



เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ต
Image Fusion of the Remote Sensing Image Data Using Wavelet
Combined Transformation

สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์

Supoj Rexrojrat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ต
Thesis Title Image Fusion of the Remote Sensing Image Data Using Wavelet
 Combined Transformation
ชื่อ นามสกุล สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์ ยิ้มมั่น)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า (บัณฑิตศึกษา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะ วิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ ฤทธิทอง)

วันที่ 29 เดือน เมษายน พ.ศ. 2559

ชื่อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ต
ชื่อ สกุล สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

การหลอมข้อมูลภาพเป็นเครื่องมือในการเอาข้อมูลการสำรวจจาก
ระยะไกลที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน และมีลักษณะที่หลากหลายมารวมกันเพื่อให้ได้เป็นข้อมูล
ตัวแทนใหม่โดยจะได้ข้อมูลภาพที่มีคุณภาพดีขึ้น ดังนั้นในงานปริญญาานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการ
หลอมภาพด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธี IHS หรือ Intensity-hue-saturation เปรียบเทียบกับ
วิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธี PCA หรือ Principal Component Analysis ผลการทดลองพบว่า
วิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธี IHS จะได้ความละเอียดที่สูงขึ้นและมีค่ารายละเอียดเชิงคลื่นที่
สูงขึ้น แต่วิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธี PCA จะได้ความละเอียดที่สูงขึ้นเช่นกันแต่ค่ารายละเอียด
เชิงคลื่นจะเสียหาย

คำสำคัญ : การหลอมภาพ, ไอเอสเอส, พีซีเอ, การแปลงเวฟเล็ต

Thesis title Image Fusion of the Remote Sensing Image Data Using Wavelet
Combined Transformation

Author Supoj Rexrojrat

Degree Master of Engineering

Major program Electrical engineering

Academic Year 2015

ABSTRACT

The data fusion is implement to take the survey data remotely from difference sources and have various looks to be combined to get a new agents. To get better quality of data, we will present a method of fusion by wavelet transform with IHS Transformation method or PCA Transformation method. From the results showed that both IHS and PCA Transformation method able to be gotten high quality but the specifications of wave from damage is different.

Keywords : Fusion, IHS, PCA, Wavelet Transform

กิตติกรรมประกาศ

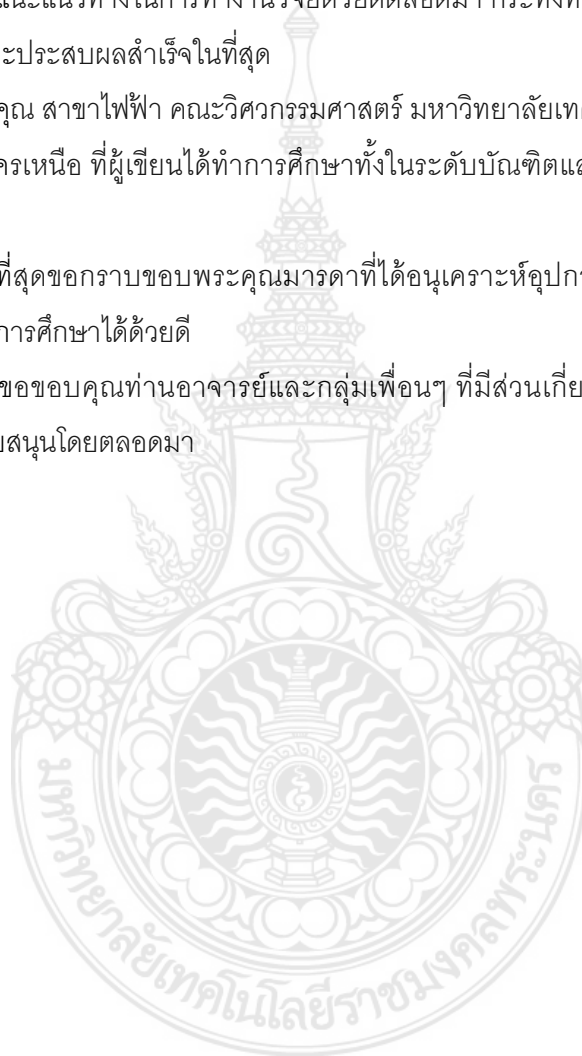
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือในการทำวิจัยจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์ชะ ซึ่งอาจารย์ได้กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยด้วยดีตลอดมา กระทั่งทำให้ผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยได้ดีและประสบผลสำเร็จในที่สุด

ขอขอบคุณ สาขาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ ที่ผู้เขียนได้ทำการศึกษาทั้งในระดับบัณฑิตและบัณฑิตศึกษา จนสำเร็จการศึกษา

สำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณมารดาที่ได้อนุเคราะห์อุปการะและให้กำลังใจมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบคุณท่านอาจารย์และกลุ่มเพื่อนๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ซึ่งคอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนโดยตลอดมา

สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ฉ)
สารบัญภาพ	(ช)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 สมมติฐาน	3
1.5 กรอบแนวความคิด	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 คำนิยามศัพท์	5
1.8 คำสำคัญ	5
บทที่ 2 พื้นฐานของการสำรวจระยะไกล	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ความหมายของรีโมตเซนซิง	6
2.3 พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.3.1 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็ก	8
2.3.2 ทฤษฎีอนุภาพ	13
2.4 การสะท้อนแสงของผิวโลก	14
2.4.1 การสะท้อนกลับ	14
2.4.2 การดูดกลืน	15
2.4.3 การส่งผ่าน	16
2.5 อุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียม	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง	24
2.7 กล้องถ่ายภาพสำหรับการสำรวจระยะไกล	27
2.8 ยานสำรวจ	29
2.9 การแปลงเวฟเล็ต	31
2.9.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต	31
2.9.2 ความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ต	37
2.9.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง	42
2.9.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบช่วง	46
2.10 การปรับค่าความสว่างของภาพ	57
2.10.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	57
2.11 การหาค่าสหสัมพันธ์	59
2.12 ขั้นตอนการต่อภาพแบบสหสัมพันธ์	60
2.13 ฟังก์ชันพื้นฐานการสหสัมพันธ์	61
2.14 การลบขอบภาพโดยวิธีการเฉลี่ยค่าระดับสีเทา	62
2.15 วิธีการปรับความสว่างให้สอดคล้องกัน	63
2.16 ทบทวนวรรณกรรมและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	65
บทที่ 3 เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ต	66
3.1 บทนำ	66
3.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก	66
3.3 วิธีการประยุกต์ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักกับงานรีโมตเซนซิง	72
3.3.1 นิยามของตัวแปร	72
3.3.2 วิธีการแปลงข้อมูลภาพ	73
3.3.3 วิธีการคำนวณหาค่าเมตริกซ์ Covariance	74
3.3.4 วิธีการคำนวณหา Eigenvalue และ Eigenvector	76
3.3.5 วิธีการโปรเจกชัน	79
3.3.6 วิธีการสเกลลิง	80

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.7 การปรับปรุงภาพโดยใช้การปรับเท่าสีสโตแกรม	81
3.4 การแปลงข้อมูลระบบ IHS (Intensity-hue-saturation)	82
3.4.1 การแปลงจากระบบสี RGB เป็น IHS	86
3.4.2 การแปลงจากระบบสี IHS มาเป็นระบบสี RGB	86
3.5 การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม	88
3.5.1 การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet transform	88
3.5.2 การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet transform	90
บทที่ 4 ผลการทดลอง	92
4.1 บทนำ	92
4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบ	92
4.2.1 ภาพต้นฉบับในระบบ Panchromatic	92
4.2.2 ภาพต้นฉบับในระบบ Multispectral (RGB)	93
4.3 ผลการทดสอบภาพในระบบ PCA ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต	94
4.4 ผลการทดสอบภาพในระบบ IHS ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการวิจัย	101
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	106
ประวัติผู้เขียน	111

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	การจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.2	ความยาวคลื่นที่ใช้ในอุปกรณ์วัดหลักๆ	21
2.3	คำจำกัดความของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง	23
2.4	คุณลักษณะของตัวตรวจวัดเชิงเส้น	26
2.5	ประเภทของยานสำรวจและวัตถุที่สังเกต	29
3.1	ตัวอย่างความแตกต่างของระหว่างตัวแปรเดิมลำดับที่ 1 และ 2	72
4.1	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสหสัมพันธ์ของภาพต้นฉบับและอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (PSNR) จากการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet Transform	96
4.2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสหสัมพันธ์ ของภาพต้นฉบับและอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (PSNR) จากการหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet Transform	98
4.3	สหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA โดยการทำให้ Matching Histogram	100
4.4	สหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA โดยไม่ทำให้ Matching Histogram	100

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
2.1	ลักษณะการเก็บข้อมูลโดยการสำรวจระยะไกล	8
2.2	คุณสมบัติของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าตามทฤษฎีคลื่น	9
2.3	ประเภทของการสำรวจระยะไกลที่สัมพันธ์กับย่านความยาวคลื่นทั้ง 3 ประเภท	12
2.4	เปรียบเทียบปรากฏการณ์การสะท้อนแสงในลักษณะการสะท้อนกลับหมดการสะท้อนแบบกระจาย และการสะท้อนแบบผสม	15
2.6	การเปรียบเทียบลายเส้นเชิงคลื่นของทรัพยากรหลัก	18
2.7	การจำแนกประเภทของอุปกรณ์	20
2.8	องค์ประกอบของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง	22
2.9	การจำแนกประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง	24
2.10	ความไวในการตอบสนองของหลอดแสง	25
2.11	ความไวของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบไฟโรอิเล็กทริก	26
2.12	ระบบกล้อง Zeiss RMK	28
2.13	ตัวอย่างลักษณะของ Morlet Wavelet	32
2.14	ลักษณะของสัญญาณชายชูชอยดัล	33
2.15	แสดงลักษณะของฟังก์ชันหน้าต่าง	33
2.16	ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่าต่างๆกัน	34
2.17	ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต	35
2.18	ลักษณะของสัญญาณที่มีหลายความถี่ที่ตำแหน่งเวลาต่างกัน	36
2.19	ลักษณะของผลการ Coefficient	37
2.20	ลักษณะของระนาบเวลาความถี่แบบคงที่	39
2.21	ลักษณะของระนาบเวลาและความถี่สำหรับการแปลงเวฟเล็ต	40

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
2.22	ลักษณะการแตกกระจายสัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่างๆ	41
2.23	ลักษณะของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ชนิดต่างๆ	41
2.24	การแปลงเวฟเล็ตในลักษณะของการ Inner product	45
2.25	ลักษณะของการแจกแจงสัมประสิทธิ์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต	46
2.26	สัญลักษณ์ของฟิลเตอร์แบงด์แบบ 2 ช่องสัญญาณ หรือ Bands separator	47
2.27	สัญลักษณ์โครงสร้างต้นไม้ในการวิเคราะห์ห่ออกเทพของฟิลเตอร์แบงด์	48
2.28	ลักษณะของการแยกแบนด์ความถี่ของออกเทพฟิลเตอร์แบงด์	48
2.29	ฟิลเตอร์แบงด์แบบ 2 ช่องสัญญาณในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต	51
2.30	ลักษณะของ DWT โดยใช้ Dyadic Tree structure (Octave filter bank)	52
2.31	ลักษณะของ IWT โดยการใช้ Dyadic tree structure	52
2.32	แผนภาพ Image Wavelet Decomposition	54
2.33	แผนภาพ Image Wavelet Reconstruction	54
2.34	ภาพแบนด์ย่อยที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตหลายครั้ง	55
2.35	ภาพถ่ายต้นแบบ Barbara ขนาด 512x512x8 บิต	56
2.36	(ก) ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตระดับที่ 1	56
2.36	(ข) ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตระดับที่ 2	56
2.37	พื้นที่ที่ต้องการจะนำมาต่อด้วยกันเพื่อให้ได้ข้อมูลภาพขนาดใหญ่ที่สุด	60
2.38	ส่วนที่ซ้อนทับของภาพที่ต้องการหาค่าสหสัมพันธ์	61
2.39	ลักษณะการซ้อนทับของข้อมูลภาพ	63
3.1	การหมุนของแกนในสองมิติ	70
3.2	Eigenvector และ Eiganvalue ในสองมิติ	71

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูง	71
3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักลำดับแรกของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ	71
3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบ	73
3.6 ขั้นตอนการแปลงข้อมูลภาพ	73
3.7 โพลีซาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector	76
3.8 โพลีซาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector(ต่อ)	77
3.9 โพลีซาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ)	78
3.10 ซาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ)	79
3.11 โพลีซาร์ทการสเกลลิ่ง	80
3.12 การจำลองภาพระบบสี IHS	83
3.13 รูปจำลองปริมาตรสีสำหรับการแปลงแบบ RGB เป็น IHS	84
3.14 แนวคิดสัมพันธ์ระหว่างระบบสี RGB และระบบสี IHS	87
3.15 resample สัญญาณภาพ Multispectral เป็น I H S	88
3.16 การทำ Histogram match ภาพ PAN กับ I	88
3.17 การหลอมภาพด้วยวิธีการนำเสนอ: IHS ร่วมกับ Wavelet transform	89
3.18 resample สัญญาณภาพ Multispectral เป็น PCA	90
3.19 การทำ Histogram match ภาพ PAN กับ I	90
3.20 การหลอมภาพด้วยวิธีการนำเสนอ: PCA ร่วมกับ Wavelet transform	91
4.1 ภาพ Panchromatic ต้นฉบับ ขนาด 2,449 X 613 พิกเซล	92
4.2 ภาพ Multispectral แบนด์ R (RED) ต้นฉบับ ขนาด 612 X 153 พิกเซล	93
4.3 ภาพ Multispectral แบนด์ G (Green) ต้นฉบับ ขนาด 612 X 153 พิกเซล	93
4.4 ภาพ Multispectral แบนด์ B (Blue) ต้นฉบับ ขนาด 612 X 153 พิกเซล	93

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า	
4.5	แบนด์ Lp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	94
4.6	แบนด์ LHp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	94
4.7	แบนด์ HLp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	94
4.8	แบนด์ HHp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	94
4.9	แบนด์ PC1' ภายหลังการปรับปรุงภาพ	95
4.10	แบนด์ PC2 ที่ได้จากการแปลง PCA	95
4.11	แบนด์ PC3 ที่ได้จากการแปลง PCA	96
4.12	ผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet Transform	96
4.13	แบนด์ Lp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	97
4.14	แบนด์ LHp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	97
4.15	แบนด์ HLp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	97
4.16	แบนด์ HHp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform	98
4.17	ผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี IHSร่วมกับ Wavelet Transform	98
4.18	ภาพต้นฉบับเปรียบเทียบผลลัพธ์	99

บทที่ 1

บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีการหลอมรวมข้อมูลภาพ เป็นการนำเอาข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล หรือรีโมทเซนซิง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแขนงหนึ่งที่ใช้เพื่อการบ่งบอกจำแนก และวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุต่างๆบนพื้นผิวโลก โดยปราศจากการสัมผัสโดยตรงแต่อาศัยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนหรือแผ่ออกจากวัตถุ ที่สามารถหาคุณลักษณะของวัตถุได้จากลักษณะการสะท้อนหรือการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุนั้นๆ โดยการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเป็นการนำเอาข้อมูลจากการสำรวจที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างกันและมีความหลากหลายมารวมกันนำมาสร้างเป็นข้อมูลใหม่ เพื่อมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงคุณภาพของข้อมูลให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ใช้งานในงานทางด้าน อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา อุตุนิยมวิทยา ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ สังคม วิศวกรรม และอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือความระเอียดทางข้อมูลได้มากขึ้นในการใช้งาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลภาพที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกคุณลักษณะข้อมูลตามความต้องการอย่างเหมาะสม การวิเคราะห์ข้อมูลภาพในปัจจุบันจะเป็นการวิเคราะห์กันในลักษณะการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากดาวเทียมเพียงหนึ่งดวงมาทำการวิเคราะห์ เนื่องมาจากข้อมูลภาพที่ได้จากดาวเทียมแต่ละดวงจะมีความสามารถในการเก็บข้อมูลภาพที่ครอบคลุมพื้นที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องวัดหรือเครื่องถ่ายภาพที่นำมาใช้ และการที่จะใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียมที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากมาวิเคราะห์ก็มักเกิดปัญหา ในกรณีที่ต้องการข้อมูลภาพที่มีความละเอียดและความถูกต้องมากๆ ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลภาพที่มีบริเวณกว้างออกไปจากข้อมูลภาพหนึ่งภาพสามารถเกิดขึ้นได้ จึงต้องเป็นการนำภาพอีกชุดหนึ่งในบริเวณที่ใกล้เคียงกันมาประกอบการพิจารณา ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้ดังนั้นเพื่อที่จะอุปสรรคดังกล่าว จึงได้เสนอให้มีการนำข้อมูลภาพที่อยู่บริเวณใกล้เคียงหลอมรวมกันให้ได้ภาพเดียวกันทำให้คุณภาพของ

ข้อมูลภาพมากขึ้น เพื่อสะดวกในการนำไปวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาทำการหลอมรวมข้อมูลภาพด้วยกันอยู่หลากหลายรูปแบบและหลากหลายวิธี เช่น lidar-multispectral stack, optical-SAR stack, RGB Color Composite, Brovey Transformation, IHS Transformation, Principal Component Analysis (PCA), Wavelet Transformation และ Ehler Fusion ซึ่งแต่ละวิธีอาจจะมีผลของข้อมูลภาพและองค์ประกอบของภาพที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ท โดยวิธี IHS Transformation และ Principal Component Analysis (PCA) ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ทในการหลอมรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางข้อมูลของภาพและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการนำข้อมูลที่มีประสิทธิภาพไปใช้วิเคราะห์ในงานทางด้านอื่นที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลภาพในหนึ่งกระบวนการจะประกอบไปด้วยขั้นตอนมากมายสำหรับหนึ่งข้อมูลภาพที่ต้องการซึ่งการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมหากจำเป็นต้องใช้ข้อมูลภาพที่มากกว่าหนึ่งภาพ ต้องเสียเวลาในการวิเคราะห์มากพอสมควร เนื่องจากข้อมูลภาพจากดาวเทียมเพียงหนึ่งข้อมูลภาพไม่อาจจะครอบคลุมบริเวณที่ต้องการศึกษาได้ครบถ้วน จึงต้องนำข้อมูลภาพในบริเวณใกล้เคียงทำการวิเคราะห์ร่วมซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือ

- เพื่อต้องการศึกษาข้อมูลภาพทั้งที่ได้จากดาวเทียมดวงเดียวกันและต่างกัน
- เพื่อต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่มีค่าความละเอียดต่างกันนำมาหลอมรวมเข้าด้วยกัน
- เพื่อต้องการศึกษาข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ภาพหลังจากการปรับแก้ค่าความละเอียดของข้อมูลภาพให้เท่ากันเปรียบเทียบจากภาพเดิม
- เพื่อต้องการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของภาพถ่ายดาวเทียมที่ภายหลังจากการปรับแก้ค่าความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมและการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายระยะไกลจากดาวเทียม โดยวิธี การแปลงเว็บลีตพร้อมกับวิธี IHS หรือ Intensity-Hue-Saturation เปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเว็บลีตพร้อมกับวิธี PCA หรือ Principal Component Analysis เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ผลที่ได้ระหว่างวิธีการดังกล่าว ซึ่งผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงค่าสหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบน ของภาพถ่ายดาวเทียม โดยวิธีการเปรียบเทียบการทำ Matching Histogram และไม่ทำ Matching Histogram ทำให้ทราบถึงผลการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียมจากวิธีขั้นต้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นถึง ความละเอียดและรายละเอียดเชิงคลื่น ในแต่ละวิธีที่ต่างกัน

1.4 สมมติฐาน

ภาพถ่ายระยะไกลจากดาวเทียมที่มีที่มาแตกต่างกัน อาจจะมาจกดาวเทียมต่างกันหรือแต่ละช่วงเวลานั้น สามารถปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายระยะไกลจากดาวเทียม โดยการหลอมรวมภาพ สามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ วิธีการแปลงเวฟเล็ท วิธี PCA (Principal Component Analysis) และวิธี IHS (Intensity-Hue-Saturation) ซึ่งแต่ละวิธีที่นำมาใช้ในการปรับปรุงภาพถ่ายดาวเทียมจะมีคุณลักษณะผลลัพธ์ที่ได้หลังการปรับปรุงแตกต่างกัน ดังนั้นจากวิธีการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีดังกล่าวร่วมกับการทำ Matching Histogram จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียมให้มีความละเอียดและรายละเอียดเชิงคลื่นให้ดีขึ้น เพื่อสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในงานที่เกี่ยวข้องได้อย่างสะดวกและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียมอาจมีปัจจัยในการพิจารณาแตกต่างกันนั้น ทั้งในเวลา สถานที่ คุณภาพและรายละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียม ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียมโดยการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธี เทคนิคการหลอมรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ทและเปรียบเทียบคุณภาพ ค่าสหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวิธีการดังกล่าวเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการนำไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.5 กรอบแนวความคิด



1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากผลการวิจัยการทดลองวิธีเทคนิคการหลอมรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเลิตนั้น จะทำให้ทราบถึงข้อมูลที่มาและทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ทฤษฎีการแปลงเวฟเลิตและทฤษฎีที่ใช้ร่วมในการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดาวเทียม นำมาซึ่งผลลัพธ์ในการปรับปรุงคุณภาพการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในงานด้านต่างๆ เช่น ช่วยเพิ่มความถูกต้องของการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ช่วยเพิ่มรายละเอียดหรือความชัดเจนในการจำแนกวัตถุ งานทางด้านธรณีวิทยาและงานทางด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.7 คำนิยามศัพท์

ดาวเทียม วัตถุที่มนุษย์สร้างขึ้นเลียนแบบดาวบริวารของดาวเคราะห์ เพื่อให้โคจรรอบโลกหรือรอบพลาพลาอื่น มีอุปกรณ์สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับอวกาศและถ่ายทอดข้อมูลนั้นมายังโลก วัตถุประสงค์ขณะดังกล่าวที่โคจรรอบโลก ใช้เป็นอุปกรณ์โทรคมนาคมด้วย เช่น ถ่ายทอดคลื่นวิทยุและโทรทัศน์ข้ามทวีป.

ภาพถ่ายดาวเทียม ภาพที่ได้จากการส่งดาวเทียมที่มีการติดตั้งเครื่องถ่ายภาพที่สามารถขยายและจำแนกความแตกต่างของสิ่งต่างๆ ที่ปรากฏบนผิวโลก โดยอาศัยการสะท้อนรังสีความร้อนของสิ่งต่างๆบนผิวโลก ข้อมูลจากดาวเทียม เป็นสัญญาณตัวเลขที่ได้รับ ณ สถานีรับสัญญาณดาวเทียมภาคพื้นดิน ซึ่งกระจายอยู่ในบางประเทศทั่วโลก เมื่อสถานีรับสัญญาณภาคพื้นดินได้รับข้อมูลตัวเลขที่ส่งมาแล้ว จึงแปลงตัวเลขออกเป็นภาพอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ภาพถ่ายดาวเทียม

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP - Digital Signal Processing) สัญญาณที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ มักจะอยู่ในรูปของสัญญาณแบบแอนะล็อกหรือเป็นหมายถึงสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา ในแง่โครงสร้าง การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะหมายถึง เพื่อทำการดัดแปลงสัญญาณซึ่งอยู่ในรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าแบบแอนะล็อกดังกล่าวเหล่านั้นให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อทำการประมวลผลโดยอาศัยตัวประมวลผลดิจิทัล คำว่าการประมวลผล หมายถึงการใช้ทฤษฎีคณิตศาสตร์เพื่อการคำนวณ การดัดแปลง หรือ การจัดรูปแบบของสัญญาณ กับสัญญาณที่อยู่ในรูปของสัญญาณ

1.8 คำสำคัญ

การหลอมภาพ, ไอเอสเอส, พีซีเอ, การแปลงเวฟเล็ต

บทที่ 2

พื้นฐานของการสำรวจระยะไกล

2.1 บทนำ

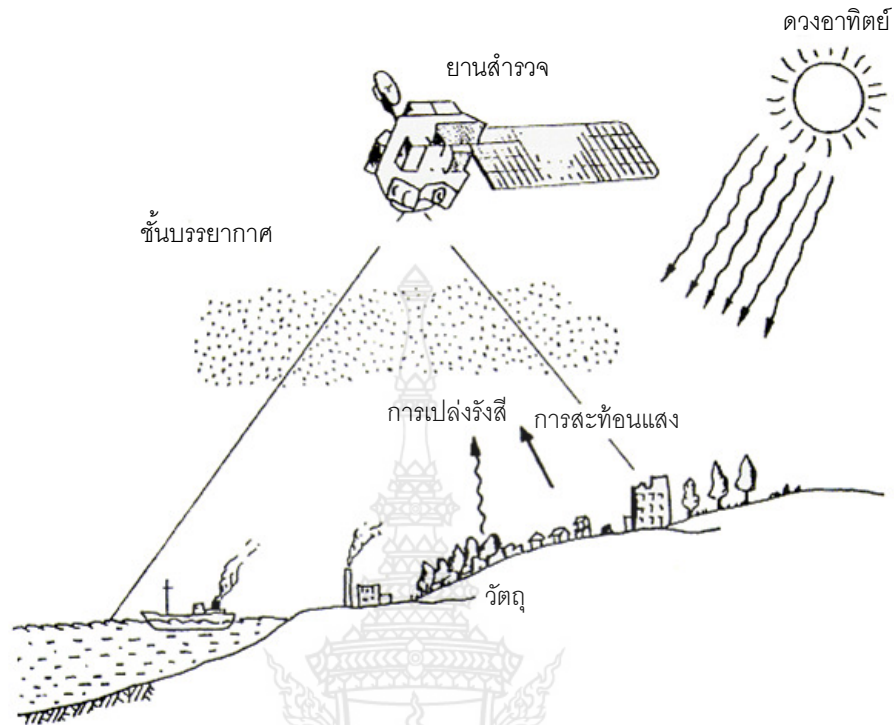
ในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาของรีโมตเซนซิงและองค์ประกอบต่างๆของการสำรวจระยะไกลรวมทั้งทฤษฎีเบื้องต้นของเวฟเล็ท ที่ใช้ในการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีการผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ท ซึ่งองค์ประกอบต่างๆอาจมีปัจจัยและผลกระทบในการวิเคราะห์การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจส่วนประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์และทฤษฎีของการสำรวจระยะไกลเสียก่อน เพื่อจำแนกข้อมูลที่ได้รวมถึงผลกระทบต่างๆในการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ก่อนจะทำการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีผสมการแปลงเวฟเล็ท ทั้งนี้จะมีเนื้อที่เกี่ยวข้องกับ การสะท้อนแสงของผิวโลก อุปกรณ์บนดาวเทียม อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง กล้องถ่ายภาพระยะไกลรวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการแปลงเวฟเล็ท การปรับค่าความสว่างของภาพ ฯ ซึ่งใช้เป็นปัจจัยในการวิเคราะห์

2.2 ความหมายของรีโมตเซนซิง

โดยคำจำกัดความ รีโมตเซนซิง (Remote Sensing) หมายถึงการสำรวจระยะไกลที่ปราศจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างอุปกรณ์สำรวจและเป้าหมายที่ต้องการสำรวจ แท้จริงแล้วรู้จักรูปแบบของรีโมตเซนซิงในทางธรรมชาติที่มีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ เช่น การได้กลิ่น การได้ยิน และการมองเห็น การมองเห็นด้วยตาของมนุษย์มีลักษณะเทียบเคียงกับรีโมตเซนซิงที่ได้จากการประดิษฐ์มากที่สุด โดยมีร่างกายเปรียบเสมือนของฐานของเครื่องสำรวจ และมีดวงตาเป็นอุปกรณ์สำรวจที่มีความสามารถในการมองเห็นสิ่งต่างๆ จากการตกกระทบของแสงที่วัตถุแล้วสะท้อนเข้าสู่

ตา ซึ่งมีความไวทั้งระดับความเข้มและความถี่ของคลื่นแสง ทำให้สามารถแยกแยะระดับความมืดหรือสว่าง ตลอดจนสีเส้นต่างๆได้

