

การวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์ ESAR ในเชิงปริมาณโดยใช้ฟังก์ชันอ้างอิง
แบบโพลาไรเซชัน
Quantitative Data Analysis of ESAR Data by Using Polarimetric
Focusing Function

พันตรี ผศ.ดร.นราเทพ พฤกษ์หิรัญ

กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
E-Mail: narathepp@gmail.com

บทคัดย่อ : ในปัจจุบันระบบเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เทคโนโลยีระบบเรดาร์ Synthetic Aperture Radar (SAR) เป็นหนึ่งในเครื่องมือสำคัญที่ใช้สำหรับการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลของพื้นผิวโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการจำแนกชนิดและประเภทของพื้นที่ต่างๆ

ในบทความนี้จะนำเสนอแนวทางเลือกสำหรับการจำแนกชนิดและประเภทของพื้นผิวโลก โดยใช้ตัวแปรที่อาศัยพื้นฐานของการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ตามลักษณะของโพลาไรเซชัน โดยจะใช้เป้าหมายเฉพาะชนิดต่างๆ จำนวนสามแบบคือแผ่นเหล็กเรียบ, แผ่นเหล็กเข้ามุมสองด้าน และแผ่นเหล็กเข้ามุมสามด้านมาเป็นพื้นฐานในการหาฟังก์ชันอ้างอิง ที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ SAR จากค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายโดยอาศัยหลักการทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ แล้วจึงนำเอาข้อมูลภาพแบบโพลาไรเซชันมาทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยตัวแปร the differential reflectivity และ the linear depolarization ratio เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันทั้งสามแบบ

คำสำคัญ: ระบบเรดาร์ Synthetic Aperture Radar, โพลาไรเซชัน, ฟังก์ชันอ้างอิง, การจำแนกชนิดเป้าหมาย, การออกแบบโมเดลเป้าหมาย

Abstract: Nowadays, the radar remote sensing technology is being developed rapidly and there are many applications. The synthetic aperture radar is one of important tools that can be used to explore and storage data of the Earth's surface, especially in the identification and classification of different areas.

In this paper, we will present a novel method to classify the Earth's surface based on the different backscattered polarized electromagnetic waves. We will use three types of canonical targets, such as flat plate, dihedral and trihedral corner reflector, to generate the polarized reference function based on the radar cross section by using the principle of Physical optics approximation. And the differential reflectivity and the linear depolarization ratio will be used to obtain the quantitative information of the ground surface.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR), Polarimetry, Focussing Function, Target Decomposition, Target Modelling

1. บทนำ

ด้วยสภาวะแวดล้อมในการดำรงชีวิต และการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วในสังคมโลกปัจจุบัน ได้ก่อให้เกิดความต้องการด้านการสื่อสารข้อมูลที่รวดเร็ว ทันเหตุการณ์ โดยเฉพาะในสภาวะการณ์ฉุกเฉิน ที่จำเป็นต้องใช้การประมวลผลข้อมูลและตัดสินใจดำเนินการเฉพาะหน้าด้วยความรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เกิดภัยทางธรรมชาติ เทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถมีส่วนช่วยเหลือในการรับมือกับภัยทางธรรมชาติก็คือ เทคโนโลยีการถ่ายภาพทางอากาศด้วยระบบกล้องถ่ายรูป ที่มีความคมชัดสูงจากดาวเทียมหรืออากาศยาน ซึ่งจะช่วยให้ผู้รับผิดชอบสามารถประเมินเหตุการณ์ และสามารถตอบสนองให้ความช่วยเหลือได้อย่างทันท่วงที แม้ว่าการถ่ายภาพด้วยกล้องจากมุมสูง จะมีประสิทธิภาพมากและให้รูปภาพที่คมชัด

แต่ขีดจำกัดสำคัญประการหนึ่งของกล้องถ่ายรูป คือสภาพภูมิอากาศ ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีก้อนเมฆบัง หรือเกิดพายุฝนฟ้าคะนองก็ไม่สามารถที่จะทำการถ่ายภาพในบริเวณพื้นที่นั้นได้ และขีดจำกัดที่สำคัญก็คือแหล่งกำเนิดแสงที่จำเป็นสำหรับการถ่ายภาพ ทำให้สามารถปฏิบัติการถ่ายภาพได้เฉพาะในตอนเวลากลางวัน และในสภาพอากาศเปิดเท่านั้น

เทคโนโลยี Synthetic Aperture Radar (SAR) จึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหา เนื่องจากสามารถทำการสร้างรูปภาพที่มีลักษณะคล้ายกับรูปภาพถ่ายโดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มาจากดวงอาทิตย์ โดยระบบเรดาร์ SAR จะทำงานโดยการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปแล้วทำการบันทึกสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศของระบบเรดาร์ ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปตาม

แนวเส้นทางการบิน จากเป้าหมายหรือพื้นผิวโลก ที่ทำการสำรวจ โดยสัญญาณที่สะท้อนกลับมา จะมีระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่กระจายไปยังวัตถุ และสะท้อนกลับยังระบบเรดาร์ รวมถึงความเข้มของสัญญาณที่แตกต่างกันไปตามสภาพของพื้นผิวโลกบริเวณนั้น หลังจากนั้นสัญญาณเรดาร์ที่บันทึกไว้ จะต้องผ่านกระบวนการประมวลผลในระบบดิจิทัล ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบสองมิติ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นข้อมูลรูปภาพที่มีขนาดของจุดแสดงผลที่แตกต่างกันไปตามภูมิประเทศ

