Post-seismic ด้วยเทคนิค Time-series InSAR เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้มีความซับซ้อนประกอบไปด้วยกลไกหลายอย่างและมีขนาดเล็กแตกต่างจากช่วง Co-seismic ที่มีขนาดการเคลื่อนตัวในระดับเมตรหรือสิบเมตรขึ้นไป (Tronin, 2009) ดังนั้นเทคนิค DInSAR จึงสามารถนำมาใช้ได้เพราะขนาดการเคลื่อนตัวมีขนาดใหญ่กว่า noise หลายเท่าตัวซึ่งแตกต่างจากการเคลื่อนตัวในช่วง Post-seismic ที่มีขนาดเล็กและเกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคที่สามารถกำจัดหรือลดค่าความผิดพลาดที่ปะปนมากับสัญญาณเฟสเพื่อให้อัตราส่วน SNR (Signal Noise Ratio) ดีขึ้นจนท้ายที่สุดแล้วสามารถเห็นการเคลื่อนตัวขนาดเล็กในระดับมิลลิเมตรหรือเซนติเมตรได้ อีกทั้งต้องอาศัยระยะเวลาที่ยาวนานอาจจะหลายปีหรือมากกว่านั้นเพื่อจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่ค่อยๆเกิดขึ้น

2. วัตถุประสงค์

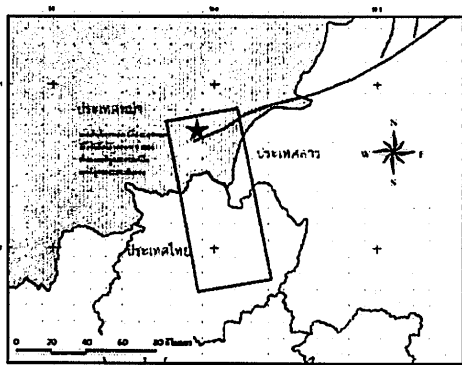
2.1 เพื่อตรวจสอบลักษณะ Post-seismic Motion จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Tarlay ขนาด $M_w 6.8$ เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 ในเขตประเทศพม่า

2.2 ทดสอบศักยภาพการใช้เทคนิค Time-series InSAR ในการประมวลผลจากภาพถ่ายดาวเทียม Radarsat-2 เพื่อการวิเคราะห์แนวโน้มที่อาจเกิดคาบอุบัติซ้ำในอนาคต

3. พื้นที่ศึกษาและข้อมูลที่นำมาใช้

3.1 พื้นที่ศึกษาคครอบคลุมในบริเวณจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว Tarlay ขนาด Mw 6.8 เมื่อวันที่ 24 มีนาคม 2011 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของรอยเลื่อน Nam Ma ในประเทศพม่าดังภาพที่ 3

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาคือภาพถ่ายจากดาวเทียม Radarsat-2 ในโหมด Fine Beam (F3N) ครอบคลุมพื้นที่ขนาด 50 x 150 ตารางกิโลเมตร ในแนวการโคจรของดาวเทียมขาขึ้นจำนวนทั้งสิ้น 19 ภาพ รายละเอียดดังตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้รับทั้งหมดอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมิถุนายนปี 2011 ถึงพฤษภาคม 2013 โดยเลือกภาพวันที่ 20 มีนาคม 2012 เป็นภาพ Master เพื่อใช้ในการประมวลผลซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 3 พื้นที่ศึกษาบริเวณที่ภาพถ่ายจากดาวเทียม Radarsat-2 ครอบคลุม

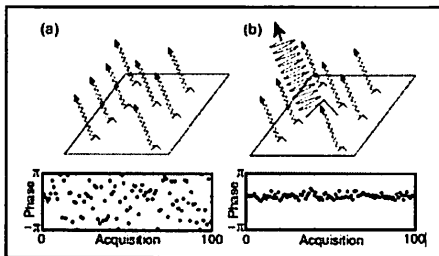
ตารางที่ 1 ข้อมูล Radarsat-2 (Ascending orbit, F3N)