ทั้งนี้ถือได้ว่ารีโมตเซนซึ่งเป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแขนงหนึ่ง ที่ใช้ในการบ่งบอกจำแนก หรือ วิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุต่างๆ โดยปราศจากการสัมผัสโดยตรง แต่จะอาศัยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อน หรือแผ่ออกมาจากวัตถุ เป็นต้นกำเนิดของข้อมูลที่สำคัญจากระยะไกล อย่างไรก็ตาม วัตถุอื่นๆเช่น ความโน้มถ่วง หรือสนามแม่เหล็ก ก็อาจนำมาใช้ในการสำรวจระยะไกลได้เช่นกัน เครื่องมือที่วัดค่าพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนหรือแผ่ออกมาจากวัตถุเรียกว่า อุปกรณ์วัดจากระยะไกล (Remote Sensor) หรืออุปกรณ์วัด (Sensor) ตัวอย่างเช่น กล้องถ่ายภาพหรือเครื่องกวาดภาพ(Scanner) สามารถหาคุณลักษณะของวัตถุได้จากลักษณะการสะท้อนหรือการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุนั้นๆ กล่าวคือ " วัตถุแต่ละชนิดจะมีลักษณะการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีที่เฉพาะตัวและแตกต่างกัน ถ้าวัตถุหรือสภาพแวดล้อมเป็นคนละประเภทกัน " การสำรวจจากระยะไกลจึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจำแนก วิเคราะห์คุณลักษณะและเข้าใจวัตถุหรือสภาพแวดล้อมต่างๆจากลักษณะเฉพาะตัวในการสะท้อนแสงหรือแผ่รังสี การสำรวจระยะไกลโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นได้ในภาพที่ 2.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกลเหล่านี้จะผ่านกระบวนการอัตโนมัติด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์และการแปลด้วยตา จากนั้นจึงนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษา การใช้ที่ดิน ป่าไม้ ธรณีวิทยา สภาพแวดล้อม ฯลฯ จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับรีโมตเซนซึ่งทั้งส่วนที่เป็นธรรมชาติ และส่วนที่ได้จากการประดิษฐ์ขึ้น นั่นก็คือ คลื่นแสง ทำหน้าที่เสมือนสื่อกลางระหว่างอุปกรณ์สำรวจและเป้าหมาย คลื่นแสงเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วทางธรรมชาติ เช่นพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์หรือที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลก ขณะเดียวกันสามารถที่จะสร้างพลังงานดังกล่าวนี้ได้ เพื่อช่วยในการสำรวจกรณีที่พลังงานธรรมชาติไม่อำนวยหรือยังมีจุดบอด เช่น ไม่สามารถผ่านก้อนเมฆที่บดบังเป้าหมายได้



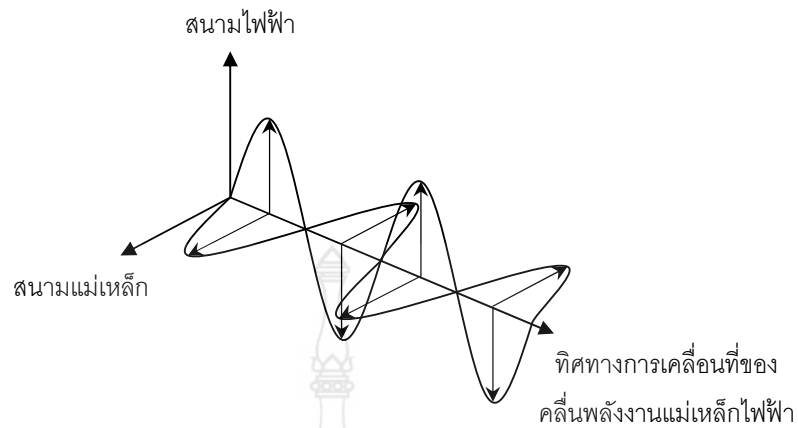
ภาพที่ 2.1 ลักษณะการเก็บข้อมูลโดยการสำรวจระยะไกล

2.3 พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งในหลายๆรูปแบบของพลังงาน เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานเคมี และพลังงานกล พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไปยังเป้าหมายต่างๆได้ โดยการแผ่รังสี การอธิบายปรากฏการณ์ที่ค่อนข้างจะซับซ้อนสามารถอาศัยทฤษฎีอนุภาค

2.3.1 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็ก

พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางของสนามไฟฟ้า และทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 คุณสมบัติของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าตามทฤษฎีคลื่น

การเคลื่อนที่ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะของคลื่นจึงสามารถที่จะกำหนดความแตกต่างของพลังงานได้ สังเกตความยาวคลื่น (λ) คือ ระยะจากยอดคลื่นหนึ่งถึงอีกยอดคลื่นหนึ่ง และความถี่ (f) ซึ่งก็คือจำนวนยอดคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านจุดหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยเวลาโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ และความเร็วแสง (c) ดังสมการที่ (2.1)

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

โดยที่ c ค่าคงที่ของความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 3×10^8 เมตร/วินาที ในสุญญากาศ

ย่านความยาวคลื่นของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ รังสีแกมมา (Gamma) รังสีเอ็กซ์ (X-Ray) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-Ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (Vision light) รังสีอินฟราเรด (IR-Infrared) จนถึงคลื่นวิทยุ (Radio wave) โดยเรียงลำดับจากความยาวคลื่นสั้นไปจนถึงความยาวคลื่นยาวตามลำดับ

ดังในตาราง 2.1 แสดงชื่อ และย่านความถี่ต่างๆของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้ามีสิ่งที่น่าสนใจก็คือ การแยกประเภทของรังสีอินฟราเรด และคลื่นวิทยุอาจจะแตกต่างกันไปขึ้นกับสาขาวิชาการนั้นๆตามที่แสดงในตารางเป็นตัวอย่างที่ใช้กันทั่วไป

ตารางที่ 2.1 การจำแนกพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

ประเภท		ความยาวคลื่น	ความถี่
อัลตราไวโอเล็ต		100 ~ 0.4 μm	750 ~ 3000 THz
แสงที่ตามองเห็น		0.4 ~ 0.7 μm	430 ~ 750 THz
อินฟราเรด	อินฟราเรดใกล้	0.7 ~ 1.3 μm	230 ~ 730 THz
	อินฟราเรดคลื่นสั้น	1.3 ~ 3 μm	100 ~ 230 THz
	อินฟราเรดคลื่นกลาง	3 ~ 8 μm	38 ~ 100 THz
	อินฟราเรดความร้อน	8 ~ 14 μm	22 ~ 38 THz
	อินฟราเรดไกล	14 ~ 1 mm	0.3 ~ 22 THz
คลื่นวิทยุ	มิลลิเมตรย่อย		0.1 ~ 1 mm 0.3 ~ 3 THz
	ไมโครเวฟ	มิลลิเมตร (EHF)	1 ~ 10 Cm 30 ~ 300 GHz
		เซนติเมตร (SHF)	1 ~ 10 m 3 ~ 30 GHz
		เดซิเมตร (UHF)	0.1 ~ 1 mm 0.3 ~ 3 GHz
	คลื่นสั้นมาก (VHF)	1 ~ 10 m 30 ~ 300 MHz	
	คลื่นสั้น (HF)	10 ~ 100 m 3 ~ 30 MHz	
	คลื่นกลาง (MF)	0.1 ~ 1 km 0.3 ~ 3 MHz	
คลื่นยาว (LF)	1 ~ 10 km 30 ~ 300 kHz		
คลื่นยาวมาก (VLF)	10 ~ 100 km 3 ~ 30 kHz		

ย่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการสำรวจระยะไกลได้แก่ คลื่นอัลตราไวโอเล็ตใกล้ (ความยาวคลื่น 0.3 ~ 0.4 ไมโครเมตร) คลื่นที่ตามองเห็น(ความยาวคลื่น 0.4 ~ 0.7 ไมโครเมตร)ประกอบไปด้วยแถบสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง คลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near infrared) อินฟราเรดคลื่นสั้น (Short wave infrared) อินฟราเรดความร้อน (Thermal infrared)(ความยาว

คลื่น 0.7 ~ 14 ไมโครเมตร) และคลื่นไมโครเวฟ (Microwave)(ความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร ~ 1 เมตร)ซึ่งย่านแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ และอินฟราเรดคลื่นสั้นนั้นในบางครั้งจะเรียกว่าอินฟราเรดช่วงสะท้อน(ความยาวคลื่น 0.7 ~ 3 ไมโครเมตร)เพราะเป็นย่านที่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของพลังงานแสงอาทิตย์น้อยมาก

ในขณะที่ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่มีการแผ่พลังงานไฟฟ้าสูงสุดนั้นคือ ความยาวคลื่น 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งจะเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสำรวจระยะไกลย่านความถี่ที่ตามองเห็นและย่านอินฟราเรดสะท้อนโดยข้อมูลที่ได้จากการสำรวจระยะไกลในย่านแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรดสะท้อน ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน (Reflectance) ของวัตถุต่างๆบนผิวโลก โดยที่แหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ในการสำรวจจากระยะไกลย่านอินฟราเรดจะได้จากตัววัตถุเองเนื่องจากวัตถุใดๆก็ตามที่มีอุณหภูมิในระดับปกติจะมีความสามารถในการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 10 ไมโครเมตร การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟ สามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบพาสซีฟ (Passive) และการสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบแอกทีฟ (Active) ในการสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบพาสซีฟจะสามารถวัดค่าการแผ่รังสีไมโครเวฟ (Microwave radiation) ได้จากวัตถุ ในขณะที่การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟแบบแอกทีฟจะสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกลับ (Back scattering coefficient) ได้

ในภาพที่ 2.3 แสดงการจำแนกการสำรวจระยะไกลออกได้เป็น 3 ประเภทตามย่านความยาวคลื่นดังนี้

- (1) การสำรวจระยะไกลย่านแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรดสะท้อน (Visible and Reflective Infrared Remote Sensing)
- (2) การสำรวจระยะไกลย่านอินฟราเรดความร้อน (Thermal Infrared Remote Sensing)
- (3) การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟ (Microwave Remote Sensing)

	การสำรวจระยะไกลย่านแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด	การสำรวจระยะไกลย่านอินฟราเรดความร้อน	การสำรวจระยะไกลย่านไมโครเวฟ
แหล่งกำเนิดพลังงานวัตถุ	ดวงอาทิตย์	วัตถุ	วัตถุ เรดาร์
ค่าการสะท้อน	ค่าการสะท้อน	การแผ่รังสีความร้อน (อุณหภูมิ, สภาพเปล่งรังสี)	การแผ่รังสี สัมประสิทธิ์การจัดกระจายกลับ
ค่าการแผ่รังสีเชิงคลื่น	ค่าการแผ่รังสีที่สะท้อน	ค่าการแผ่รังสีที่เปล่งออก	
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	อัลตราไวโอเล็ต	ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น	อินฟราเรด สะท้อน อินฟราเรด ความร้อน ไมโครเวฟ
เครื่องมือวัด	0.4 μm	0.7 μm	1mm
- กล้องถ่ายภาพ	0.3 μm	0.9 μm	14 μm
- ตัวตรวจวัดแสง			1mm
- ไมโครเวฟ			30cm

ภาพที่ 2.3 ประเภทของการสำรวจระยะไกลที่สัมพันธ์กับย่านความยาวคลื่นทั้ง 3 ประเภท

2.3.2 ทฤษฎีอนุภาค

อธิบายถึงพฤติกรรมของคลื่นแสงที่แพร่ออกจากแหล่งกำเนิด ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคย่อยที่เรียกว่า ควินต้าหรือโฟตอน อนุภาคย่อยเหล่านี้มีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคอื่นๆที่ประกอบด้วยพลังงานและโมเมนตัมแต่ต่างกันตรงที่โฟตอนมีมวลเป็นศูนย์เมื่ออยู่นิ่งความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับความถี่ตั้งสมการที่ (2.2)

$$E = h \cdot f \quad (2.2)$$

กำหนดให้

E คือพลังงานของโฟตอน

h คือค่าคงที่ Planck

f คือความถี่คลื่น

จากสมการที่ (2.1) คูณด้วย $\frac{h}{h}$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

นั่นคือพลังงานของโฟตอนเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น หรือ ก็คือแปรตรงกับความถี่คลื่นหมายความว่ายิ่งคลื่นแสงมีความยาวคลื่นมากพลังงานโฟตอนจะมีค่าน้อย และในทางกลับกันหากคลื่นแสงมีความถี่สูงระดับพลังงานก็จะสูงตาม ความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญของพฤติกรรมของพลังงานกับแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4 การสะท้อนแสงของผิวโลก

ปฏิกริยาระหว่างพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นผิวโลกเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการสำรวจระยะไกล เพราะเป็นค่าที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์สำรวจในลักษณะของพลังงาน ซึ่งจะสะท้อนจากพื้นผิวโลกในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพื้นผิวในการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นจึงต้องเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวเพื่อประโยชน์ในการแปลความหมายจากภาพ

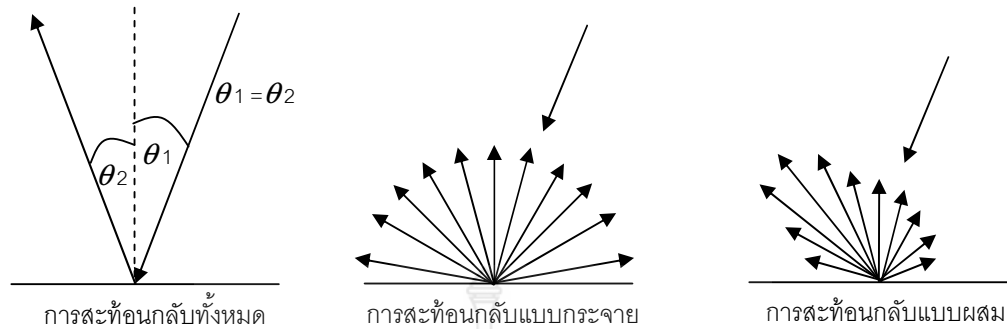
2.4.1 การสะท้อนกลับ

เป็นปรากฏการณ์เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนกลับ ปริมาณแสงที่สะท้อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว เป็นลักษณะราบเรียบหรือขรุขระ มุมตกกระทบของแสง ความสามารถหรืออัตราสะท้อนแสงของพื้นผิวโลก และโพลาไรเซชันของแสงที่ตกกระทบ การสะท้อนกลับเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะคือ

1. การสะท้อนกลับหมดในทิศทางตรงข้ามเกิดในกรณีที่พื้นผิวมีลักษณะราบเรียบโดยที่มิติความขรุขระที่ผิวมีค่าน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวคลื่น โดยแสงที่ตกกระทบทั้งหมดจะสะท้อนกลับในทิศทางที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ มักจะเกิดกับสิ่งที่มีความยาวคลื่นค่อนข้างยาว การสะท้อนในลักษณะนั้นนอกจากจะไม่เกิดประโยชน์ต่อการสำรวจระยะไกลแล้วยังบดบังสภาพพื้นผิวที่แท้จริงที่ปรากฏบนภาพด้วย ลักษณะนี้เรียกว่า "ประกายแดด" โดยที่ปรากฏการณ์เช่นนี้มักเกิดกับบริเวณพื้นผิวน้ำ ดินบางประเภทและหินที่ไหลเหมือนผิวดิน

2. การสะท้อนแบบกระจาย เป็นการสะท้อนจากพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ แต่อยู่ในลักษณะที่สม่ำเสมอและเกิดในย่านแสงที่ตามองเห็นเป็นส่วนใหญ่

3. การสะท้อนแบบผสม เป็นลักษณะที่มักเกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติโดยรวมเอาลักษณะการสะท้อนกลับหมดและการสะท้อนแบบกระจายเข้าไว้ด้วยกัน ภาพที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบเทียบการสะท้อนแสงทั้ง 3 ลักษณะ



ภาพที่ 2.4 เปรียบเทียบปรากฏการณ์การสะท้อนแสงในลักษณะ การสะท้อนกลับหมด การสะท้อนแบบกระจาย และการสะท้อนแบบผสม

ค่าการสะท้อนตามความยาวคลื่นเรียกว่า ค่าการสะท้อนเชิงคลื่น (Spectral reflectance) สมมติฐานของการสำรวจระยะไกลมีว่า "ค่าการสะท้อนเชิงคลื่นจะมีลักษณะเฉพาะตัวและแตกต่างกันเมื่อสะท้อนจากวัตถุหนึ่งไปยังวัตถุหนึ่ง" ค่าการสะท้อนของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงที่มีทิศทางตกกระทบและสะท้อนที่แน่นอนจะเรียกว่า ค่าการสะท้อนเชิงทิศทาง (Directional reflectance) ทิศทางของแสงที่ตกกระทบและที่สะท้อนนี้อาจเป็นแบบเชิงทิศทาง แบบรูปกรวย หรือแบบคลุมซีกโลก จึงมีลักษณะผสมผสานกันได้ถึง 9 แบบ ค่าการสะท้อนเชิงคลื่นของสิ่งปกคลุมดินที่แตกต่างกันออกไปทำให้สามารถจำแนกประเภทของสิ่งปกคลุมดิน โดยวิธีสำรวจระยะไกลได้ด้วยการสังเกตค่าการสะท้อนเชิงคลื่นหรือค่าการแผ่รังสีเชิงคลื่นจากผิวนั้นๆ

2.4.2 การดูดกลืน

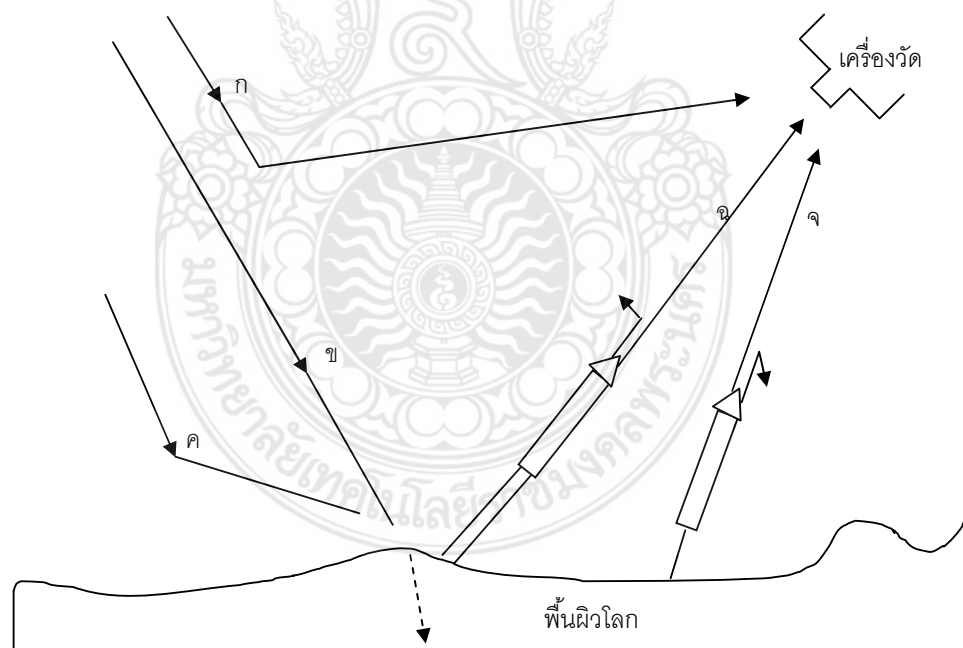
ปรากฏการณ์นี้เป็นเช่นเดียวกับการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ เมื่อพลังงานตกกระทบพื้นผิวโลก บางส่วนจะสะท้อนกลับ ในขณะที่บางส่วนจะถูกดูดกลืน ปริมาณการดูดกลืนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของพื้นผิว ตลอดจนขนาดหรือความหนา นอกจากนี้ การดูดกลืนยังจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละความยาวคลื่น บางพื้นผิวจะดูดกลืนได้ดีในช่วงคลื่นสั้น และพื้นผิวบางประเภทก็จะดูดกลืนได้ดีในช่วงคลื่นยาว อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานบางส่วนเกิดขึ้น พลังงานนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของความร้อน อุณหภูมิของวัตถุจะเพิ่มขึ้นทำให้ตัวมันเองกลายเป็นต้นกำเนิดพลังงาน ดังเช่นการแผ่พลังงานระยะไกลเพราะสามารถใช้อุปกรณ์ตรวจจับได้

ทั้งกลางวันและกลางคืน และเป็นย่านหนึ่งของหน้าต่างบรรยากาศที่ไม่ถูกรบกวนโดยอนุภาคในชั้นบรรยากาศ

2.4.3 การส่งผ่าน

การส่งผ่านพลังงาน เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องกับการดูดกลืนพลังงานของพื้นผิว โดยพลังงานส่วนที่ ได้รับการดูดกลืนจะถูกถ่ายถอดไปยังส่วนที่อยู่ลึกลงไป ค่าการส่งผ่านรังสีของวัตถุใดๆก็คือสัดส่วนของปริมาณพลังงาน ณ จุดซึ่งพลังงานได้เคลื่อนที่ไป ต่อพลังงานที่ตกกระทบทั้งหมดโดยทั่วไป แล้วค่าการส่งผ่านจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิวและสำหรับพื้นผิวหนึ่งๆจะเกิดการส่งผ่านได้ดีในบางช่วงคลื่นเท่านั้น

ภาพที่ 2.5 แสดงภาพสรุปเส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดผ่านชั้นบรรยากาศไปกระทบยังผิวโลก แล้วสะท้อนกลับเข้ามาสู่อุปกรณ์ตรวจจับ สำหรับระบบที่แสดงนี้เป็นระบบพาสซีฟ แหล่งกำเนิดพลังงาน คือ ดวงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยเส้นทางเดินดังต่อไปนี้



ง

ภาพที่ 2.5 เส้นทางเดินของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าการสำรวจระยะไกลแบบพาสซีฟ

ก. รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศและจะเกิดการสูญเสียไปบางส่วน โดยส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนละส่วนหนึ่งจะเกิดการกระจายโดยอนุภาคต่างๆในชั้นบรรยากาศ แล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับโดยมิได้ตกกระทบพื้นผิวโลก ปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดลักษณะคล้าย "หมอก" บนภาพถ่ายจากดาวเทียมและเกิดความไม่คมชัดของภาพ

ข. รังสีที่เหลือจากการดูดกลืนและกระจายในชั้นบรรยากาศ จะตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ

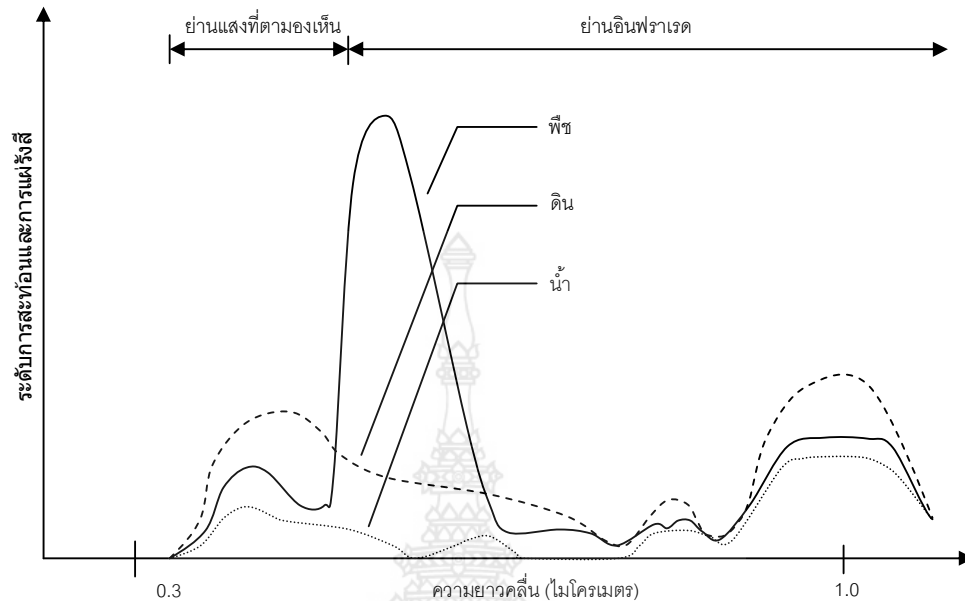
ค. แสงจากท้องฟ้าที่เกิดการกระจายในชั้นบรรยากาศตกกระทบพื้นผิวโลกแล้วสะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับรวมกับข้อ (ข.)

ง. รังสีบางส่วนที่ตกกระทบพื้นผิวโลกที่ถูกดูดกลืนและส่งผ่านสู่ระดับเบื้องล่าง

จ. รังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกแล้วเดินทางสู่อุปกรณ์ตรวจจับ

ฉ. การกระจายของรังสีที่สะท้อนหรือแผ่จากพื้นผิวโลก บางส่วนสะท้อนออกนอกทิศทางของอุปกรณ์ตรวจจับ บางส่วนสะท้อนเข้าเครื่องสำรวจและบางส่วนสะท้อนกลับสู่พื้นผิวโลกอีก

สิ่งที่ต้องการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ คือ รังสีในส่วนของ (ข.) และ (จ.) ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติทางแสงของแต่ละพื้นผิวแม้ว่า (ง.) จะแสดงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยก็ตาม แต่โดยที่ (ง.) มีความสัมพันธ์กับ (ข.) ในเชิงกลับกัน ดังนั้น จึงเป็นการเพียงพอที่จะดูจากค่าสะท้อนเป็นส่วนใหญ่ ค่าการสะท้อนหรือแฉ่รังสีที่วัดได้ ณ ความยาวคลื่นต่างๆ ของแถบพลังงาน หรือสิ่งที่เรียกว่าลายเส้นเชิงคลื่น (Spectral signature) จะเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพื้นผิว ค่าเหล่านี้สามารถวัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการหรือจากการสำรวจในสนาม ภายใต้สภาวะที่ปราศจากการรบกวนของชั้นบรรยากาศ การรวบรวมลายเส้นเชิงคลื่นของพื้นผิวประเภทต่างๆ จะมีประโยชน์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับให้บันทึกภาพด้วยช่วงคลื่นที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทและช่วยในการแปลความหมายของภาพถ่ายจากดาวเทียม



ภาพที่ 2.6 การเปรียบเทียบลายเส้นเชิงคลื่นของทรัพยากรหลัก

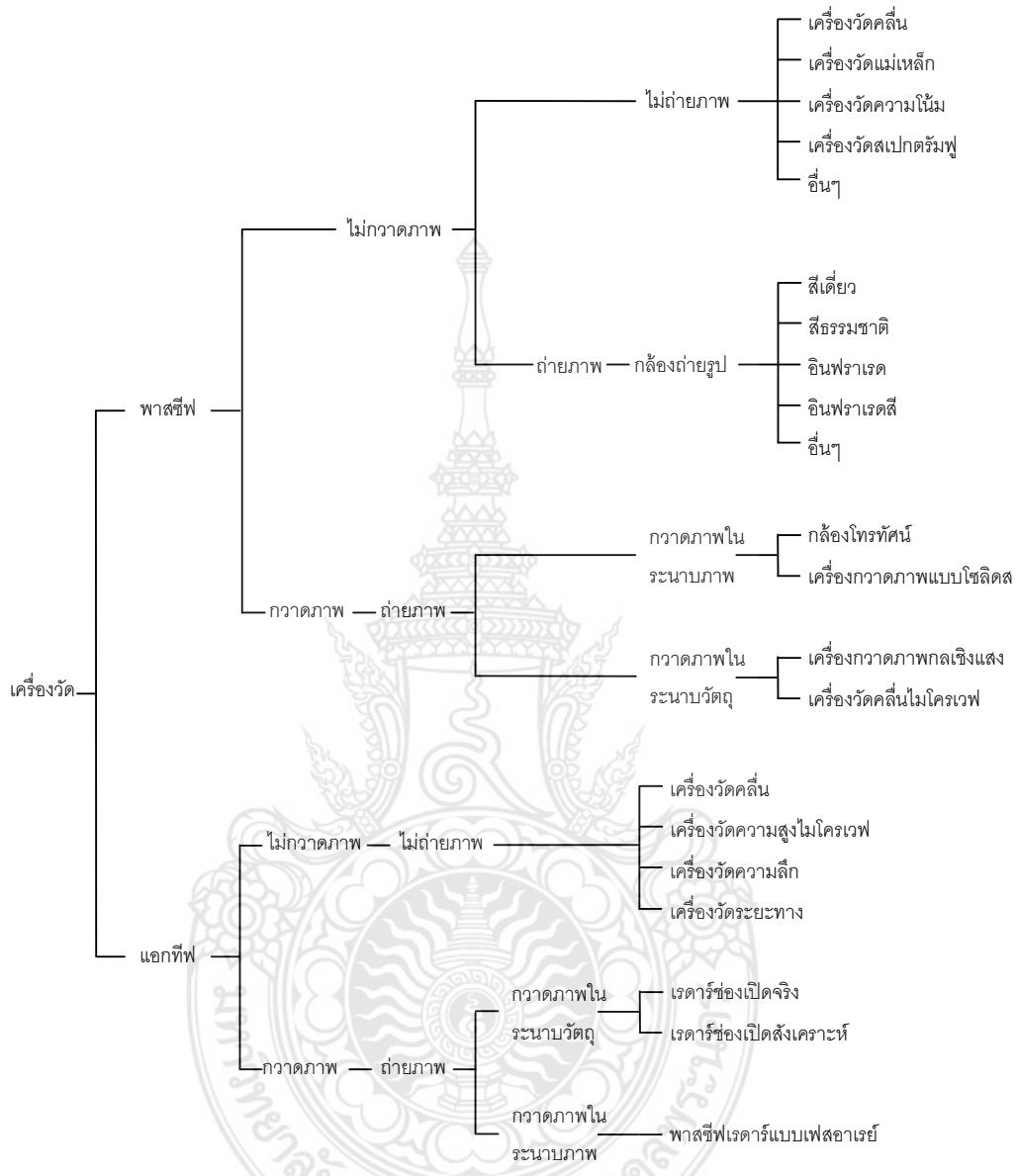
2.5 อุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียม

ความหมายของอุปกรณ์สำรวจบนดาวเทียมหมายถึงเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการสะท้อนของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นหนึ่งหรือหลายช่วงคลื่นของแถบพลังงานที่ครอบคลุมจากช่วงคลื่นที่ตามองเห็นจนถึงช่วงคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากพื้นผิวโลก พลังงานที่สะท้อนเข้าสู่อุปกรณ์วัดนี้อาจมาจากสิ่งที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ เช่น จากดวงอาทิตย์ ในกรณีนี้อุปกรณ์สำรวจจะเป็นแบบพาสซีฟ (Passive) สำหรับอุปกรณ์ที่ผลิตพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อที่จะส่งไปกระทบพื้นผิวโลกโดยไม่ต้องอาศัยธรรมชาติแล้วจึงวัดค่าสะท้อนของพลังงานที่ส่งกลับมาอีกต่อหนึ่งเป็นระบบที่เรียกว่า แอคทีฟ (Active) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า เรดาร์ นั่นเอง ระบบพาสซีฟมักจะเป็นระบบที่ใช้สำหรับคลื่นสั้น คือช่วงคลื่นที่ตามองเห็นจนถึงอินฟราเรดใกล้และช่วงคลื่นความร้อน ส่วนระบบเรดาร์มักจะใช้สำหรับช่วงคลื่นที่ยาว เช่น ไมโครเวฟ ดังเช่นเครื่องอัลติมิเตอร์ สแก๊จเทอโรมิเตอร์และซินธิติก-อเพอร์เจอร์เรดาร์ เป็นต้น

จากอุปกรณ์วัดที่สามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เองนั้น จะส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบวัตถุที่ต้องการนั้นๆ ให้สะท้อนพลังงานออกมาอีกครั้งเพื่อการตรวจวัดและจดบันทึกผลที่ได้ ตัวอย่างอุปกรณ์วัดชนิดนี้ ได้แก่ ระบบเรดาร์ ซึ่งมีอยู่กัน 2 ประเภท ดังนี้ ระบบกวาดภาพ (Scanning system) ระบบไม่กวาดภาพ (Non-scanning system) โดยอุปกรณ์วัดที่จัดอยู่ในประเภทพาสซีฟ ที่รวมเอาลักษณะของระบบไม่กวาดภาพ และเป็นวิธีแบบไม่ถ่ายภาพ (Non-imaging method) เรียกว่าเครื่องบันทึกในแนวตั้ง (Profile radiometer) ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์วัดคลื่นไมโครเวฟ เรียกว่า ไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave radiometer) ส่วนพาสซีฟเซนเซอร์ชนิดไม่กวาดภาพแต่ใช้วิธีถ่ายภาพ (Imaging method) ได้แก่กล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ใช้บนเครื่องบิน หรือกล้องถ่ายภาพบนดาวเทียม ตัวอย่างเช่นกล้องที่ใช้บนดาวเทียม COSMOS ของรัสเซีย เป็นต้น พาสซีฟเซนเซอร์ที่เป็นทั้งระบบที่มีลักษณะการกวาดภาพและบันทึกออกมาเป็นภาพ แบ่งออกได้เป็นอุปกรณ์วัดชนิดกวาดสร้างภาพจากระนาบภาพ (Image plane scanning sensor) เช่น กล้องโทรทัศน์หรือชนิดที่เรียกว่าเครื่องกวาดภาพแบบโซลิดสเตต (Solid state scanner) และอุปกรณ์วัดชนิดกวาดสร้างภาพจากระนาบวัตถุ (Object plane scanning sensor) เช่น เครื่องกวาดภาพหลายช่วงคลื่น (Multi-spectral scanner หรือ Optical mechanical scanner) และอุปกรณ์วัดไมโครเวฟชนิดกวาดภาพ (Scanning microwave radiometer)

อุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมมากในการสำรวจระยะไกล ได้แก่ กล้องถ่ายภาพ เครื่องกวาดภาพแบบอุปกรณ์สถานะของแข็ง (Solid state) เช่น ซีซีดี (CCD- Charge Coupled Device) เครื่องกวาดภาพหลายช่วงคลื่นประเภทเลเซอร์นั้น ได้รับการนิยมนำไปใช้ตรวจมลภาวะในอากาศโดยการใช้อุปกรณ์วัดสเปกตรัมแบบเลเซอร์ และใช้อุปกรณ์วัดความสูงแบบเลเซอร์ ในการวัดความสูงเป็นต้น

จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงชนิดของอุปกรณ์วัดที่มีใช้ในปัจจุบันและกำลังได้รับการพัฒนาขึ้นในอนาคตสำหรับเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล เป็นที่คาดหมายว่าในอนาคตจะมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะประเภทต่างๆกันออกไป มีทั้งพาสซีฟเซนเซอร์ (Passive sensor) คือ อุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับ และบันทึกสัญญาณข้อมูลซึ่งสะท้อนหรือเปล่งจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และแอทีฟเซนเซอร์ (Active sensor) ที่สามารถรับและบันทึกสัญญาณ ข้อมูล ซึ่งสะท้อนจากวัตถุที่ต้องการศึกษา



ภาพที่ 2.7 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์

ในตารางที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์วัดที่ใช้อยู่อย่างแพร่หลายพร้อมช่วงคลื่น อุปกรณ์วัดที่ใช้เลนส์ในสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็นและสเปกตรัมอินฟราเรดสะท้อน เรียกว่า อุปกรณ์วัดเชิงแสง (Optical sensor) ซึ่งมีคุณลักษณะที่กำหนดโดยความสามารถเชิงคลื่น เชิงแสง และเชิงรูปร่างทางเลขาคณิต



ภาพที่ 2.8 องค์ประกอบของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง

คุณลักษณะเชิงคลื่น (Spectral characteristics) ได้แก่ ย่านของความยาวคลื่น และความกว้างของช่วงคลื่นนั้นๆ ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่ง (จุดกลาง) ของช่วงคลื่น ความไวต่อสัญญาณ ณ จุดปลายของช่วงคลื่น ความไวต่อสัญญาณของช่วงคลื่นที่รอบนอก และความไวของการเปลี่ยนระนาบคลื่นที่ใช้

ตารางที่ 2.3 คำจำกัดความของคุณลักษณะของอุปกรณ์วัดเชิงแสง

รายการ	คำนิยาม
พิสัยของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ความกว้างของช่วงคลื่นที่ใช้ในหนึ่งแบนด์
ความยาวคลื่น ณ ศูนย์กลาง	ความยาวคลื่น ณ จุดศูนย์กลางของแบนด์ที่ใช้
การตอบสนองที่จุดปลายทั้งสองของแบนด์	เส้นโค้งคุณลักษณะที่ช่วงปลายทั้งสองของคลื่น
ความไวของแบนด์	ความไวของแบนด์หนึ่งๆ
ความไวภายนอกแบนด์	ความไวของช่วงคลื่นภายนอกแบนด์นั้น
ความแตกต่างความไวระหว่างแบนด์ที่แตกต่างกัน	อัตราส่วนของความไวระหว่างแบนด์ที่ต่างกัน
พิสัยพลวัต	พิสัยของความไวของอุปกรณ์วัดในรูปของอัตราส่วนของความต่างสูงสุดและต่ำสุดของค่าการแผ่รังสี
ความแตกต่างความไวระหว่างจุดภาพ	อัตราส่วนของระดับข้อมูลขาออกสูงสุดต่อข้อมูลขาออกต่ำสุดของจุดภาพ
สภาพเชิงเส้นของคุณลักษณะข้อมูลขาเข้า-ขาออกของอุปกรณ์วัด	ระดับข้อมูลขาเข้าต่อระดับข้อมูลขาออกในระดับข้อมูลขาเข้าที่มีกำลังสูงกว่า
กำลังสมมูลของสัญญาณรบกวน	กำลังสัญญาณข้อมูลขาเข้าที่สามารถให้ข้อมูลขาออกเทียบเท่ากับกำลังสัญญาณรบกวน
สนามมุมมอง	พื้นที่หรือภาพที่ครอบคลุมด้วยวัดจากระยะไกล (สนามเชิงมุมของกล้องถ่ายรูป ความกว้างของการวาดภาพ)
สนามมุมมอง ณ ขณะนั้น	สนามของมุมที่ตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด 1 ตัว
MTF	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบแปรเปลี่ยนของอุปกรณ์วัด ซึ่งจะเป็นตัวกำหนด IFOV
ความเพี้ยนเชิงแสง	ความเพี้ยนของภาพอันเนื่องมาจากส่วนประกอบเชิงแสงของอุปกรณ์วัด เช่น ความคลาดของเลนส์
มุมของการมองภาพสามมิติ	ความแตกต่างของอุปกรณ์ของมุมมองวัดแบบสเตอริโอ
ความถี่การถ่ายภาพ	เวลาที่ใช้ในการวาดภาพ 1 เส้น

อุปกรณ์วัดซึ่งใช้ฟิล์มถ่ายภาพเป็นตัวบันทึกข้อมูลนั้น จะดูคุณลักษณะได้จากความไวของฟิล์มคุณสมบัติส่งผ่านพลังงานของตัวกรอง (Filter) และคุณภาพของเลนส์ที่ใช้ อุปกรณ์ชนิดกวาดภาพ ดูได้ที่คุณลักษณะเชิงคลื่นของตัวตรวจวัด (Detector) และตัวแยกเชิงคลื่น (Spectral splitter) และยิ่งไปกว่านั้น ความคลาดสี (Chromatic aberration) ก็มีผลสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาคุณลักษณะเชิงรังสีของอุปกรณ์วัดเชิงแสงนั้นดูจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนผ่านระบบแสงนั้น ได้แก่ ความสามารถในการวัดคลื่นของระบบ ความไวต่อพลังงานได้แก่ กำลังสมมูลของสัญญาณรบกวน (Noise Equivalent Power; NEP) พิสัยพลวัต (Dynamic range) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise ratio; S/N ratio) และสัญญาณรบกวนอื่น ๆ รวมทั้งสัญญาณรบกวนเชิงปริมาณ

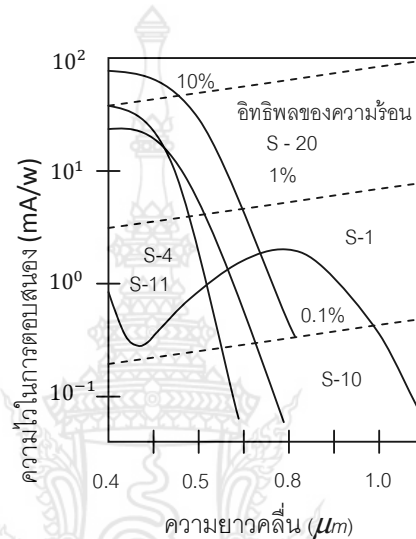
2.6 อุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง

อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Detector) คืออุปกรณ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจวัดมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะตรวจวัดช่วงคลื่น ซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันออกไป ภาพที่ 2.9 แสดงให้เห็นอุปกรณ์ตรวจวัด 3 ชนิดคือ ชนิดเปล่งแสง (Photo emission) กระตุ้นเชิงแสง (Optical excitation) และอาศัยความร้อน (Thermal effect)



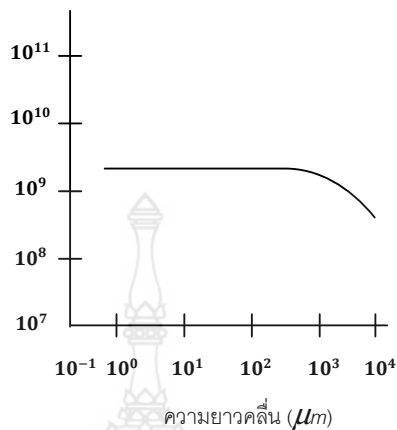
ภาพที่ 2.9 การจำแนกประเภทของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง

ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดเปล่งแสง ซึ่งจะมีความไวต่อพลังงานแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต จนถึงแสงที่มองเห็น ได้แก่ หลอดแสง (Photo tube) และหลอดขยายแสง (Photo multiplier tube) เป็นต้นภาพที่ 2.10 แสดงเส้นโค้งความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดหลอดแสงชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2.10 ความไวในการตอบสนองของหลอดแสง

ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระตุ้นแสง ซึ่งมีความไวย่านอินฟราเรด ได้แก่ ไดโอดพลังงานแสง (Photo-diode) ตัวเปล่งแสง (Photo-transistor) อุปกรณ์ตรวจวัดแบบนำไฟฟ้าพลังงานแสง (Photo conductive detector) และอุปกรณ์วัดแบบเชิงเส้น (Linear array sensor) เป็นต้น อุปกรณ์วัดแบบตัวเปล่งแสง และอุปกรณ์ตรวจแบบนำไฟฟ้าพลังงานใช้กระแสไฟฟ้า (Electric current) เป็นตัวที่ทำให้ทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดอาศัยความร้อน ซึ่งมีความไวต่อพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ จนถึงอินฟราเรดไกลนั้น ได้แก่ อุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple barometer) และอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric barometer) เป็นต้น ภาพที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งของสภาพตรวจวัดได้ของอุปกรณ์วัดความกดอากาศแบบไพโรอิเล็กทริก



ภาพที่ 2.11 ความไวของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบโฟโรอิเล็กทริก

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะของอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสงซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ชนิด อุนหภูมิ ช่วงความยาวคลื่น ความยาวคลื่นสูงสุด ความไวในการตรวจวัด ในรูป D^* สภาพตรวจวัดได้ (Detectivity) และระยะเวลาในการตอบสนอง

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของตัวตรวจวัดเชิงเส้น

ตัวตรวจวัด	ชนิด	ช่วงคลื่น (λ m)	สภาพตรวจวัดได้ D^*2	จุดตัดของความถี่ (Hz)	อุณหภูมิขณะทำงาน
Pt-S	PV	0.35 - 0.6	30	10^8	295.0
Si p-n PD	PV	0.4 - 1.0	50	10^7	295.0
Si p-i-n PD	PV	0.4 - 1.1	80	10^8	295.0
Si APD	PV	0.4 - 0.8	80	10^{10}	295.0
Ge p-n PD	PV	0.6 - 1.8	50	10^7	295.0
InSb p-n PD	PV	3.0 - 6.2	8	5×10^2	77.0
PbSnTe p-n PD	PV	5.0 - 11.4	>15 - 60 VW	10^7	77.0
PbS	PC	0.5 - 3.8	15.0	300	196.0
PbSe	PC	0.8 - 4.6	3.00	3×10^3	196.0
PbTe	PC	0.8 - 5.5	0.16	3×10^3	196.0
p-InSb	PC	2.0 - 6.7	2.00	3×10^3	77.0

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของตัวตรวจวัดเชิงเส้น(ต่อ)

ตัวตรวจวัด	ชนิด	ช่วงคลื่น (λm)	สภาพตรวจวัดได้ D^*2	จุดตัดของความถี่ (Hz)	อุณหภูมิขณะทำงาน
n-InSb	PC	1.0 - 3.6	30.00	3x10 ³	195.0
PbSnTe	PC	5.0 - 11.0	1.70	3x10 ³	4.2
CdHgTe	PC	5.0 - 16.0	3.00	104	4.2
Ge : Au	PC	2.0 - 9.5	0.02	104	77.0
Ge : Zn, Au	PC	5.0 - 40.0	1.00	103	4.2
Ge : Cu	PC	5.0 - 30.0	3.00	103	4.2
Si : Al	PC	2.0 - 16.0	1.00	104	27.0
Si : Sb	PC	2.0 - 31.5	1.80	104	4.0
ATGS	TC	1 - 1000	0.030	10	295.0
(Ba,Sr) Tio3	TC	1 - 1000	0.011	100	295.0

PV ชนิดตัวแปลงแสง

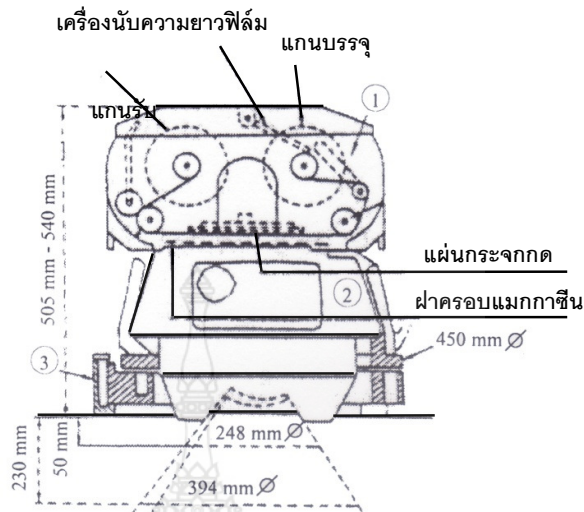
PC ชนิดตัวตรวจวัดแบบนำไฟฟ้าพลังงานแสง

TC ชนิดตัวตรวจวัดแลลไพโรอิเล็กทริก

$10^{10} \text{ cm}, H_2^{1/2} W^1$

2.7 กล้องถ่ายภาพสำหรับการสำรวจระยะไกล

กล้องถ่ายภาพเหล่านี้ ได้แก่ กล้องสำรวจทางอากาศ (Aerial survey camera) กล้องถ่ายภาพหลายช่วงคลื่น (Multispectral camera) และกล้องถ่ายภาพจอกว้าง (Panoramic camera) เป็นต้น กล้องสำรวจทางอากาศ บางที่รู้จักในชื่อว่ากล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ซึ่งใช้ถ่ายภาพจากเครื่องบินหรือยานอวกาศเพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศโดยอาศัยการถ่ายภาพเหลื่อมกันทำให้เกิดระบบสามมิติซึ่งเป็นที่รู้จักกันมากได้แก่ กล้อง RMK แสดงได้ในภาพที่ 2.12 แสดงกลไกของกล้อง Zeiss RMK กล้องถ่ายภาพจากอวกาศ (Space camera) ที่ใช้บนกระสวยอวกาศ



ภาพที่ 2.12 ระบบกล้อง Zeiss RMK

เนื่องจากกล้องถ่ายภาพแบบเมตริกซ์ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำรวจภูมิประเทศอย่างละเอียด และมีความถูกต้องสูงดังนั้นข้อกำหนดต่างๆในระบบแสงและคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตต้องเป็นไปตามกฎเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังนี้

- 1) ความเพี้ยนของเลนส์ต้องมีค่าน้อยที่สุด
- 2) เลนส์ควรให้รายละเอียดสูงและภาพที่ได้ควรมีความคมชัดสม่ำเสมอ แม้บริเวณมุมภาพ
- 3) ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างกรอบภาพและแนวแกนของระบบเลนส์ ควรให้มีเป็นบรรทัดฐาน โดยใช้เครื่องหมาย Fiducial หรือ Rescau
- 4) แนวแกนของเลนส์กับระนาบของฟิล์มควรตั้งฉากกันเสมอ
- 5) ความแบนราบของฟิล์มควรให้คงไว้ตลอดเวลาโดยอาศัยระบบแผ่นสุญญากาศ
- 6) ความยาวโฟกัสของเลนส์ควรได้รับการวัดและเปรียบเทียบอย่างแม่นยำ
- 7) การถ่ายภาพต่อเนื่องหลายๆภาพควรให้ชัตเตอร์ที่มีความเร็วสูงและใช้การเลื่อนฟิล์มอัตโนมัติ
- 8) ควรใช้ระบบการชดเชยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพื่อป้องกันภาพไหวในขณะที่ถ่ายภาพวัตถุเคลื่อนที่เร็ว โดยเฉพาะในกรณีกล้องถ่ายภาพรูปจากอวกาศ

2.8 ยานสำรวจ

โดยทั่วไปยานสำรวจ ได้แก่ ดาวเทียม (Satellite) และยานอวกาศ (Aircraft) นอกจากนี้ยังอาจหมายถึง เครื่องบินที่บังคับวิทยุ บัลลูนที่ใช้ในการสำรวจในระดับความสูงไม่มาก รวมทั้งรถที่ติดบันไดสูง (Ladder truck) ที่ใช้ในการสำรวจระดับพื้นดิน ตารางที่ 2.5 แสดงประเภทต่างๆของยานสำรวจ ระดับความสูงและวัตถุประสงค์ที่ต้องการสำรวจ

ตารางที่ 2.5 ประเภทของยานสำรวจและวัตถุประสงค์ที่สังเกต

ยานสำรวจ	ระดับความสูง	การสังเกตการณ์	หมายเหตุ
ดาวเทียมค้างฟ้า	36,000 กม.	จุดสังเกตการณ์คงที่	GMS
ดาวเทียมวงโคจรกลม (สำรวจโลก)	500 - 1,000 กม.	สังเกตการณ์แบบประจำ	LANSAT, STOP, MO S-1, ฯลฯ
กระสวยอวกาศ	240 - 350 กม.	สังเกตการณ์แบบไม่ประจำการ ทดลองในอวกาศ	
เครื่องตรวจอากาศด้วยวิทยุ	100 ม. - 100 กม.	การศึกษาค้นคว้าต่างๆ	
เครื่องบินไอพ่นระดับสูง	10 - 12 กม.	การสำรวจการศึกษาในพื้นที่กว้าง	
เครื่องบินความสูงระดับต่ำถึงระดับกลาง	500 - 8,000 กม.	การศึกษาค้นคว้าต่างๆ การสำรวจอวกาศ	
เครื่องลอยบนอากาศ	500 - 3,000 กม.	การสำรวจ การศึกษาค้นคว้าต่างๆ	
เฮลิคอปเตอร์	100 - 2,000 กม.	การศึกษาค้นคว้าต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	
เครื่องบินบังคับวิทยุ	ต่ำกว่า 500 ม.	การศึกษาค้นคว้าต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	เครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์
เครื่องบินลอยนึ่ง	50 - 500 ม.	การศึกษาค้นคว้าต่างๆ การสำรวจทางอากาศ	เครื่องร่อนลอยนึ่ง ร่วม ชูชีพ

เป็นไปตามข้อกำหนด อย่างไรก็ตาม ได้มีการใช้เฮลิคอปเตอร์หรือเครื่องบินที่บังคับวิทยุบินในแนวบินอิสระเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ในการติดตามสังเกตการณ์สภาพความเสียหายจากภัยธรรมชาติเป็นต้น

ดาวเทียมที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะไกลเพื่อสำรวจพื้นโลก เรียกว่า ดาวเทียมสำรวจจากระยะไกลหรือดาวเทียมสำรวจโลก สำหรับดาวเทียมอุตุนิยมวิทยานั้นบางครั้งถูกจัดแยกประเภทต่างหากจากดาวเทียมสำรวจระยะไกลอื่นๆ ดาวเทียมสำรวจระยะไกล มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่แตกต่างกันตามลักษณะวงโคจร ระดับความสูงและอุปกรณ์วัด วัดดูประสงค์หลักของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาโคจรค้างฟ้า GMS ซึ่งโคจรในระดับความสูง 36,000 กิโลเมตร คือเพื่อการสำรวจด้านอุตุนิยมวิทยา ในขณะที่ดาวเทียม LANDSAT ซึ่งมีวงโคจรผ่าขั้วโลกที่ระดับความสูงประมาณ 700 กิโลเมตร มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจพื้นดิน ในอนาคตดาวเทียมสำรวจระยะไกลจะมีสัมภาระบรรทุกของดาวเทียมขนาดใหญ่ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดหลายประเภทเพื่อใช้งานในลักษณะเอนกประสงค์ ดังเช่นในโครงการการขยายการสำรวจขั้วโลก (Polar Orbit Platform - POP) ภายใต้ความร่วมมือระหว่างประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มประชาคมยุโรป ญี่ปุ่น และแคนาดา นอกจากนี้แล้วยังมีโครงการเฉพาะเรื่อง ซึ่งใช้ดาวเทียมขนาดเล็กเพิ่มจำนวนมากขึ้นในอนาคตอีกด้วย

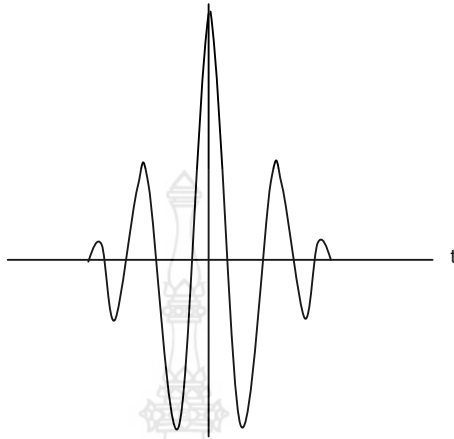
2.9 การแปลงเวฟเล็ต

2.9.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต

ในที่นี้เป็นการอธิบายถึงความหมาย ลักษณะทั่วไป ความแตกต่างระหว่างการแปลงเวฟเล็ตกับการแปลงข้อมูลแบบอื่นๆ

(ก) ลักษณะของเวฟเล็ต

ทฤษฎีเวฟเล็ต (Wavelet Theory) เป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการสร้างโมเดลของสัญญาณระบบ ซึ่งประกอบขึ้นด้วยเซตของสัญญาณเฉพาะ ที่มีลักษณะเป็นคลื่นเล็กๆ เรียกว่า "เวฟเล็ต" โดยลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน ดังที่แสดงในภาพที่ 2.13

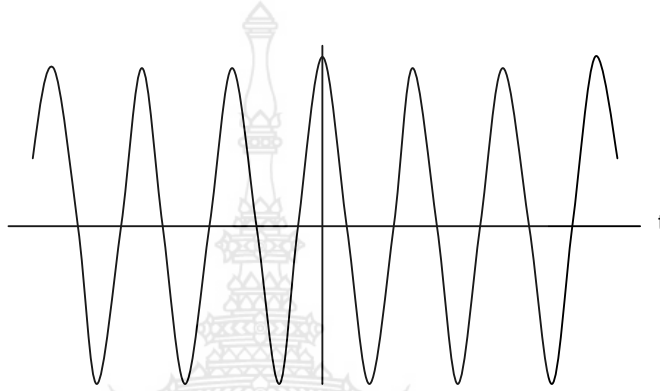


ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างลักษณะของ Morlet Wavelet: $g(t) = e^{-\frac{t^2}{64}} \cos(t)$

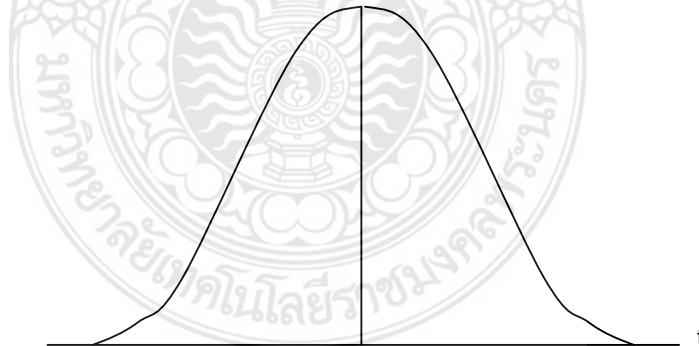
ในภาพที่ 2.13 เป็นตัวอย่างของเวฟเล็ตชนิดหนึ่ง เรียกว่าเวฟเล็ต Morlet จะสังเกตเห็นว่ามีคุณสมบัติของเวฟเล็ตตามที่กล่าวมาทั้ง 2 เงื่อนไข คือมีการออกซิเลทในลักษณะของสัญญาณซายน์ฮอยดัล (Sinusoidal) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 รวมกับเงื่อนไขของการลดอย่างรวดเร็วตามลักษณะฟังก์ชันหน้าต่าง (Windows Function) ดังแสดงในภาพที่ 2.15