ในบทความนี้จะนำเสนอ กรรมวิธีใหม่ ในการสร้างฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชัน จากเป้าหมายเฉพาะ เพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ SAR โดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามหลักการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อหาค่าค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายเฉพาะสามชนิดคือ แผ่นเหล็กเรียบ, แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน และแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน ค่าการกระเจิงและแพร่กระจายกลับมายังระบบเรดาร์นั้น จะขึ้นอยู่กับโพลาริเซชันของรูปคลื่นที่ใช้ในการส่ง และการรับสัญญาณเรดาร์ด้วย จากนั้นจะนำเอาข้อมูลที่ได้มาประมวลผลโดยใช้หลักการจำแนกประเภทของวัตถุด้วยตัวแปรสองแบบคือ the differential reflectivity และ the linear depolarization ratio โดยมีจุดประสงค์เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของฟังก์ชันอ้างอิงแบบใหม่ ในการช่วยจำแนกชนิดของเป้าหมายและพื้นผิวโลกด้วย

โดยในบทความนี้จะมีการแบ่งหัวข้อสำคัญในการนำเสนอออกเป็นส่วนๆ ดังต่อไปนี้ ในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวถึงหลักของการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง

ของเป้าหมาย, การจำลองการสะท้อนของคลื่นด้วยหลักการทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ (Physical Optics: PO), และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณโดยตัวแปร the differential reflectivity และ the linear depolarization ratio ในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ ซึ่งจะครอบคลุมไปถึงการประมาณค่าการสะท้อนแบบโพลาริเซชัน ที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ หัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของระบบเรดาร์ SAR การออกแบบโมเดลของเป้าหมายเฉพาะทั้งสามแบบคือ แผ่นเหล็กเรียบ, แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน และแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้านและข้อมูลเรดาร์ที่นำมาทดสอบ ในหัวข้อที่ 5 จะเป็นการนำเสนอผลการทดลอง โดยจะแบ่งออกเป็นค่าที่ได้จากหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายเพื่อนำมาใช้เป็นฟังก์ชันอ้างอิง สำหรับการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ และผลการทดลองที่ได้จากการประมวลผล โดยใช้หลักการจำแนกประเภทของวัตถุ the differential reflectivity และ the linear depolarization ratio ในหัวข้อที่ 6 จะเป็นการกล่าวสรุปผลและการวิจัย ที่จะสามารถทำได้ในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการสะท้อนกลับมายังสายอากาศภาครับของระบบเรดาร์จากวัตถุหรือเป้าหมายที่อยู่ในระยะไกล (far field) จะสามารถอธิบายเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่จะแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างคลื่นที่ตกกระทบ E^i และคลื่นสะท้อน E^s ในรูปของสมการเมตริกซ์การกระจัดกระจาย S_{pq} (Scattering Matrix) ได้ดังต่อไปนี้, [1]

$$E^s = \frac{e^{-jkR}}{R} [S_{pq}] E^i \quad (1)$$

หรือ

$$E^s = \begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \frac{e^{-jkR}}{R} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่ R คือระยะทางระหว่างสายอากาศและเป้าหมาย, K คือหมายเลขคลื่น (wave number), e^{-jkR}/R อธิบายการแพร่กระจายของแอมพลิจูดและเฟสของคลื่น, ตัวแปร S_{pq} คือค่าแอมพลิจูดของเมตริกซ์การกระจัดกระจาย โดยที่ค่าอินเด็กซ์ q และ p จะแสดงถึงโพลาไรเซชันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนตามลำดับ ค่าอินเด็กซ์ h และ v หมายถึงโพลาไรเซชันของคลื่นระนาบแนวนอน (horizontal) และแบบตั้ง (vertical) ตามระนาบของสนามไฟฟ้า

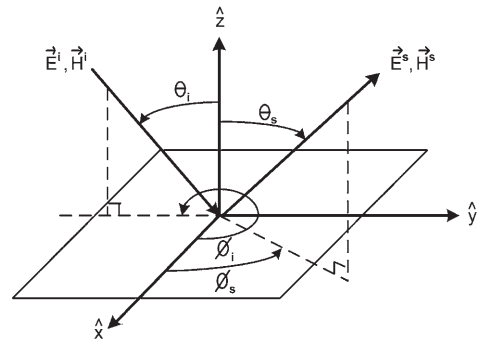
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมาย

สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายจะมีข้อมูลหลายอย่างเกี่ยวกับตัวของเป้าหมายนั้นๆ โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมาย (radar cross section) สามารถหาได้โดยการวัดหรือการคำนวณด้วยแบบจำลอง ตัวอย่าง เช่นในบทความทางวิชาการ [2], [3] ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมาย เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ SAR และการนำข้อมูลรูปภาพไปใช้งานในลักษณะต่างๆ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายจะอธิบาย

ได้เสมือนกับเป็นพื้นที่เรดาร์ภาคตัดขวาง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของวัตถุ, ความถี่ของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และโพลาไรเซชันของคลื่นที่ตกกระทบและคลื่นสะท้อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จะสามารถอธิบายในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_{pq} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_p^s(\theta_s, \phi_s)|^2}{|E_q^i(\theta_i, \phi_i)|^2} \quad (3)$$

ขนาดของมุมต่างๆ $(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)$ ในสมการที่ (3) จะแสดงอยู่ใน ภาพที่ 1 โดยใช้ระบบพิกัดฉากหรือระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งจะมีแกนพิกัดสามแกนตั้งฉากซึ่งกันและกันเรียกว่าแกน x, y และ z ขนาดของมุมเหล่านี้จะแสดงทิศทางของคลื่นที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวของวัตถุ และทิศทางของคลื่นสะท้อนกลับไปยังทิศทางของสายอากาศ



ภาพที่ 1 ค่าของมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 การจำลองการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้หลักการทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ

โดยทั่วไปนั้น ในการจำลองเพื่อหาค่าการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ หรือเป้าหมายต่างๆ จะใช้การหาค่าการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะตัวนำ หลักการสำคัญก็คือการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบกับการสะท้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุ ตามหลักการทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ (PO) จะสามารถบอกได้ว่าส่วนประกอบตามแนวสัมผัส (tangential) ของความเข้มสนามแม่เหล็ก H (magnetic field intensity) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุที่เป็นโลหะ จะเท่ากับส่วนประกอบ ตามแนวสัมผัสของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวของวัตถุ โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิว J_s (current density), ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ H^i และเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) จะอยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้, [4]

$$J_s = 2\hat{n} \times H^i \quad (4)$$

การหาค่าการสะท้อน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก B (magnetic flux density) และเวกเตอร์โพเทนเชียล A (vector potential) ในรูปของ $B = \Delta \times A$ เมื่อทำการแก้สมการแมกซ์เวลล์แล้ว จะสามารถเขียนสมการแสดงค่าเวกเตอร์โพเทนเชียลได้ดังต่อไปนี้

$$A(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S J_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (5)$$

โดยที่เวกเตอร์ $r = (x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z})$ คือจุดพิกัดที่ต้องการทราบค่าและเวกเตอร์ $r' = (x'\hat{x} + y'\hat{y} + z'\hat{z})$ คือจุดพิกัดของแหล่งกำเนิด หรือวัตถุเป้าหมาย การหาค่าของสนามแม่เหล็ก ในตำแหน่งระยะไกลจากแหล่งกำเนิด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E^s = -j\omega A \quad (6)$$

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์ข้อมูล หลังจากการประมวลผลสัญญาณเรดาร์แล้วสามารถทำได้หลายรูปแบบ ในบทความนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ตัวแปรสองแบบคือ the differential reflectivity (Z_{dr}) และ the linear depolarization ratio (L_{dr}) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะถูกนำไปใช้ในการประมวลผลข้อมูล ที่ได้จากระบบเรดาร์พยากรณ์อากาศ ค่า Z_{dr} จะสามารถแสดง ในรูปแบบเดซิเบล dB จากสัดส่วนระหว่างค่าความเข้มในการสะท้อนในช่องโพลาไรเซชันแบบ hh และค่าความเข้มในการสะท้อนในช่องโพลาไรเซชันแบบ vv ได้ดังสมการต่อไปนี้, [5], [6]

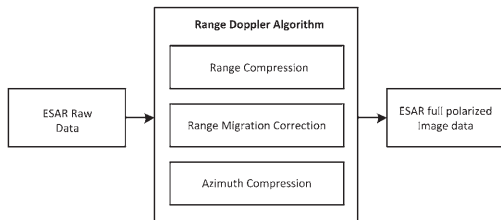
$$Z_{dr} = 10 \cdot \log_{10} \frac{S_{hh}}{S_{vv}} \quad (7)$$

ข้อมูลที่สำคัญของค่า Z_{dr} จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของวัตถุ โดยที่ค่า Z_{dr} จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์เมื่อวัตถุมีรูปร่างลักษณะทรงกลม ค่า Z_{dr} จะมีค่าเป็นบวกในกรณีที่วัตถุมีแกนในระนาบแนวนอน ที่มากกว่าแนวตั้ง และค่า Z_{dr} จะมีค่าเป็นลบเมื่อวัตถุมีขนาดของแกนในแนวตั้งมากกว่าขนาดของแกนในแนวนอน อีกตัวแปรหนึ่งที่นำมาทดสอบในบทความนี้ก็คือค่า L_{dr} ซึ่งจะได้จากสมการต่อไปนี้

$$L_{dr} = 10 \cdot \log_{10} \frac{S_{vh}}{S_{hh}} \quad (8)$$

3. ฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชัน

การประมวลผลสัญญาณของระบบเรดาร์ SAR นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน, [7], [8], [9], [10] ตัวอย่างเช่น The Range Doppler Algorithm, The Chirp Scaling Algorithm, The Omega-K Algorithm และ The SPE-CAN Algorithm ในบทความนี้จะใช้วิธี The Range Doppler Algorithm ทำการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ ESAR ของสถาบัน German Aerospace Center (DLR) ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ซึ่งมีขั้นตอนหลักอยู่สามขั้นตอนคือ range compression, range migration correction และ azimuth compression ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ SAR ผลด้วย The Range Doppler Algorithm

ในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ SAR โดยทั่วไปโดยใช้ The Range Doppler Algorithm นั้นจะใช้ฟังก์ชันอ้างอิงของเป้าหมายที่เป็นจุด (point target) ในสองขั้นตอนคือ range compression และ azimuth compression ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการทำงานของระบบเรดาร์ SAR

ตัวอย่างเช่น ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณ, ความถี่, อัตราเร็วในการส่งสัญญาณซ้ำ รวมไปถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศยานที่ใช้เป็นแพลตฟอร์มด้วย ในบทความนี้ได้ทำการออกแบบฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชัน ของเป้าหมายชนิดต่างๆ โดยการเพิ่ม $\sigma_{pq}(u, r)$ เข้าไปในสมการเพื่อนำมาใช้ในการประมวลผลในขั้นตอนของ azimuth compression ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้, [11]

$$h_{a,pq}(u, r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) [\sigma_{pq}(u, r)] e^{j(2\pi f_D t_a - \pi K_a t_a^2)} \quad (9)$$

และ

$$[\sigma_{pq}(u, r)] = \begin{bmatrix} \sigma_{hh}(u, r) & \sigma_{hv}(u, r) \\ \sigma_{vh}(u, r) & \sigma_{vv}(u, r) \end{bmatrix} \quad (10)$$

