

การเพิ่มความแม่นยำของ InSAR สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน: การออกแบบและปรับแต่ง Corner Reflectors Enhancing InSAR Accuracy for Infrastructure Monitoring: Design and Optimization of Corner Reflectors

อมสิริ คุตติยะ^{1,*}, สรรวิศ สุกเวชัย², สุชาญพงศ์ อบอุ่น³, ชนิกานต์ ยอดยา⁴, กิตติพิศ ประภัสร์⁵, วสวัต สามประดิษฐ์⁶,
ปณณรัตน์ อธิชัยไพศาล⁷, อนุเฒ่า อบอุ่น⁸

^{1,2,3,4,5,8} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

^{6,7} ฝ่ายบำรุงรักษาโยธา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จ.นนทบุรี ประเทศไทย

ได้รับทุนอุดหนุนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

*Corresponding author; E-mail address: aomsiri.du@ku.th

บทคัดย่อ

การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ เช่น อ่างเก็บน้ำและเขื่อน ด้วยเทคนิค Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ได้รับการยอมรับในด้านความสามารถในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระดับมิลลิเมตรด้วยความครอบคลุมทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลา การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและพัฒนาระบบ Corner Reflectors (CRs) เพื่อรองรับการใช้งานกับ C-band SAR เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูล InSAR โดยการออกแบบ CRs คำนึงถึงปัจจัยสำคัญ เช่น ขนาด ความถี่เรดาร์ วัสดุ สภาพแวดล้อม การติดตั้ง และการปรับมุมรับสัญญาณให้เหมาะสม เพื่อให้การสะท้อนสัญญาณมีเสถียรภาพและทนทานโครงสร้างต้นแบบของ CRs มีขนาดฐานกว้าง 2.4 เมตร สูง 1.2 เมตร ผลิตจากสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร และติดตั้งที่อ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคอง ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จากการตรวจสอบจากภาพถ่ายดาวเทียมระบบเรดาร์ พบว่า CRs สามารถสะท้อนสัญญาณเรดาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วง C-band (5.405 GHz) และทนทานต่อสภาพแวดล้อม นอกจากนี้การปรับมุมรับสัญญาณที่เหมาะสมมีผลสำคัญต่อค่าความสว่างเรดาร์ (RCS) โดยหากมีข้อผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อย อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการสะท้อนลดลงผลการศึกษายืนยันว่า CRs สามารถใช้สอบเทียบข้อมูล จาก Sentinel-1 SAR ได้อย่างแม่นยำ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ InSAR สนับสนุนการจัดการความเสี่ยงและการบำรุงรักษา โครงสร้างพื้นฐาน เพื่อความปลอดภัยของประชาชน และส่งเสริมการพัฒนาระบบเฝ้าระวังที่ยั่งยืนในระยะยาว

คำสำคัญ: คอนเนอร์รีเฟล็กเตอร์, อินซาร์, โครงสร้างพื้นฐาน, การตรวจสอบความปลอดภัย

Abstract

Monitoring critical infrastructure, such as reservoirs and dams, using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) has been widely recognized for detecting millimeter-level displacements with comprehensive spatial and temporal coverage. This study focuses on the design and development of

Corner Reflectors (CRs) optimized for C-band SAR applications to enhance the accuracy and reliability of InSAR-derived data. The CRs design considers size, radar frequency, material properties, installation conditions, and alignment adjustments to maximize signal stability and durability. A CR prototype, with a 2.4-meter base width and 1.2-meter height, constructed from 2-mm thick stainless steel, was installed at the Lam Takhong upper reservoir, under the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). Field experiments confirmed that the CR effectively reflects radar signals at the C-band (5.405 GHz) and withstands environmental conditions. Proper alignment of the CRs is crucial, as even minor misalignments significantly reduce the radar cross-section (RCS). The results demonstrate that CRs are a reliable tool for calibrating Sentinel-1 SAR data, improving the accuracy of InSAR measurements. This advancement supports risk management and maintenance planning for infrastructure safety, contributing to developing a sustainable long-term monitoring system.

Keywords: Corner Reflectors, InSAR, Infrastructure, Monitoring the safety

1. คำนำ

โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) เช่น สะพาน เขื่อน อ่างเก็บน้ำ อาคารและทางหลวง มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคม เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้เป็นรากฐานของการดำเนินชีวิตประจำวันและการพัฒนาประเทศ [1] อย่างไรก็ตาม ความเสียหายหรือการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้อาจนำมาซึ่งความเสี่ยงที่ร้ายแรงต่อความปลอดภัยของประชาชนและทรัพย์สิน รวมถึงผลกระทบต่อทางเศรษฐกิจในวงกว้าง [2] ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างพื้นฐานมีทั้งจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ตัวอย่างเช่น แผ่นดินไหว น้ำท่วม การทรุดตัวของดินหรือการใช้งานโครงสร้างที่เกินขีดจำกัดอาจทำให้เกิดความเสียหายหรือการพังทลายของโครงสร้าง หากไม่ได้รับการตรวจสอบและแก้ไขอย่างทันเวลาที่ [3] ปัญหาเหล่านี้สามารถสร้างความสูญเสียอย่างมหาศาล

ในด้านชีวิต เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันเทคนิคการตรวจสอบความมั่นคงของโครงสร้างพื้นฐานได้พัฒนาไปอย่างก้าวหน้าโดยเฉพาะการใช้ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถตรวจวัดการเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานในระดับมิลลิเมตร [4] ยกตัวอย่างเช่น การนำเอาเทคโนโลยีอนุกรมเวลา InSAR มาใช้สำหรับการติดตามความปลอดภัยของเขื่อน [2] และการนำเอาเทคโนโลยีอนุกรมเวลา InSAR มาใช้วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของกรุงเทพมหานคร [5] ด้วยความครอบคลุมทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลาทำให้ InSAR ได้รับความนิยมในการเฝ้าระวังและประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐานในบริเวณกว้าง อย่างไรก็ตาม หนึ่งในวิธีที่ได้รับการยอมรับในการตรวจสอบและเปรียบเทียบข้อมูล InSAR คือ การใช้ Corner Reflectors (CRs) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อสะท้อนคลื่นเรดาร์กลับไปยังแหล่งกำเนิดอย่างแม่นยำ [6] CRs ถูกนำมาใช้งานด้านการเฝ้าระวังโครงสร้างพื้นฐาน การศึกษาธรณีวิทยาและการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมทั่วโลก [7] โดยในประเทศไทยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย หรือ กฟผ. ได้ดำเนินโครงการออกแบบและติดตั้ง CRs ตัวแรก ณ อ่างพิกน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวัฒนาจังหวัดนครราชสีมา เพื่อสนับสนุนการใช้เทคนิค InSAR ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานและการเคลื่อนตัวของพื้นดิน โดยกลไกสำคัญของการทำงานของ CRs คือ “การสะท้อนสามครั้ง” (triple-bounce mechanism) [9] ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนพื้นผิวทั้งสามของ CRs และสะท้อนกลับไปในแนวตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดอย่างเสถียร โดยความสามารถนี้ทำให้ CRs เป็นจุดสะท้อนที่มีความเข้มของสัญญาณสูงกว่าเป้าหมายธรรมชาติ (natural scatterers) เช่น ดิน หิน หรือพืชพรรณ การออกแบบและพัฒนาระบบ Corner Reflectors (CRs) เพื่อใช้ร่วมกับเทคนิค InSAR [8] เป็นอีกก้าวหนึ่งที่สำคัญในการเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูล [10] CRs ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ช่วงคลื่น C-band ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ประมาณ 5.405 GHz [9] และสามารถรับสัญญาณได้ทั้งในแนวขาขึ้น (Ascending) และขาลง (Descending) มีบทบาทสำคัญทั้งในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานและการสอบเทียบข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม Synthetic Aperture Radar (SAR) โดยในการสอบเทียบข้อมูลนั้น CRs ใช้เป็นอุปกรณ์สะท้อนสัญญาณเรดาร์กลับไปยังดาวเทียมจึงสามารถตรวจสอบตำแหน่งของข้อมูล (Geometric Calibration), ปรับค่าความเข้มของสัญญาณ (Radiometric Calibration) และตรวจสอบค่าการเคลื่อนที่ (Displacement Calibration) มักใช้งานร่วมกับ GNSS เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ ด้วยคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบทั้งในเชิงโครงสร้างและภูมิประเทศ [11]

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษา ออกแบบ และปรับแต่ง Corner Reflectors (CRs) เพื่อเพิ่มความแม่นยำของเทคนิค Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน โดยเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อเสริมประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังและลดความเสี่ยงของความปลอดภัยที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ทั้งในด้านความปลอดภัยของประชาชนและการปกป้องโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ [12] งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูล InSAR เท่านั้น แต่ยังมีส่วนในการพัฒนาระบบเฝ้าระวังที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในระยะยาว และสนับสนุนการจัดการความเสี่ยงและการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อเสริมสร้าง

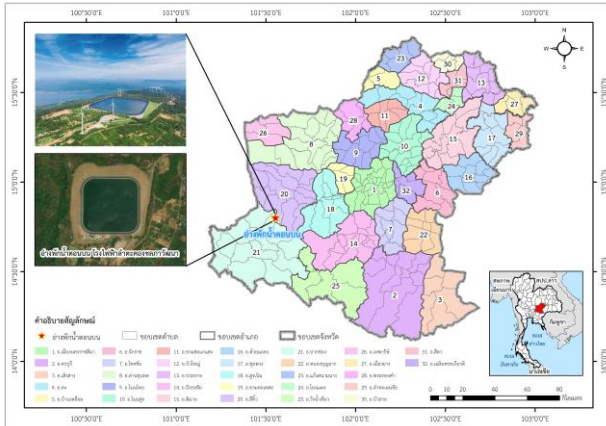
ความปลอดภัยของประชาชน ตลอดจนเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้าในภูมิภาคนี้