การนำเวฟเล็ตหลายๆอันมารวมกันเป็นเซตเพื่อจะใช้ในการอธิบายสัญญาณใดๆโดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละตัวมีโครงสร้างมาจากฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นเวฟเล็ตต้นกำเนิดที่เรียกว่า เวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) โดยคลื่นแต่ละคลื่นภายในเซตของเวฟเล็ตจะเกิดการสเกลและเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ตแม่ การสเกลในที่นี้หมายถึง การหดเข้า (Compressing) หรือการขยายออก (Dilation) โดยใช้ " a " แทนพารามิเตอร์ของการหดหรือขยายอันเป็นการเปลี่ยนความถี่ดังกล่าว ส่วนการเลื่อนตำแหน่งกำหนดโดยพารามิเตอร์ " b " ซึ่งหมายถึง การเลื่อนตำแหน่งของการเกิดคลื่นบนแกนเวลา ในภาพที่ 2.16 แสดงให้เห็นถึงเวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า " a " , " b " ต่างๆกันโดยที่ยังอยู่ภายในเซตของเวฟเล็ตที่สัมพันธ์กับเวฟเล็ตแม่ในภาพที่ 2.13 นอกจากนี้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลจะต้องถูกนอร์มอลไลซ์ด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$ เสมอ เพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลไปแล้วยังคงมีพลังงานเช่นเดียวกับเวฟเล็ตแม่ ดังนั้นถ้าให้ $g(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง " a " , " b " ใดๆได้ดังนี้

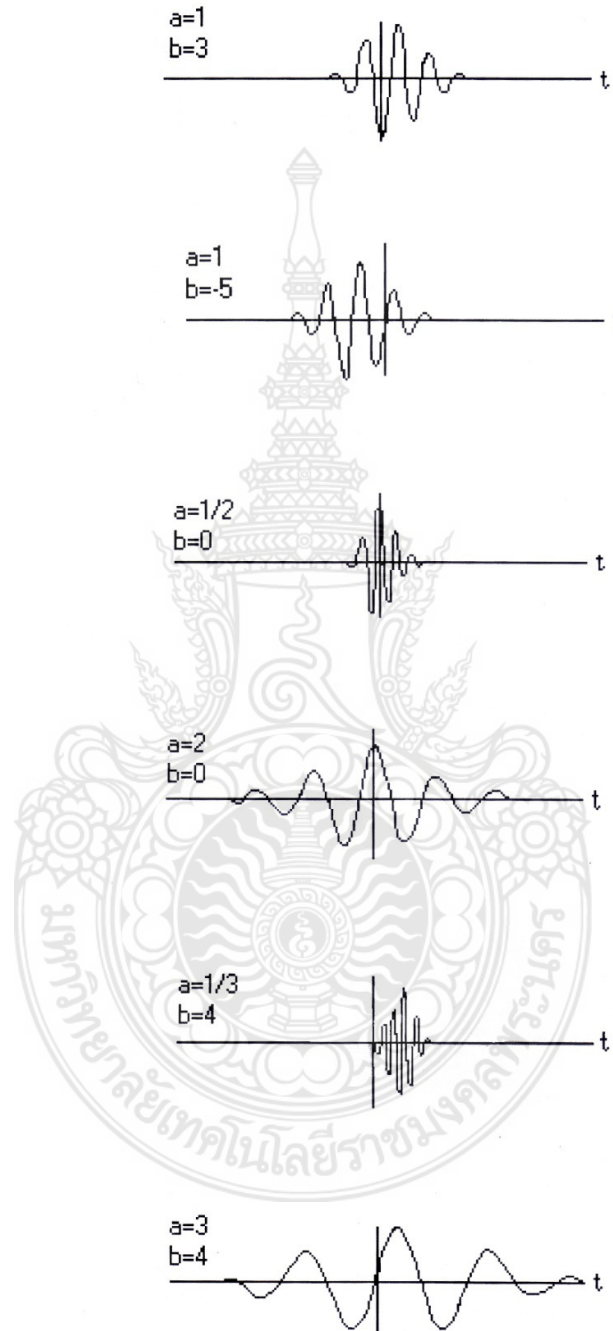
$$g_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.4)$$



ภาพที่ 2.14 ลักษณะของสัญญาณไซน์ชอยด์ล: $\cos(t)$



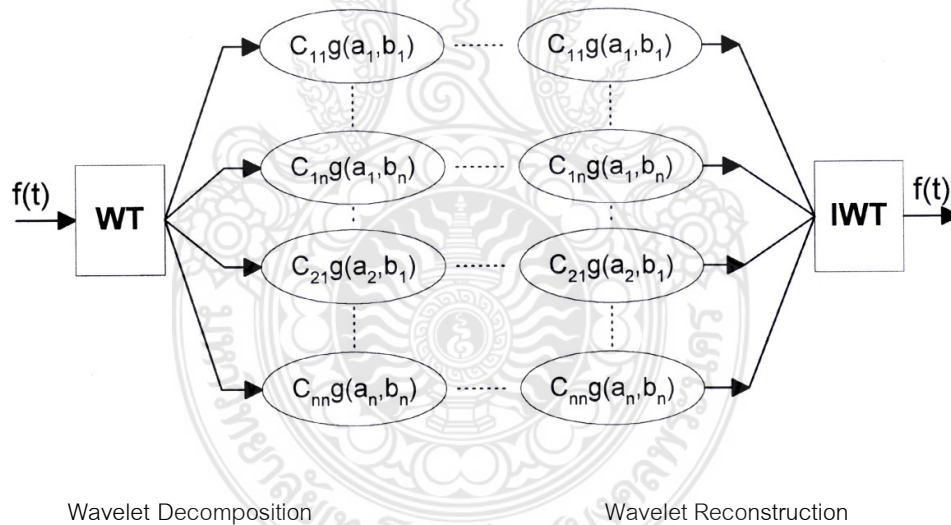
ภาพที่ 2.15 ลักษณะของฟังก์ชันหน้าต่าง $e^{-\frac{t^2}{64}}$



ภาพที่ 2.16 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า " a ", " b " ต่างๆกัน

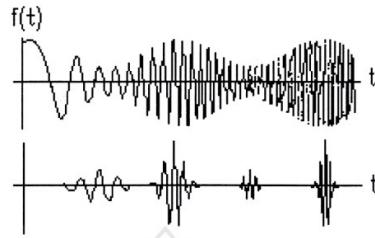
(ข) ทฤษฎีพื้นฐานเวฟเล็ตในการสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง

การอธิบายสิ่งหนึ่งสิ่งใดในทฤษฎีเวฟเล็ตจะเปรียบเสมือนการแตกสิ่งเหล่านั้นออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ที่สัมพันธ์กันคล้ายกับภาพต่อจิ๊กซอว์ โดยที่ชิ้นส่วนเหล่านั้นจะอยู่ในรูปของเวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่ง และมีค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆ กันคุณอยู่กับเวฟเล็ตแต่ละตัว ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนว่าคลื่นเวฟเล็ตเป็นฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function: b_i) ในการสร้างสัญญาณใดๆ โดยกระบวนการแตกกระจายชิ้นส่วนนี้เรียกว่า "แตกกระจายเวฟเล็ต" (Wavelet Decomposition) ซึ่งก็คือขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตนั่นเอง ในทำนองเดียวกันการรวมกลับเวฟเล็ต (Wavelet Reconstruction) ก็คือการแปลงกลับเวฟเล็ต (Inverse Wavelet Transform: IWT) โดยจะเป็นการนำเอาส่วนประกอบย่อยๆ เหล่านี้มาเรียงต่อกันเพื่อประกอบสัญญาณเดิม ดังแสดงในภาพ 2.17 แสดงการแตกกระจายสัญญาณ $f(t)$ ออกเป็นคลื่นเวฟเล็ตที่มีความถี่และตำแหน่งต่างกันจำนวน $n \times n$ ตัว



ภาพที่ 2.17 ลักษณะของการแตกกระจายสัญญาณและรวมกลับสัญญาณของเวฟเล็ต

ในภาพที่ 2.18 ภาพบนแสดงสัญญาณ $f(t)$ ที่ประกอบด้วยคลื่นหลายความถี่ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนแกนเวลา ส่วนในภาพด้านล่างแสดงถึงการดึงสัญญาณ $f(t)$ ที่ตำแหน่งเวลาใดๆ ออกมา



ภาพที่ 2.18 ลักษณะของสัญญาณที่มีหลายความถี่ที่ตำแหน่งเวลาต่างกัน

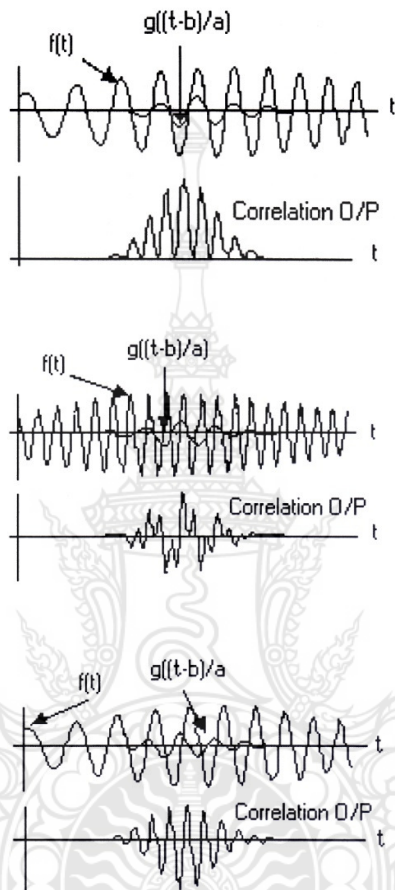
จากการที่สามารถทำการสร้างเซตของเวฟเล็ตได้จากสมการสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของเวฟเล็ตแม่นั้น การสเกลและการเลื่อนตำแหน่งดังกล่าวจะถูกเรียกรวมกันว่า Affine Operation ซึ่งจะสามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ในลักษณะการส่ง (Mapping) ตัวแปรอิสระ t ไปยังตัวแปรอิสระตัวใหม่ t^* ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

$$t^* = \frac{t-b}{a} \quad (2.5)$$

และจะสามารถเขียนสมการสำหรับการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous wavelets Transform:CWT) ที่ใช้ในการกระจายสัญญาณของฟังก์ชัน $f(t)$ ด้วยเวฟเล็ตแม่ $g(t)$ ได้ดังนี้

$$(W_g f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.6)$$

โดยที่ $"a"$ หมายถึงคอมเพล็กซ์คอนจูเกต $"a"$ เป็นพารามิเตอร์ของการสเกล และ $"b"$ เป็นพารามิเตอร์ของการเลื่อนตำแหน่ง สัญญาณลักษณะ $(W_g f)(a, b)$ หมายถึงสัญญาณอินพุตที่ขึ้นกับการส่งตัวแปร t ไปเป็นฟังก์ชัน 2 มิติที่ขึ้นกับตัวแปรอิสระ a และ b โดย $(W_g f)(a, b)$ จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ต (Wavelet Coefficient)



ภาพที่ 2.19 ลักษณะของผลการ Coefficient ระหว่าง $f(t)$, $g((t - b)/a)$

2.9.2 ความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ด

การแปลงฟูเรียร์นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นการแปลงสัญญาณ $f(t)$ จากโดเมนส์เวลาไปเป็นสัญญาณ $F(\omega)$ ซึ่งอยู่ในโดเมนส์ความถี่หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าเป็นการหาสเปกตรัมของสัญญาณ $f(t)$ นั้นเอง โดยมีสมการเป็น

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.7)$$

จะสังเกตเห็นว่าข้อมูลที่ได้อาจจากการทรานส์ฟอร์ม จะมีตลอดย่านความถี่ $-\infty$ ถึง $+\infty$ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต ณ ขณะเวลาใดๆ ก็จะมีผลกระทบไปตลอดย่านสัญญาณของสเปกตรัม $F(\omega)$ ด้วยนอกจากนี้การแปลงฟูเรียร์ยังไม่สามารถเลือกทำการวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะช่วงเวลาหรือความถี่ใดๆได้ ดังนั้นวิธีการแปลงฟูเรียร์จึงให้ข้อมูลมากเกินไป ความจำเป็น นอกจากนี้ในทางปฏิบัติหากสัญญาณอินพุตจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ (Non Stationary Signal) การใช้การแปลงฟูเรียร์จะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณเนื่องจากมีข้อมูลมากเกินไปในการคำนวณใหม่แต่ละครั้งดังนั้นการแปลงฟูเรียร์จึงเหมาะสมสำหรับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงคงที่ (Stationary Signal)

การแปลงกาบอร์ (Gabor Transform) เป็นการแปลงที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นแบบแรกเพื่อแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะเป็นการทำการแปลงฟูเรียร์เฉพาะช่วงเวลาและช่วงความถี่ที่กำหนดผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (Window function: wf) ซึ่งหน้าต่างนี้จะใช้ฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian function)

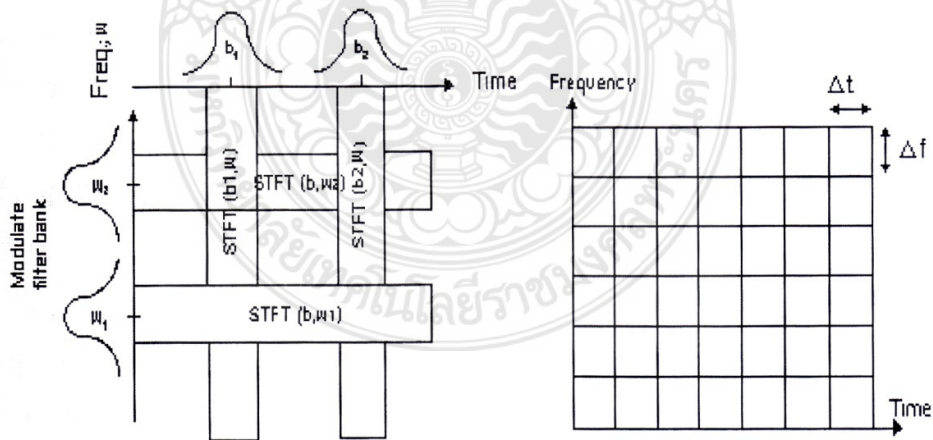
$$g_a(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} e^{-\frac{t^2}{4a}} \quad (2.8)$$

$$(G_b^a f)(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} f(t) g_a(t - b) dt \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.8) เป็นฟังก์ชันหน้าต่างแบบเกาส์เซียน และสมการที่ (2.9) เป็นสมการของการแปลงกาบอร์ จะเห็นว่าการทรานส์ฟอร์มแบบนี้สามารถเลือกตำแหน่งการวิเคราะห์สัญญาณ โดยกำหนดที่พารามิเตอร์ b และเลือกช่วงความถี่ด้วยพารามิเตอร์ a แต่เนื่องจากการแปลงกาบอร์ให้ฟังก์ชันหน้าต่างแบบเดียวจึงอาจไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาต่อมาเป็นการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น (Short time Fourier Transform: STFT) ซึ่งจะสามารถทำการเลือกฟังก์ชันหน้าต่างที่จะใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณได้ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสัญญาณอินพุตที่จะวิเคราะห์ได้ดีขึ้น

$$G_{af}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (e^{-i\omega t} f(t)) \overline{w(t-b)} dt \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.10) จะเป็นสมการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น โดยที่ตำแหน่งเวลาในการวิเคราะห์จะกำหนดโดยค่า " b " และช่วงความถี่ในการวิเคราะห์กำหนดด้วยความถี่ของฟังก์ชันหน้าต่างนั้นๆ แต่จะสังเกตเห็นว่าทั้งการแปลงกaborและการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้นจะมีลักษณะของช่วงการวิเคราะห์ที่คงที่ดังแสดงในภาพ 2.11 แสดงช่วงเวลาและช่วงความถี่คงที่ (Fixed resolution transform) ทั้งนี้ฟังก์ชันหน้าต่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติขณะทำการแปลงซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่สูงจะมีช่วงคาบเวลาที่แคบในขณะที่สัญญาณความถี่ต่ำจะมีช่วงคาบเวลาที่กว้างกว่า ดังนั้นการแปลงกaborและการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น อาจทำให้ข้อมูลที่ได้จากการแปลงออกมามากหรือน้อยเกินไป ถ้าเป็นในกรณีหลังจะทำให้ต้องมีการแปลงจากหลายช่วงเวลาแล้วนำมาประกอบกัน จึงจะได้ข้อมูลครบถ้วนในช่วงเวลาที่ต้องการ ดังนั้นช่วงเวลาควรจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับช่วงความถี่ที่จะทำการวิเคราะห์ นั่นคือในช่วงความถี่สูงขึ้นไปจะมีช่วงเวลาในการวิเคราะห์ที่น้อยลงและในช่วงความถี่ต่ำลงจะใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์มากขึ้น



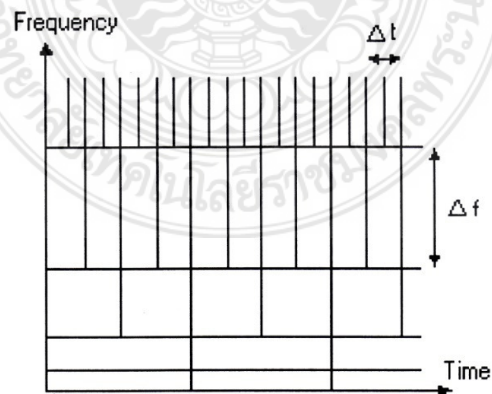
ภาพที่ 2.20 ลักษณะของระนาบเวลาความถี่แบบคงที่

(Constant Time - Frequency plane)

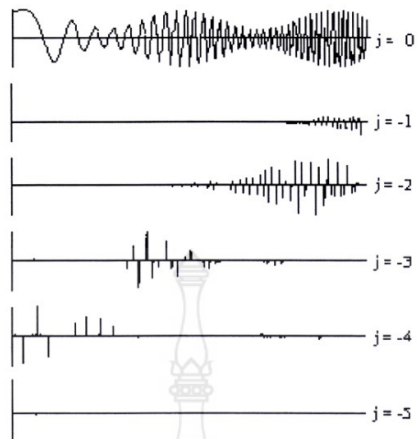
จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้มีการพัฒนาเป็นการแปลงในรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า "การแปลงเวฟเล็ต" ซึ่งจะเป็นการแปลงผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง โดยฟังก์ชันหน้าต่างสามารถเลื่อนตำแหน่งและปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่วิเคราะห์ได้โดยเรียกฟังก์ชันหน้าต่างแบบนี้ว่า "ฟังก์ชันเวฟเล็ต" (wavelet function)

$$(W_{gf})(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g^* \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \quad (2.11)$$

$g(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ซึ่งจะถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a , " b " ตามลำดับ โดยช่วงเวลาและความถี่ในการทรานฟอร์มจะสัมพันธ์กันดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พิจารณาภาพที่ 2.22 จะพบว่าระนาบเวลาและความถี่จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลา และความถี่ที่สัมพันธ์กันคือ ในช่วงความถี่สูงจะใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์เพียงสั้นๆ (Δf สูง Δt ต่ำ) ซึ่งจะเหมาะสมกับลักษณะสัญญาณในทางปฏิบัติ ในภาพที่ 2.23 จะเป็นการแสดงลักษณะการแตกกระจายสัญญาณออกไปในระดับความถี่ที่ต่างกัน โดยในระดับที่ $j = -1$ จะมีเฉพาะส่วนความถี่สูงและในระดับที่ j ต่ำลง สัญญาณจะมีความถี่ที่ต่ำลงด้วย ซึ่งจะเห็นว่าสอดคล้องกับภาพของระนาบเวลาและความถี่



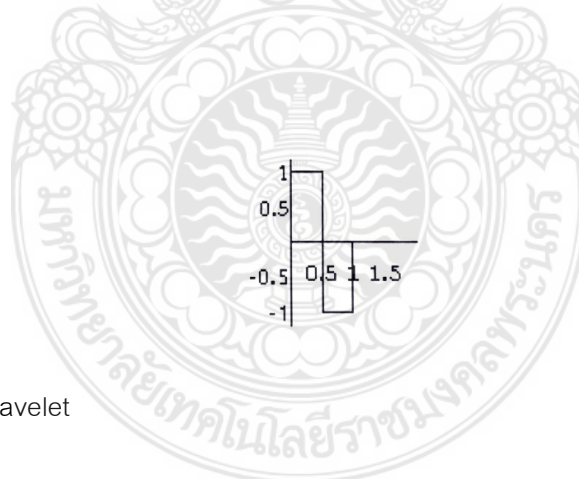
ภาพที่ 2.21 ลักษณะของระนาบเวลาและความถี่สำหรับการแปลงเวฟเล็ต



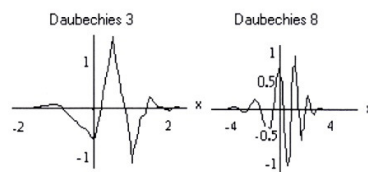
ภาพที่ 2.22 ลักษณะการแตกกระจายสัญญาณไปยังระดับความละเอียดต่างๆ

นอกจากนี้ $g(t)$ ยังมีได้หลายรูปแบบแต่ต้องเป็นไปตามคุณสมบัติของการแปลงเวเลตดังนั้นก็จึงทำให้การแปลงเวเลตมีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่มีความเหมาะสมได้เป็นอย่างดีดังภาพที่ 2.23 แสดงลักษณะของฟังก์ชันเวเลตแม่ชนิดต่างๆที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

Harr wavelet

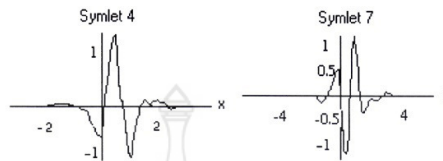


Daubechies wavelet

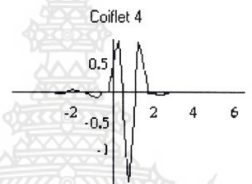


ภาพที่ 2.23 ลักษณะของฟังก์ชันเวเลตแม่ชนิดต่างๆ

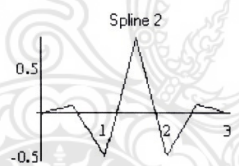
Symlet wavelet



Coiflet wavelet



Spline wavelet



ภาพที่ 2.23 ลักษณะของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ชนิดต่างๆ(ต่อ)

2.9.3 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

จากการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้น จะสังเกตเห็นว่าหน้าต่างเวลา-ความถี่ (Time-frequency window) จะมีพื้นที่ในการวิเคราะห์ที่คงที่เสมอไม่ว่าจะเป็นการพิจารณาที่ความถี่และช่วงเวลาใดๆ ขนาดช่วงความกว้างของความถี่และช่วงเวลาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของฟังก์ชันหน้าต่างที่ใช้ ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติในขณะการแปลง แต่ในทางปฏิบัติความถี่ของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนไซเคิลต่อหนึ่งหน่วยเวลา ที่ความถี่สูงจะมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในช่วงเวลาที่แคบ ส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในช่วงความถี่ต่ำจะใช้ช่วงเวลาที่นานกว่า ดังนั้นถ้าใช้การแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลานั้น และเลือกฟังก์ชันหน้าต่างที่มีช่วงความถี่และช่วงเวลาไม่เหมาะสมจะทำให้ต้องมีการทำการแปลงหลายครั้งหลายตำแหน่ง เพื่อให้ได้ข้อมูลในช่วงเวลาทั้งหมดที่ต้องการ หรือถ้าความกว้างของช่วงเวลาของฟังก์ชันหน้าต่าง

มากเกินไปจะทำให้ได้รับข้อมูลมากเกินไปจนความจำเป็น ดังนั้นฟังก์ชันหน้าต่างที่ดี ความกว้างของช่วงเวลาและช่วงความถี่จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนผกผันที่สัมพันธ์กัน นั่นคือเมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณที่มีความถี่สูง ความกว้างของช่วงเวลาควรจะแคบและมีช่วงความถี่ที่กว้าง ในทางกลับกันถ้าวิเคราะห์สัญญาณที่มีความถี่ต่ำ ความกว้างของช่วงเวลาควรจะกว้างและมีช่วงความถี่ที่แคบ เพื่อที่จะทำให้ได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนและเวลาในการแปลงน้อยลง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น ไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณที่มีกรเปลี่ยนแปลงความถี่สูงต่ำในสัญญาณตัวเดียวกัน แต่ในการแปลงเวฟเล็ตจะอาศัยฟังก์ชันหน้าต่างซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของช่วงเวลาและช่วงความถี่ให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์สัญญาณในช่วงความถี่และช่วงเวลาที่น่าสนใจใดๆได้ ซึ่งฟังก์ชันหน้าต่างที่มีคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่า "ฟังก์ชันเวฟเล็ต"

กำหนดให้ $\Psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ และเป็นไปตาม Admissibility condition [1] คือ

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2.12)$$

เรียก $\Psi(t)$ ว่าเป็นรากฐานเวฟเล็ต (Basis wavelet) หรือเวฟเล็ตแม่ ซึ่งมีคุณสมบัติในการเลื่อนตำแหน่งและเปลี่ยนความถี่ได้ดังแสดงในสมการที่ (2.13)

$$\Psi_{b,a}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi \left[\frac{t-a}{b} \right] \quad (2.13)$$

และเมื่อนำมาเขียนเป็นสมการการแปลงฟูเรียร์ที่พิจารณาผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง ที่ตำแหน่งเวลาและความถี่ในขณะนั้นได้สมการที่ (2.14) ซึ่งก็คือการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องนั่นเอง

$$(W_{\psi}f)(b, a) = |a|^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \quad (2.14)$$

โดยที่ $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$ และ $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$

เทอม $|a|^{\frac{1}{2}}$ จะเป็นการนอร์มอลไลซ์ (Normalization) ของ $\Psi(t)$ เพื่อให้พลังงานของ $\Psi(t)$ ที่ b, a ใดๆยังคงมีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอ ทำให้การแปลงเวฟเล็ตที่ตำแหน่ง b, a ใดๆ พลังงานของ $\Psi(t)$ จะไม่มีผลกระทบของสัญญาณ $f(t)$ ในช่วงนั้นๆ และจะสามารถเขียนสมการการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องในลักษณะของ Inner product ได้ดังนี้

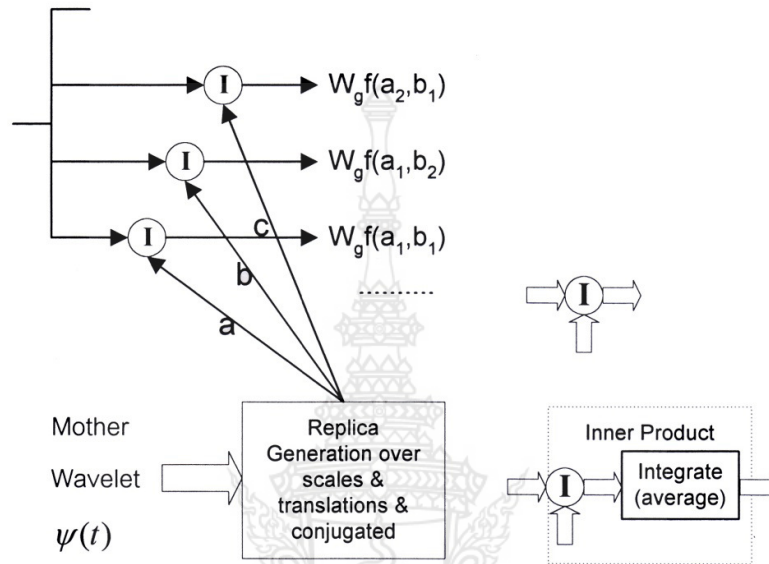
$$(W_{\psi}f)(b, a) = \langle f, \Psi_{b,a} \rangle \quad (2.15)$$

สังเกตว่าจากการกำหนดให้ $\Psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ นั่นคือ $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty$ แสดงว่า $\Psi(t)$ จะต้องหาขนาดและพลังงานได้เสมอ เพราะฉะนั้น $\Psi(t)$ จะมีการลดลงสู่ศูนย์ทั้งสองด้าน ถ้าให้ $\hat{\Psi}(0) = 0$ ซึ่งจะต้องมีเงื่อนไขอีกอันหนึ่งเกิดขึ้นคือ

$$\hat{\Psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \Psi(t) dt \quad (2.16)$$

$$\hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$$

แสดงว่าพื้นที่ใต้กราฟของ $\Psi(t) = 0$ นั่นก็คือฟังก์ชันดังกล่าวต้องมีการออกสขีเลขเสมอ