โดยที่ r คือระยะห่างระหว่างสายอากาศและเป้าหมาย, u คือตำแหน่งของสายอากาศระบบเรดาร์ตามแนวทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องบิน, ดาวเทียม, t_a คือเวลาอ้างอิงตามแนวการเคลื่อนที่, T_a คือเวลาที่เป้าหมายอยู่ในปริมหรือแนวการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้ในระบบเรดาร์, f_D คือความถี่ดอปเปลอร์และ K_a คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในแนว azimuth

ในบทความนี้จะทำการแปลงค่าของสนามแม่เหล็กในสมการที่ (6) จากระบบพิกัดแบบทรงกลมที่มีส่วนประกอบของเวกเตอร์คือ r, θ, ϕ ไปเป็นระบบพิกัดแบบฉากที่มีส่วนประกอบของเวกเตอร์คือ x, y, z จากนั้นจะนำเอาสนามไฟฟ้า ที่มีโพลาไรเซชันในแนวแกน y และสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันในแนวแกน z มาใช้สำหรับการจำลองผลในช่องสัญญาณภาครับของระบบเรดาร์ใน

โพลาริเซชันแบบแนวนอน h และในแบบแนวตั้ง v ตามลำดับดังสมการต่อไปนี้, [12]

$$\sigma_{hh}(u, r) = 4\pi R^2 \frac{|E_y^s(\theta_s, \phi_s)|^2}{|E_h^i(\theta_i, \phi_i)|^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{vh}(u, r) = 4\pi R^2 \frac{|E_z^s(\theta_s, \phi_s)|^2}{|E_h^i(\theta_i, \phi_i)|^2} \quad (12)$$

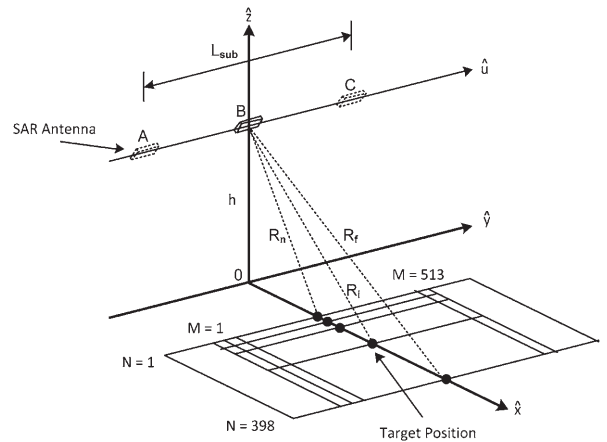
$$\sigma_{hv}(u, r) = 4\pi R^2 \frac{|E_y^s(\theta_s, \phi_s)|^2}{|E_v^i(\theta_i, \phi_i)|^2} \quad (13)$$

$$\sigma_{vv}(u, r) = 4\pi R^2 \frac{|E_z^s(\theta_s, \phi_s)|^2}{|E_v^i(\theta_i, \phi_i)|^2} \quad (14)$$

4. การออกแบบโมเดล

4.1 สภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR

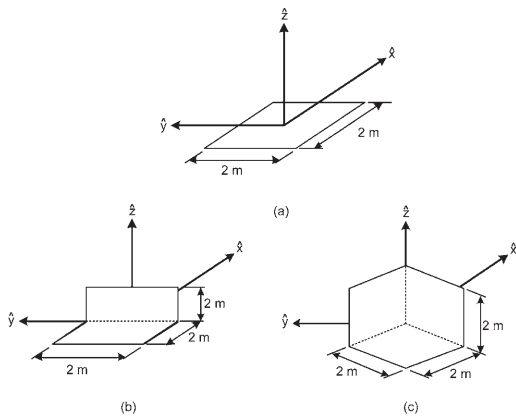
ระบบเรดาร์ SAR มีการทำงานแบบแอดทีฟ โดยจะมีแหล่งกำเนิดสัญญาณของตัวเอง หลักการทำงานที่สำคัญก็คือการสร้างสิ่งที่เรียกว่า synthetic aperture ขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของแพลตฟอร์มเช่นเครื่องบินหรือดาวเทียม, [13], [14], [15], [16] ในภาพที่ 3 จะเป็นการแสดงสภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR ที่ใช้ในการจำลองผล แนวการเคลื่อนที่ของสายอากาศคือ, โดยตำแหน่งของสายอากาศจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง C ในขณะที่สายอากาศอยู่ ณ ตำแหน่ง B แนวทิศทางหลักของรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศจะเป็นแนวตั้งฉากกับตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของพื้นผิวโลกที่กำลังสำรวจอยู่



ภาพที่ 3 สภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR ที่ใช้ในการจำลองผล

4.2 การจำลองเป้าหมาย

ในบทความนี้ได้เลือกเป้าหมายเฉพาะเพื่อนำมาสร้างเป็นฟังก์ชันอ้างอิงจำนวนสามแบบด้วยกัน ในภาพที่ 4 จะแสดงเป้าหมายเฉพาะทั้งสามแบบที่นำมาพิจารณาในบทความนี้คือ แผ่นเหล็กเรียบ, แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน และแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน ซึ่งเป้าหมายแต่ละชนิดจะแทนลักษณะของพื้นผิวโลกในภูมิประเทศจริงดังนี้ แผ่นเหล็กเรียบจะแทนพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นพื้นราบ, แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้านจะแทนลักษณะภูมิประเทศที่เป็นแนวสันกำแพงหรือแนวป่า และแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้านจะแทนลักษณะภูมิประเทศของตัวเมืองที่ประกอบไปด้วยบ้านเรือนและอาคารสูง



ภาพที่ 4 แบบจำลองของเป้าหมายเฉพาะ (a) แผ่นเหล็กเรียบ, (b) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน และ (c) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน

ในการคำนวณ หาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายแบบโพลาริเซชัน จะใช้หลักการของทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ PO โดยไม่ได้คำนึงถึงส่วนขอบของเป้าหมายแต่ละชนิด โดยจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวตามสมการที่ (4) จากนั้นจะใช้ฟังก์ชันอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อหาค่าของเวกเตอร์โพเทนเชียลตามสมการที่ (5) เพื่อนำไปสู่การหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศของระบบเรดาร์ตามสมการที่ (6) ต่อไปในการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะต้องคำนึงถึง ลักษณะทางของโครงสร้างของวัตถุหรือเป้าหมายนั้นๆ ด้วย ในกรณีของแผ่นเหล็กเรียบจะสามารถคำนวณค่าในระยะไกล (far field) ได้เลย แต่ในกรณีของแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน และแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้านซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่า จะต้องคำนึงถึงการแพร่กระจายและการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวบนแผ่นเหล็กรอบข้างด้วย ซึ่งจะต้องทำการคำนวณในระยะใกล้ (near field) , [17]

4.3 ข้อมูลเรดาร์ที่นำมาทดสอบ

ในบทความนี้ได้นำข้อมูลดิบ (raw data) มาจากระบบเรดาร์ ESAR ของสถาบัน German Aerospace Center (DLR) ซึ่งเป็นระบบเรดาร์ที่ใช้แพลตฟอร์มเป็นเครื่องบิน พื้นที่ที่ทำการเก็บบันทึกข้อมูลคือบริเวณสนามบินและตัวอาคารของสถาบันวิจัยเอง ซึ่งจะประกอบไปด้วยพื้นที่ที่เป็นบริเวณโล่งแจ้งและเรียบในส่วนของสนามบินบริเวณตอนกลางของพื้นที่, พื้นที่ที่เป็นบริเวณป่า โดยรอบบริเวณด้านล่างของพื้นที่ ที่ทำการทดสอบและส่วนของพื้นที่ที่ประกอบไปด้วยอาคารบ้านเรือนบริเวณด้านบนขวา และถัดมาทางซ้ายมือก็จะเป็นตัวอาคารขนาดใหญ่ของสถาบันวิจัย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพดาวเทียม และตัวแปรที่สำคัญของระบบเรดาร์ ESAR ที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ ตามลักษณะของภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมในภาพที่ 3 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 5 ภาพแสดงพื้นที่จริงของข้อมูลเรดาร์ SAR จาก Google Map

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่สำคัญของระบบเรดาร์ ESAR ของสถาบัน German Aerospace Center (DLR)

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ความถี่หลัก	f_c	1.3	GHz
ความกว้างแถบสัญญาณ	B	100	MHz
ความถี่ในการส่งสัญญาณ	f_{prf}	400	Hz
ความเร็วในการบิน	v	86.505	m/s
ความสูงในการบิน	h	3031.08	m
ระยะทางที่ไกลที่สุดในแนวแกน x	R_n	3344.89	m
ระยะทางที่ไกลที่สุดในแนวแกน x	R_f	5723.07	m

5. ผลการทดลอง

การดำเนินการทดลอง จะแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้คือ ในขั้นตอนแรกจะต้องทำการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบโพลาไรเซชัน ของเป้าหมายทั้งสามชนิดภายใต้สภาพแวดล้อมของระบบเรดาร์ SAR ขึ้นมาก่อน เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชัน ในการประมวลผล ในขั้นตอนของ azimuth compression จากนั้นจะนำเอาข้อมูลที่ได้ออกมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยค่า Z_{dr} และค่า L_{dr} เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันในการใช้จำแนกชนิดหรือประเภทของเป้าหมายบนพื้นดิน กับการใช้ฟังก์ชันอ้างอิงที่ใช้กันโดยทั่วไป

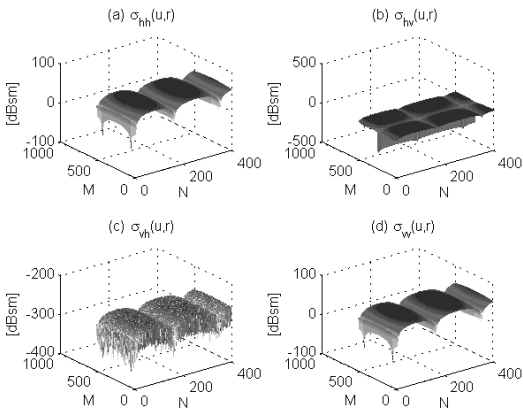
5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายชนิดต่างๆ

ในการคำนวณด้วยแบบจำลอง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายต่างๆ ในบทความนี้จะใช้สภาพแวดล้อมดังที่แสดงในภาพที่ 3 โดยตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสายอากาศ

จากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง C จะถูกแบ่งออกเป็นจำนวน 513 จุดซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษร M ตามแนวแกน y ซึ่งตำแหน่งของเป้าหมายจะคงที่อยู่ ณ พิกัด $y = 0$ ในแนวแกน x ตำแหน่งของเป้าหมายที่ใช้ในการคำนวณจะถูกจัดเป็น 397 ตำแหน่งซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ตัวอักษร N ตามระยะตั้งแต่ R_n ถึง R_f ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงนั้น ที่ตำแหน่งของสายอากาศตามแนวแกน y จะต้องทำการหาขนาดของมุมตกกระทบและมุมสะท้อนใหม่ ของทุกตำแหน่งของระบบเรดาร์ตามแนวการเคลื่อนที่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบและมุมสะท้อน จะมีผลกระทบต่อลักษณะและทิศทางของคลื่นแม่เหล็ก ที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวของเป้าหมายตามสมการที่ (4) ด้วย