ลำดับ	วันที่รับข้อมูล	Perpendicular Baseline (เมตร)	Temporal Baseline (วัน)
1	30 มิถุนายน 2011	-132	264
2	24 กรกฎาคม 2011	-108	240
3	17 สิงหาคม 2011	-30	216
4	4 ตุลาคม 2011	-57	168
5	28 ตุลาคม 2011	197	144
6	21 พฤศจิกายน 2011	101	120
7	15 ธันวาคม 2011	112	96
8	8 มกราคม 2012	-1026	72
9	1 กุมภาพันธ์ 2012	-129	48
10	25 กุมภาพันธ์ 2012	-90	24
11	20 มีนาคม 2012	0	0
12	13 เมษายน 2012	158	24
13	7 พฤษภาคม 2012	-576	48
14	31 พฤษภาคม 2012	155	72
15	24 มิถุนายน 2012	290	96
16	19 กรกฎาคม 2013	-37	240
17	15 มีนาคม 2013	-86	264
18	8 เมษายน 2013	-100	288
19	26 พฤษภาคม 2013	165	312

4. หลักการของ Time- Series InSAR

หลักการงานที่สำคัญของเทคนิค InSAR นี้คืออาศัยการวิเคราะห์ผลต่างเฟส (Phase Differential) ของภาพเรดาร์ระบบ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไปซึ่งภาพทั้งสองภาพนี้จะถูกบันทึกในตำแหน่งเดียวกันแต่คนละช่วงเวลา ผลต่างเฟสนี้สามารถศึกษาถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Deformation Pattern) ในลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นบนโลก

สำหรับเทคนิค Time-series InSAR นั้นจะอาศัยค่าสะท้อนกลับของสัญญาณที่คงที่และถาวรหรือเรียกว่า Permanent Scatterer (PS) ของสัญญาณเรดาร์ที่ส่งไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายังเสาอากาศ โดยใช้หลักการสร้างจำนวนภาพ Differential Interferograms หลายๆ ภาพซึ่งคู่ภาพที่สร้างขึ้นมานี้จะอาศัยการอ้างอิงจากภาพ Master ตัวเดียวกัน จากภาพที่ 4 แสดงถึงการเปรียบเทียบสัญญาณที่สะท้อนกลับในแต่ละจุดภาพ ภาพ 4a ประกอบไปด้วยสัญญาณที่มีการสะท้อนแบบกระจายกระจายภายในจุดภาพ แตกต่างจากภาพ 4b แสดงถึงการสะท้อนของสัญญาณที่โดดเด่นและคงที่สัญญาณที่สะท้อนกลับมานั้นน่าจะมาจากการสะท้อนจากวัตถุที่มีขนาดใหญ่แข็งแรงและคงทน เช่น ก้อนหินขนาดใหญ่ หรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ เป็นต้น ฉะนั้นค่าเฟสที่ได้จึงมีค่า Coherence ที่ดีและเป็นผลดีต่อการสร้าง Interferogram ในลำดับต่อไป



ภาพที่ 4 ลักษณะการสะท้อนของเฟส ภาพ 4a การกระจายกระจายของสัญญาณเฟสภายในจุดภาพ ภาพ 4b การสะท้อนกลับของสัญญาณเฟสที่คงที่และถาวร (Hooper, 2007)

สำหรับการเลือกภาพ Master นั้นจะเลือกจากภาพที่มีผลรวมที่น้อยที่สุดของค่าที่ไม่สัมพันธ์กัน (Decorrelation) อันประกอบไปด้วยระยะห่างของช่วงเวลา (Temporal Baseline), ระยะห่างระหว่างแตริกของการรับสัญญาณของภาพแต่ละคู่ที่นำมาสร้าง Interferogram (Spatial Baseline), ความแตกต่างของ