หมายเหตุ Ψ

$$\begin{aligned}
 a &= \Psi^*[(t - b_1)/a_1] \\
 b &= \Psi^*[(t - b_2)/a_1] \\
 c &= \Psi^*[(t - b_2)/a_2]
 \end{aligned}$$

ภาพที่ 2.24 การแปลงเวฟเล็ตในลักษณะของการ Inner product

ถ้าพิจารณาหน้าต่างเวลา-ความถี่ ของการแปลงเวฟเล็ต โดยที่ $\Psi(t), \hat{\Psi}(\omega)$ เป็นไปตามเงื่อนไข $tW(t) \in L^2(\mathbb{R})$ และกำหนดให้จุดศูนย์กลางและรัศมีมีความกว้างของ $\Psi(t)$ เป็น t^* และ $\Delta\Psi$ ตามลำดับ ดังนั้น $\Psi_{b,a}$ จะมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $b + at^*$ และมีรัศมีเป็น $a\Delta\Psi$ โดยข้อมูลของสัญญาณ $f(t)$ จะถูกพิจารณาผ่าน Time-window ที่มีความกว้างของช่วงเวลาดังนี้

$$[b + at^* - a\Delta\Psi, b + at^* + a\Delta\Psi] \tag{2.17}$$

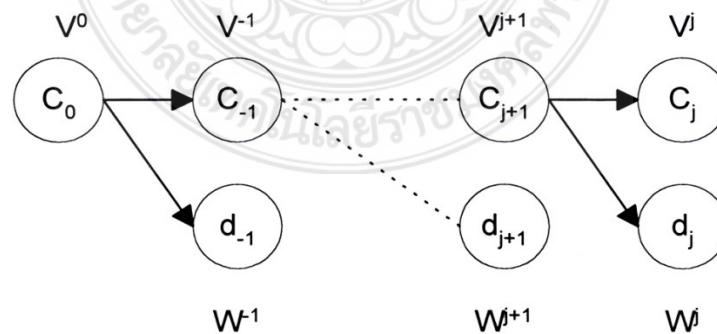
2.9.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบแบ่งช่วง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายถึง การแปลงเวฟเล็ตแบบแบ่งช่วง (Discrete wavelets Transform: DWT) โดยจะทำการพิจารณาการแปลงเวฟเล็ตแบบแบ่งช่วงในลักษณะของ Filter banks ในทางปฏิบัติสัญญาณที่วิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์จะเป็นการสุ่ม (Sampling) สัญญาณเข้ามาในจำนวนที่จำกัด ดังนั้นถ้ากำหนดให้ $C_0(m)$ เป็นเซตของสัมประสิทธิ์ของสัญญาณอินพุต จำนวน m ตัวและกำหนดให้ระดับความละเอียดของสัญญาณเริ่มต้นที่ศูนย์ จะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$f(t) \in V_0; f(t) \in L^2(\mathbb{R}) \quad (2.18)$$

$$V_0 = W_{-1} \oplus \dots \oplus W_{j+2} \oplus W_{j+1} \oplus W_j \oplus V_j \quad (2.19)$$

สมการที่ (2.19) จะเป็นสมการการแตกกระจายสัญญาณ $f(t)$ ในสเปซ V^0 ไปจนถึงระดับความละเอียดที่ j ดังนั้นเทอมสัมประสิทธิ์ $c_0 m$ จะถูกแตกเป็นสัมประสิทธิ์ในเซตของ $c_j(m)$ ในสเปซ V^j และกลุ่มของเซต $d_{-1}(m), d_{-2}(m), \dots, d_j(m)$ ซึ่งอยู่ในเวฟเล็ตสเปซที่ระดับความละเอียดต่างๆกัน ขบวนการดังกล่าวนี้จะเป็นลักษณะของวิธีการ "การแปลงเวฟเล็ตแบบแบ่งช่วง" (Discrete Wavelets Transform: DWT) นั่นเอง ดังแสดงในภาพที่ 2.25



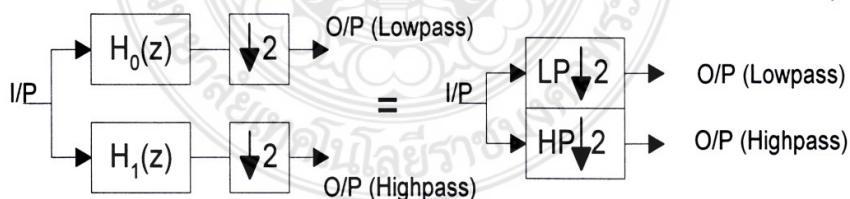
ภาพที่ 2.25 ลักษณะของการแจกแจงสัมประสิทธิ์ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

(ก) การแปลงเวฟเลตโดยใช้หลักการวิเคราะห์ของฟิลเตอร์แบงค์

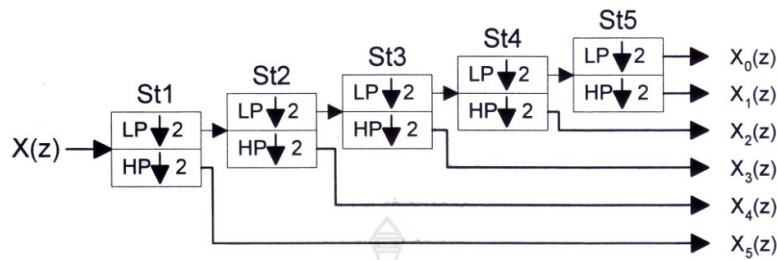
ขบวนการแปลงเวฟเลตแบบแบ่งช่วง จะทำการพิจารณาสัญญาณส่งผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่า ก็เปรียบกับการนำสัญญาณอินพุตนั้นผ่าน วงจรฟิลเตอร์ที่มีแบนด์วิทที่มีอัตราลดลงสองเท่า เหมือนกับแบนด์วิทของฟังก์ชันหน้าต่างในขณะ นั้นเอง ดังนั้นจึงสามารถนำเอาหลักการของฟิลเตอร์แบงค์ มาใช้ในการสร้างการแปลงเวฟเลตแบบ แบ่งช่วงในทางปฏิบัติได้ ก่อนที่จะอธิบายรายละเอียดของการแปลงเวฟเลตแบบแบ่งช่วง ขอ อธิบายถึงหลักฐานของฟิลเตอร์แบงค์ก่อนดังนี้

(ข) การวิเคราะห์ออกเทฟของฟิลเตอร์แบงค์ (Octave Analysis Filter Banks)

ฟิลเตอร์แบงค์แบบ 2 ช่องสัญญาณ (Two channel filter banks) เป็นการแยกสัญญาณ อินพุตออกเป็น 2 ส่วน โดยแบ่งเป็นส่วนความถี่ต่ำและส่วนความถี่สูง ดังนั้นฟิลเตอร์แบงค์แบบ สองช่องสัญญาณ จึงประกอบด้วยวงจรที่เป็น ตัวกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter): $H_0(z)$ และ ตัวกรองความถี่สูง (Complementary highpass filter): $H_1(z)$ ซึ่งในส่วนของความถี่สูง (highpass) จะใช้ในการแยกความถี่ในแบนด์ที่ต้องการออกมา (Band-separating filter) ดังแสดง ในภาพที่ 2.26 , ภาพที่ 2.27 และภาพที่ 2.28 ลักษณะของ การวิเคราะห์ออกเทฟของฟิลเตอร์ แบงค์ จะเป็นแบบโครงสร้างต้นไม้ (Tree structure) ซึ่งเป็นการนำเอาฟิลเตอร์แบงค์แบบ 2 ช่องสัญญาณมาเรียงต่อกัน โดยใช้สัญญาณเอาท์พุตในส่วนความถี่ต่ำจากวงจรตัวกรองความถี่ ต่ำมาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกอีกครั้งหนึ่งดังแสดงในภาพที่ 2.28



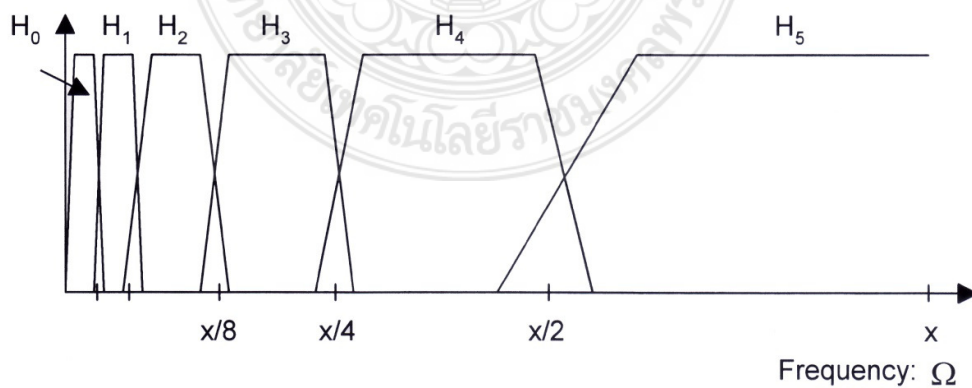
ภาพที่ 2.26 สัญลักษณ์ของฟิลเตอร์แบงค์แบบ 2 ช่องสัญญาณ หรือ Bands separator



ภาพที่ 2.27 สัญลักษณ์โครงสร้างต้นไม้ในการวิเคราะห์หรือออกเทพของฟิลเตอร์แบงค์

ในฟิลเตอร์แบงค์แบบ 2 สัญลักษณ์ ชุดแรก จะทำการแยกความถี่สูงครึ่งด้านบน ($X_5(z)$) และสัญลักษณ์ความถี่ต่ำครึ่งด้านล่างมาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกครึ่งหนึ่งอีกครั้ง โดยกำหนดให้ครึ่งบนทางความถี่สูงเป็นสัญลักษณ์ $X_4(z)$ และจะนำส่วนความถี่ต่ำไปทำการแยกแบนด์ต่อไปเรื่อยๆ ตามระดับที่ต้องการ ในภาพที่ 2.28 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของแบนด์ความถี่ที่ถูกแบ่งออกไปเรื่อยๆ สัมพันธ์กับอัตราส่วนการสุ่มของสัญญาณอินพุต $X(z)$ ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลการสุ่มจะลดลงสองเท่าในแต่ละสเตทนั่นเอง ฟังก์ชันทรานเฟอร์ของฟิลเตอร์แบงค์ในแต่ละระดับจะหาได้จาก

$$H_i(z) = \frac{X_i(z)}{X(z)} \text{ เมื่อ } i = 0, 1, \dots, 5 \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.28 ลักษณะของการแยกแบนด์ความถี่ของออกเทพฟิลเตอร์แบงค์

Cut off frequency มีค่าลดลงครึ่งละสองเท่า ดังนั้นจึงเรียกว่าออกเทฟฟิลเตอร์แบงก์ (Octave filter banks) และจากภาพที่ 2.28 จะสังเกตได้ว่า Absolute transition bandwidth ซึ่งเป็นเอาต์พุตของความถี่ต่ำ จะลดลงในอัตราสองเท่า โดยลดลงไปในทางความถี่ต่ำลงและฟังก์ชันทรานส์ฟอร์มอื่นๆ จะมีลักษณะเป็น Band pass ดังนั้นฟิลเตอร์แบงก์จึงมีความสามารถในการแยกแบนด์ความถี่ต่างๆออกมา (Band-separating filter)

การสร้าง DWT โดยใช้การวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์

ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการพิจารณาการแจกแจงสัมประสิทธิ์ของการโปรเจกต์สัญญาณในสเปซ V^{j+1} ไปในสเปซย่อย V^j และ W^j ซึ่งเป็นการทำ DWT หนึ่งระดับในรูปแบบของการวิเคราะห์ด้วยฟิลเตอร์แบงก์โดยอาศัยหลักการของฟิลเตอร์แบงก์แบบ 2 ช่องสัญญาณ

กำหนดให้สัญญาณอินพุต $f(t) \in V^{j+1}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$f_{j+1}(t) = \sum_n c_{j+1}(n) \phi_{j+1,n}(t) \in V^{j+1} \quad (2.21)$$

ซึ่งสัมประสิทธิ์ $c_{j+1}(n)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ข้อมูลสุ่มที่ทราบค่าของ $f(t)$ จากความสัมพันธ์ $V^{j+1} = V^j \oplus W^j$ จะสามารถเขียนเป็นการโปรเจกต์ $f(t)$ ลงในสเปซ V^j และ W^j ได้เป็น

$$f_{j+1}(t) = \sum_m c_j(m) \phi_{j,m}(t) + \sum_m d_j(m) \psi_{j,m}(t) \quad (2.22)$$

ในทางปฏิบัติการโปรเจกต์ชั้นจะเป็นการหาค่าของ $c_j(m)$ และ $d_1(m)$ จาก $c_{j+1}(n)$ และขณะเดียวกันฟังก์ชันพื้นฐาน $\phi_{j,m}(t)$ ในสเปซ V^j ด้วยโดยใช้สมการที่ (3.23)

$$\phi_{j,m}(t) = 2^{j/2} \sum_v \overline{h_0(v)} \phi(2^{j+1}t - 2m - v) \quad (2.23)$$

ถ้าสมมติให้ $2m + v \rightarrow n$ และ $h_0(n) = 2^{\frac{1}{2}} h_0 k, k \in ZZ$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\phi_{j,m}(t) &= \sum_n h_0(n - 2m) 2^{(j+1)/2} \phi(2^{j+1}t - n) \\ &= \sum_n h_0(n - 2m) \phi_{j-1,n}(t)\end{aligned}\quad (2.24)$$

ในการทำงานเดียวกันฟังก์ชันพื้นฐาน $\phi_{j+1,m}(t)$ ของสเปซ V^{j+1} จะถูกแบ่งออกเป็นเซตของฟังก์ชันพื้นฐาน $\psi_{j,m}(t)$ ในสเปซ W^j ด้วยเช่นกัน ดังนั้น $\psi_{j,m}(t)$ สามารถกำหนดได้โดยวิธีเดียวกัน ดังสมการที่ (2.25)

$$\psi_{j,m}(t) = \sum_n h_1(n - 2m) \phi_{j+1,n}(t) \quad (2.25)$$

ถ้าต้องการหาสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันคลื่น $c_j(m)$ จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.26) โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ $c_j(n) = \langle f(t), \phi_{j,n}(t) \rangle$ และสมการที่ (2.24) ช่วยพิสูจน์ดังนี้

$$\begin{aligned}c_j(m) &= \langle f(t), \phi_{j,m}(t) \rangle \\ &= \langle f(t), \sum_n h_0(n - 2m), \phi_{j+1,n}(t) \rangle \\ &= \sum_n h_0(n - 2m) \langle f(t), \phi_{j+1,m}(t) \rangle\end{aligned}\quad (2.26)$$

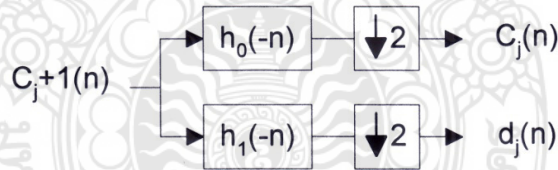
$$= \sum_n h_0(n - 2m)c_{j+1}(n)$$

$$= h_0(-n) * c_{j+1}(n) |_{n=2m}$$

เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์ $c_j(m)$ จะหาได้จากการคอนโวลูชันของสัมประสิทธิ์ $c_{j+1}(n)$ กับลำดับ $h_0(-n)$ แล้วทำการลดอัตราสุ่มลง (Down sampling) ด้วยสอง เพื่อให้เอาต์พุตมีจำนวนเท่ากับ m ในขณะเดียวกันสัมประสิทธิ์ของเวฟเล็ต $d_j(m)$ ก็จะสามารถหาได้จากวิธีเดียวกันคือ

$$d_j(m) = h_1(-n) * c_{j+1}(n) |_{n=2m} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.26) และ (2.27) สามารถเขียนเป็นแผนภูมิในลักษณะของฟิลเตอร์แบงก์แบบ 2 ช่องสัญญาณ สำหรับการแจกแจงสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตได้ดังภาพที่ 2.29 ซึ่งจะเป็นการโปรเจกชันสัญญาณไปยังสเปซย่อยนั่นเอง

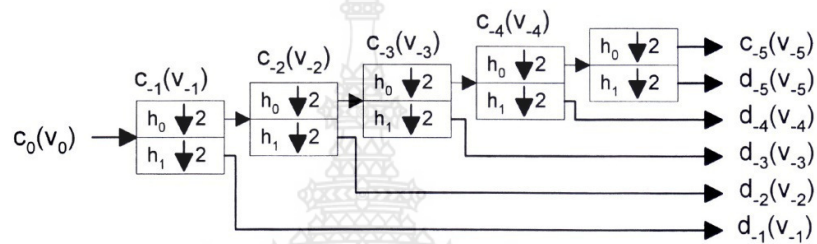


ภาพที่ 2.29 ฟิลเตอร์แบงก์แบบ 2 ช่องสัญญาณในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การแตกกระจายสัญญาณจะถูกกระทำด้วย Analysis filter banks ที่มี Impulse response เป็น $h_0(-n)$ และ $h_1(-n)$ โดยที่สัญญาณ $f(t) \in V^{j+1}$ จะมีความละเอียดเป็นสองเท่าของสัญญาณในสเปซย่อย V^j, W^j และสัมประสิทธิ์ $c_j(m), d_j(m)$ จะมีอัตราการสุ่มลดลงครึ่งหนึ่งของ $c_{j+1}(n)$ นั่นหมายความว่า จำนวนสัมประสิทธิ์ของ $c_{j+1}(n)$ จะถูกแบ่งให้ $c_j(m), d_j(m)$ อย่างละครึ่ง ถ้าพิจารณาคุณสมบัติของการสเกล (Two-scale property) $f(t) \rightarrow f(2t)$ และจากลักษณะสมบัติของการเป็นโครงข่ายของสเปซย่อยๆ V^j จะพบว่าการโปรเจกชัน V^{j+1} เป็น V^j จะเป็นการลดความถี่ของสัญญาณลงครึ่งหนึ่ง จะมีลักษณะ

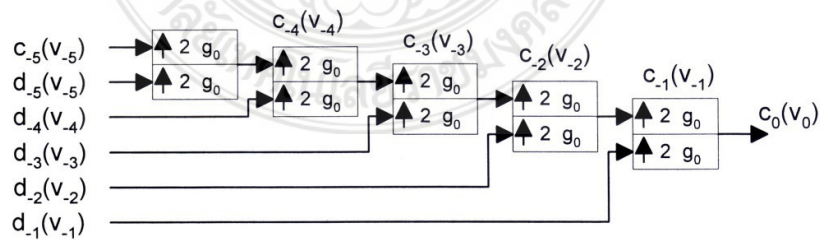
เป็นตัวกรองความถี่ต่ำและการโปรเจ็คไปใน W^j จะเป็นส่วนของตัวกรองความถี่สูง ดังนั้น $h_0(-n)$ และ $h_1(-n)$ จึงเป็น Impulse reponse ของตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูง ตามลำดับ

ในกรณีที่มีการทำ DWT ซ้ำในแนวของความถี่ จะกลายเป็นลักษณะของ Dyadic Tree structure ซึ่งเหมือนกับขบวนการ Octave filter banks ดังแสดงในภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 ลักษณะของ DWT โดยใช้ Dyadic Tree structure (Octave filter bank)

สัมประสิทธิ์เวฟเล็ต d_{-1} ถึง d_{-5} จะเปรียบเสมือน Discrete - time bandpass signal หมายถึงสัญญาณในช่วงที่ผ่าน Basspass filter ที่แบนด์ความถี่ต่างๆ ในขณะที่ c_{-5} ของฟังก์ชันสเกลลิ่งจะเป็น Discrete - time lowpass signal ซึ่งดูได้จากภาพที่ 2.28 และโครงสร้างในภาพที่ 2.30 เรียกว่า “การแปลงเวฟเล็ตแบบแบ่งช่วง” (Discrete Wavelet Transform: DWT)



ภาพที่ 2.31 ลักษณะของ IWT โดยการใช้ Dyadic tree structure

ในภาพที่ 2.31 แสดงกระบวนการ “การแปลงกลับเวฟเล็ต” (Inverse Wavelets Transform: IWT) จะสังเกตเห็นว่า Upsampling digital filter $g_0(n)$ และ $g_1(n)$ จะกระทำกับ สัมประสิทธิ์ $c_j(m)$ และ $d_j(m)$ ในกรณีที่เป็นเลขคู่เท่านั้น เช่น สัมประสิทธิ์ $c_j(0)$ จะกระทำกับ $g_0(n)$ และ $c_j(1)$ จะกระทำกับ $g_0(n - 2)$ เป็นต้น

จากเนื้อหาทั้งหมดที่กล่าวมาทำให้ทราบถึงคุณสมบัติ ของการแปลงเวฟเล็ต ความแตกต่างระหว่างการแปลงเวฟเล็ตกับการแปลงข้อมูลอื่นๆ และความเหมาะสมของงานที่จะนำการแปลงเวฟเล็ต ชนิดต่างๆไปประยุกต์ใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การแปลงเวฟเล็ตในการประมวลผลภาพแบบ DWT โดยใช้ หลักการแยกองค์ประกอบแบนด์ย่อย (subband decomposition) ของภาพ ซึ่งเป็นเทคนิคของ Mallat โดยภาพต้นแบบจะถูกแยกเป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำดังรายละเอียดต่อไปนี้

การแปลงเวฟเล็ตในการประมวลผลภาพสามารถแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนคือ

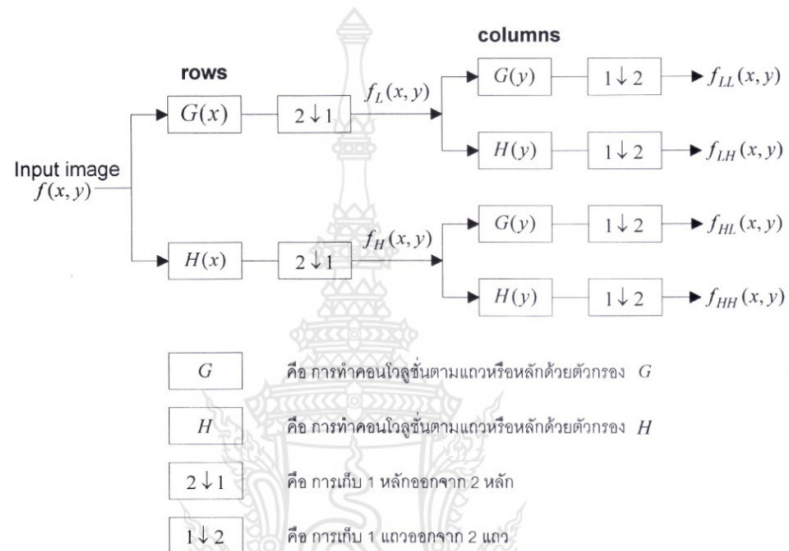
1) Wavelet Decomposition

เป็นการแยกภาพต้นฉบับออกเป็นองค์ประกอบย่อย ซึ่งแสดงได้ดังแผนภาพในภาพที่ 2.32 โดยเริ่มต้นจากภาพต้นฉบับ $f(x, y)$ จะถูกกรองไปตามแนวแถว (row) ด้วยตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ G และตัวกรองความถี่สูง H จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการลดจำนวนการสุ่ม (downsampling) ลง 2 เท่า โดยการเก็บข้อมูลมา 1 หลัก (column) จากข้อมูล 2 หลัก ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลเอาต์พุตความถี่สูงและความถี่ต่ำ จากนั้นเอาต์พุตทั้งสองจะถูกกรองตามแนวหลักและลดจำนวนการสุ่มลง 2 เท่า โดยการเก็บข้อมูล 1 แถวจาก 2 แถว ผลลัพธ์ที่ได้จะประกอบด้วยภาพแบนด์ย่อยความถี่ต่ำ $f_{LL}(x, y)$ จำนวน 1 ภาพ และภาพแบนด์ย่อยความถี่สูงจำนวน 3 ภาพ คือ $f_{LH}(x, y)$, $f_{HL}(x, y)$ และ $f_{HH}(x, y)$ ตามลำดับ โดยแต่ละภาพจะมีขนาดลดลงเป็น $1/4$ เท่าของภาพต้นฉบับ

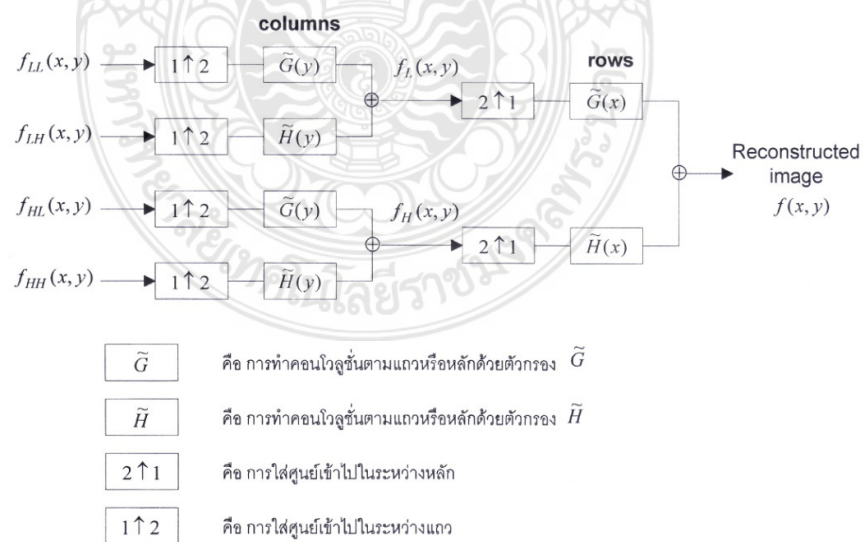
2) Wavelet Reconstruction

เป็นการสร้างภาพขึ้นมาใหม่จากองค์ประกอบย่อย ซึ่งแสดงได้ดังแผนภาพในภาพที่ 2.33 โดยเริ่มจากแบนด์ย่อยทั้ง 4 จะถูกเพิ่มจำนวนการสุ่ม (Upsampling) เป็น 2 เท่า โดยการเติมศูนย์เข้าไปในระหว่างแต่ละคู่ของแถว ภายหลังจากการเพิ่มจำนวนการสุ่มแล้วผลลัพธ์ที่ได้จะถูกกรองไปตามหลักและบวกเข้าด้วยกัน จากนั้นจะทำกระบวนการซ้ำไปตามแถว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นภาพที่ถูกสร้างกลับขึ้นมาใหม่

ในการแปลงเวฟเล็ตสำหรับภาพ 1 ครั้ง (Stage) จะทำให้ได้ภาพที่มีขนาดเท่ากัน 4 ภาพ คือเป็นภาพที่มีข้อมูลส่วนรายละเอียด (ข้อมูลความถี่สูง) จำนวน 3 ภาพ และเป็นภาพที่มีระดับความสว่าง (ข้อมูลความถี่ต่ำ) จำนวน 1 ภาพ ซึ่งขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ตนี้สามารถกระทำกับภาพข้อมูลความถี่ต่ำได้ต่อไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.34



ภาพที่ 2.32 แผนภาพ Image Wavelet Decomposition



ภาพที่ 2.33 แผนภาพ Image Wavelet Reconstruction

f_{LL1}	f_{LH1}
f_{HL1}	f_{HH1}

ภาพแบนด์ย่อยที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต 1 ครั้ง

f_{LL2}	f_{LH2}	f_{LH1}
f_{HL2}	f_{HH2}	
f_{HL1}		f_{HH1}

ภาพแบนด์ย่อยที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต 2 ครั้ง

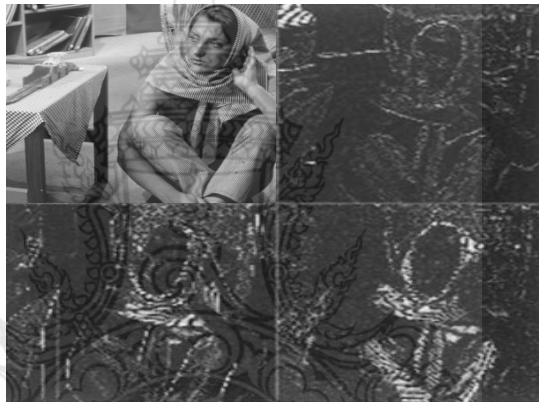
f_{LL3}	f_{LH3}	f_{LH2}	f_{LH1}
f_{HL3}	f_{HH3}		
f_{HL2}		f_{HH2}	
f_{HL1}		f_{HH1}	