2. พื้นที่และหลักการที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

อ่างพิกน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวัฒนาตั้งอยู่ในพื้นที่ระหว่างอำเภอสีคิ้วและอำเภอบำเพ็ญ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยพื้นที่ศึกษานี้ตั้งอยู่ที่พิกัดทางภูมิศาสตร์ประมาณละติจูด 14.765°N และลองจิจูด 101.425°E อยู่บนสันเขายาวที่ระดับ 650 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล ล้อมรอบด้วยภูเขาและป่าไม้ที่มีความสูงชัน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งส่งผลต่อการกระจายของสัญญาณเรดาร์และความซับซ้อนของภูมิประเทศที่ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) และ Corner Reflectors (CRs) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเฝ้าระวัง อ่างพิกน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวัฒนา มีความจุ 10.3 ล้านลูกบาศก์เมตรและพื้นที่ผิวน้ำ 0.34 ตารางกิโลเมตร โดยถูกสร้างขึ้นด้วยการขุดและถมด้วยวัสดุหินในพื้นที่ซึ่งประกอบด้วยหินทรายและหินเคลย์ และปูพื้นผิวด้วยแอสฟัลติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete) เพื่อป้องกันการร้าวซึม โครงสร้างนี้มีระยะพื้นน้ำ (Freeboard) 2 เมตร และเชื่อมต่อกับอาคารโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ใต้ดินลึกกว่า 350 เมตร ทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบ Pumped Storage Hydropower ภายใต้การดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โรงไฟฟ้าแห่งนี้ใช้กังหันน้ำแบบ Vertical Shaft Francis Type มีกำลังการผลิตรวม 500 เมกะวัตต์

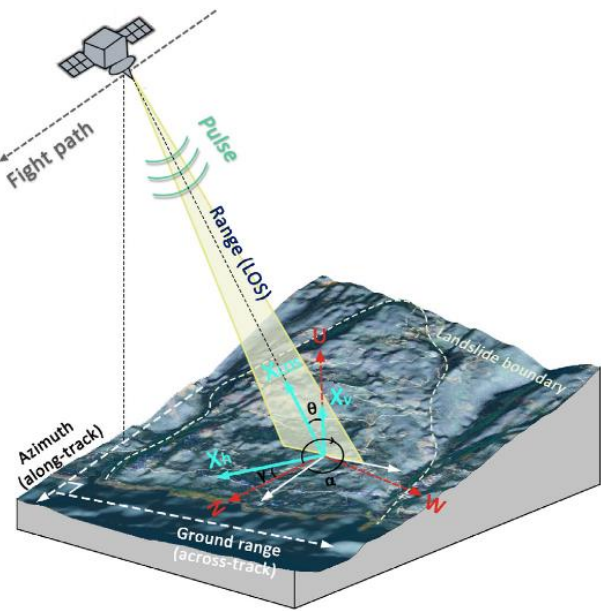
พื้นที่อ่างพิกน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวัฒนาถูกเลือกเป็นพื้นที่ศึกษาเนื่องจากเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ช่วยเสริมความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตาม พื้นที่นี้มีความเสี่ยงต่อการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดิน เนื่องจากลักษณะธรณีวิทยาและภูมิประเทศที่ลาดชันเพื่อเฝ้าระวังและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว เทคนิค InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ถูกนำมาใช้ เนื่องจากสามารถวัดการเคลื่อนตัวในระดับมิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม การใช้งานในพื้นที่ภูมิประเทศซับซ้อนจำเป็นต้องใช้ Corner Reflectors (CRs) เพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูล โดย CRs ทำหน้าที่เป็นจุดสะท้อนสัญญาณเรดาร์ที่ช่วยเพิ่ม Signal-to-Noise Ratio (SNR) และปรับปรุงคุณภาพข้อมูลจาก Sentinel-1 SAR ที่ใช้คลื่นความถี่ C-band การศึกษาในพื้นที่นี้จึงเน้นการพัฒนาระบบ InSAR และ CRs เพื่อประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐาน เพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดิน เพื่อความปลอดภัยของเขื่อนและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาวิจัย อ่างพังก้านตอนบน โรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวัฒนา จังหวัด นครราชสีมา

2.2 หลักการของ Synthetic Aperture Radar (SAR)

Synthetic Aperture Radar (SAR) เป็นเทคนิคการถ่ายภาพเชิงภูมิศาสตร์ที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงสามทศวรรษที่ผ่านมา [11] เทคโนโลยีนี้มีข้อได้เปรียบสำคัญ คือทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืน และสามารถทำงานได้ในทุกสภาพอากาศ เช่น ฝน หมอก หรือเมฆ เนื่องจาก SAR ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสร้างภาพถ่ายพื้นผิวโลกที่มีความละเอียดสูงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเมฆและฝุ่นละอองได้รวมถึงศักยภาพในการครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ [13] ความสามารถเหล่านี้ส่งผลให้ SAR สามารถรวบรวมข้อมูลที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงเกี่ยวกับระดับความสูงของพื้นดินและการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวทำให้เทคนิค SAR กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลกและการตรวจจับอันตรายทางธรณีวิทยา ดังที่แสดงหลักการถ่ายภาพของ SAR ในรูปที่ 2 [11] การทำงานของ SAR อาศัยหลักการสะท้อนกลับ (Backscattering) ของสัญญาณเรดาร์ เมื่อกระทบกับวัตถุบนพื้นผิวโลก โดยสัญญาณสะท้อนกลับจะถูกบันทึกและประมวลผลเป็นภาพถ่ายเรดาร์ที่มีความละเอียดสูง [14] หลักการทำงานของ SAR ใช้เทคนิค Aperture Synthesis โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของดาวเทียมหรือแพลตฟอร์ม เช่น เครื่องบิน เพื่อสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงกว่าขนาดจริงของเสาอากาศ โดยปกติเสาอากาศที่ใช้ในการถ่ายภาพเรดาร์จะต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้ได้ความละเอียดสูง อย่างไรก็ตาม การใช้เสาอากาศขนาดใหญ่ในทางปฏิบัตินั้นมีความยุ่งยากและไม่สะดวกดังนั้น SAR จึงใช้เทคนิค Aperture Synthesis โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของดาวเทียมเพื่อสร้างเสาอากาศเสมือนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากการบันทึกสัญญาณเรดาร์ในหลายตำแหน่งตลอดแนวการเคลื่อนที่ของดาวเทียม จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาประมวลผลร่วมกันเพื่อสร้างภาพที่มีความละเอียดสูง เทคนิคนี้ทำให้ SAR สามารถสร้างภาพที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) สูงโดยไม่จำเป็นต้องใช้เสาอากาศขนาดใหญ่จริง ๆ [15] ในงานวิจัยนี้ใช้ Sentinel-1 SAR ซึ่งเป็นดาวเทียมที่ใช้กันในย่านความถี่ C-band (5.405 GHz) ซึ่งมีความสามารถในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นผิวในระดับมิลลิเมตร [16] C-band มีความยาวคลื่นประมาณ 5.6 เซนติเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวดินและโครงสร้างพื้นฐาน [17] เนื่องจากความยาวคลื่นนี้สามารถทะลุผ่านพืชพรรณบางชนิดและสะท้อนกลับจากพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในระดับมิลลิเมตรได้อย่างแม่นยำ [18]

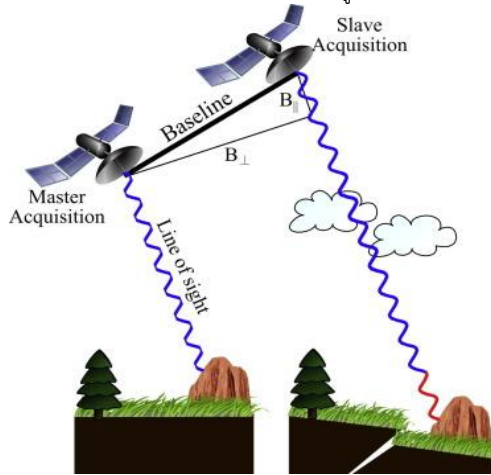


รูปที่ 2 การสร้างภาพถ่ายพื้นผิวโลกที่มีความละเอียดสูง โดยใช้เทคนิค SAR

2.3 หลักการของ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่ายเรดาร์จากดาวเทียมเพื่อวัดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวโลกหรือโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ โดยอาศัยความแตกต่างของเฟส (Phase Difference) ระหว่างภาพ Synthetic Aperture Radar (SAR) สองภาพหรือมากกว่าที่ถ่ายจากตำแหน่งวงโคจรที่ใกล้เคียงกันในช่วงเวลาต่างกั้กันดังแสดงในรูปที่ 3 [19] การประมวลผล InSAR เริ่มจากการใช้ภาพ SAR หลายช่วงเวลา (Multi-temporal) โดยนำภาพเหล่านี้มาวิเคราะห์ค่าความต่างเฟสที่ตรงกันบนพื้นฐาน พิกเซลต่อพิกเซล (Pixel-by-Pixel) เพื่อหาค่าความแตกต่างของระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณจนถึงพื้นผิววัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป [20] หลักการของ InSAR คือการที่ดาวเทียมเรดาร์โคจรรอบโลกและถ่ายภาพพื้นที่เดิมซ้ำ ๆ ในแต่ละช่วงเวลา เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของเฟสระหว่างภาพ SAR ที่ถ่ายได้จากตำแหน่งวงโคจรที่แตกต่างกันเล็กน้อย จะสามารถวัดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวได้ในระดับมิลลิเมตร [21] การเปลี่ยนแปลงของเฟสหรือความแตกต่างของระยะทางนี้สะท้อนถึงการเคลื่อนตัวเข้าหาดาวเทียมหรือออกจากดาวเทียม โดยข้อมูล InSAR ที่ได้จะถูกประมวลผลเพื่อสร้าง Interferogram ซึ่งแสดงค่าความแตกต่างของเฟสที่เกิดขึ้น InSAR มีความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานในระยะยาวทำให้เทคนิคนี้เหมาะกับงานด้านการเฝ้าระวังและติดตามโครงสร้างพื้นฐาน (Monitoring) เช่น การทรุดตัวของดิน การเคลื่อนตัวของเขื่อน การบิตตัวของอาคารสูง และการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหว [22] นอกจากนี้ InSAR ยังสามารถคาดการณ์แนวโน้มการเคลื่อนตัวที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้อีกด้วยอย่างไรก็ตาม การประมวลผล InSAR อาจได้รับผลกระทบจาก Noise ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและลดความน่าเชื่อถือของข้อมูล Noise ที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายปัจจัย เช่น Atmospheric Noise ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ และ Orbital Errors ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม

[23] เพื่อปรับปรุงความแม่นยำและลดผลกระทบจาก Noise จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิค การสอบเทียบ (Calibration) ของข้อมูล InSAR



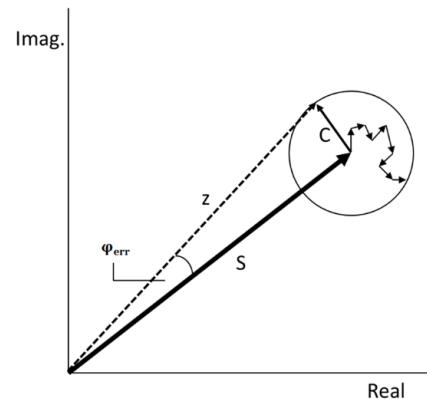
รูปที่ 3 หลักการทำงานของ InSAR แสดงการบันทึกภาพเรดาร์จากสองช่วงเวลา (Master Acquisition และ Slave Acquisition)

2.4 หลักการทำงานของ Corner Reflector

ตัวสะท้อนเรดาร์แบบไตรเอ็ดรัล (Trihedral Radar Reflector) หรือที่มักเรียกว่า "ตัวสะท้อนแบบมุม (Corner Reflectors - CRs)" เป็นหนึ่งในตัวสะท้อนที่มีประสิทธิภาพสูง [26] เนื่องจากใช้หลักการการสะท้อนสามครั้ง (Triple Reflection) [10] โดย CRs ประกอบไปด้วยแผ่นสะท้อนสามแผ่นที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้โครงสร้างของ CRs มีลักษณะคล้ายกับมุมของลูกบาศก์ (Cube Corner Structure) โครงสร้างนี้ประกอบด้วยฐานแผ่นหนึ่งและแผ่นแนวตั้งอีกสองแผ่นซึ่งเมื่อคลื่นเรดาร์ตกกระทบบนแผ่นสะท้อนแผ่นใดแผ่นหนึ่งจะเกิดการสะท้อนไปยังแผ่นที่สองและต่อเนื่องไปยังแผ่นที่สามก่อนที่จะสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดของคลื่น [27] หลักการการสะท้อนสามครั้ง (Triple Reflection Principle) ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับไปยังเรดาร์มีทิศทางเดียวกับคลื่นที่เข้ามาโดยการสะท้อนกลับนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแต่ละแผ่นของ CRs ตั้งฉากกัน ทำให้เกิดการสะท้อนแบบกลับทิศทาง (Retroreflection) ซึ่งช่วยให้ CRs สามารถสะท้อนพลังงานกลับไปยังแหล่งกำเนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยให้ Signal-to-Noise Ratio (SNR) สูงขึ้นในทางปฏิบัติ CRs สามารถสะท้อนคลื่นเรดาร์ได้ดีแม้ในสถานะที่สัญญาณอ่อนหรืออยู่ในพื้นที่ที่สัญญาณกระจายไปในทิศทางอื่น [25]คุณสมบัติการสะท้อนแบบ Retroreflective ของ CRs ทำให้เป้าหมาย (Target) ที่ติดตั้ง CR ปรากฏชัดเจนนับบนเรดาร์และช่วยเพิ่ม Radar Cross Section (RCS) ซึ่งเป็นตัววัดความสามารถในการสะท้อนของวัตถุ โดย CRs มีความสามารถในการสะท้อนคลื่นเรดาร์ที่เข้ามาในมุมกว้างได้ดี และส่งกลับไปยังแหล่งกำเนิดอย่างแม่นยำ ทำให้ CRs ถูกนำมาใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น การสำรวจ (Surveying) [12] การตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Monitoring) [28] และการติดตามการเปลี่ยนแปลงของแผ่นดินไหว แผ่นดินทรุด หรือการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก (Geohazard Monitoring) ผ่านดาวเทียมเรดาร์ เช่น Sentinel-1 ซึ่งใช้เทคนิค InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ในการเปรียบเทียบภาพเรดาร์ในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อตรวจจับความแตกต่างของพื้นผิวอย่างละเอียด [22]

การประยุกต์ใช้ Corner Reflectors (CRs) ในเทคนิค InSAR เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเฝ้าระวังโครงสร้างพื้นฐาน ในเชิงเทคนิค Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) อาศัย Corner Reflectors (CRs) เป็นองค์ประกอบสำคัญในการ สอบเทียบ (Calibration) ข้อมูลเรดาร์จากดาวเทียม SAR (Synthetic Aperture Radar) โดย CRs ทำหน้าที่ เป็น Permanent Scatterers ที่มีความเข้มของสัญญาณที่แน่นอนและเสถียร ส่งผลให้สามารถลดสัญญาณรบกวนจากชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Noise) และข้อผิดพลาดจากวงโคจรของดาวเทียม (Orbital Errors) ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ข้อมูล InSAR [29] จากรูปที่ 4 แสดงการแทนค่าของสัญญาณเรดาร์ใน

ระนาบเชิงซ้อน (Complex Plane) เส้นทึบ (เวกเตอร์ S) แทนค่าของสัญญาณเรดาร์ที่ได้รับจากเป้าหมาย ซึ่งมีทั้งส่วนจริง (Real) และส่วนจินตภาพ (Imaginary) เส้นประ (เวกเตอร์ z) แสดงตำแหน่งที่สัญญาณควรจะอยู่ในอุดมคติ หากไม่มีข้อผิดพลาด C และวงกลมรอบ C แสดงถึง Noise หรือสัญญาณรบกวน (Decorrelation Noise) ที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หรือสัญญาณรบกวนจากระบบเรดาร์ และมุมความผิดพลาดของเฟส ϕ_{err} เป็นค่าความต่างเฟสระหว่างสัญญาณจริง S กับสัญญาณอ้างอิง z ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์ InSAR นอกจากนี้การใช้งาน CRs ยังมีบทบาทสำคัญในการเฝ้าระวังและติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐาน โดยสามารถคาดการณ์แนวโน้มการเคลื่อนตัว และประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างได้อย่างแม่นยำในระดับมิลลิเมตร การติดตั้ง CRs ในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิประเทศซับซ้อน และการกระเจิงของสัญญาณสูง ช่วยให้สามารถลดผลกระทบจาก Noise และปรับปรุงความแม่นยำของข้อมูล InSAR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [24] ทั้งนี้ การใช้ CRs เป็นจุดสอบเทียบช่วยให้ข้อมูล InSAR มีความถูกต้องสูงขึ้น ส่งผลให้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลกและโครงสร้างพื้นฐานเป็นไปอย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการสนับสนุนการวางแผนการบำรุงรักษาและการจัดการความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐาน ในระยะยาว [30]



รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่สะท้อนกลับจากพิทเชลหนึ่งเกิดจากผลรวมเชิงซ้อนของตัวกระเจิงทั้งหมดภายในพิทเชลนั้น รูปนี้ได้รับการอ้างอิงจากแหล่งข้อมูล [31,33]

3. ข้อพิจารณาในการออกแบบและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อพิจารณาในการออกแบบ

3.1.1 ข้อพิจารณาข้อมูล Sentinel-1

Sentinel-1 เป็นดาวเทียมเรดาร์ในโครงการ Copernicus ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย European Space Agency (ESA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการ เฝ้าระวังและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก ผ่านเทคนิค Synthetic Aperture Radar (SAR) ซึ่งปฏิบัติการในย่านความถี่ C-band (5.405 GHz) ข้อมูลที่ได้รับจาก Sentinel-1 สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในระดับมิลลิเมตร โดยมีความครอบคลุมทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลา อีกทั้งยังสามารถทำงานได้ในทุกสภาพอากาศและทั้งกลางวันและกลางคืน ส่งผลให้เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการ ติดตามและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและโครงสร้างพื้นฐาน ได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ [31]

ในการวิจัยนี้ข้อมูลจาก Sentinel-1 ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นผิว (Surface Deformation Analysis) โดยอาศัยเทคนิค Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ซึ่ง สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในระดับมิลลิเมตร โดยอาศัย Phase

Difference ของภาพเรดาร์สองภาพที่ถ่ายในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ข้อพิจารณาในการเลือกและใช้ข้อมูล Sentinel-1 ได้แก่ การเลือก Level-1 Single Look Complex (SLC) ซึ่งมีทั้ง Amplitude และ Phase ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณค่าความแตกต่างของเฟสและสร้าง Interferogram นอกจากนี้ การใช้โหมด Interferometric Wide Swath (IW) ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงและสามารถครอบคลุมพื้นที่กว้าง (~250 km) ทำให้สามารถตรวจสอบพื้นที่เป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการเลือกข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ InSAR จำเป็นต้องพิจารณา รอบการโคจรของ Sentinel-1A ซึ่งมีค่าการโคจรซ้ำทุก 12 วัน ตลอดจนการเลือก คู่ภาพ (Image Pair) ที่เหมาะสม โดยให้ค่าความแตกต่างของระยะระหว่างตำแหน่งการถ่ายภาพในแนวตั้งฉากต่อโคจร (Perpendicular Baseline) ไม่เกิน 200 เมตร เพื่อลดปัญหา Decorrelation ที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของมุมตกกระทบ ในการจัดการและประมวลผลข้อมูล Sentinel-1 งานวิจัยนี้ใช้ Sentinel Application Platform (SNAP) สำหรับกระบวนการ Pre-processing เช่น การปรับเทียบ (Calibration) การตัดภาพ (Subset) และการปรับแก้ภูมิประเทศ (Terrain Correction) อย่างไรก็ตาม เทคนิค InSAR ยังคงมีข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ Decorrelation ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว เช่น พืชพรรณ หรือการก่อสร้าง รวมถึง Atmospheric Noise ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ความชื้นและอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ ซึ่งสามารถลดความแม่นยำของข้อมูล InSAR ได้ ในการแก้ไข ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงใช้ Corner Reflectors (CRs) เพื่อทำหน้าที่เป็น จุดอ้างอิงถาวร (Permanent Scatterers) ที่ช่วยในการสอบเทียบ (Calibration) และลดผลกระทบของ Noise เพื่อเพิ่มความเสถียรของข้อมูล InSAR ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด [16]