Doppler Centroid และ Thermal Noise (Hooper et al., 2007) ฉะนั้นการเลือกภาพ Master ที่เหมาะสมคือมีค่า Perpendicular Baseline และ Temporal Baseline ที่น้อยที่สุดดังตารางข้างต้น

Interferogram คือความแตกต่างของค่าเฟสที่สอดคล้องกับพื้นที่ซึ่งภายในประกอบไปด้วย Interferometric Phase (ϕ_{inf}) มีสัญญาณต่างๆและค่าความผิดพลาดที่ปะปนมาดังสมการที่ 1 (Ferretti et al., 2011)

$$\phi_{inf} = \phi_{defo} + \phi_{topo} + \phi_{atm} + \phi_{orbit} + \phi_{noise} \quad (1)$$

เมื่อ ϕ_{defo} คือ Deformation in LOS หรือการเคลื่อนตัวในแนวทิศทางของเรดาร์

ϕ_{topo} คือ Topographic Effect ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความสูงของภูมิประเทศ

ϕ_{atm} คือ Atmospheric Delay ผลกระทบจากชั้นบรรยากาศเนื่องจากชั้นบรรยากาศที่ปะปนไปด้วยด้วยค่าอิเล็กตรอนและไอน้ำทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการสะท้อนกลับของสัญญาณ

ϕ_{orbit} คือ Orbit Error ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม

ϕ_{noise} คือ Noise หรือสัญญาณรบกวน

เทคนิค Time-Series InSAR คือ การนำ Differential Interferograms หลายๆภาพมาประมวลผลด้วยกัน จากสมการที่ 1 ค่า ϕ_{inf} จะถูกกำจัดหรือลดค่าความผิดพลาดจากสัญญาณต่างๆที่ปะปนมาจนท้ายที่สุดแล้ว เหลือเพียงค่า ϕ_{defo} ที่มาจากการเคลื่อนตัวในแนวเรดาร์เท่านั้นเมื่อได้ค่าเฟสที่สมบูรณ์ในแต่ละจุดภาพของ Interferogram แล้วความสูงหรือการเคลื่อนตัวของแผ่นดินจะถูกนำมาคำนวณ (Zebker and Villasenor, 1992) เพื่อที่จะตรวจจับค่าการเปลี่ยนแปลงของภูมิประเทศบนพื้นผิวโลกในระดับมิลลิเมตรได้

โดยส่วนใหญ่เทคนิค InSAR ที่ถูกนำมาใช้คือเทคนิค DInSAR และ Time-Series InSAR สองเทคนิคอาศัยหลักการที่คล้ายคลึงกันคือการนำ Differential Interferograms มาประมวลผลเพียงแต่เทคนิค DInSAR ใช้จำนวนคู่ภาพเพียงสองคู่ภาพก็เพียงพอเพื่อที่จะวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวเหมาะสมกับการตรวจจับการเคลื่อนตัวที่เห็นได้ชัดเจนเช่น Co-seismic Motion ซึ่งค่า ϕ_{defo} ที่ได้มีขนาดมากกว่า ϕ_{atm} , ϕ_{orbit} และ ϕ_{noise} ฉะนั้นเพียงกำจัดหรือลดค่า ϕ_{topo} ก็สามารถเห็นการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้แตกต่างจาก Post-seismic Motion มีขนาดการเปลี่ยนแปลงที่เล็กกว่าและเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ต้องอาศัยระยะเวลาทำให้ค่าสัญญาณต่างๆรวมถึงค่าความผิดพลาดที่ปะปนมามีขนาดใหญ่กว่า ϕ_{defo} จึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิค Time-series InSAR ในการเฉลี่ยและลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อทำให้ค่า SNR ดีขึ้นจนสามารถเห็นการเคลื่อนตัวในระดับมิลลิเมตรได้

5. ขั้นตอนการศึกษา

ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Radarsat-2 ระบบ SAR ทั้ง 19 ภาพจะถูกนำมาประมวลผลผ่านโปรแกรม DORIS เวอร์ชัน 4.02 และ StaMPS/MTI เวอร์ชัน 3.2 ดังภาพที่ 5 โดยแบ่งการประมวลผลดังนี้