ภาพแบนด์ย่อยที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ต 3 ครั้ง

ภาพที่ 2.34 ภาพแบนด์ย่อยที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตหลายครั้ง



ภาพที่ 2.35 ภาพถ่ายต้นแบบ Barbara ขนาด 512x51x8 บิต



ภาพที่ 2.36 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตระดับที่ 1



ภาพที่ 2.36 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ตระดับที่ 2

2.10 การปรับค่าความสว่างของภาพ[1,3,6,7]

การปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการต่อภาพ เพราะโดยปกติภาพถ่ายดาวเทียมที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีพื้นที่บางส่วนของภาพซ้อนทับ (Overlaped) กัน แต่เนื่องจากการต่อข้อมูลภาพที่ผ่านมาก่อนหน้าเป็นการต่อข้อมูลภาพโดยตรง ซึ่งไม่คำนึงถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นกับค่าความสว่างที่สัมพันธ์ของข้อมูลภาพ เช่น ข้อมูลภาพที่ได้จากเวลาบันทึกแตกต่างกันจะให้ความสว่างของข้อมูลภาพที่แตกต่างกันและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป ทำให้คุณลักษณะของข้อมูลภาพเปลี่ยนไปเช่นกัน เช่น ลักษณะต้นไม้ที่เปลี่ยนไป จึงเป็นสาเหตุให้ข้อมูลภาพที่ได้ภายหลังต่อมีลักษณะที่ไม่มีความต่อเนื่องกลมกลืนกันจนสามารถมองเห็นได้ชัดเจน ทำให้สังเกตเห็นรอยตะเข็บที่เกิดจากการต่อข้อมูลภาพได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอขั้นตอนการปรับค่าความสว่างของข้อมูลภาพให้สอดคล้องกันเพื่อที่จะลดความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลภาพได้ ก่อนที่จะนำข้อมูลมาต่อกันและลบรอยตะเข็บของข้อมูลภาพต่อไป

2.10.1 ค่าเฉลี่ยและเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean Standard Deviation)

ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สามารถคำนวณหาได้จากค่าของข้อมูลใดๆ ที่รวบรวมได้ หรือแม้แต่นำมาใช้กับข้อมูลภาพก็ยังคงใช้วิธีการเดียวกันนี้ซึ่งค่าเฉลี่ยก็คือค่าความสว่างของข้อมูลภาพในระดับสีเทา (Gray scale) ทุกๆข้อมูลที่สามารถอ่านได้

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I(i) \quad (2.28)$$

กำหนดให้

- μ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพ
- I คือ ค่าความสว่างของข้อมูลภาพในพิกัดภาพที่ซ้อนทับ
- n คือ จำนวนของข้อมูลภาพทั้งหมด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพคือ จำนวนซึ่งเป็นค่าที่แสดงคุณลักษณะเฉพาะของจุดภาพซึ่งลักษณะของจุดภาพที่จะเปลี่ยนแปลงต่างไปจากค่าเฉลี่ย สำหรับในภาพระดับสีเทาที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงแล้วความคมชัดของภาพก็จะสูงตาม แต่ยังมีส่วนทำให้ภาพมีข้อมูลที่เป็นสัญญาณรบกวนมากขึ้นด้วย ซึ่งสมการของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงได้ในสมการที่ (2.29)

$$\sigma = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (i) \right] - \mu^2} \quad (2.29)$$

กำหนดให้

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพ

ความน่าเชื่อถือของค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในความเป็นจริงจะมีข้อมูลจำกัดอยู่ที่จำนวนข้อมูลที่นำมาพิจารณานั้น ไม่มีค่าที่จำกัดแน่นอนซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับข้อมูลภาพที่นำมาพิจารณาจากสมการที่ (2.28) และ (2.29) สามารถจะนำไปใช้ในการพิจารณาเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความสว่างระหว่างข้อมูลภาพทั้งสองได้ หากความสัมพันธ์ของสมการข้างล่างดังนี้

$$B_n = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} B_0 + \mu_1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \mu_2 \quad (2.30)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_1(i) \quad \mu_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_2(i)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_1^2(i) \right] - \mu_1^2} \quad \sigma_2 = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} I_2^2(i) \right] - \mu_2^2}$$

โดยกำหนดให้

- B_n คือ ระดับค่าสีเทาของข้อมูลภาพใหม่
- B_0 คือ ระดับค่าสีเทาของข้อมูลภาพเดิม
- σ_1 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพอ้างอิงจากพื้นที่ส่วนบริเวณซ้อนทับ
- σ_2 คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพที่ต้องปรับค่าความสว่างจากพื้นที่บริเวณซ้อนทับ
- μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพอ้างอิงจากพื้นที่ส่วนบริเวณซ้อนทับ
- μ_2 คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพที่ต้องการปรับค่าความสว่างจากพื้นที่บริเวณซ้อนทับ

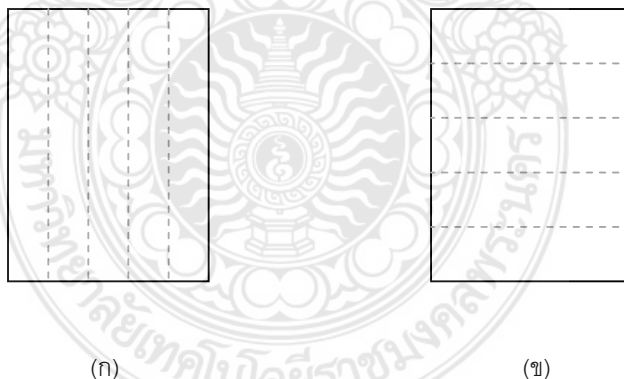
2.11 การหาค่าสหสัมพันธ์[4,8]

ในการต่อภาพถ่ายดาวเทียมทั้งสองเข้าด้วยกันจำเป็นต้องหาค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลภาพในบริเวณที่ซ้อนทับ เพื่อให้ได้บริเวณที่ต่อกันแล้วกลมกลืนได้ดี โดยดูจากลักษณะที่สอดคล้องหรือเหมือนกันของภาพทั้งสอง ซึ่งในการสังเกตด้วยตาเปล่า ถ้าบริเวณที่ต้องการหามีลักษณะคล้ายกับบริเวณอื่นๆ ในภาพที่ไม่ต้องการก็อาจจะทำให้เกิดการผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นเพื่อให้ได้บริเวณข้อมูลภาพที่สัมพันธ์กันมากที่สุดในการต่อข้อมูลภาพจึงได้อาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยโดยที่จะดูจากค่าตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการจะนำมาต่อ นั่นซึ่งเรียกว่า ค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลภาพ (Image correlation) ลักษณะของสมการที่จะแสดงต่อไปนี้เป็น การหาค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลภาพโดยการอาศัยการเปรียบเทียบที่ต้องการของข้อมูลภาพทั้งสองแบบ กล่าวคือ พิกัดภาพหรือที่ละพิกัดภาพ โดยจะกำหนดให้บริเวณที่ต้องการจะสัมพันธ์มีลักษณะเป็นหน้ากาก (Mask) มีขนาดตามต้องการและเคลื่อนที่ไปบนข้อมูลภาพต้นฉบับจนกระทั่งพบบริเวณที่สัมพันธ์กันก็จะแสดงค่าความสัมพันธ์ออกเป็นตัวเลข ค่าของตัวเลขที่มากจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของภาพมีลักษณะที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกันมากที่สุดแต่ทั้งนี้จะไม่เกิน "1"

2.12 ขั้นตอนการต่อภาพแบบสหสัมพันธ์

การหาพิกัดที่ซ้อนกันของข้อมูลภาพที่ต้องการ โดยทั่วไปข้อมูลภาพที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกันนั้นต้องมีพื้นที่บางส่วนที่เหลื่อมทับกันระหว่างข้อมูลภาพทั้งสองไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ หรือ 1 ใน 5 ส่วน ดังนั้นการกำหนดรอยต่อก็จะหาได้จากบริเวณที่พิกัดของข้อมูลภาพมีการซ้อนทับ ซึ่งในการต่อข้อมูลภาพนั้นจะไม่คำนึงว่าระดับสีเทาของข้อมูลภาพทั้งสองจะแตกต่างกันหรือเหมือนกันเพราะว่ามีซอฟต์แวร์ที่ต้องนำมาคิด แต่ในการพิจารณาจะคำนึงถึงเพียงลักษณะของทางภูมิประเทศของภาพเท่านั้น

ในการหาพิกัดซ้อนทับของข้อมูลภาพสามารถทำได้โดย การกำหนดพื้นที่ขนาดเล็กที่ได้ตัดมาจากข้อมูลภาพใหญ่ในข้อมูลภาพต้นฉบับ แต่มีข้อกำหนดว่าควรที่จะกำหนดจากบริเวณขอบของข้อมูลภาพด้านใดด้านหนึ่งก่อนเพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลภาพที่ใหญ่ที่สุดเมื่อต่อกันได้แล้วและเพื่อลดจำนวนครั้งในการต่อ จากนั้นกำหนดให้เป็นหน้ากากเพื่อที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับอีกข้อมูลภาพหนึ่งที่จะนำมาต่อด้วยกัน ซึ่งขนาดของข้อมูลภาพที่ตัดมาควรมีขนาดที่เหมาะสม ลักษณะของการกำหนดบริเวณที่นำมาต่อกันจะแสดงในภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 พื้นที่ที่ต้องการจะนำมาต่อกันเพื่อให้ได้ข้อมูลภาพขนาดใหญ่ที่สุด

2.13 ฟังก์ชันพื้นฐานการสหสัมพันธ์

ในการคำนวณค่า $E(i, j)$ มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 แต่จะต้องไม่เกิน 1 หมายความว่า ข้อมูลภาพที่นำมาเปรียบเทียบมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ

$$E(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{w(n, m) - \bar{w}\} \{s(i + n - 1, j + m - 1) - \bar{s}\}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{w(n, m) - \bar{w}\}^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \{s(i + n - 1, j + m - 1) - \bar{s}\}^2}} \quad (2.31)$$

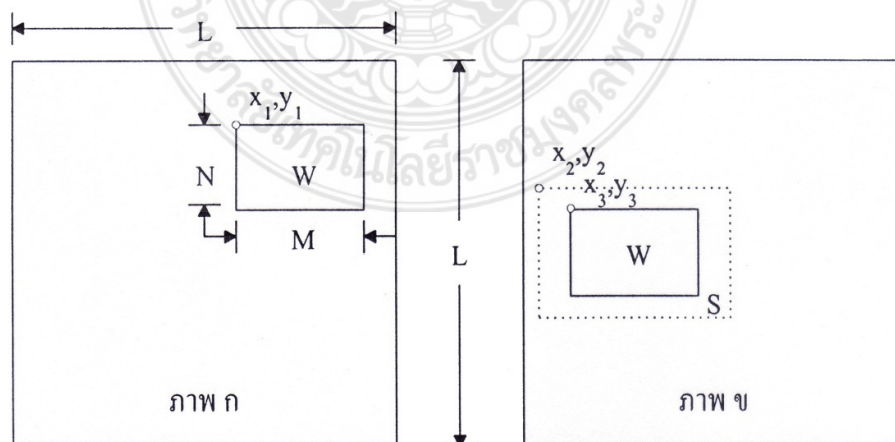
กำหนดให้

$w(n, m)$ ข้อมูลภาพย่อย

$$\bar{w} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w(m, n)$$

$s(i + n - 1, j + m - 1)$ ข้อมูลภาพใหญ่

$$\bar{s} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N s(i + n - 1, j + m - 1) \quad \text{ค่าเฉลี่ยข้อมูลภาพ}$$



ภาพที่ 2.38 ส่วนที่ซ้อนทับของภาพที่ต้องการหาค่าสหสัมพันธ์

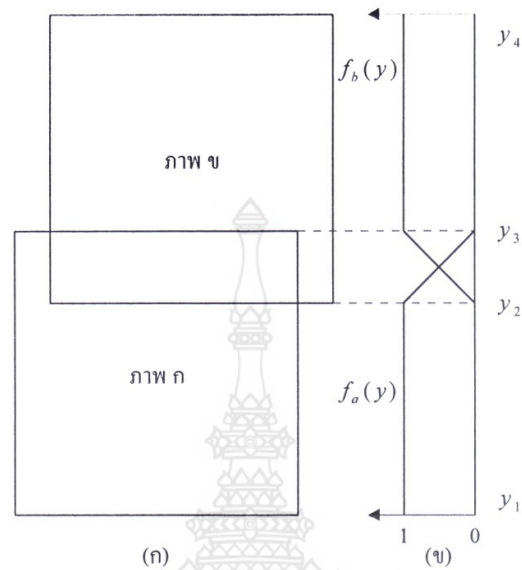
2.13 การลบขอบภาพโดยวิธีการเฉลี่ยค่าระดับสีเทา[1]

ภายหลังการคำนวณหาพิกัดซ้อนทับที่เหมือนกันได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการต่อข้อมูลภาพเข้าด้วยกัน ซึ่งในการต่อข้อมูลภาพจะเป็นการนำข้อมูลภาพมาเชื่อมต่อกันด้วยการซ้อนทับ โดยอาศัยพิกัดต่างๆ ที่ได้จากการสหสัมพันธ์ดังในภาพที่ 2.38(ก) จากนั้นประยุกต์ใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นดังภาพที่ 3.28(ข) จะเห็นว่าผลรวมของน้ำหนักของฟังก์ชัน f_a และ f_b ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 1 เสมอ วิธีนี้เป็นการเฉลี่ยค่าระดับสีเทาโดยฟังก์ชันดังกล่าว จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของข้อมูลที่อยู่ระหว่าง y_1 ถึง y_2 และ y_3 ถึง y_4 กำหนดให้ส่วนของข้อมูลภาพไม่ได้ซ้อนทับกันฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ $g_a(x, y)$ และ $g_b(x, y)$ ตามลำดับ หรือค่าของข้อมูลภาพซ้อนทับอยู่ระหว่าง y_2 ถึง y_3 กำหนดให้ฟังก์ชันมีเงื่อนไข $f_a(y) + f_b(y) = 1$ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 2.38(ข)

$$g(x, y) = \begin{cases} g_a(x, y) & ; y_1 < y < y_2 \\ f_a(y)g_a(x, y) + f_b(y)g_b(x, y) & ; y_2 < y < y_3 \\ g_b(x, y) & ; y_3 < y < y_4 \end{cases} \quad (2.32)$$

เมื่อให้

- $g(x, y)$ คือ ค่าระดับของสีเทาของข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ย
- $g_a(x, y)$ คือ ค่าระดับของสีเทาของข้อมูลภาพ ก
- $g_b(x, y)$ คือ ค่าระดับของสีเทาของข้อมูลภาพ ข
- $f_a(y), f_b(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น



ภาพที่ 2.39 ลักษณะการซ้อนทับของข้อมูลภาพ

- (ก) ลักษณะการวางซ้อนทับของข้อมูลภาพ ก และ ข
 (ข) ฟังก์ชันน้ำหนักแบบเชิงเส้น $f_a(y)$ และ $f_b(y)$ สำหรับภาพ ก และ ข

2.15 วิธีการปรับความสว่างให้สอดคล้องกัน (Brightness matching)

โดยปกติภาพถ่ายดาวเทียมที่จะนำมาต่อเข้าด้วยกันนั้นได้รับจากการถ่ายภาพด้วยภาพถ่ายดาวเทียม ณ บริเวณใกล้เคียงกันและจะมีบางส่วนของภาพซ้อนทับกัน เนื่องจากภาพทั้งสองที่จะนำมาต่อโดยปกติมักจะถ่ายในเวลาแตกต่างกัน จึงเป็นสาเหตุทำให้ภาพถ่ายมีค่าความสว่างแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมเวลานั้น โดยภาพที่ได้ ณ เวลานั้นๆ จะแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น จำนวนก้อนเมฆ ฤดูกาล เป็นต้น

เมื่อนำภาพถ่ายที่ได้รับจากการถ่ายภาพต่างเวลามาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทำให้ภาพผลลัพธ์ที่ได้หลังเชื่อมต่อเกิดความไม่ต่อเนื่องของความสว่าง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยตะเข็บตรงบริเวณรอยต่อของภาพอย่างเห็นได้ชัดเจนและยากที่จะลบรอยตะเข็บดังกล่าวให้หมดไปได้ ดังนั้นการปรับค่าความสว่างในภาพทั้งสองให้มีค่าใกล้เคียงกันยิ่งขึ้นก่อนที่จะนำไปทำการลบรอยตะเข็บ

ด้วยวิธีการเฉลี่ยค่าระดับสีเทาวิธีการไบอัสด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นและวิธีการไบอัสด้วยฟังก์ชันบทเตอร์เวอริธ วิธีปรับค่าความสว่างมีรายละเอียดดังนี้

คำนวณหาค่าเฉลี่ย m_1, m_2 และค่าเบี่ยงเบน p_1, p_2 ของข้อมูลภาพดังสมการที่ (2.33)

$$m_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} g_1(i), p_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} (g_1(i) - m_1)^2}$$

(2.33)

$$m_2 = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} g_2(i), p_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} (g_2(i) - m_2)^2}$$

จากนั้นทำการปรับค่าความสว่างของภาพโดยใช้สมการที่ (2.34)

$$P = \frac{p_1}{p_2} Q + m_1 - \frac{p_1}{p_2} m_2$$

(2.34)

เมื่อ	Q	คือ ระดับค่าสีเทาของจุดภาพเดิม
	P	คือ ระดับค่าสีเทาของจุดภาพใหม่
	m_1, p_1	คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพอ้างอิงจากพื้นที่ส่วนบริเวณซ้อนทับ

2.16 ทบทวนวรรณกรรมและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

นฤพร หินสมุทร “การต่อภาพและการวิเคราะห์องค์ประกอบของภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความละเอียดต่างกัน” สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2543 “ISBN 974-622-688-6” โดยกล่าวถึงการต่อภาพถ่าย ดาวเทียมที่มีความละเอียดต่างกันและการปรับแก้ค่าความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตโดยการใช้จุดควบคุมทางภาคพื้นที่ยื่นทับกัน การแทรกค่าของข้อมูลที่หายไปภายหลังจากการปรับแก้ค่าความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตศาสตร์ให้มีความละเอียดของภาพเหมือนกัน การปรับแก้ค่าความสว่างในระดับสีเทาของภาพให้สอดคล้องกันทั้งภาพ และสุดท้ายเป็นการลบรอยตะเข็บที่บริเวณขอบภาพที่เกิดจากการต่อภาพให้หายไป

เกศกนก กฤตภาศิริวัฒน์ “การบีบอัดข้อมูลภาพด้วยการเข้ารหัสเวกเตอร์ควอนไทซ์” สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2543 “ISBN 974-622-699-1” โดยกล่าวถึง เทคนิคการบีบอัดข้อมูลภาพด้วยการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการแปลงเวฟเลตมาทำเวกเตอร์ควอนไทซ์แบบอะแดปทีฟ ซึ่งช่วยลดค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย และยังคงรักษา ค่าเฉลี่ยของจำนวนบิตต่อจุดภาพของข้อมูลภาพที่ถูกบีบอัด

“จักรกฤษณ์ หอมทอง” การผสมภาพจากข้อมูลและการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2545 “ISBN 974-648-909-7” ได้กล่าวถึงการแก้ไขการสูญเสียข้อมูลจากการผสมภาพ RGB จากภาพหลายแถบความยาวคลื่นเพียง 3 แบนด์ โดยแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) แปลงภาพทั้งหมดไปเป็นภาพองค์ประกอบต่างๆภาพ (PC_s) และข้อมูลภาพความละเอียดสูงแบบ PAN จะถูกทำการแยกโดยการแปลงเวฟเลต กำหนดภาพ RGB จากภาพองค์ประกอบหลัก 3 ภาพ ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลมากกว่า 95% ของข้อมูล ภาพเดิม ความเข้ม(I) ของข้อมูลภาพจากการแปลง RGB ไปยัง IHS จะถูกแทนที่ด้วยภาพ PAN ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความถี่ต่ำ ซึ่งได้จากการแปลงเวฟเลต และสอดคล้องกับภาพหลายแถบความยาวคลื่น หลังจากนั้นทำการแปลง IHS เป็น RGB

บทที่ 3

เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ต

3.1 บทนำ

ในเทคนิคการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ต จะทำการหลอมรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธี PCA (Principal Component Analysis) ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต และวิธี IHS (Intensity-Hue-Saturation) ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต ทั้งนี้ผลที่ได้จากทั้ง 2 วิธีดังกล่าวจะทำการเปรียบเทียบผลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหลังจากทำการวิเคราะห์ระหว่างทั้ง 2 วิธี เพื่อหากระบวนการที่ได้รับข้อมูลที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ของข้อมูลภาพมากที่สุด โดยเปรียบเทียบค่าสหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำการจำลองผลทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลของการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงข้อมูลภาพและการหลอมรวมข้อมูลภาพจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก PCA (Principal Component Analysis) และทฤษฎีการแปลงข้อมูล IHS (Intensity-Hue-Saturation) ซึ่งนำไปใช้ร่วมกับทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ต

3.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก[9]

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบ Linear combination ของข้อมูลภาพที่จะรักษาไว้ซึ่งค่าความแปรปรวน (Variance) ของแกนเดิม (Original Axis) ในขณะที่แกนใหม่จะถูกสร้างขึ้นมา โดยมีการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลภาพจากแกนเดิมต่างๆ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวแปร X จะเป็นการแปลงเชิงเส้น (Linear Transformation) ของค่าความแปรปรวนจากข้อมูลเดิมสู่ตัวแปรใหม่ Y โดยที่ Y นั้นจะไม่มีค่าสหสัมพันธ์ ถึงแม้ว่าข้อมูลในตัวแปร X จะมีค่าสหสัมพันธ์สูงก็ตาม การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักนี้ เป็นเทคนิคทางสถิติที่อยู่บนพื้นฐานของ Variance และ Covariance ของกลุ่มข้อมูลค่า Variance นี้เป็นการแตก

กระจาย (Scatter) ที่ได้ปรากฏอยู่ภายในหนึ่งตัวแปรของกลุ่มข้อมูล ส่วน Covariance จะเป็นการวัดการแตกกระจายในระหว่างกลุ่มตัวแปร

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของตัวแปร X ทั้งหมด n ตัว เป็นการกำหนดการแปลงเชิงเส้นของทุกๆการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรเดิม สู่ตัวแปรใหม่ Y ทั้งหมด n ตัว ในการแปลงนี้ กำหนดให้ตัวแปรลำดับแรก (คือองค์ประกอบแรก) ของกลุ่มตัวแปร Y มีค่าความแปรปรวนสูงสุด จากความแปรปรวนทั้งหมด ส่วนตัวแปรลำดับที่สองของกลุ่มตัวแปร Y จะมีความแปรปรวนสูงสุด จากความแปรปรวนที่เหลือและไล่ลงไปสำหรับตัวแปรถัดไป จุดประสงค์หลักของทฤษฎีในการแปลงก็คือ การได้คืนมาของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด เพื่อที่จะรักษาเอาไว้ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทุกอย่างที่ต้องการ ดังนั้น จำนวนการแปรเปลี่ยนที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในตัวแปรหลังๆ นั้น มีค่าความแปรปรวนน้อย จนอาจจะพิจารณาได้ว่า มีค่าน้อยมากและสามารถตัดทิ้งได้ ถ้าหากมีการตัดเอาตัวแปรหลังๆดังกล่าวทิ้งไปก็จะเป็นการลดขนาดมิติของภาพ

ตัวแปรที่ได้หลังจากการแปลงคือกลุ่มตัวแปร Y ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะไม่ให้ค่าสหสัมพันธ์ ซึ่งคุณสมบัติอย่างหนึ่งของการแปลง เรียกว่า Orthogonality หรือการขาดหายไปของค่าสหสัมพันธ์ของแกน ภายหลังจากการแปลง จะเกิดจากผลของการแปลงนั่นเอง แม้ว่าในกลุ่มตัวแปร X เดิมจะมีค่าสหสัมพันธ์สูงก็ตาม โดยปกติแล้ว จำนวนตัวแปรหลังจากการแปลงจะน้อยลงเมื่อตัวแปร X เดิมจะมีค่าสหสัมพันธ์สูงขึ้น ข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงเป็นข้อมูลสำหรับการใช้ค่าของตัวแปรหนึ่ง ในการทำนายค่าที่สอดคล้องในตัวแปรอื่นๆ ส่วนเกินของข้อมูลดังกล่าวนี้ จะไม่ปรากฏในกลุ่มตัวแปรที่ขาดความสัมพันธ์กัน ดังนั้น ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันสามารถแสดงได้ด้วยกลุ่มของตัวแปรที่ไม่สัมพันธ์กัน ได้กระชับกว่ากลุ่มตัวแปรที่สัมพันธ์กัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเป็นการแปลงเชิงเส้น คือ

$$Y = CX + B \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_q \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2p} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdots & c_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q1} & c_{q2} & c_{q3} & \cdots & c_{qp} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix}$$

โดยที่ $q \leq p$ มีเงื่อนไขกำหนดว่าการแปลงนั้นต้องได้ซึ่ง Geometric orthogonality นั่นคือ $CC^t = I$ โดยที่ C^t เป็นทรานโพสของ C และ I เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ และที่เพิ่มขึ้นมาคือ ตัวแปรหลังการแปลง Y ต้องตั้งฉากกันนั่นคือ ไม่มีความสัมพันธ์กัน การกำหนดเงื่อนไขนี้ให้พิจารณาจาก

$E(X) = m_x$ เมื่อ m_x เป็นเวกเตอร์ของค่าเฉลี่ยตัวแปร X จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E(Y) &= E(CX + B) \\ &= CE(X) + B \\ &= Cm_x + B \\ &= m_y \end{aligned} \tag{3.2}$$

เนื่องจากไม่มีข้อกำหนดจำกัดในการเลื่อนของ Y ไปยังจุดกำเนิดใหม่ ดังนั้น จึงสามารถเลือกให้ $m_y = 0$ จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$Cm_x + B = 0$$

หรือ $-Cm_x = B$ (3.3)

แทนสมการที่ (3.3) ลงใน (3.1)

$$Y = CX + (-Cm_x) \tag{3.4}$$

$$Y = C(X - m_x)$$

ปัญหาคือ ให้คำนวณหา C ภายใต้เงื่อนไขของ $CC^t = I$

เนื่องจาก $m_x = 0$ ดังนั้นเมตริกซ์ Covariance Y หาได้จาก

$$\begin{aligned} E(Y Y^t) &= E\{[C(X - m_x)][C(X - m_x)]^t\} \\ &= CE[(X - m_x)(X - m_x)^t]C^t \\ &= C \sum C^t \end{aligned} \quad (3.5)$$

เมื่อ \sum เป็นเมตริกซ์ Covariance ขนาด $p * p$ ของตัวแปร X

ในการบังคับให้ได้เงื่อนไขที่ตัวแปร Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น ความสัมพันธ์ที่ได้มาคือ

$$C \sum C^t = A \quad (3.6)$$

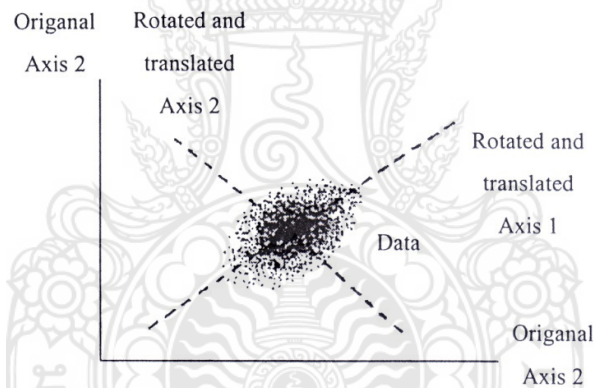
$$A = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_{qq} \end{bmatrix}$$

A คือ เมตริกซ์ covariance ของตัวแปร Y ซึ่งเป็นเมตริกซ์ $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33} \dots, \lambda_{qq}$ เป็นเทอมในแนวทแยง โดยสมาชิกที่ไม่อยู่ในแนวทแยงจะเป็นศูนย์ทั้งหมด ดังนั้นค่า Covariance ต่างที่เป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่า Y ต่างๆ ไม่มีความสัมพันธ์กัน λ_{11} เป็นค่าความแปรปรวนของตัวแปร Y หรือองค์ประกอบแรกของตัวแปร Y ส่วน λ_{22} เป็นค่าความแปรปรวนของตัวแปร Y หรือองค์ประกอบหลักที่ 2 และอื่นๆ