3.1.2 ขนาดของ Corner Reflector (CRs)

Corner Reflectors (CRs) เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อสะท้อนคลื่นเรดาร์กลับไปยังแหล่งกำเนิด โดยอาศัยหลักการการสะท้อนสามครั้ง (Triple Reflection) จากแผ่นสะท้อนสามแผ่นที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้ได้สัญญาณที่มีความเข้มสูงและเสถียร [11] การออกแบบขนาดของ CRs มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ Radar Cross Section (RCS) และ Signal-to-Noise Ratio (SNR) ของข้อมูล InSAR โดยขนาดของ CRs ต้องสอดคล้องกับความยาวคลื่น (Wavelength) ของคลื่นเรดาร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนและลดสัญญาณรบกวน (Noise) ขนาดของ CRs ถูกกำหนดโดย ความยาวของขอบ (Edge Length) ของแผ่นสะท้อน [10] ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่า RCS และ SNR ในการวิจัยนี้ CRs ถูกออกแบบให้ใช้งานร่วมกับ Sentinel-1 SAR ซึ่งทำงานในย่านความถี่ C-band (5.405 GHz) โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 5.6 เซนติเมตร [16] ขนาดของ CR ที่เหมาะสมควรมีความยาวของขอบ (Edge Length, L) ประมาณ 2.4 เมตร เพื่อให้ได้ Radar Cross Section (RCS) ที่สูงและเสถียร การกำหนดขนาดของ CRs ในย่านความถี่ C-band ใช้สมการที่ 1 ในการคำนวณ

$$RCS = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2} \quad (1)$$

โดยที่

RCS คือค่าการสะท้อนที่ได้จาก Corner Reflector (CRs)

a คือขนาดของหน้างาน Corner Reflector (CRs)

λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณเรดาร์จากดาวเทียม Sentinel-1 สำหรับในกรณีใช้ความยาวคลื่นในช่วง C-band

จึงใช้ $\lambda = 5.600$ cm หรือ 0.056 m

จากสมการเห็นได้ว่าขนาดของ CRs มีความสัมพันธ์กับ RCS โดยตรง โดยเมื่อเพิ่มความยาวของขอบ L จะทำให้ค่า RCS เพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งช่วย

ปรับปรุง Signal-to-Noise Ratio (SNR) และเพิ่มความเสถียรของข้อมูล InSAR [27] อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของ CRs อย่างไม่มีขีดจำกัดไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากจะทำให้เกิด Multipath Interference และเพิ่มความซับซ้อนในการติดตั้งขนาดและการออกแบบของ CR มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพในการสะท้อนสัญญาณและความแม่นยำของข้อมูล InSAR [32] ซึ่งในการวิจัยนี้ CRs ถูกออกแบบให้มีขนาด 2.4 เมตร x 2.4 เมตร

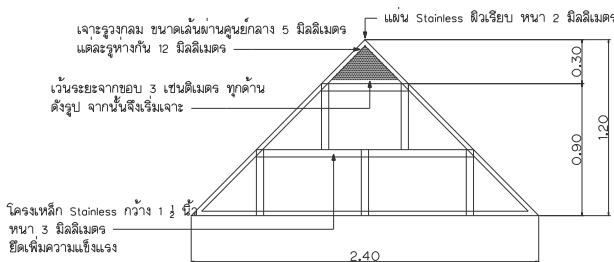
3.1.3 มุมการติดตั้ง (Incidence Angle)

มุมการติดตั้ง (Incidence Angle) ของ Corner Reflector (CR) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ Signal-to-Noise Ratio (SNR) และ Radar Cross Section (RCS) ของข้อมูล InSAR โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลจาก Sentinel-1 SAR ซึ่งทำงานในโหมด Interferometric Wide Swath (IW) ที่มี มุมตกกระทบ (Incidence Angle) อยู่ระหว่าง 29° ถึง 46° ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของภาพที่ได้ การปรับมุมการติดตั้ง CRs ให้สอดคล้องกับ Incidence Angle ของเรดาร์ จะช่วยเพิ่มความเข้มของสัญญาณสะท้อนและลด Decorrelation ที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของมุมตกกระทบ ในการติดตั้ง Corner Reflectors (CRs) ควรพิจารณาให้ตำแหน่งของ CRs ขนานกับพื้นดิน เพื่อให้แน่ใจว่ามุมสะท้อนตรงกับมุมตกกระทบของเรดาร์ โดยเฉพาะในกรณีของ Sentinel-1 ซึ่งใช้ C-band (5.405 GHz) ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบ การปรับทิศทางของ CRs ควรชี้ไปทางทิศของดาวเทียม Sentinel-1 ในแต่ละวงโคจร โดยพิจารณาทั้ง Ascending Orbit (ขาขึ้น) และ Descending Orbit (ขาลง) เพื่อให้แน่ใจว่าการสะท้อนของสัญญาณกลับไปยังดาวเทียมมีประสิทธิภาพสูงสุดและมี Signal-to-Noise Ratio (SNR) ที่ดี [33] มุมการติดตั้ง (Incidence Angle) ที่เหมาะสมจะช่วยให้ปรับปรุง Radar Cross Section (RCS) ของ CRs และเพิ่มความเสถียรของข้อมูล InSAR ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นผิว การคำนวณมุมติดตั้งสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลวงโคจรของ Sentinel-1 ที่ได้จาก Precise Orbit Ephemerides (POD) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก Copernicus Open Access Hub ในการวิจัยนี้ CRs ถูกติดตั้งที่อ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคอง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดิน เพื่อให้การติดตั้ง CRs มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้ปรับมุมรับสัญญาณให้สอดคล้องกับ Incidence Angle ของ Sentinel-1 ในทั้ง Ascending Orbit และ Descending Orbit เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและมีความเสถียรสูงสุด

3.1.4 วัสดุที่ใช้ในการสร้าง CRs

ในการวิจัยนี้ Corner Reflectors (CRs) ถูกสร้างจากสแตนเลส (Stainless Steel) เนื่องจากมีค่าการสะท้อนสูง (High Reflectivity) ซึ่งช่วยเพิ่ม Radar Cross Section (RCS) และ Signal-to-Noise Ratio (SNR) ทำให้สามารถสะท้อนสัญญาณจากดาวเทียม Sentinel-1 SAR ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร สแตนเลสยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) สูง ทำให้สามารถติดตั้งได้ในพื้นที่ อ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา ซึ่งมีความชื้นสูงและสภาพอากาศแปรปรวนตลอดทั้งปี นอกจากนี้สแตนเลสยังมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง (Structural Strength) สูงทำให้ CRs มีความคงทนต่อแรงลมและแรงกระแทก [10] โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ แผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มความทนทานและความเสถียรในการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น อลูมิเนียมและเหล็กชุบสังกะสีพบว่า สแตนเลสมีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในด้านการสะท้อนสัญญาณและ

ความทนทาน จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้าง CRs ที่สามารถใช้งานได้ในระยะยาวและให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ InSAR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้มีการเจาะรูบนแผ่นพบว่าสแตนเลสเพื่อช่วยในการระบายน้ำหากมีฝนตก ลดแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้าง และยังเป็นการป้องกันการสะสมของฝุ่นและสิ่งสกปรก ทั้งนี้การเจาะรูอาจมีผลกระทบต่อการสะท้อนของเรดาร์ (RCS - Radar Cross Section) ส่งผลให้ค่าการสะท้อนของเรดาร์ลดที่ความถี่บางช่วง ดังนั้นในการออกแบบขนาดของรูจึงไม่ควรเกิน 1/6 ของความยาวคลื่นเรดาร์ [9] ในงานวิจัยนี้ออกแบบขนาดของรูเป็น 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับ ความยาวคลื่น X-band (≈ 31 มิลลิเมตร) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการสะท้อนของเรดาร์ (RCS - Radar Cross Section) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงให้เห็นรูที่เจาะบนแผ่นสแตนเลสของ Corner Reflectors

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแม่นยำของเทคนิค Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ในการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน โดยมุ่งเน้นการออกแบบและปรับแต่ง Corner Reflectors (CRs) ให้เหมาะสมกับ C-band (5.405 GHz) ของ Sentinel-1 SAR ซึ่งปฏิบัติการในโหมด Interferometric Wide Swath (IW) เพื่อเพิ่ม Radar Cross Section (RCS) และ Signal-to-Noise Ratio (SNR) กระบวนการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็นสี่ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การออกแบบและพัฒนา CRs (2) การติดตั้ง CRs และเก็บข้อมูลภาคสนาม (3) การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล InSAR และ (4) การวิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6

ในขั้นตอนแรก การออกแบบและพัฒนา CRs ใช้ โปรแกรม AutoCAD (Computer-Aided Design) เพื่อออกแบบโครงสร้างให้สอดคล้องกับ