5.1 การประมวลผลด้วยโปรแกรม DORIS หลักการคืออาศัยการจับคู่ภาพระหว่างภาพ Master และภาพอื่นๆที่เหลือที่เรียกว่า Slave เพื่อวิเคราะห์ผลต่างเฟสเพื่อนำมาสร้าง Interferogram (ในที่นี่จะได้ Interferogram ทั้งสิ้น 18 ภาพ) เริ่มต้นโดยนำแต่ละภาพมาทำการแปลงให้อยู่ใน DORIS Format และทำการ Coregistration ในแต่ละจุดภาพเพื่อให้มีความถูกต้องทางด้านแนว แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ SRTM DEM ซึ่ง

มีความละเอียด 90 เมตรถูกนำมาใช้ในการลบค่า ϕ_{topo} ออกไป ขั้นตอนต่อไปค่า ϕ_{inf} (ดังสมการที่ 1) จะถูกคำนวณ ภาพ Slave ในแต่ละจุดภาพจะทำการ Resample โดยอ้างอิงจากภาพ Master (Kampes and Usai, 1999) จากนั้นภาพ Interferogram จะถูกสร้างขึ้นและเลือกเฉพาะเฟสที่มีความเสถียรเท่านั้นเพื่อจะนำไปสู่การประมวลผลในขั้นตอนต่อไป

5.2 การประมวลผลด้วยโปรแกรม StaMPS อาศัยเทคนิค Time-Series InSAR มีหลักการคือใช้ Differential Interferograms ของหลายๆคู่ภาพจากโปรแกรม DORIS มาประมวลผลเข้าด้วยกันนำค่าที่ได้ในแต่ละจุดภาพมาประมวลผลภาพรวมของขั้นตอนนี้คือ

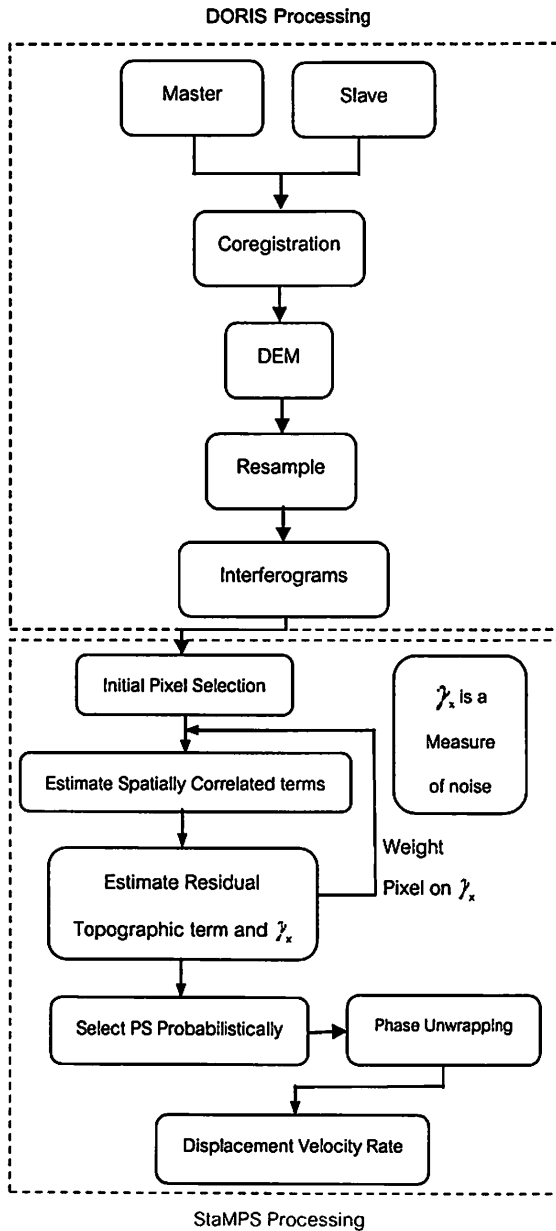
5.2.1 การเลือกพิกเซลกลุ่มแรก (Initial Pixel Selection) เริ่มต้นจากการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้สำหรับประมวลผลซึ่งจะเลือกเฉพาะค่าสะท้อนกลับของสัญญาณที่คงที่และถาวรเท่านั้นแล้วนำค่าที่ได้ในแต่ละจุดภาพมาประมวลผล