ภาพที่ 6 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายของแผ่นเหล็กเรียบในโพลาไรเซชันแบบ (a) hh, (b) hv, (c) vh, (d) vv ผลที่ได้จากการประมวลผลในแต่ละโพลาไรเซชันจะมีลักษณะของเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกันในแนว

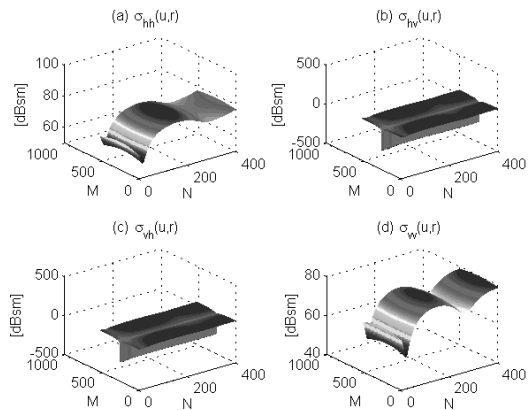
azimuth โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงสูงสุดของโพลาริเซชันแบบโคโพลาริเซชัน (hh, vv) จะอยู่ที่ตรงกลางในแนวแกน y แต่ละแนว และผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงในโพลาริเซชันแบบครอสโพลาริเซชัน (hv, vh) ก็จะมีค่าที่ต่ำกว่าโพลาริเซชันแบบโคโพลาริเซชันมากตามที่คาดการณ์ไว้



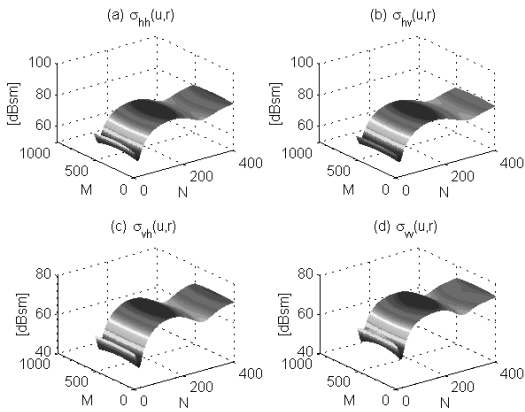
ภาพที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายของแผ่นเหล็กเรียบในโพลาริเซชันแบบ (a) hh, (b) hv, (c) vh, (d) vv

ในภาพที่ 7 จะเป็นการแสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้านในโพลาริเซชันแบบ (a) hh, (b) hv, (c) vh, (d) vv จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงในแบบโคโพลาริเซชันในรูปที่ 7 (a) และ (d) จะมีความคล้ายคลึงกัน เช่นเดียวกับกรณีของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงในแบบครอสโพลาริเซชันในรูปที่ 7 (b) และ (c) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงเอกลักษณ์สำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน โดยค่าที่ได้จะลดต่ำลงมากจนแทบจะหายไปแนวการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบในแนวประมาณขนานกับแนวแกน x

เป้าหมายเฉพาะแบบที่สาม ที่ได้เลือกมาทำการทดสอบจำลองผลค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงก็คือแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงไว้ในภาพที่ 8 ในโพลาริเซชันแบบ (a) hh, (b) hv, (c) vh, (d) vv ซึ่งจะเห็นได้ว่าในทุกโพลาริเซชันจะมีความต่อเนื่องของเส้นกราฟทั้งตามแนวแกน x และตามแนวแกน y แตกต่างจากเป้าหมายที่เป็นแผ่นเหล็กเรียบและแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน แต่ก็จะมีเอกลักษณ์ที่สำคัญคือลักษณะของรูปคลื่นในแนวแกน x ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นถึงผลกระทบของค่ามุมตกกระทบที่เปลี่ยนไปจะทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายของแผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้านในโพลาริเซชันแบบ (a) hh, (b) hv, (c) vh, (d) vv



ภาพที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายของแผ่นเหล็กเข้ามามุมฉากสามด้านในโพลาไรเซชันแบบ (a) hh, (b) hv, (c) vh, (d) vv

ตารางที่ 2 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงสูงสุดของเป้าหมายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบในหน่วย dBsm (decibel relative to one square meter) ในแต่ละโพลาไรเซชันซึ่งค่าต่างๆ ที่แสดงไว้ในตารางและจากการประมวลผลจะเป็นค่าเฉพาะสำหรับตัวแปรต่างๆ และสภาพแวดล้อมที่กำหนดไว้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองผล ก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงของเป้าหมายต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงสูงสุดของเป้าหมายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

โพลาไรเซชัน	ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงสูงสุด dBsm		
	แผ่นเหล็กเรียบ	แผ่นเหล็กเข้ามามุมฉากสองด้าน	แผ่นเหล็กเข้ามามุมฉากสามด้าน
hh	62.49	80.42	81.23
hv	13.83	40.69	80.78
vh	-254.20	36.14	72.00
vv	60.53	78.66	75.11

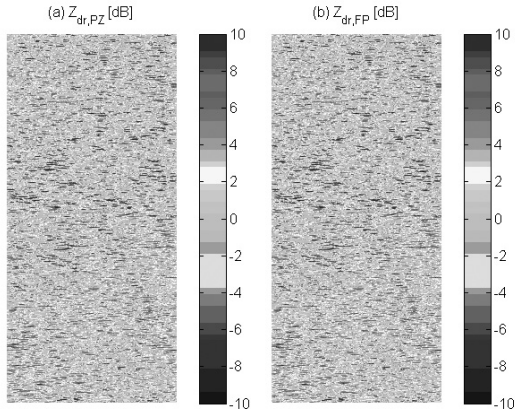
การทดสอบขั้นต่อไปก็คือการนำเอาข้อมูลรูปภาพในโพลาไรเซชันทั้งสี่แบบ ที่ผ่านกรรมวิธีการประมวลผลด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันมาผ่านกรรมวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณดังต่อไปนี้