Incidence Angle ($29^\circ - 46^\circ$) ของ Sentinel-1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะท้อนของ CRs โดยเลือกใช้สแตนเลส (Stainless Steel) หนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าการสะท้อนสูงและทนทานต่อการกัดกร่อน หลังจากการออกแบบเสร็จสิ้น จึงทำการผลิตต้นแบบ CRs และ ทดสอบประสิทธิภาพการสะท้อนสัญญาณ ภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้ Network Analyzer และ Radar Simulator เพื่อประเมินค่าการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ ในขั้นตอนที่สองการติดตั้ง CRs และเก็บข้อมูลภาคสนาม CRs ถูกติดตั้งที่อ่างพักน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา โดยกำหนดให้ ทิศทางของ CRs ตรงกับ Azimuth Direction ของ Sentinel-1 ทั้งใน Ascending Orbit (SW-NE) และ Descending Orbit (NW-SE) เพื่อให้ได้รับ Signal-to-Noise Ratio (SNR) สูงสุดและลดผลกระทบจาก Decorrelation การติดตั้ง CRs คำนึงถึงความมั่นคงของโครงสร้างและสภาพแวดล้อมเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในระยะยาว ในขั้นตอนที่สาม การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล InSAR ข้อมูลเรดาร์ที่ได้รับจาก Sentinel-1 ถูกประมวลผลโดยใช้ Sentinel Application Platform (SNAP) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ Pre-processing เช่น การปรับเทียบสัญญาณ (Calibration) การตัดภาพ (Subset) และการปรับแก้ภูมิประเทศ (Terrain Correction) จากนั้นทำการวิเคราะห์ Phase Difference ของภาพเรดาร์เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของพื้นผิวในระดับมิลลิเมตร โดยใช้ CRs เป็นจุดสอบเทียบ (Calibration Points) เพื่อลดผลกระทบจาก Atmospheric Noise และ Orbital Errors และเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จาก InSAR และในขั้นตอนสุดท้ายการวิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย ดำเนินการโดยใช้ Time-Series InSAR เพื่อประเมินแนวโน้มการเคลื่อนตัวของพื้นผิวและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ CRs ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาโดยเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของข้อมูล InSAR ก่อนและหลังการสอบเทียบด้วย CRs ผลการวิเคราะห์ช่วยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ CRs ในการเพิ่มความแม่นยำและความเสถียรของข้อมูล InSAR ซึ่งมีความสำคัญต่อการเฝ้าระวังและประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) สำหรับโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและความปลอดภัยของประชาชน

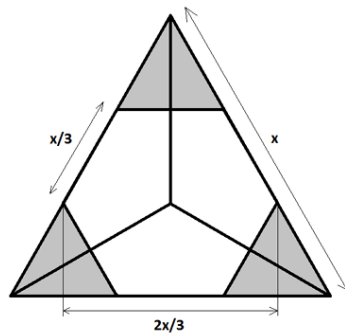


รูปที่ 6 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การคำนวณออกแบบรูปร่างของ Corner Reflectors

ค่าความเข้มของ RCS (Radar Cross Section) เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถของวัตถุในการสะท้อนคลื่นเรดาร์กลับไปยังต้นทาง เช่น สถานีเรดาร์หรือดาวเทียม โดยค่ายังสูงหมายถึงวัตถุนั้นสะท้อนเรดาร์ได้ดีขึ้นหรือมองเห็นได้ชัดขึ้นทางเรดาร์ และในทางกลับกันถ้าค่าต่ำ หมายถึงวัตถุนั้นสะท้อนเรดาร์ได้น้อยหรือตรวจจับได้ยากขึ้นนั่นเอง [35] ในปัจจุบัน Corner Reflectors แบบรูปทรงสามเหลี่ยมได้รับการยอมรับและแพร่หลายเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่ารูปทรงอื่น เช่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือ quarter-circle เนื่องจากแรงกดบนแผ่นสะท้อนถูกกระจายได้อย่างสมดุล โดยความแข็งแรงนี้ช่วยให้สามารถรักษามุมฉากระหว่างแผ่นสะท้อนได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการสะท้อนเรดาร์อย่าง

แม่นยำ [10] อีกทั้งยังสามารถตัดและประกอบได้ง่ายกว่ารูปทรงที่ซับซ้อน เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงวงกลม หรือ รูปทรงห้าเหลี่ยม และใช้วัสดุน้อยกว่ารูปทรงอื่น ทำให้ ลดต้นทุนการผลิตและน้ำหนักของโครงสร้าง แม้ว่า Corner Reflector แบบรูปทรงสามเหลี่ยมจะให้ค่า Radar Cross Section (RCS) ต่ำกว่ารูปทรงอื่น ๆ แต่ในทางปฏิบัติ Triangular CRs ยังให้ค่า RCS ที่เพียงพอ สำหรับการใช้งานเรดาร์ส่วนใหญ่ และ Triangular CRs เป็นรูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย [36] ในการศึกษาด้านเรดาร์และการเปรียบเทียบระบบเรดาร์ NASA รวมไปถึงหน่วยงานวิจัยหลายแห่งเลือกใช้รูปทรงนี้เนื่องจาก สมดุลระหว่างความแข็งแรง ต้นทุน และประสิทธิภาพในการสะท้อนเรดาร์ (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ช่องเปิด (Aperture) ของ Triangular Trihedral Corner Reflector (CR) เมื่อตั้งฉากกับคลื่นเรดาร์ โดย กลไกการสะท้อนสามครั้ง (Triple Bounce Mechanism) เกิดขึ้นเฉพาะใน พื้นที่หกเหลี่ยมสีขาว (Effective Area) ซึ่งสะท้อนคลื่นกลับไปยังเรดาร์อย่างแม่นยำ [10]

3.2.2 การคำนวณออกแบบขนาดของ Corner Reflector

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณที่ได้จากดาวเทียมขาขึ้น (Ascending)

DATE	RIGHT_RCS (dBsm)	LEFT_RCS (dBsm)	RIGHT_CR_SIZE (Sq.m.)	LEFT_CR_SIZE (Sq.m.)
24/11/2024	153.781	555.153	0.583	0.803
12/6/2024	102.982	103.000	0.527	0.527
18/12/2024	579.821	579.821	0.812	0.812
30/12/2024	299.148	110.132	0.688	0.536
1/11/2025	201.998	117.236	0.624	0.544
23/1/2025	104.337	104.337	0.529	0.529
2/4/2025	104.481	106.383	0.529	0.531
16/2/2025	855.433	855.433	0.895	0.895

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณที่ได้จากดาวเทียมขาลง (Descending)

DATE	RIGHT_RCS (dBsm)	LEFT_RCS (dBsm)	RIGHT_CR_SIZE (Sq.m.)	LEFT_CR_SIZE (Sq.m.)
12/10/2024	4434.606	4434.606	1.350	1.350
22/12/2024	111.837	345.965	0.538	0.713
1/3/2025	3090.246	2850.946	1.233	1.209
15/1/2025	3910.407	3910.407	1.308	1.308
27/1/2025	8854.377	1957.041	1.605	1.100
2/8/2025	7830.112	1957.041	1.556	1.100
12/10/2024	4434.606	4434.606	1.350	1.350
22/12/2024	111.837	345.965	0.538	0.713

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่ได้มาซึ่งค่า RCS ที่ต้องการในพื้นที่ เพื่อนำมาคำนวณขนาดของ CRs ตามสูตรที่กล่าวมาข้างต้น จากการคำนวณขนาดของ Corner Reflectors (CRs) ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบเรดาร์รับส่งสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar: SAR) พบว่าขนาดที่ได้มีค่าเท่ากับ 1.605 เมตร ขนาดดังกล่าวถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ความยาวคลื่นของเรดาร์ ความต้องการด้านการสะท้อนพลังงานเรดาร์และข้อจำกัดด้านโครงสร้างของตัวสะท้อนหรือรูปร่างของ CRs นั้นเอง จากการคำนวณทำให้ทราบขนาดเริ่มต้นที่เหมาะสมของ CRs สำหรับติดตั้งในพื้นที่ที่ศึกษาวิจัย ขนาดของ CRs ที่เหมาะสมส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ ข้อมูลอินเตอร์เฟอโรเมทรี (Interferometry) โดยเฉพาะการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก [37] การเลือกขนาด CRs ที่เหมาะสมช่วยให้สามารถปรับปรุงความแม่นยำของข้อมูล InSAR และเพิ่มคุณภาพของจุดกระเจิงถาวร (Persistent Scatterer: PS) ที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นดินยิ่งขึ้น และจากตารางที่ 3 แสดงค่า Maximum RCS (Radar Cross Section สูงสุด ในหน่วย dBm² ที่ตำแหน่ง boresight ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ CRs รูปร่างสามเหลี่ยมกับค่าความสามารถของวัตถุในการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงกัน กล่าวคือ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นค่าความสามารถของวัตถุในการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ก็มากขึ้นตาม ดังนั้นค่าขนาดของ CRs ที่นำไปใช้สามารถเลือกจากการคำนวณและสัมพันธ์กับตารางด้านล่างได้ นั้นเอง

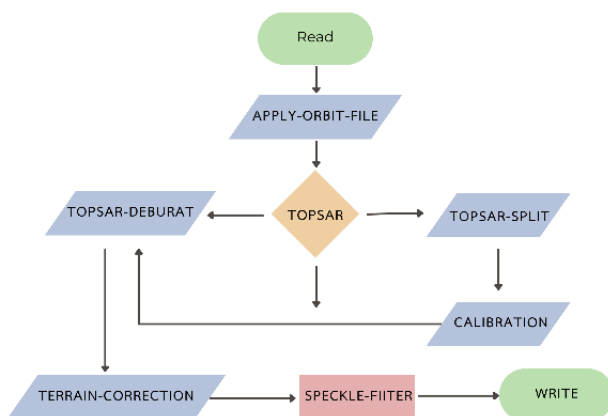
ตารางที่ 3 ค่า RCS สูงสุด (dBm²) ที่ตำแหน่ง Boresight [10]

ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง	C - band	
	SIR	TTCR
0.5	13.06	19.29
1.0	25.11	31.33
1.5	32.15	38.37
2.0	37.15	43.37
2.5	41.02	47.24
3.0	44.19	50.41