5.2.2 Estimate Spatially Correlated Terms และ Estimate Residual Topographic Term and γ_x ปกติในทุกๆ Interferogram จะมีค่าสัญญาณรบกวนจากเฟสและค่าความผิดพลาดที่แฝงอยู่ในแต่ละจุดภาพ ขั้นตอนนี้จึงเป็นการประมาณค่าที่เกิดขึ้นเพื่อกำจัดค่า ϕ_{topo} , ϕ_{atm} , ϕ_{orbit} และ ϕ_{noise} ค่าเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณและกำจัดออกไปตามสมการที่ 2 (Hooper, 2009) จากนั้นทำการ Unwrapping ในลักษณะของการวนซ้ำ (Iteration) ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกคำนวณให้อยู่ในระบบพิกัดของเรดาร์ InSAR ดัดแปลงภาพจาก Hooper (2009)

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \{i(\Delta\phi_i - \beta_i \Delta h_i)\} \right| \quad (2)$$

เมื่อ N = จำนวนภาพที่นำมาใช้งาน
 $\Delta\phi_i$ = ค่าต่างเฟสในแต่ละจุดภาพ

B_i = ค่า Baseline
 Δh = ค่าต่างของความสูง

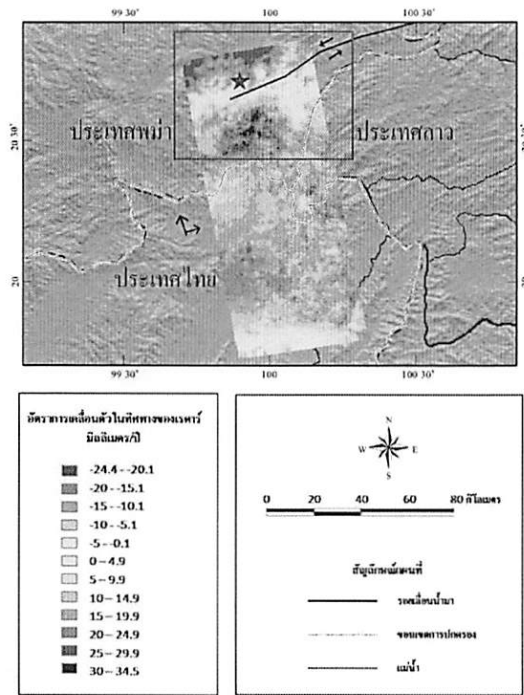


ภาพที่ 5 แสดงขั้นตอนการทำงานของเทคนิค Time-series InSAR ดัดแปลงภาพจาก Hooper (2009)

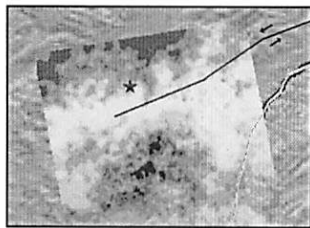
เมื่อทำการประมวลผลในขั้นตอนนี้จะได้ข้อมูลจุดที่แสดงถึงค่าเฉลี่ยของอัตราความเร็วในการเคลื่อนตัว (Displacement Velocity Rate) ในแนวทิศทางของเรดาร์ที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ค่าความเปลี่ยนแปลงของแผ่นดินที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา

7. ผลการศึกษา

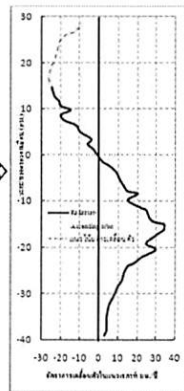
ผลจากการประมวลผลด้วยภาพจากดาวเทียม Radarsat-2 โดยใช้จำนวนภาพในช่วงเวลาประมาณ 2 ปี สำหรับ F3N Path ในแนววงโคจรขาขึ้นพบจำนวนจุดที่ให้ค่าสะท้อนกลับของสัญญาณที่คงที่และถาวร (PS Points) จำนวนทั้งสิ้น 181,491 จุด ผลการวิเคราะห์หลังจากทำการให้ค่าพิกัดภาพ (Geocode) ให้อยู่ในระบบพิกัดของเรดาร์แล้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นตามแนวของรอยเลื่อน Nam Ma ในแนวทิศทางของเรดาร์ให้ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวระหว่าง -24.4 – 34.5 มิลลิเมตรต่อปีดังภาพที่ 6a มังที่อยู่ทางทิศเหนือของรอยเลื่อน Nam Ma จะเคลื่อนตัวไปทางด้านซ้ายซึ่งให้ค่าการเคลื่อนตัวเป็นลบในทิศทางเข้าหาระบบเรดาร์ และในทางตรงกันข้ามมังที่อยู่ทางทิศใต้ของรอยเลื่อนจะเคลื่อนตัวไปทางด้านขวาซึ่งให้ค่าเป็นบวกในทิศทางออกจากระบบเรดาร์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลรอยเลื่อนที่มีรูปแบบการวางตัวแบบเหลี่ยมซ้ายเมื่อสังเกตอัตราของการเคลื่อนตัวจะพบว่าค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากจากแนวรอยเลื่อน Nam Ma ออกไปและจะค่อยๆลดขนาดลง จากภาพที่ 6b เส้นประสีแดงแสดงถึงเส้นที่ตัดขวางกับแนวรอยเลื่อน Nam Ma เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 6c ที่แสดงขนาดของการเคลื่อนตัวเมื่อห่างจากแนวรอยเลื่อนออกไป แต่เนื่องจากทางตอนเหนือของรอยเลื่อนภาพ Radarsat-2 ครอบคลุมพื้นที่ห่างจากแนวรอยเลื่อนเพียงประมาณ 15 กิโลเมตรแตกต่างจากทางตอนใต้ของรอยเลื่อนที่ครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าแต่ถึงอย่างไรก็ตามสามารถ



ภาพที่ 6a



ภาพที่ 6b

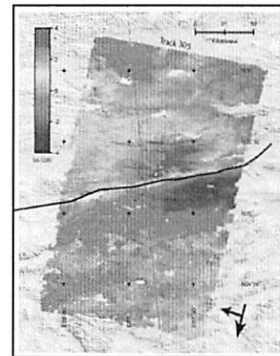


ภาพที่ 6c

ภาพที่ 6a ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวของแผ่นดินในช่วง Post-seismic บริเวณรอยเลื่อน Nam Ma โดยใช้ภาพจากดาวเทียม Radarsat-2 ในแนววงโคจรขาขึ้นโหมด F3N ภาพ 6b ภาพขยายในบริเวณพื้นที่รอยเลื่อน Nam Ma และภาพ 6c ภาพตัดขวางบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหว

อนุমানแนวโน้มได้จากเส้นประสีแดงเพราะโดยปกติแนวโน้มการเคลื่อนตัวของทั้งสองฝั่งรอยเลื่อนควรจะสมมาตรกันหากพิจารณาขนาดของการเคลื่อนตัวตามแนวตัดขวางเพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาจากแบบจำลองการเกิดแผ่นดินไหวในขั้นตอน Post-seismic Motion ของ Reid's Elastic Rebound ดังภาพที่ 2d พบว่า ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับแบบจำลองคือ มีการเคลื่อนตัวที่อยู่บริเวณรอยเลื่อนโดยขนาดจะเพิ่มขึ้นและค่อยๆลดลงเมื่อห่างจากแนวรอยเลื่อนออกไป