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยค่า

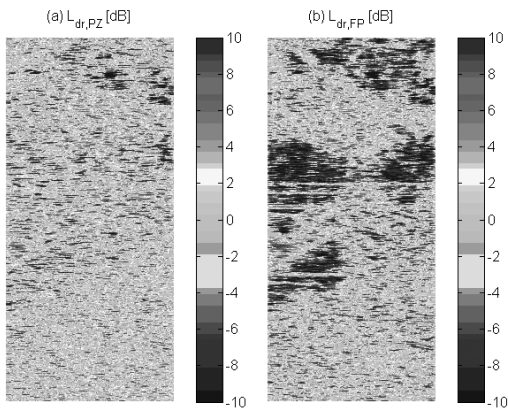
$$Z_{dr}$$

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยค่าตัวแปร the differential reflectivity (Z_{dr}) จะใช้ข้อมูลรูปภาพในโพลาไรเซชันแบบ hh

และ vv มาทำการวิเคราะห์ โดยในภาพที่ 9 จะแสดงข้อมูลรูปภาพแบบโพลาไรเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า Z_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของ (a) เป้าหมายแบบจุด (b) แผ่นเหล็กเรียบ และในภาพที่ 10 คือข้อมูลรูปภาพแบบโพลาไรเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า Z_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของ (a) แผ่นเหล็กเข้ามามุมฉากสองด้าน (b) แผ่นเหล็กเข้ามามุมฉากสามด้าน



ภาพที่ 9 ข้อมูลรูปภาพแบบโพลาริเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า Z_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันของ (a) เป้าหมายแบบจุด (b) แผ่นเหล็กเรียบ



ภาพที่ 10 ข้อมูลรูปภาพแบบโพลาริเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า Z_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันของ (a) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน (b) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน

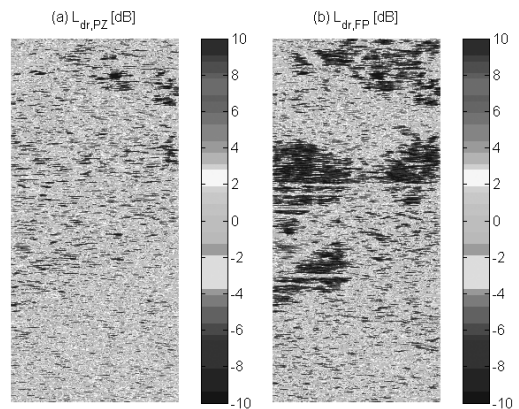
จากผลการวิเคราะห์ทั้งสี่แบบ จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นการใช้ฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันของเป้าหมาย

ชนิดต่างๆ จะไม่ทำให้เกิดการปรับปรุงการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยตัวแปร Z_{dr} เมื่อเทียบกับการประมวลผลด้วยฟังก์ชันอ้างอิงของเป้าหมายแบบจุดที่ใช้งานกันโดยทั่วไป

5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยค่า

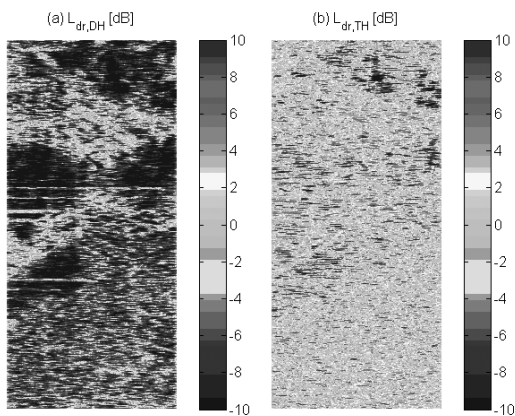
$$L_{dr}$$

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยค่า the linear depolarization ratio (L_{dr}) จะแสดงผลไว้ในภาพที่ 11 และภาพที่ 12 โดยในภาพที่ 11 เป็นข้อมูลรูปภาพแบบโพลาริเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า L_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันของ (a) เป้าหมายแบบจุด (b) แผ่นเหล็กเรียบ และในภาพที่ 12 คือข้อมูลรูปภาพแบบโพลาริเซชัน ที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า L_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันของ (a) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสองด้าน (b) แผ่นเหล็กเข้ามุมฉากสามด้าน



ภาพที่ 11 ข้อมูลรูปภาพแบบโพลาริเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า L_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาริเซชันของ (a) เป้าหมายแบบจุด (b) แผ่นเหล็กเรียบ

โดยสิ่งที่น่าสนใจคือภาพที่ 11 (a) ซึ่งได้ผ่านการประมวลผลด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของเป้าหมายแบบแผ่นเหล็กเรียบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในส่วนบริเวณที่เป็นพื้นเรียบ เช่น บริเวณลานของสนามบินและบริเวณทุ่งหญ้า ค่า L_{dr} จะมีขนาดน้อยกว่าศูนย์ ทำให้สามารถมองเห็นเป็นลักษณะเหมือนแนวเส้นแบ่งเขตระหว่างบริเวณที่เป็นพื้นที่เรียบ และบริเวณที่มีสิ่งปลูกสร้างหรือป่าไม้ได้ อีกทางเลือกหนึ่งก็คือการใช้ฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของเป้าหมายที่เป็นแผ่นเหล็กฉากเข้ามาสองด้านในภาพที่ 12 (a) ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่า L_{dr} ในบริเวณพื้นที่เรียบ และในส่วนบริเวณที่เป็นบ้านพักอาศัยบริเวณตอนบนขวาของพื้นที่ที่ทำการทดสอบนั้น จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์มาก ทำให้สามารถใช้เป็นทางเลือกในการจำแนกชนิดของพื้นผิวโลกได้อีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 12 ข้อมูลรูปภาพแบบโพลาไรเซชันที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยค่า L_{dr} หลังจากทำการ azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของ (a) แผ่นเหล็กเข้ามาฉากสองด้าน (b) แผ่นเหล็กเข้ามาฉากสามด้าน