จากสมการที่ (3.6) จะเห็นว่า A คือ เมตริกซ์ Eigenvalue สำหรับ \sum และ C เป็นเมตริกซ์ Eigenvalue ที่สอดคล้องดังนั้น จึงต้องทำการคำนวณหา Eigenvalue ต่างๆ โดยจะพบว่า $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33} \dots, \lambda_{qq}$ เหล่านี้ ใช้แสดงแทนจำนวนค่าความแปรปรวนทั้งหมดที่อยู่บนแกนของ

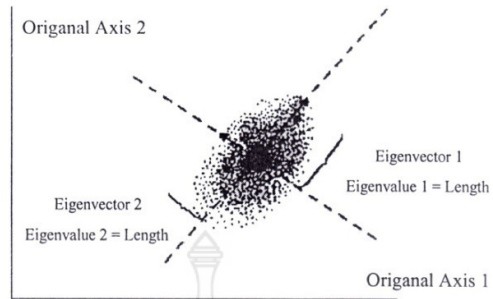
ตัวแปร Y เงื่อนไขของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักคือ ค่าความแปรปรวนทั้งหมดของกลุ่มข้อมูลเดิม (ผลบวกของสมาชิกในแนวทแยง Σ) เท่ากับค่าความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล หลังผ่านการแปลง (ผลบวกของสมาชิกในแนวทแยง A)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักที่นำมาใช้กับข้อมูลรีโมทเซนซิง สามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายเมื่อใช้รูปเชิงเรขาคณิต กระบวนการของการแปลงแบบเชิงเส้นเมื่อตัวแปรมีการเลื่อนและการหมุน ดังภาพที่ 3.1 ตำแหน่งของแกนต่างๆเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแล้วถูกเปลี่ยนไปตำแหน่งของกลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มข้อมูลอื่นจะไม่เปลี่ยน ตัวอย่างของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักนั้น เปรียบได้กับหลอดที่บรรจุลูกปิงปองหลายๆลูก ถ้ามองจากปลายทางหนึ่งหลอดปรากฏว่า จะเห็นลูกปิงปองริมสุดเพียงลูกเดียว ถ้าพลิกด้านข้างหลอดจะเห็นปิงปองทุกๆลูก ซึ่งก็เหมือนกับการมองภาพขององค์ประกอบหลักต่างๆ



ภาพที่ 3.1 การหมุนของแกนในสองมิติ

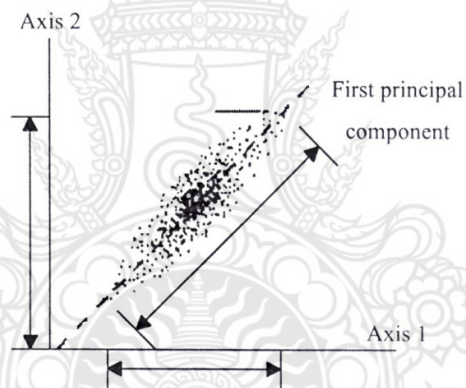
ค่า Eigenvalue และค่า Eigenvector มีความสัมพันธ์ดังการแตกกระจายของข้อมูลในภาพที่ 3.2 Eigenvector นั้น จะอยู่บนแกนที่แปลงไปแล้ว และความยาวของ Eigenvector ต่างๆ คือค่า Eigenvalue ดังนั้น Eigenvector ที่ยาวที่สุด ถูกเลือกเป็นแกนแรกของการแปลง หรือองค์ประกอบหลักลำดับที่ 1 ส่วนความยาวที่ 2 ก็ถูกเลือกเป็นองค์ประกอบหลักลำดับที่ 2 และอื่นๆ ถัดไป สำหรับกรณีที่มีตัวแปรเพียง 2 ตัวนั้น คู่ของ Eigenvector - Eigenvalue จะสอดคล้องกับแกนยาวสุดของวงรีที่ล้อมรอบข้อมูลทั้งหมด



ภาพที่ 3.2 Eigenvector และ Eigenvalue ในสองมิติ

ลักษณะของสเก็เตอร์แกรม แสดงให้เห็นถึงค่าองศาของสหสัมพันธ์ที่ปรากฏในข้อมูลถ้า สเก็เตอร์แกรมที่ยาวและแคบ โดยไม่ขนานกับแกนเดิมแสดงว่าข้อมูลมีค่าสหสัมพันธ์สูง ดังภาพที่

3.3



ภาพที่ 3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูง



ภาพที่ 3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักลำดับแรกของข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ

สเก็ตเตอร์แกรมที่มีลักษณะเป็นวงกลม ดังภาพที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ องค์ประกอบหลักต่างๆ ของข้อมูลที่ไม่สัมพันธ์กันนี้ จะไม่มีแกนใดที่ลากผ่านวงกลม แล้วได้ข้อมูลมากกว่าการโปรเจกชันข้อมูลลงบนแกนเดิม สมาชิกต่างๆ ในเมตริกซ์โหลดดิ้งในตารางที่ 3.1 เป็นการแสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของโหลดดิ้งสำหรับ 3 ตัวแปร โดยที่คอลัมน์แรกของโหลดดิ้งในตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลังจากการแปลงเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความแปรปรวนที่ได้จากตัวแปรทั้ง 3 ของข้อมูลเดิม ในจำนวนค่าเกือบเท่ากับค่าความแปรปรวนทั้งหมดของตัวแปรเดิม ในกรณีที่ค่าโหลดดิ้งเป็นลบนั้น แสดงให้เห็นถึงการรวมในทางตรงกันข้าม คอลัมน์ที่ 2 ของตารางที่ 3.1 จึงแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างตัวแปรเดิมนำดับที่ 1 (ค่าโหลดดิ้ง = 0.8) กับตัวแปรเดิมนำดับที่ 2 (ค่าโหลดดิ้ง = 0.9) เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างความแตกต่างของระหว่างตัวแปรเดิมนำดับที่ 1 และ 2
ตัวแปรหลังการเปลี่ยนแปลง

		1	2	3
ตัวแปรเดิม	1	0.7	0.8	-0.1
	2	0.5	-0.9	0.3
	3	0.6	0.2	0.5

3.3 วิธีการประยุกต์ทฤษฎีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักกับงานรีโมทเซนซิง

3.3.1 นิยามของตัวแปร

จากทฤษฎีของการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในหัวข้อที่ 3.2 เมื่อ X เป็นข้อมูลเดิมนำมาแปลงเพื่อให้ได้ข้อมูลใหม่คือ Y สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรม ได้ดังภาพที่ 3.5 ในทางรีโมทเซนซิงข้อมูลเดิม X ที่จะทำการวิเคราะห์คือ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ประกอบด้วย แบนด์ที่ 1, แบนด์ที่ 2 และ แบนด์ที่ 3 (สมมติว่าดาวเทียมดวงนั้นมีข้อมูล 3 แบนด์) นั้น หมายความว่าข้อมูล X ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร คือ x_1, x_2 และ x_3 โดยกำหนดให้เป็นข้อมูลแบนด์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับเมื่อ X ผ่านการแปลงแล้ว จะได้ข้อมูลใหม่คือ Y ซึ่งประกอบด้วย y_1, y_2 และ y_3 เช่นกัน จากทฤษฎีจะได้ว่า y_1 คือ องค์ประกอบหลักที่ 1 ให้ค่าความแปรปรวนสูงสุด y_2 คือองค์ประกอบหลักที่ 2 ให้ค่าความแปรปรวนต่ำลงมา และเรื่อยไปจนถึง y_3 คือองค์ประกอบหลักที่ 3 ให้ค่าความแปรปรวนต่ำสุด

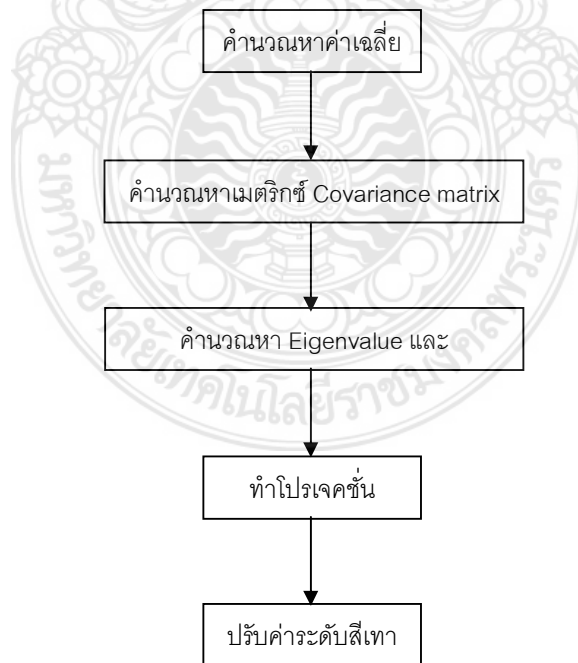


ภาพที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

3.3.2 วิธีการแปลงข้อมูลภาพ

ในการแปลงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะมีขั้นตอนต่างๆต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ละแบนด์
- ขั้นที่ 2 คำนวณหาเมตริกซ์ Covariance
- ขั้นที่ 3 คำนวณหา Eigenvalue
- ขั้นที่ 4 คำนวณหา Digenvector
- ขั้นที่ 5 การทำโปรเจคชั่น
- ขั้นที่ 6 ทำการปรับระดับข้อมูลใหม่ให้อยู่ในช่วง 0- 255 ระดับ



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการแปลงข้อมูลภาพ

3.3.3 วิธีการคำนวณหาเมตริกซ์

สูตรที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$\sum = (X - \bar{X})(X - \bar{X})^t \quad (3.7)$$

เมื่อ

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยข้อมูลเดิม

$(X - \bar{X})^t$ คือ ทราנסโพสของ $(X - \bar{X})$

จากนิยามในหัวข้อที่ 3.3.1 จะได้

$$\bar{X} = \bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \bar{X}_4, \bar{X}_5, \bar{X}_6, \bar{X}_7, \bar{X}_8, \bar{X}_9$$

โดย

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเดิมในแต่ละแบนด์

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \bar{X}_3 \\ \bar{X}_4 \\ \bar{X}_5 \\ \bar{X}_6 \\ \bar{X}_7 \\ \bar{X}_8 \\ \bar{X}_9 \end{bmatrix}$$

จะได้

$$(X - \bar{X}) = [(X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2)(X_3 - \bar{X}_3)(X_4 - \bar{X}_4)(X_5 - \bar{X}_5) \dots (X_8 - \bar{X}_8)(X_9 - \bar{X}_9)]$$

จัดรูปแบบสมการใหม่

$$(X_i - \bar{X}_i) = \begin{bmatrix} X_{i,1} - \bar{X}_i \\ X_{i,2} - \bar{X}_i \\ X_{i,3} - \bar{X}_i \\ \vdots \\ X_{i,j} - \bar{X}_i \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$X_{i,j} = \text{ข้อมูลภาพตำแหน่งที่ } j \text{ ของภาพแบนด์ที่ } i$$

โดยข้อมูลภาพทั้ง 3 ภาพ ทุกแบนด์ควรจะมีขนาดเท่ากัน ในที่นี่ได้กำหนดให้ใช้ขนาดของข้อมูลภาพ เพื่อสะดวกในการใช้งานกับภาพขนาดต่างๆ ได้ ในที่นี้ สมมติข้อมูลภาพมีขนาด 256x256 จุดภาพ มีลำดับตำแหน่งของข้อมูลภาพดังนี้

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & x_{i,3} & \cdots & x_{i,256} \\ x_{i,257} & x_{i,258} & x_{i,259} & \cdots & x_{i,512} \\ x_{i,513} & x_{i,514} & x_{i,515} & \cdots & x_{i,768} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,65281} & x_{i,65282} & x_{i,65283} & \cdots & x_{i,65536} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.7) เขียนเทอม $(X - \bar{X})^t$ และ $(X - \bar{X})$ ได้เป็น

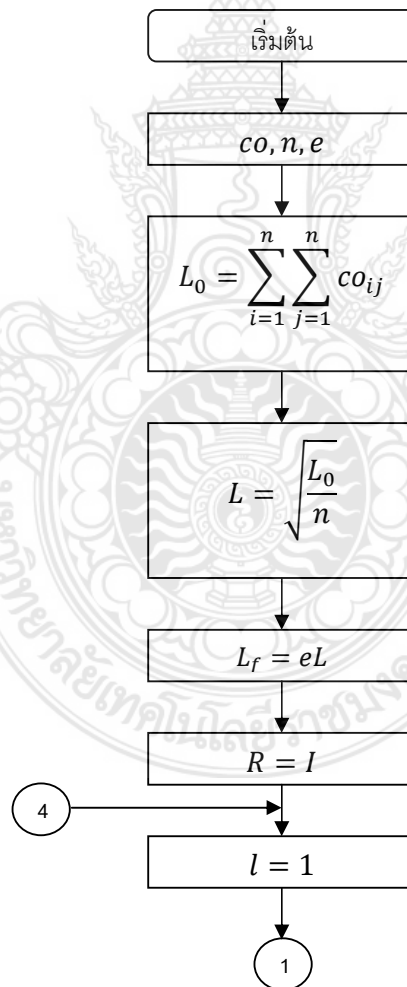
$$\begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & x_{i,3} & \cdots & x_{i,256} \\ x_{i,257} & x_{i,258} & x_{i,259} & \cdots & x_{i,512} \\ x_{i,513} & x_{i,514} & x_{i,515} & \cdots & x_{i,768} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,65281} & x_{i,65282} & x_{i,65283} & \cdots & x_{i,65536} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & x_{i,3} & \cdots & x_{i,256} \\ x_{i,257} & x_{i,258} & x_{i,259} & \cdots & x_{i,512} \\ x_{i,513} & x_{i,514} & x_{i,515} & \cdots & x_{i,768} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i,65281} & x_{i,65282} & x_{i,65283} & \cdots & x_{i,65536} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{1,1} & \Sigma_{1,2} & \Sigma_{1,3} & \cdots & \Sigma_{1,9} \\ \Sigma_{2,1} & \Sigma_{2,2} & \Sigma_{2,3} & \cdots & \Sigma_{2,9} \\ \Sigma_{3,1} & \Sigma_{3,2} & \Sigma_{3,3} & \cdots & \Sigma_{3,9} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma_{9,1} & \Sigma_{9,2} & \Sigma_{9,3} & \cdots & \Sigma_{9,9} \end{bmatrix}$$

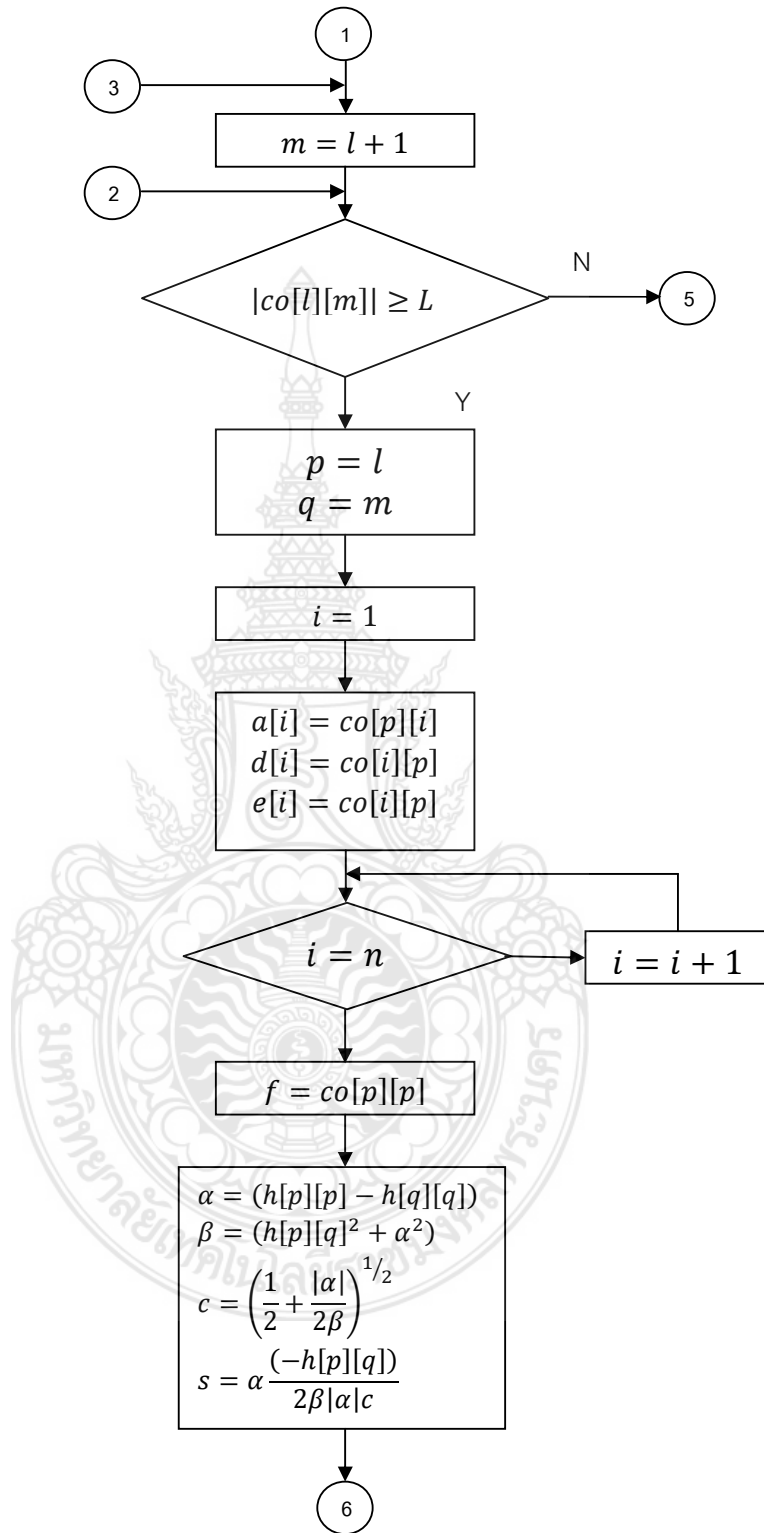
(3.8)

3.3.4 วิธีการคำนวณหา Eigenvalue และ Eigenvector

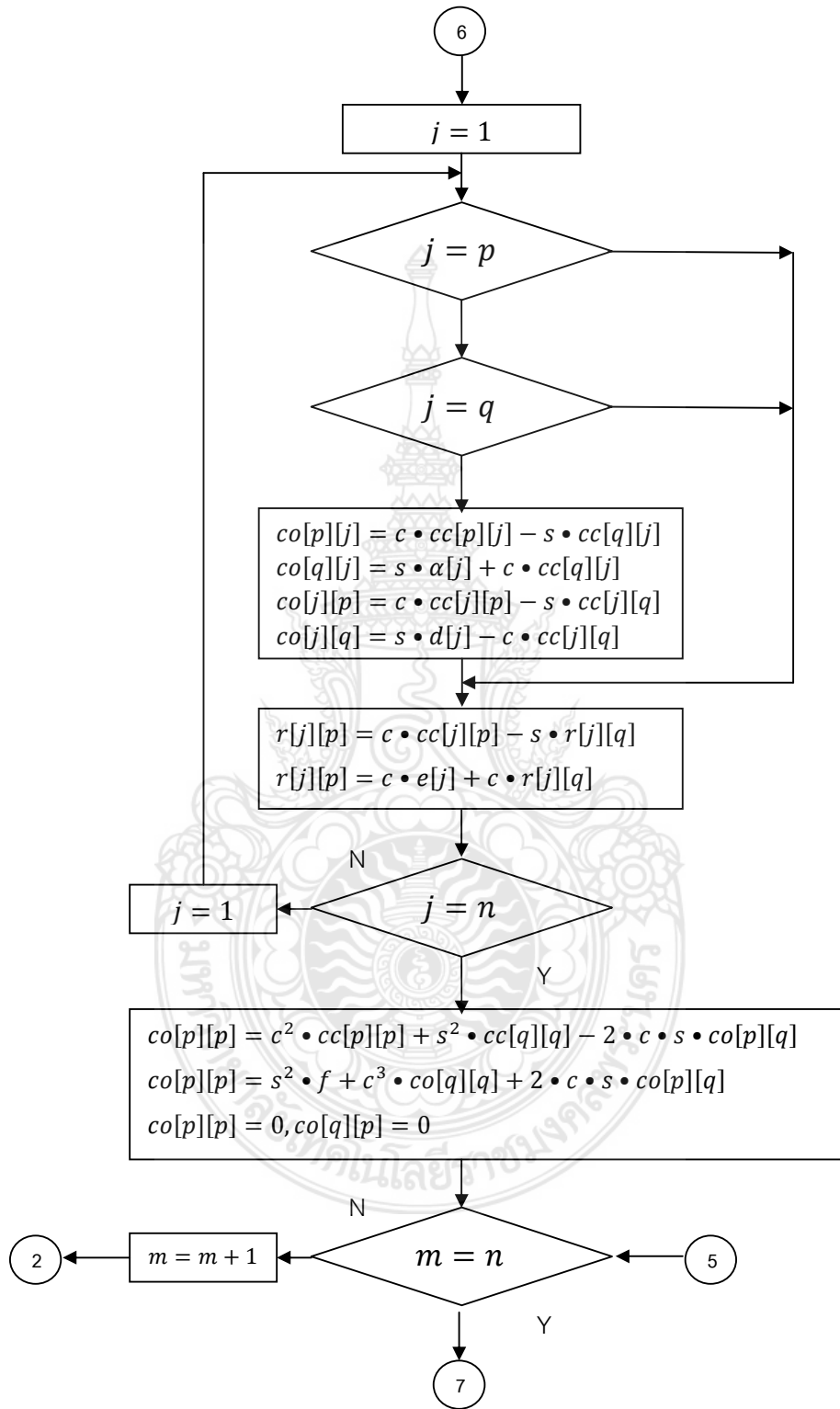
ค่า Eigenvalue และ Eigenvector ขององค์ประกอบหลักต่างๆคำนวณหาได้จากเมตริกซ์ Covariance ที่ได้จากข้อมูลเดิม โดยวิธีการของ jacobi [15,16] ซึ่งแสดงให้เห็นได้ในภาพที่ 3.7 ภายหลังจากหาค่าผลรวมของเมตริกซ์ Covariance และนำค่าสมบูรณ์ของเมตริกซ์ Covariance มาเปรียบเทียบกับค่า L ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงจึงทำการกำหนดเวกเตอร์เมตริกซ์จาก Covariance จนครบทุกข้อมูล แล้วทำขั้นที่ 1 ต่อไปในภาพที่ 3.8 แต่ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริงให้ทำในขั้นตอนที่ 5 ทางขวามือ ภายหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนที่ 1 แล้วให้ไปตรวจสอบเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 6 ต่อ และถ้าเงื่อนไขเป็นจริงทั้งหมดจึงเสร็จการคำนวณหา Eigenvalue และ Eigenvector จากหลักการของ Jacobi



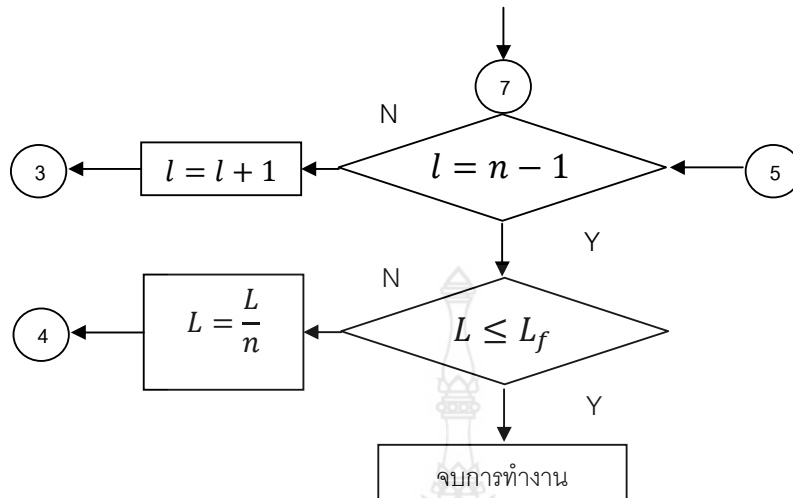
ภาพที่ 3.7 โฟลว์ชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector



ภาพที่ 3.8 โพลีชาร์กการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector(ต่อ)



ภาพที่ 3.9 โฟลว์ชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ)



ภาพที่ 3.10 โฟลว์ชาร์ทการคำนวณหาค่า Eigenvalue และ Eigenvector (ต่อ)

3.3.5 วิธีการโปรเจคชั่น

โดยทั่วไปการใช้ค่า Eigenvector ของแต่ละองค์ประกอบหลักมาคูณกับข้อมูลเดิม (X) จะได้ข้อมูลใหม่ (Y) ดังนี้

สูตรการคำนวณข้อมูลใหม่ (Y_1) ดังตัวอย่าง

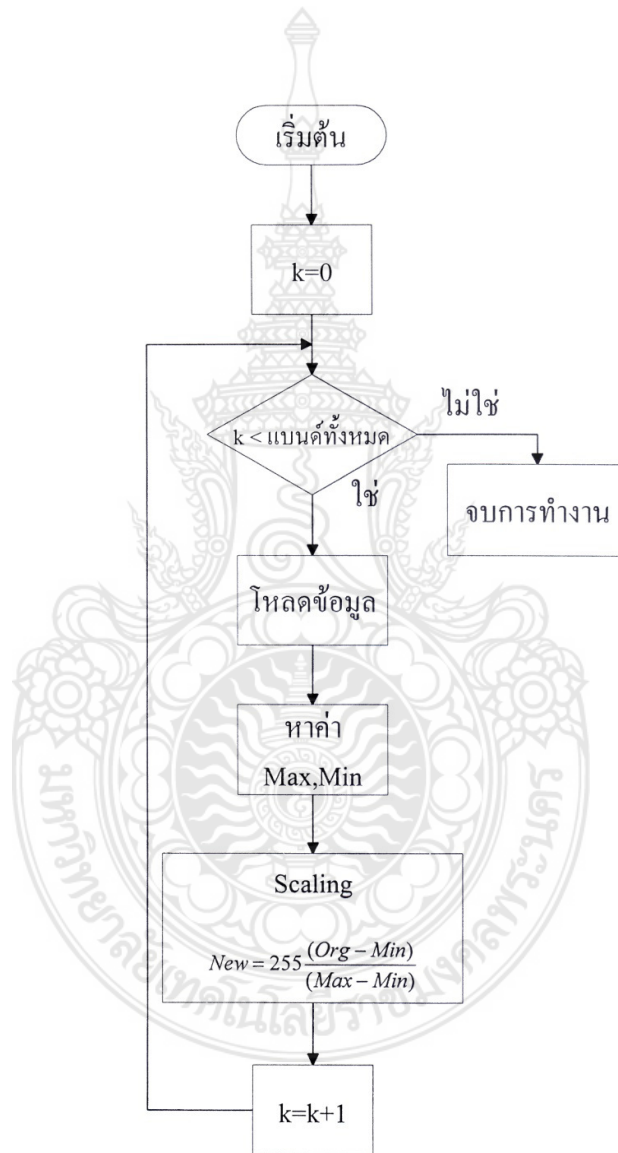
$$Y_i = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} * X \quad (3.9)$$

โดยที่

$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix}$ คือเมตริกซ์ Eigenvector ขององค์ประกอบใหม่ที่ได้จากการคำนวณหลักการของ Jacobi

3.3.6 วิธีการสเกลลิง

ข้อมูลที่ได้จากการทำโปรเจคชั่น จะมีระดับสีเทาที่ไม่ได้อยู่ในช่วง 0 - 255 ระดับ ซึ่งจะทำให้การใช้ข้อมูลไม่มีความหมาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับค่าระดับสีเทาของแต่ละองค์ประกอบหลักใหม่ทั้งหมดให้อยู่ในช่วง 0 - 255 ระดับ มีวิธีการดังแสดงในไฟล์ชาร์ทภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ไฟล์ชาร์ทการสเกลลิง