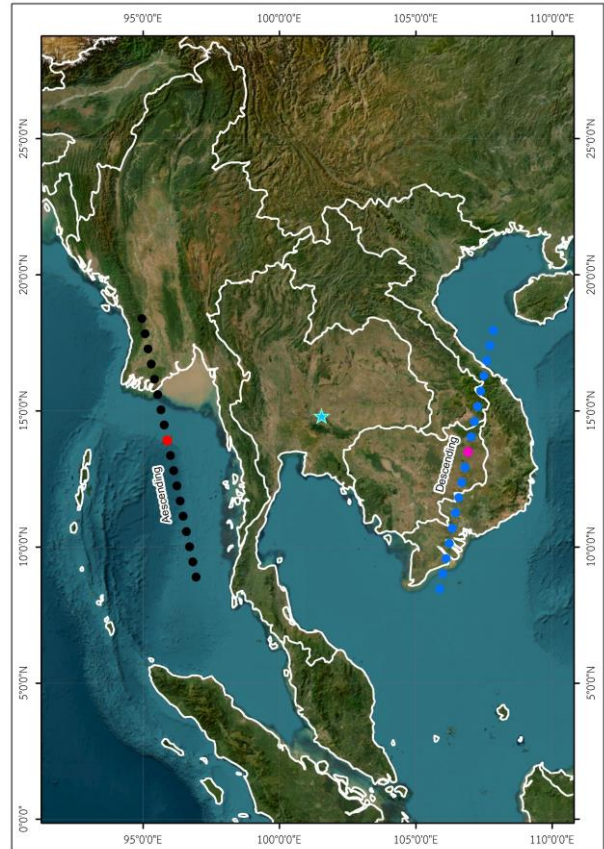
3.2.3 การคำนวณมุมในการรับสัญญาณเพื่อปรับ Corner Reflectors (CRs)

การคำนวณมุมในการรับสัญญาณเพื่อปรับ Corner Reflectors (CRs) ให้สามารถรับและสะท้อนสัญญาณจากดาวเทียม Sentinel-1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งใน ขาขึ้น (Ascending) และ ขาลง (Descending) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ Signal-to-Noise Ratio (SNR) และ Radar Cross Section (RCS) โดยขั้นตอนการคำนวณเริ่มต้นด้วย การอ่านข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมจากไฟล์ XML ซึ่งบรรจุรายละเอียดเชิงเวลาและพิกัดตำแหน่งในระบบพิกัด Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) ข้อมูลนี้สามารถดาวน์โหลดได้จาก Copernicus Open Access Hub ซึ่งให้ข้อมูล Precise Orbit Ephemerides (POD) ของ Sentinel-1 ที่แม่นยำ [10] ในการประมวลผล ข้อมูลพิกัด ECEF ถูกแปลงเป็น พิกัดภูมิศาสตร์ (Geodetic Coordinates: Latitude, Longitude, Altitude) โดยใช้ ฟังก์ชัน ecef2geodetic จากไลบรารี pyproj ซึ่งช่วยให้สามารถแสดงตำแหน่ง

ของดาวเทียมบนพื้นผิวโลกในรูปแบบที่เข้าใจง่ายขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณค่ามุม Azimuth และ Elevation รวมถึงระยะทาง Slant Range ระหว่างตำแหน่งดาวเทียมกับตำแหน่ง Corner Reflectors ที่ระบุไว้ที่ ละติจูด 14.801111 ลองจิจูด 101.554166 ความสูง 634.188 เมตร โดยใช้ฟังก์ชัน ecef2aer จาก pyproj3d เช่นกัน มุม Azimuth เป็นมุมที่วัดจากทิศเหนือ (True North) โดยหมุนตามเข็มนาฬิกา เพื่อหาทิศทางของดาวเทียมจากจุดอ้างอิง ในขณะที่ มุม Elevation เป็นมุมที่วัดจากเส้นขอบฟ้า (Horizon) ขึ้นไปยังตำแหน่งของดาวเทียม การคำนวณทั้งสองมุมนี้ช่วยให้สามารถปรับทิศทางของ CRs ได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้สอดคล้องกับทิศทางของคลื่นเรดาร์จาก Sentinel-1 เพื่อให้ CRs สามารถสะท้อนสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในขาขึ้น (Ascending Orbit) และขาลง (Descending Orbit) จำเป็นต้องปรับมุมรับสัญญาณ (Incidence Angle) ให้สอดคล้องกับ Azimuth Direction ของ Sentinel-1 โดยใน Ascending Orbit Azimuth Direction จะอยู่ในช่วงทิศตะวันตกเฉียงใต้ไปทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (SW-NE) ส่วนใน Descending Orbit Azimuth Direction จะอยู่ในช่วงทิศตะวันตกเฉียงเหนือไปทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) การปรับมุม CRs ให้สอดคล้องกับ Azimuth Direction ทั้งสองทิศทางนี้จะช่วยเพิ่ม Radar Cross Section (RCS) และ Signal-to-Noise Ratio (SNR) อย่างมีประสิทธิภาพ [27] การคำนวณ Incidence Angle ทำได้โดยใช้ข้อมูลวงโคจร (Precise Orbit Ephemerides, POD) เพื่อหามุมระหว่างแนวเส้นตรงที่ลากจากดาวเทียมมายังตำแหน่ง CRs กับเส้นตั้งฉากที่ผ่านตำแหน่ง CRs ซึ่งสามารถคำนวณได้จากมุม Elevation และระยะทาง Slant Range ที่ได้จากฟังก์ชัน ecef2aer การคำนวณนี้ช่วยให้สามารถปรับมุมของ CR ให้สอดคล้องกับ Incidence Angle ของ Sentinel-1 ซึ่งมีช่วงมุมตกกระทบระหว่าง 29° ถึง 46° เพื่อเพิ่มความเข้มของสัญญาณสะท้อน (Backscattering Intensity) และลด Decorrelation ที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของมุมตกกระทบ ในการปรับหน้าจากรับสัญญาณ Corner Reflectors สำหรับดาวเทียมขาขึ้น (Ascending) ได้ทำการปรับมุมจากทิศอาซิมุมมา 261.609119 องศา และปรับหน้ารับสัญญาณจากมุม Zenith 44.121199 องศา และสำหรับดาวเทียมขาลง (Descending) ได้ทำการปรับมุมจากทิศอาซิมุมมา 103.09890 องศา และปรับหน้ารับสัญญาณจากมุม Zenith 45.091437 องศา



รูปที่ 8 ขั้นตอนในการหาค่า RCS เพื่อนำมาคำนวณขนาดของ CRs ต่อไป



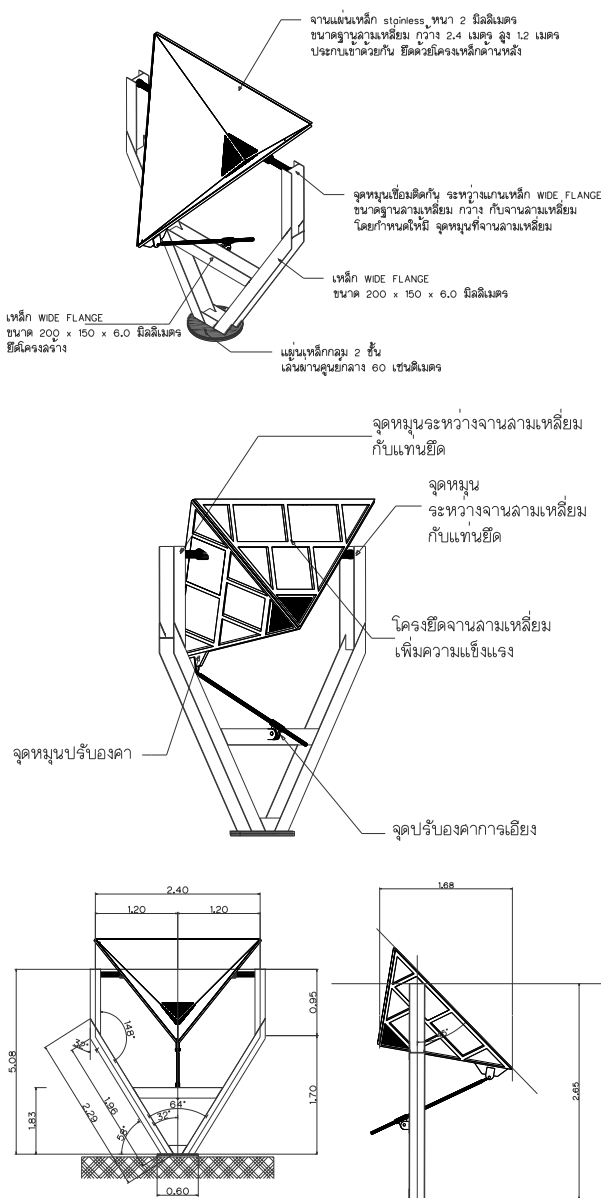
รูปที่ 9 ตำแหน่งติดตั้ง CR ตำแหน่งดาวเทียมที่ยิงสัญญาณลงมายัง CRs และแนวการเคลื่อนที่ของดาวเทียมขาขึ้น (Ascending) และดาวเทียมขาลง (Descending)

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิจัยขนาดของ Corner Reflector