6. สรุป

ในตอนต้นของบทความนี้ ได้ทำการสรุปทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัย การประมวลผลสัญญาณเรดาร์ระบบ SAR ฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของเป้าหมายต่างๆ จำนวนสามแบบคือ แผ่นเหล็กเรียบ แผ่นเหล็กเข้ามาแบบสองด้าน และแผ่นเหล็กเข้ามาแบบสามด้าน และได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลรูปภาพที่ผ่านกรรมวิธี azimuth compression ด้วยฟังก์ชันอ้างอิงดังกล่าว เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของฟังก์ชันอ้างอิงเหล่านั้นในการใช้ประโยชน์ในด้าน การจำแนกชนิดและประเภทของพื้นผิวโลก โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลของระบบเรดาร์ ESAR มาทำการทดสอบตามการใช้งานจริงของระบบ

จากผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงไว้ข้างต้นพบว่าตัวแปรค่า the differential reflectivity และ the linear depolarization ratio สามารถนำมาใช้เป็นทางเลือกสำหรับการจำแนกชนิดและประเภทของวัตถุบนพื้นผิวโลกได้ และหลังจากการประมวลผลด้วยฟังก์ชันอ้างอิงแบบโพลาไรเซชันของเป้าหมายเฉพาะที่เป็นแผ่นเหล็กเรียบและแผ่นเหล็กเข้ามาแบบสองด้านแล้ว จะสามารถใช้เป็นทางเลือกหรือตัวแปรเสริมในการจำแนกพื้นที่บริเวณที่มีลักษณะเป็นพื้นเรียบ และทุ่งหญ้าออกจากบริเวณพื้นที่ที่เป็นอาคารสิ่งปลูกสร้างได้

ในบทความนี้ ได้มีการกำหนดค่าเฉพาะของสภาพแวดล้อมและเป้าหมายต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลดิบของระบบเรดาร์ ESAR และการประมวลผลค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงเป้าหมายจะมีการประมาณค่าของสมการ เพื่อให้สามารถทำการประมวลผลได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ในกรณีที่มีการปรับค่าประมาณและเพิ่มความละเอียดของการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

ก็จะทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Prof. Dr.-Ing. Alberto Moreira แห่งสถาบัน German Aerospace Center (DLR) และ Prof.Dr.rer.nat. Madhukar Chandra แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี Chemnitz, Germany ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลดิบ (raw data) ของระบบเรดาร์ ESAR เพื่อนำมาใช้ในการวิจัย

8. บรรณานุกรม

- [1] Lee, J.S. and Pottier, E. (2009). *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [2] Dybdal, R.B. (1987). Radar cross section measurements, *Proceedings of the IEEE*, April 1987; Vol. 75, No.4, 498-516.
- [3] Uluisik, C., Cakir, G., Cakir, M. and Sevgi, L. (2008). Radar cross section (RCS) modeling and simulation, part 1: a tutorial review of definitions, strategies, and canonical examples, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, February 2008; Vol. 50, No.1, 115 – 126.
- [4] Balanis, C.A. (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey:
- [5] Yanovsky, F.J., Russchenberg, H.W.J., Ligthart, L.P. and Fomichev, V.S. (2000). Microwave Doppler-polarimetric technique for study of turbulence in precipitation, *Proceedings of IGARSS'00*, July 2000; Vol. 5, 2296–2298.

- [6] Phruksahiran, N. and Chandra, M. (2013). Quantitative data analysis of ESAR data, *URSI Germany: Advances in Radio Science*, 2013; Vol. 11, 291–295.
- [7] Cumming, I.G. and Wong, F.H. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, MA: Artech House, Norwood.
- [8] Soumekh, M. (1999). *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [9] Klausning, H. and Holpp, W. (2000). *Radar mit Realer und Synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung*, Oldenbourg, München.
- [10] Wu, C., Liu, K.Y., and M. Jin, M. (1982). Modeling and a correlation algorithm for space borne SAR signals, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronics Systems*, September 1982; Vol.Aes. 18, No.5, 563 – 575.
- [11] Phruksahiran, N. (2013). *Polarimetrische Streuungseigenschaften und Fokussierungsmethoden zur quantitativen Auswertung der polarimetrischen SAR-Daten*, PhD thesis, University of Technology Chemnitz, Germany
- [12] Phruksahiran, N. and Chandra, M. (2013). Polarimetric radar cross section under SAR geometry, *URSI Germany: Advances in Radio Science*, 2013; Vol. 11, 277–282.
- [13] Curlander, J.C. and McDonough, R.N. (1991). *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- [14] Skolnik, M.I. (1990). *Radar Handbook*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- [15] Tomiyasu, K. (1978). Tutorial review of synthetic-aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface, *Proceedings of the IEEE*, May 1978; Vol. 66, No.5, 563–583.
- [16] Elachi, C., T. Bicknell, T., Jordan, R.L. and Wu C. (1982). Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: applications, techniques, and technology, *Proceedings of the IEEE*, October 1982; Vol. 70, No.10, 1174–1209.
- [17] Knott, E.F. (1985). A progression of high-frequency RCS prediction techniques, *Proceedings of the IEEE*, February 1985; Vol. 73, No.2, 252–264.