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการศึกษาของ Ryder et al. (2007) ศึกษา Post-seismic Motion จากแผ่นดินไหวขนาด 7.6 ในปี 1997 บริเวณ Manyi ดังภาพที่ 7 ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้นและแนวรอยเลื่อนดังกล่าวเหลี่ยมซ้ายเช่นกัน



ภาพที่ 7 Post-seismic Motion จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด Mw 7.6 บริเวณ Manyi ที่เบตด้วยภาพจากดาวเทียม ERS-2 แนววงโคจรขาลง Ryder et al. (2007)

ผลการศึกษาพบว่า มีรูปแบบของการเคลื่อนตัวที่คล้ายคลึงกันจึงเป็นข้อมูลที่ช่วยสนับสนุนว่าผลการศึกษาอยู่ในขั้นตอนของ Post-seismic Motion และบริเวณรอยเลื่อน Nam Ma ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงและขยับตัวไปอย่างช้าๆ อันเนื่องมาจากการกระทำของแรงเค้นที่อยู่ในบริเวณรอยเลื่อนอยู่รวมถึงอาจจะมีแรงกระทำอื่นๆที่เกิดจากกระบวนการทางด้านธรณีฟิสิกส์ที่ไม่ได้กล่าวถึงใน

งานวิจัยครั้งนี้ด้วยประกอบกับภาพจากดาวเทียม Radarsat-2 ในแนววงโคจรขาขึ้นนี้ทิศทางของการส่ง Radar Pulse หรือที่เรียกว่า Radar Line-of-Sight อยู่ในแนวเดียวกันกับรอยเลื่อน Nam Ma จึงสามารถพิจารณาได้ว่าผลการศึกษามาจากการเคลื่อนตัวที่เกิดจาก Post-seismic Motion ดังนั้นการใช้เทคนิค Time-series InSAR ในงานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพพอที่จะทำให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงบางอย่างที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวในอนาคตได้

8. สรุปผลการศึกษา

การใช้เทคนิค Time-series InSAR เพื่อการติดตาม Post-seismic Motion ของแผ่นดินไหว Tarlay ประเทศพม่าโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Radarsat-2 จำนวนทั้งสิ้น 19 ภาพพบว่าอัตราการเคลื่อนตัวสอดคล้องกับแบบจำลองของ Reid's Elastic Rebound เนื่องจากในพื้นที่นี้ได้เคยศึกษาขั้นตอนของ Co-seismic Motion และ Post-seismic Motion ไว้แล้วหากนำทั้งสองค่านี้มาหักลบกันจะสามารถประมาณค่า Inter seismic Motion ได้ ประกอบงานของ Lacassin et al. (1998) ที่ศึกษา Inter seismic Motion ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วเมื่อนำข้อมูลทั้งสองมาประกอบกันก็จะสามารถประมาณคาบอุบัติซ้ำได้

เนื่องจากพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่ที่มีอัตราการเคลื่อนตัวต่ำอีกทั้งเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เมือง Tarlay นี้ยังมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาเรื่อง Post-seismic Motion ที่มีขนาดใหญ่ $M_w \geq 7$ ในการศึกษาต่อไปควรจะใช้จำนวนภาพเพื่อประมวลผลที่มากขึ้นเพื่อช่วยให้ค่าความผิดพลาดลดลงดังงานวิจัยของ Hansen (2005) ที่ศึกษาจำนวนภาพเรดาร์ที่นำมาประมวลผลต่อความเที่ยงตรงของผลการศึกษาพบว่าค่า Standard Deviation of Velocity จะดีกว่า 0.4 มิลลิเมตร

ต่อปีเมื่อใช้จำนวนภาพอย่างน้อย 20-30 ภาพขึ้นไป ดังนั้นในอนาคตการเพิ่มจำนวนภาพที่ใช้งานจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีในการปรับปรุงผลการศึกษาและผลการวิเคราะห์ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

9. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่อนุเคราะห์ให้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Radarsat-2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้อย่างดี และขอขอบคุณ TU Delft : Delft University of Technology ประเทศเนเธอร์แลนด์ที่ให้อนุเคราะห์ในเรื่องซอฟต์แวร์ DORIS ที่ใช้ในการสร้าง Interferogram และ Andy Hooper สำหรับซอฟต์แวร์ StaMPS ที่ใช้ในการประมวลผลด้วยเทคนิค Time-series InSAR เพื่อใช้คำนวณหา Post-seismic Motion

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. (2551). แผ่นดินไหวกับประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เนกซอส อินโฟเทค จำกัด.
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39 (January), 8-20.
- Hanssen, R.F. (2005). Satellite radar interferometry for deformation monitoring: A priori assessment of feasibility and accuracy. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 6 (October), 253-260.
- Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with to application

- Volcáno Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research*, 112 (July) (B07407, doi:10.1029/2006JB004763.)
- Hooper, A. (2009). *Satellite Radar Interferometry: Methodology, Quality Control and Application Development*. In: *Presentation of InSAR Workshop, 23- 27 March 2009, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand*.
- Hooper, A. (2009). *StaMPS/MTI Manual*. Retrieved July 13, 2010, from: http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/StaMPS_Manual_v3.1.pdf.
- Kampes, B., and Usai, S. (1999). *Doris: The Delft Object-oriented Radar Interferometric Software*. Retrieved August 10, 2012, from: <http://doris.tudelft.nl/Literature/kampes99.pdf>
- Lacassin, R., Replumaz, A. and P. Hervé Leloup. (1998). Hairpin river loops and slip-sense inversion on southeast Asian strike-slip faults. *The Geological Society of America*, 26 (August), 703-706.
- McCaughey, J., and Tapponnier, P. (2011). *Myanmar earthquake of March 24, 2011 Magnitude 6.8*. Retrieved December 28, 2011, from: <http://www.earthobservatory.sg/media/news-and-features/295-myanmar-earthquake-of-march-24th-magnitude-68.html>
- Ryder, I., Parsons, B., Wright, T.J. and Funning, G.J. (2007). Post-seismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observation and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 169 (June), 1009-1027.
- Song, X., Shan, X., Qu, C., Han, Y., Zhang, G., Guo, L. and Zhang, G. (2010). The characteristics of post-seismic surface deformation of the Wenchuan MS8.0 earthquake from InSAR. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International*, (July), 1210-1213.
- Thatcher, W. (1993). The earthquake cycle and its role in the long-term deformation of continental lithosphere. *Annali Di Geofisica*, 36 (2), 13-24.
- Tririsatayawong, I., Hooper, A., and Aobpaet, A. (2011). *Co-seismic Displacement of 24-March 2011 Mw 6.8 Mong Hpayak Earthquake, Myanmar*. Retrieved March 15, 2012, from: http://radar.tudelft.nl/~ahooper/Tririsatayawong_et_al_Fringe_2011.
- Tronin, A.A. (2010). *Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review*. *Remote Sensing*, 2 (December), 124-150.
- UGSG (2013). *1999 Izmit, Turkey Earthquake*. Retrieved August 28, 2013, from: <http://earthquake.usgs.gov/research/geology/turkey/index.php>
- Wright, T.J. (2002). Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 360 (1801), 2873-2888.

Xiong, X., Shan, B., Zheng, Y. and Wang, R. (2009).

Stress transfer and its implication for earthquake hazard on the Kunlun Fault, Tibet. *ScienceDirect*, 482 (August), 216-225.

Zebker, H.A. and Villasenor, J. (1992). Decorrelation

in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 5 (30), 950-959.

Zhang, Y., Jiang, Z. and Cheng, X. (2011). Post-

seismic deformation detection using permanent scatters technology for east Kunlun fault after 2001 Kokoxili earthquake. *Geoinformatics, 2011 19th International Conference*, (June), 1-4 Shanghai, China.