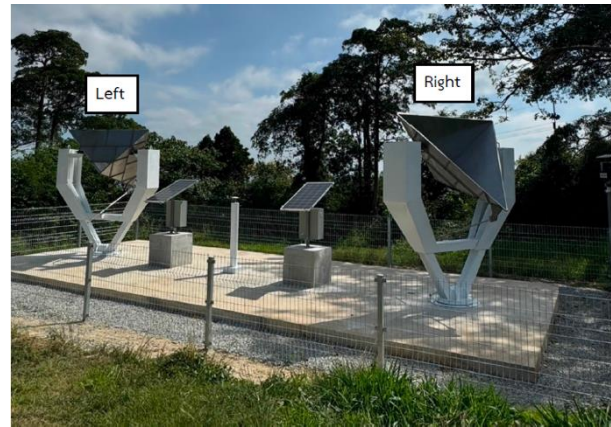
จากการคำนวณที่กล่าวมา อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึง สภาพแวดล้อมการติดตั้งในพื้นที่อ่างพักน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลัดตะคลองชลภาวัฒนาพบว่าไฮบริดกังหันลม (Hybrid Wind Turbines) ติดตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการสะท้อนแสงหรือสัญญาณที่สว่างกว่าจุดสะท้อนของ Corner Reflectors (CRs) ทำให้จุดสะท้อนของ CRs ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Clutter Interference ซึ่งเกิดจากสัญญาณสะท้อนที่รบกวนกัน (Signal Interference) ระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณหลายแหล่ง โดยเฉพาะจากกังหันลมที่มีโครงสร้างเป็นโลหะและมีการเคลื่อนไหวซึ่งทำให้เกิดการกระเจาคลื่น (Scattering) ในทิศทางที่ไม่แน่นอน ส่งผลให้ค่าความเข้มของสัญญาณจาก CRs มีความไม่เสถียรและทำให้การวิเคราะห์ InSAR Time-Series มีความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้การพิจารณาถึงความสะดวกและง่ายต่อการก่อสร้างเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากอ่างพักน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลัดตะคลอง ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่เข้าถึงยากและมีความชันสูง ทำให้การขนส่งและติดตั้ง CRs มีความท้าทาย การเลือกขนาดที่เหมาะสมจะช่วยลดความซับซ้อนในการผลิตและติดตั้งในภาคสนาม โดยยังคงประสิทธิภาพในการสะท้อนสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีการปรับขนาดหน้าจากรับของ CRs ให้ใหญ่ขึ้นจากขนาด 1.605 เมตร ที่ได้จากการคำนวณ โดยเลือกใช้ขนาด 2.40 เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ลงตัวและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริง ขนาด 2.40 เมตร นี้ช่วยให้ CRs สามารถสร้างจุดสะท้อนที่ชัดเจน (High-

Contrast Reflective Point) ซึ่งมีความเข้มของสัญญาณสูงพอที่จะต้านทาน Clutter Interference จากทั้งหมดที่อยู่ใกล้เคียงได้ซึ่งแสดงการคำนวณย้อนกลับด้านล่าง ซึ่งเมื่อแทนค่าขนาดของหน้าจาน CRs เท่ากับ 2.40 เมตร จะได้ค่า RCS เท่ากับ 44315.691 dBsm ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอแก่ความต้องการ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่ม Radar Cross Section (RCS) และปรับปรุง Signal-to-Noise Ratio (SNR) ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์ข้อมูล Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) มีความแม่นยำและเสถียรยิ่งขึ้น [25] การเลือกขนาดหน้าจานของ Corner Reflectors 2.40 เมตร ไม่เพียงแต่ช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากไฮบริดกัณฑ์เหล่านั้นแต่ยังทำให้การก่อสร้างและติดตั้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการดำเนินงานในภาคสนาม ซึ่งช่วยลดระยะเวลาและต้นทุนในการติดตั้ง นอกจากนี้ ขนาด 2.40 เมตร ยังเป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานร่วมกับ Sentinel-1 SAR ในย่านความถี่ C-band (5.405 GHz) ทำให้สามารถ วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นผิวและโครงสร้างพื้นฐาน ได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ [16]



รูปที่ 10 ขนาดและรายละเอียดของ Corner Reflector

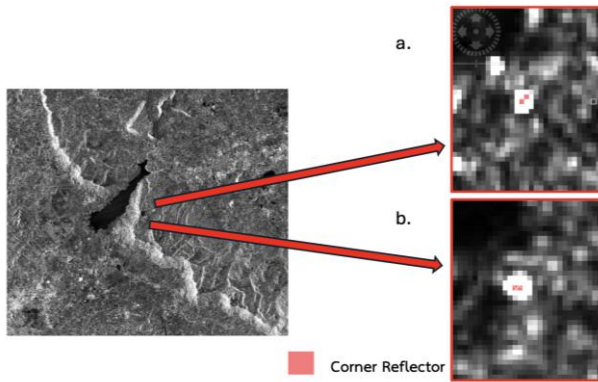
4.2 ผลการวิจัยจากการประมวลผลจากดาวเทียม Sentinel-1



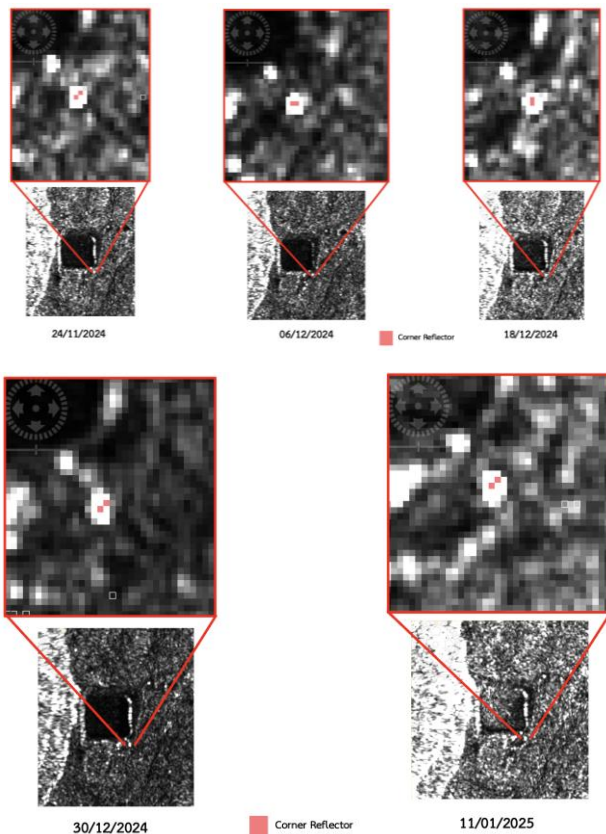
รูปที่ 11 Corner Reflector ติดตั้ง ณ อ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้าลำนาคองชล
ภาวนา จังหวัดนครราชสีมา

ตัวด้านซ้ายมือ : รับสัญญาณจากวงโคจรขาขึ้นของดาวเทียม
ตัวด้านขวามือ : รับสัญญาณจากวงโคจรขาลงของดาวเทียม

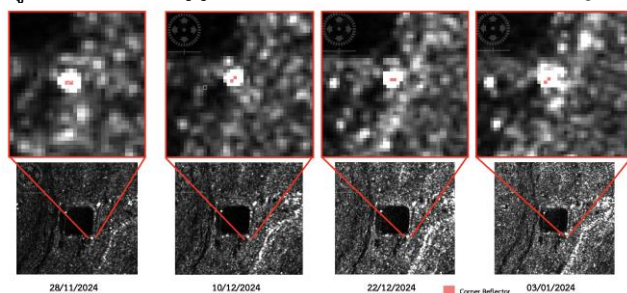
ผลการวิจัยพบว่า Corner Reflectors (CRs) ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีขนาด 2.4 เมตร x 1.2 เมตร และใช้วัสดุสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร สามารถสะท้อนสัญญาณเรดาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานร่วมกับ Sentinel-1 SAR ในย่านความถี่ C-band (5.405 GHz) ซึ่งสามารถเพิ่มค่า RCS และปรับปรุงค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) ได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การติดตั้ง CRs ที่อ่างพักน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวนา ยังช่วยยืนยันถึงความเหมาะสมของสถานที่ติดตั้ง โดยพิจารณาจาก สภาพแวดล้อมและมุมตกกระทบของคลื่นเรดาร์ ซึ่งเอื้อต่อการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นผิวได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเฝ้าระวังและประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างพื้นฐานตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองข้อมูลเรดาร์ที่มีความแม่นยำสูงในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [15, 24] จากการทดลองภาคสนามพบว่า CRs ที่ได้รับการออกแบบและติดตั้งสามารถสะท้อนสัญญาณเรดาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในช่วงเวลาที่ระดับน้ำเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อ CRs ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ในวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2567 ได้มีการรับสัญญาณจาก Sentinel-1 ในขาขึ้น (Ascending) เป็นครั้งแรกเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน 2567 และรับสัญญาณ ในขาลง (Descending) เมื่อวันที่ 28 พฤศจิกายน 2567 การวิเคราะห์ข้อมูล InSAR พบว่า CRs ปรากฏเป็นจุดสะท้อนที่สว่างชัดเจน (Bright Point) บนภาพเรดาร์ ซึ่งแสดงถึงค่าการสะท้อนที่สูงและเสถียรในทุกวงโคจรของ Sentinel-1 (ทั้ง Ascending และ Descending Orbits) ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่า CRs ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความเสถียรของข้อมูล InSAR ได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สามารถนำมาใช้ในการเฝ้าระวังและวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของพื้นผิวและโครงสร้าง



รูปที่ 12 a. ผลการรับสัญญาณครั้งแรกของดาวเทียมขาขึ้น (Ascending)
b. ผลการรับสัญญาณครั้งแรกของดาวเทียมขาลง (Descending)



รูปที่ 13 ผลการรับสัญญาณในแต่ละช่วงวันของดาวเทียมขาขึ้น (Ascending)



รูปที่ 14 ผลการรับสัญญาณในแต่ละช่วงวันของดาวเทียมขาลง (Descending)

5. บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและนำเสนอการใช้ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) สำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ เช่น อ่างเก็บน้ำและเขื่อน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางพลังงานและการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศ การใช้ InSAR เป็นวิธีที่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในระดับมิลลิเมตรได้อย่างแม่นยำและครอบคลุมทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลาอย่างมีประสิทธิภาพตามการใช้ InSAR อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีจุดอ้างอิงที่เสถียรสำหรับการสอบเทียบข้อมูล ส่งผลให้ Corner Reflectors (CRs) กลายเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้รับจากเรดาร์ดาวเทียม โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและพัฒนา CRs ให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานร่วมกับ C-band SAR (5.405 GHz) ซึ่งใช้ในดาวเทียม Sentinel-1 โดย CRs ที่ออกแบบต้องสามารถสะท้อนสัญญาณเรดาร์กลับไปยังแหล่งกำเนิดได้อย่างเสถียร เพื่อช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน และเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูล InSAR ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า CRs ขนาดฐานกว้าง 2.4 เมตร สูง 1.2 เมตร ผลิตจากสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้ง ที่อ่างพักน้ำตอนบนของโรงไฟฟ้าลำนาคองชลภาวัฒนา ซึ่งอยู่ภายใต้การดูแลของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในด้านการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ CRs จากการทดสอบภาคสนาม CRs ที่ออกแบบสามารถสะท้อนสัญญาณเรดาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงคลื่น C-band (5.405 GHz) และสามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและอุณหภูมิในพื้นที่ติดตั้ง ค่า Radar Cross Section (RCS) ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมระบบเรดาร์ แสดงให้เห็นว่า CRs ที่ออกแบบสามารถสร้างจุดสะท้อนที่มีค่าความเข้มสูงบนภาพเรดาร์ และช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูล InSAR มีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ การศึกษายังพบว่าการปรับมุมของ CRs ให้เหมาะสมกับทิศทางการรับสัญญาณของดาวเทียม Sentinel-1 มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการสะท้อนสัญญาณ หากเกิดข้อผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยในการติดตั้ง เช่น การปรับมุมที่ไม่ตรงกับแนวการโคจรของดาวเทียม อาจส่งผลให้ความสามารถในการสะท้อนลดลง และส่งผลต่อคุณภาพของข้อมูล InSAR ดังนั้น การออกแบบและติดตั้ง CRs จึงต้องคำนึงถึง มุมรับสัญญาณ (Incidence Angle) และ ทิศทางการสะท้อนของสัญญาณเรดาร์ (Backscattering Direction) เพื่อให้สามารถสะท้อนสัญญาณกลับไปยังเรดาร์ดาวเทียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การนำ CRs มาใช้ร่วมกับ InSAR ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลการเคลื่อนตัวของพื้นผิว แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการเฝ้าระวังภัยพิบัติทางธรณีวิทยา เช่น การทรุดตัวของดิน (Land Subsidence) การเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหว (Seismic Displacement) และการเปลี่ยนแปลงของเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำ (Structural Deformation Monitoring) ยกตัวอย่างเช่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 8.2 แมกนิจูดความลึก 10 กิโลเมตร มีศูนย์กลางอยู่ในประเทศเมียนมา แรงสั่นสะเทือนถึงประเทศไทยหลายพื้นที่รวม 63 จังหวัด และมีพื้นที่ได้รับความเสียหายจำนวน 18 จังหวัดรวมถึงในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร และเกิดอาฟเตอร์ช็อกตามมาอีกหลายครั้งจนสร้างความวิตกกังวลให้กับประชาชน การใช้ CRs ทำให้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการประเมินความเสี่ยงและวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐาน ในด้านความสำคัญของงานวิจัยและแนวทางในอนาคตผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า CRs ที่ออกแบบสามารถเพิ่มความแม่นยำของข้อมูล InSAR และช่วยให้สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้สนับสนุนการบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีความสำคัญทางยุทธศาสตร์ เช่น อ่างเก็บน้ำ หรือเขื่อนที่มีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานและจัดการทรัพยากรน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จากโครงการ Copernicus ของ European Space Agency (ESA) ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน 2567 ถึงเดือนมกราคม 2568 เผยแพร่โดย ASF DAAC ดาวน์โหลดข้อมูล เมื่อเดือนพฤศจิกายน 2565 ประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ SNAP (The Sentinel Application Platform) งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อภาคีวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านวิชาการและทรัพยากรสำหรับการดำเนินการวิจัย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย รวมถึงการให้ข้อมูลเชิงเทคนิคและอำนวยความสะดวกในการติดตั้งและทดสอบระบบที่อ่างพักน้ำตอนบนโรงไฟฟ้าลำตะคอง งานวิจัยนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากความช่วยเหลือจากทีมงานฝ่ายบำรุงรักษาโยธาของ กฟผ.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Valentina Macchiarulo, Pietro Milill, Chris Blenkinsopp and Giorgia Giardina. (2022). Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series. *Structural Health Monitoring* Volume 21, Issue 4 July 2022, pp. 1313-1956.
- [2] ธนวัฒน์ บุญยะผลึก (2565) การพัฒนาการติดตามความปลอดภัยของเขื่อนด้วย เทคโนโลยีอนุกรม เวลา InSAR Development of Dam Safety Monitoring with InSAR Time การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า 1-2.
- [3] นันทพร ปิยะมรัตน์ (2565) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลา อินซาร์เพื่อติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์ Application of Time-series InSAR Technology for Displacement Monitoring of the Srinakarin Dam การประชุมวิชาการวิศวกรรม โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า 1-2.
- [4] ชญาภา เลหาอะอุคมโซค (2566) การติดตามการเคลื่อนตัวของ โครงสร้างพื้นฐานโดยใช้เทคโนโลยี InSAR : กรณีศึกษาอ่างพักน้ำ ตอนบน โรงไฟฟ้าลำตะคองชลภาวัฒนา InSAR Technology for Displacement Monitoring of the Upper Reservoir of Lamtakong Jolabha Vadhana Power Plant การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, ภูเก็ต, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า 2-6.
- [5] ชยณัฐ ศิริสารณ, อังคณา พุ่มพวง, อนิรุทธ์ ลดาวิ, สรวิต สุขเวชัย และ อนุเผ่า อบแพทย์ (2563) วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของชั้นดิน ของกรุงเทพมหานครด้วยข้อมูล InSAR Subsidence Rate Analyzing of Bangkok Soil Profile with InSAR Dataการประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 2-3.
- [6] Xia Ye, H. Kaufmann, and X.F. Guo. (2004). Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-INSAR and Corner Reflectors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 70, No. 10, October 2004, pp. 1167-1172.
- [7] I. Hlaváčová a, L. Halounová a, P. Stanislavb. (2016). Sentinel-1 InSAR Processing Of Corner Reflector Information In The Northern-Bohemian Coal Basin. XXIII ISPRS Congress.
- [8] Petar Marinkovic, Gini Ketelaar, Freek van Leijen, and Ramon Hanssen. (2007). InSAR quality control: analysis of five years of corner reflector time series. *FRINGE 2007 Workshop*, pp. 1-6
- [9] Garthwaite, M.C. , Nancarrow, S., Hisiop, A., Thankappan, M., Dawson, J. H. and Lawrie, S. (2015). The design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System. Commonwealth of Australia (Geoscience Australia) , pp. 2-78.
- [10] [Matthew C. Garthwaite. (2017). On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-Frequency InSAR. *Geoscience Australia* , pp. 1-6.
- [11] Fengnian Chang, Shaochun Dong, Hongwei Yin, Xiao Ye, Zhenyun Wu, Wei Zhang, Honghu Zhu. (2024). 3D displacement time series prediction of a north-facing reservoir landslide powered by InSAR and machine learning. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* , pp. 3-17.
- [12] Yuxiao Qin, Daniele Perissin, and Ling Lei. (2013). The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation* Volume.
- [13] Josep RAVENTÓS, Carles COUSO, Javier GARCÍA, Spain. (2017). The use of InSAR technology to monitor ground and structural displacements. 7th International Conference on Engineering Surveying At, Lisbon.
- [14] Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (1998). Principles and Applications of Imaging Radar. *Manual of Remote Sensing*, Volume 2. Wiley.
- [15] Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. Wiley-Interscience.
- [16] Torres, R., et al. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, pp. 9-24.
- [17] Gernhardt, S., Bamler, R., & Eineder, M. (2015). Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. *Annals of GIS*, 21(3), pp. 241-252.
- [18] Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1982). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Addison-Wesley.
- [19] Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), pp. 441-500.
- [20] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), pp. 8-20.
- [21] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas:

- Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), pp. 9183-9191.
- [22] Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Springer.
- [23] Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1994). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10), pp. 19617-19634.
- [24] Xia Ye, H. Kaufmann, and X.F. Guo. (2004). Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-INSAR and Corner Reflectors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, pp. 1167-1172(6)
- [25] Gernhardt, S., Bamler, R., & Eineder, M. (2015). Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. *Annals of GIS*, 21(3), pp. 241-252.
- [26] Richards, M. A. (2009). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill.
- [27] Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Wiley-Interscience.
- [28] Krisztina Kelevitz , Tim J Wright , Andrew J Hooper , Senior Member, IEEE and Sivasakthy Selvakumaran , Member IEEE. (2022). Novel Corner-Reflector Array Application in Essential Infrastructure Monitoring. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, pp. 1-10.
- [29] Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), pp. 950-959.
- [30] Richard Czikhardt , Hans van der Marel and Juraj Papco (2021). An Open-Source Toolbox for Analyzing Time Series of Corner Reflectors in InSAR Geodesy. *Remote Sens.*
- [31] Andreas Piter, Mahmud Haghshenas Haghighi and Mahdi Motagh (2024). Challenges and Opportunities of Sentinel-1 InSAR for Transport Infrastructure Monitoring. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation.*
- [32] Ketelaar, V.B.H.; Marinkovic, P.; Hanssen, R.F. (2005). Validation of point scatterer phase statistics in multi-pass InSAR. In *Proceedings of the 2004 Envisat and ERS Symposium*, Salzburg, Austria, 6–10 September 2004; European Space Agency: Salzburg, Austria.
- [33] Yague-Martinez, N., Prats-Iraola, P., & Eineder, M. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), pp. 2220-2234.
- [34] Adam, N.; Kampes, B.; Eineder, M. (2015). Development of a scientific permanent scatterer system: Modifications for mixed ERS/Envisat time series. In *Proceedings of the 2004 Envisat and ERS Symposium*, Salzburg, Austria, 6–10 September 2004; European Space Agency: Salzburg, Austria.
- [35] XIN Jingyu, GU Jihong, , YANG Jie, CONG Zhou, DING Dazhi (2025). Design of corner reflector array arrangement and study of its scattering characteristics. *Chinese Journal Of Radio Science*.
- [36] Knott, E. F. (2006), *Radar Cross Section Measurements*, SciTech Publishing, Inc.
- [37] Doerry, A. W., and B. C. Brock (2009), *Radar Cross Section of Triangular Trihedral Reflector with Extended Bottom Plate Rep. SAND2009-2993*, Sandia National Laboratories, New Mexico.