3.3.7 การปรับปรุงภาพโดยใช้การปรับเท่าฮิสโตแกรม

วิธีการปรับเท่าฮิสโตแกรมเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้ปรับปรุงคุณภาพที่มีการกระจายตัวของฮิสโตแกรมที่ไม่เหมาะสม โดยวิธีของการปรับฮิสโตแกรมจะทำให้ภาพที่ได้รับการปรับปรุงใหม่มีลักษณะการกระจายตัวของฮิสโตแกรมเต็มช่วงของค่าระดับสีเทาและมีลักษณะแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) แต่ฮิสโตแกรมใหม่นี้จะไม่มีลักษณะเหมือนฮิสโตแกรมเดิม ซึ่งอาจจะมีจำนวนของค่าระดับสีเทาแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของภาพนั้นๆ

การปรับเท่าฮิสโตแกรม คือการอาศัยหลักการทางสถิติการใช้หลักการกระจายความน่าจะเป็นของค่าระดับสีเทาโดยกำหนดให้ $X = \{x_{ij}\}$ เป็นภาพที่มีค่าระดับสีเทา L ระดับ และ x_{ij} เป็นค่าระดับสีเทาของจุดภาพที่ตำแหน่ง (i, j) โดยที่ $x(i, j) \in \{0, 1, \dots, 255\}$

ขั้นตอนการปรับเท่าฮิสโตแกรมมีดังนี้

- 1) ทำการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นจะเป็นของค่าความเข้มของจุดภาพ ซึ่งแทนด้วยตัวแปร k ดังแสดงในสมการที่ (3.10)

$$p(k) = \frac{n_k}{N} \quad (3.10)$$

โดยที่ n_k เป็นจำนวนจุดภาพทั้งหมดของภาพที่มีค่าระดับสีเทาเป็น k โดย $k = 0, 1, \dots, L - 1$ และ N เป็นจำนวนจุดภาพทั้งหมดของภาพที่จะทำการปรับฮิสโตแกรม

- 2) คำนวณหาฟังก์ชันความหนาแน่นสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ดังแสดงในสมการที่ (3.11)

$$c(k) = \sum_{i=0}^k p(k) \quad (3.11)$$

- 3) คำนวณหาค่าระดับสีเทาใหม่ ดังสมการที่ (3.12)

$$f(X_k) = X_0 + (X_{L-1} - X_0)c(k) \quad (3.12)$$

โดยที่ X_0 เป็นค่าระดับสีเทาที่ต่ำสุด และ X_{L-1} เป็นค่าระดับสีเทาที่สูงสุด

- 4) ทำการปรับฮิสโตแกรมทั้งหมดจากภาพต้นฉบับ ผลลัพธ์ที่ได้เขียนสมการได้เป็นสมการที่ (3.13)

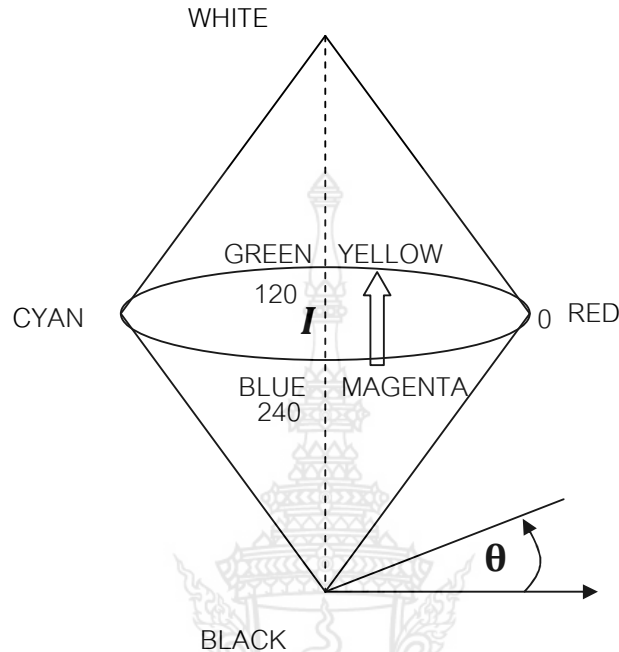
$$Y = \{y(i, j)\} = f(x) = \{f(x(i, j)) | \forall x(i, j) \in X\} \quad (3.13)$$

3.4 การแปลงข้อมูลระบบ IHS (Intensity-Hue-Saturation)

เมื่อ Intensity, Hue และ Saturation เป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการแสดงรายละเอียดของสีเมื่อใช้ระบบสี HIS แล้วก็ไม่จำเป็นต้องรู้เปอร์เซ็นต์ของสีที่ใช้ในการผสมสีกันเพื่อทำให้เกิดสีใหม่ในการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสี เช่นปรับจากสีน้ำเงินไปเป็นสีฟ้าสามารถกระทำได้จากปรับ H เท่านั้นก็ทำให้เกิดสีใหม่ ในการปรับความเข้มของสีเช่นปรับปรับจากสีน้ำเงินไปเป็นสีฟ้าก็จะสามารถกระทำจากการปรับค่า S การปรับจากมืดไปเป็นสว่างก็ปรับได้ที่ค่า I การประยุกต์งานหลายอย่างที่ใช้ในการจำลองแบบ IHS เช่นงาน Machine Vision ในการจำลองแบบนี้ในการกำหนดสีความแตกต่างของวัตถุ ในงานประมวลผลภาพเช่น การใช้การกระทำต่อ ฮิสโตแกรม โดยการปรับแต่งความสว่างของข้อมูลภาพซึ่งการกระทำทั้งหมดนี้ สามารถนำมากระทำบนการ

สามารถอธิบายแต่ละค่าในระบบสี IHS ได้ดังนี้

- 1) เคนสี (Hue) เป็นค่ามุม ค่า Hue จะมีค่าระหว่าง $0-359^\circ$ เมื่อกำหนดลำดับการเปลี่ยนแปลง จากสีแดง (Hue = 0°) ไปยังสีเขียว (Hue = 120°) และ สีเขียวไปยังสีน้ำเงิน (Hue = 240°)
- 2) ความอิ่มตัวของสี (Saturation) เป็นค่าระยะทางจากแกนกลางไปยังค่าเคนสี ความอิ่มตัวจะมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้สีที่ได้ใกล้เคียงกับเคนสีที่แท้จริงมากขึ้น ความอิ่มตัวของสีมีค่าไม่เกิน 1 เมื่อความอิ่มตัวเท่ากับ 1 ก็จะกลายเป็นสีที่บริสุทธิ์ของแสง
- 3) ความสว่างของแสง (Intensity) คือ ค่าที่ระบุว่า สีนั้นมีความสว่างของแสงมากเท่าใด ถ้าค่า ความสว่างแสงมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าเคนสีที่ได้มีส่วนประกอบของสีขาวมากขึ้น ในทางกลับกันถ้ามีค่าน้อยลงก็จะทำให้สีที่ได้มีส่วนประกอบของสีดำมากขึ้นเช่นกัน

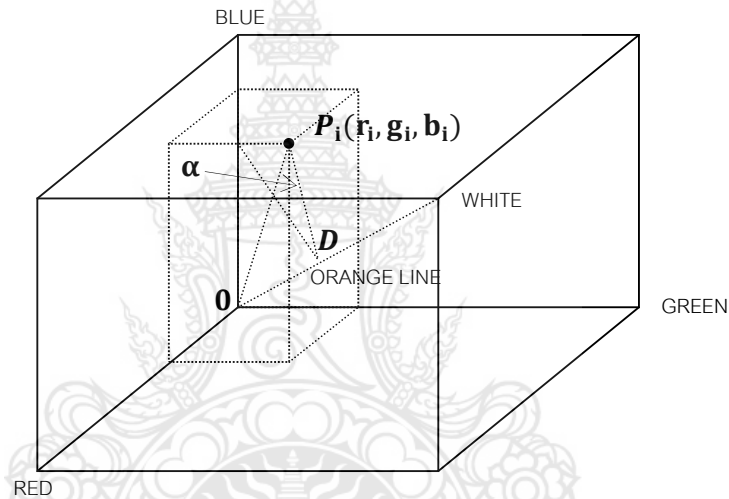


ภาพที่ 3.12 การจำลองภาพระบบสี IHS

จำลองแบบ IHS ซึ่งจะแสดงอยู่บนพิกัดรูปทรงกรวย 2 อันคว่ำเข้าหากัน ดังแสดงในภาพที่ 3.12 ค่าของ H นั้นแทนด้วยมุม θ ซึ่งจะเปลี่ยนจาก 0 ถึง 360 องศา ค่าของ S แทนด้วยรัศมีมีเปลี่ยนจาก 0 ถึง 1 ส่วน I ก็แสดงผลเป็นสีขาว เมื่อ $S=0$ สีจะเป็นสีเทา ของความสว่าง I เมื่อ $S=1$ สีจะอยู่ที่รูปปลายสุดของรูปกรวยล่าง ถ้า S มีค่าเปลี่ยนแปลงมากขึ้นสีก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากสีขาว สีเทา และสีดำ (ขึ้นอยู่กับค่าความสว่าง) ในการปรับค่าของ H จะทำให้สี เปลี่ยนจากสีแดงมุม 0 องศา ผ่านไปที่สีเขียวมุมเท่ากับ 120 องศา และสีน้ำเงินอยู่ที่ 240 องศา และเป็นสีแดงอีกครั้งที่มุมเท่ากับ 360 องศา สำหรับค่าของ I นั้น เมื่อมีค่าเท่ากับ 0 สีก็จะเป็นสีดำ เมื่อทำการปรับค่าของ I ความสว่างของสีก็จะเปลี่ยนแปลงจากมืดเป็นสว่างขึ้นเรื่อยๆ

ในการแปลงภาพดาวเทียมไปเป็นภาพ IHS เราสามารถแปลงแปลงข้อมูลจากภาพถ่ายทั้ง 3 แถบความยาวคลื่นไปเป็นภาพ IHS 1 ภาพ จากภาพที่ 3.13 เป็นรูปจำลองปริมาตรจุดสี เราจะแทนสีในการผสมสี 3 แถบความยาวคลื่นของภาพถ่ายดาวเทียมใดๆ ด้วยเวกเตอร์ $OP_i = (r_i g_i b_i)$ ซึ่งอยู่ภายในรูปปริมาตรสีที่มีความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 255 ส่วนเส้นทะแยงที่ต่อจาก

จุดเริ่มต้นและจุดที่ไกลออกไปเรียกว่า เวกเตอร์ของเส้นสีเทา (Gray Line) จุดต่างๆบนเวกเตอร์นี้มี ส่วนผสมของสีทั้งสามคือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เท่ากันตลอดทั้งเส้น ความเข้มของสีแทนด้วย เวกเตอร์ OP_i นั้นขึ้นอยู่กับความยาวของเวกเตอร์โปรเจกชัน (Projection) ลงบนเส้นสีเทา ณ OD การอิมิตัวหรือความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับระยะระหว่างเวกเตอร์ OP_i กับเส้นสีเทา หรือระยะ เวกเตอร์ $OP_i = (r_i, g_i, b_i)$ สีขึ้นอยู่กับมุมหรือองศาของ α ที่เกิดขึ้นบนรอบๆเส้นสีเทา ส่วน ความสว่างของสีขึ้นอยู่กับอัตราความแตกต่างของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ (r_i, g_i, b_i) ที่ผ่านมา RGB ในการแปลงภาพถ่ายดาวเทียมไปเป็นภาพ IHS สามารถแปลงได้จากสมการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.13 รูปจำลองปริมาตรสีสำหรับการแปลงแบบ RGB เป็น IHS

$$I(r_i, g_i, b_i) = \frac{1}{\sqrt{3}}(r_i + g_i + b_i) \quad (3.14)$$

$$H(r_i, g_i, b_i) = \cos^{-1} \frac{2b_i - g_i - r_i}{2V_i} \quad (3.15)$$

$$S(r_i, g_i, b_i) = \frac{\max(r_i, g_i, b_i) - \min(r_i, g_i, b_i)}{\max(r_i, g_i, b_i)} \quad (3.16)$$

$$\text{เมื่อ } V_i = \sqrt{((r_i^2 + g_i^2 + b_i^2) - (r_i g_i + r_i b_i + g_i b_i))}$$

ช่วงความยาวสีของภาพฮิวจากสมการที่ (3.15) คือ 0 ถึง 360 เพราะฉะนั้นก่อนแสดงภาพ ควรจัดให้อยู่ในค่า (0-255) สมมติว่าการสะท้อนของภูมิประเทศทางด้านหน้าที่ได้รับแสงดวงอาทิตย์ คือ E_i เป็นจำนวน n ครั้ง และการสะท้อนของภูมิประเทศทางด้านหลังที่ไม่ได้รับแสงอาทิตย์คือ E_h ดังนั้นจะได้ $E_i = nE_h, R_i = nR_h, G_i$ และ $B_i = nB_h$ เมื่อ RGB แทนการสะท้อนแสงของภาพที่ใช้ผสมสีจากสมการที่ 3.15 ก็จะได้

$$H(R_i, G_i, B_i) = H(R_h, G_h, B_h) \quad (3.17)$$

ดังนั้นก็จะได้

$$\begin{aligned} V_i &= \sqrt{\left((R_i^2 + G_i^2 + B_i^2) - (R_i G_i + R_i B_i + G_i B_i) \right)} \\ &= \sqrt{\left[((nR_h)^2 + (nG_h)^2 + (nB_h)^2 - (n^2 R_h G_h + n^2 R_h B_h + n^2 G_h B_h)) \right]} \\ &= nV_h \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(R_i, G_i, B_i) &= \cos^{-1} \frac{2B_i - G_i - R_i}{2V_i} \\ &= \cos^{-1} \frac{2nB_h - nG_h - nR_h}{2nV_h} \\ &= \cos^{-1} \frac{2B_h - G_h - R_h}{2V_h} \\ &= H(R_h, G_h, B_h) \end{aligned}$$

ดังนั้นฮิวจะไม่ขึ้นอยู่กับการส่องสว่างหรือการสะท้อนแสงเลย ค่าของความชันภูมิประเทศจะไม่แตกต่างกันระหว่างการสะท้อนโดยตรงและการสะท้อนเงา ดังนั้นภาพฮิวไม่มีผลกับเงาเลยซึ่งก็จะทำให้ได้ค่าฮิวใหม่

$$H(r_i, g_i, h_i) = H(r_j, g_j, h_j) \quad (3.18)$$

ถ้า $E_j = nE_i + a$ เมื่อ a เป็นค่าคงที่

3.4.1 การแปลงจากระบบสี RGB เป็น IHS

เป็นการแปลงจากระบบพิกัดคาร์ทีเซียนไปเป็นระบบเชิงขั้ว การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี IHS มีขั้นตอนการคำนวณค่า Hue ดังสมการ

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G \end{cases} \quad (3.19)$$

โดยที่

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{\frac{1}{2}}}} \right]$$

ค่า Saturation กำหนดดังสมการที่ (3.20)

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (3.20)$$

ค่า Intensity คำนวณได้จากสมการที่ (3.21)

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (3.21)$$

3.4.2 การแปลงจากระบบสี IHS มาเป็นระบบสี RGB

ในการแปลงจากระบบสี IHS เป็น RGB จะต้องหาค่า RGB ที่สอดคล้องกันในช่วงค่าที่เหมือนกัน โดยสมการการแปลงจะขึ้นอยู่กับค่า Hue ว่าอยู่ใน section ใดใน 3 section ที่แบ่งออกเป็นช่วง 120° เท่ากัน

GB sector ($120^\circ \leq H < 240^\circ$)

ถ้าค่า Hue อยู่ใน Section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ตามสมการต่อไปนี้

$$H = H - 120 \quad (3.22)$$

$$R = I(1 - s) \quad (3.23)$$

$$G = I \left[1 + \frac{s \cos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (3.24)$$

$$B = 3I - (R - G) \quad (3.25)$$

BR sector ($240^\circ \leq H < 360^\circ$)

ถ้าค่า Hue อยู่ใน Section นี้ จะต้องลบค่า Hue ด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ตามสมการต่อไปนี้

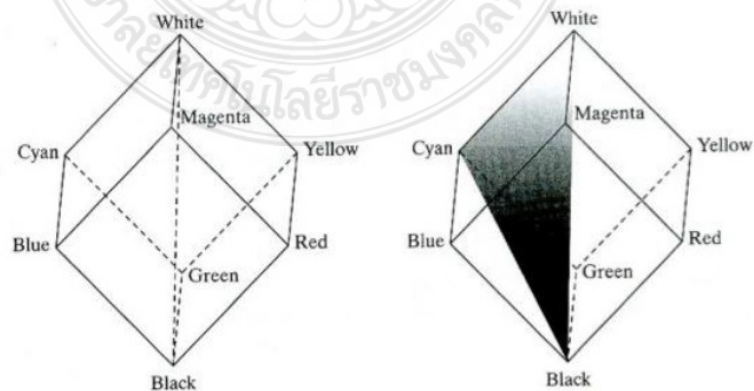
$$H = H - 240 \quad (3.26)$$

$$G = I(1 - s) \quad (3.27)$$

$$B = I \left[1 + \frac{s \cos(H)}{\cos(60-H)} \right] \quad (3.28)$$

$$R = 3I - (G - B) \quad (3.29)$$

ขั้นตอนการแปลงจากระบบสี RGB ไปเป็นระบบสี IHS ตามสมการที่ (3.19)-(3.21) และการแปลงจากระบบสี IHS ให้กลับมามีอยู่ในระบบสี RGB ตามสมการที่ (3.22)-(3.29) เป็นการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยการย้ายแกนค่าความสว่างของระบบ RGB ให้อยู่ในแกนตั้ง ดังภาพที่ 3.14 ซึ่งรูปสามเหลี่ยมจาก Black-White-Cyan จะมีค่า Hue เป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากองค์ประกอบของสีขาวและสีดำไม่มีผลต่อค่า Hue ขณะที่ค่า ความอิ่มตัวสี และ ค่าความสว่างของแสงของแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน

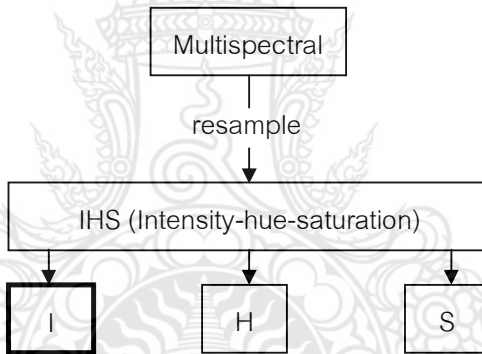


ภาพที่ 3.14 แนวคิดสัมพันธ์ระหว่างระบบสี RGB และระบบสี IHS

3.5 การหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

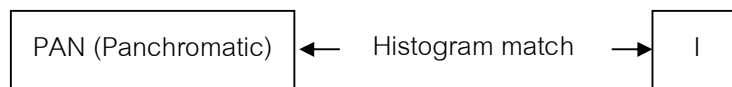
3.5.1 การหลอมภาพด้วย IHS ร่วมกับ Wavelet transform

การหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet transform จะทำการใช้ภาพ Multispectral ทำการแปลงข้อมูลภาพ resample ด้วยวิธี IHS (Intensity-Hue-Saturation) และใช้ภาพ PAN (Panchromatic) ที่มีความละเอียดสูง ทำการปรับขนาดข้อมูลภาพด้วยวิธี Histogram match (ซึ่งในกระบวนการหลอมภาพดังกล่าวจะทำการแยกวิธีการทำ Histogram match และ ไม่ทำ Histogram match ในวิธีการหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet transform) นำข้อมูลภาพทั้งสอง โดยนำ ข้อมูล (I) จาก IHS และข้อมูลภาพ PAN' ทำการแปลงข้อมูลภาพด้วย Wavelet transform จะได้ข้อมูลภาพใหม่เป็น (I') และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับด้วยวิธี Invers IHS โดยการนำ (I') แทนในข้อมูลภาพ(I)ใน IHS และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับเป็นข้อมูลภาพ RGB'



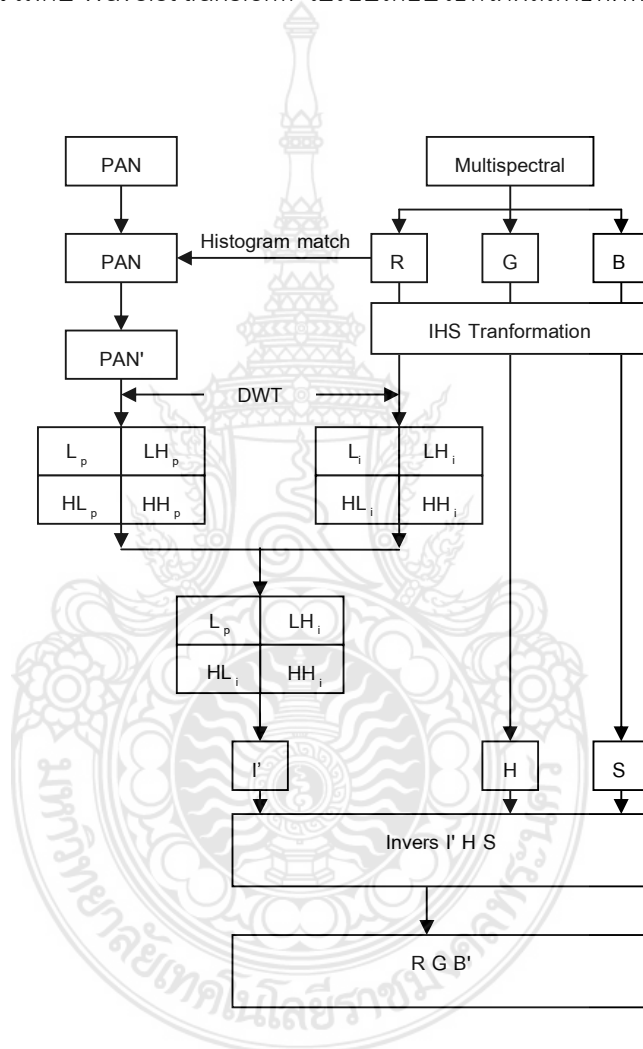
ภาพที่ 3.15 resample สัญญาณภาพ Multispectral เป็น I H S

ซึ่งในวิธีที่ไม่ทำ Histogram match ให้นำข้อมูลภาพ PAN ทำการแปลงข้อมูลภาพด้วยวิธี Wavelet transform กับ (I) จาก IHS ซึ่งจะได้ (I') และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับด้วยวิธี Invers IHS โดยการนำ (I') แทนในข้อมูลภาพ(I)ใน IHS และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับเป็นข้อมูลภาพ RGB'



ภาพที่ 3.16 การทำ Histogram match ภาพ PAN กับ I

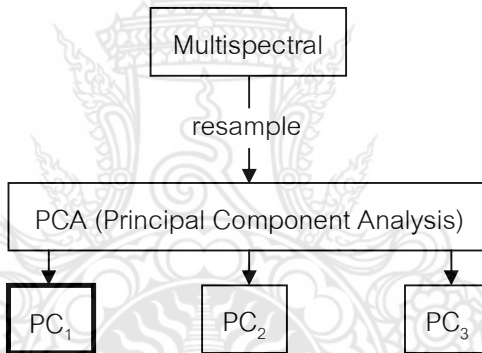
จากภาพที่ (3.17) แสดงถึงกระบวนการในการหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet transform โดยที่ขั้นตอนการหลอมข้อมูลภาพจะแตกต่างกันที่วิธีการทำ Histogram match และไม่ทำ Histogram match ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาทำการเปรียบเทียบค่าสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างวิธีดังกล่าว และทำการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่ให้ข้อมูลภาพในการหลอมรวมด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet transform เปรียบเทียบวิธีที่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



ภาพที่ 3.17 การหลอมภาพด้วยวิธีการนำเสนอ: IHS ร่วมกับ Wavelet transform

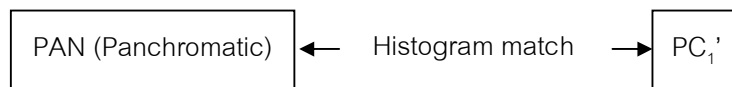
3.5.2 การหลอมภาพด้วย PCA ร่วมกับ Wavelet transform

การหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet transform จะทำการใช้ภาพ Multispectral ทำการแปลงข้อมูลภาพ resample ด้วยวิธี PCA (Principal Component Analysis) และใช้ภาพ PAN (Panchromatic) ที่มีความละเอียดสูง ทำการปรับขนาดข้อมูลภาพด้วยวิธี Histogram match (ซึ่งในกระบวนการหลอมภาพดังกล่าวจะทำการแยกวิธีการทำ Histogram match และ ไม่ทำ Histogram match ในวิธีการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet transform) นำข้อมูลภาพทั้งสอง โดยนำ ข้อมูล (PC_1) จาก PCA และข้อมูลภาพ PAN' ทำการแปลงข้อมูลภาพด้วย Wavelet transform จะได้ข้อมูลภาพใหม่เป็น (PC_1') และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับด้วยวิธี Invers PCA โดยการนำ (PC_1') แทนในข้อมูลภาพ (PC_1) ใน PCA และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับเป็นข้อมูลภาพ RGB'



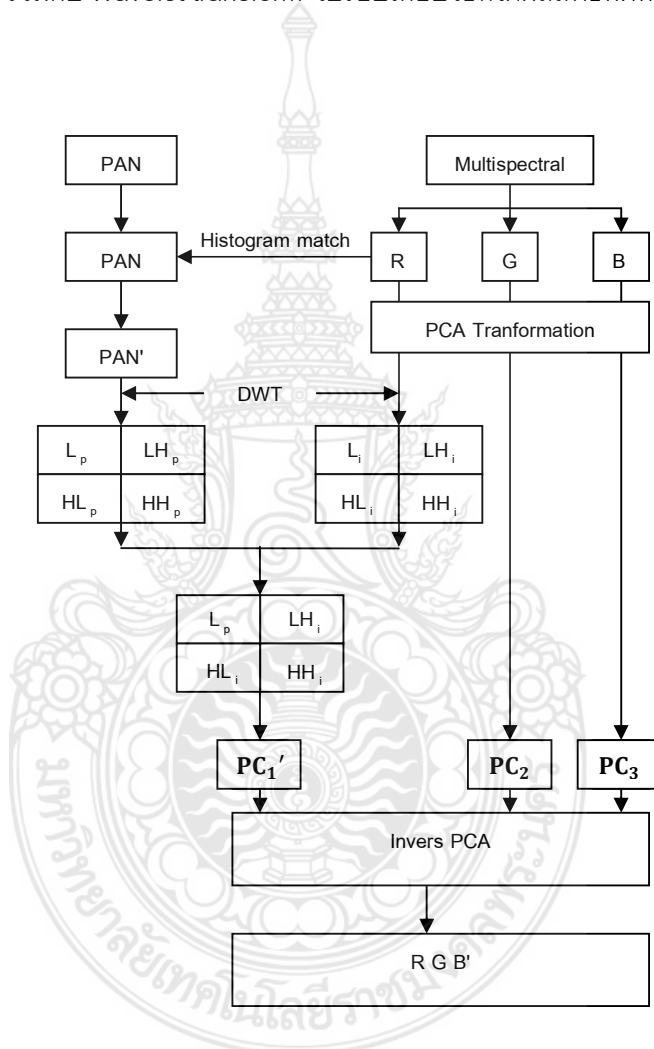
ภาพที่ 3.18 resample สัญญาณภาพ Multispectral เป็น PCA

ซึ่งในวิธีที่ไม่ทำ Histogram match ให้นำข้อมูลภาพ PAN ทำการแปลงข้อมูลภาพด้วยวิธี Wavelet transform กับ (PC_1) จาก PCA ซึ่งจะได้ (PC_1') และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับด้วยวิธี Invers PCA โดยการนำ (PC_1') แทนในข้อมูลภาพ (PC_1) ใน PCA และทำการแปลงข้อมูลภาพกลับเป็นข้อมูลภาพ RGB'



ภาพที่ 3.19 การทำ Histogram match ภาพ PAN กับ I

จากภาพที่ (3.20) แสดงถึงกระบวนการในการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet transform โดยที่ขั้นตอนการหลอมข้อมูลภาพจะแตกต่างกันที่วิธีการทำ Histogram match และไม่ทำ Histogram match ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาทำการเปรียบเทียบค่าสหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างวิธีดังกล่าว และทำการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่ให้ข้อมูลภาพในการหลอมรวมด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet transform เปรียบเทียบวิธีที่ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด



ภาพที่ 3.20 การหลอมภาพด้วยวิธีการนำเสนอ: PCA ร่วมกับ Wavelet transform

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

เพื่อต้องการศึกษาเทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ตจากภาพ Panchromatic (PAN) กับภาพ Multispectral (RGB) ด้วยการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธี Intensity hue saturation (IHS) และ Principal Component Analysis (PCA) จากการทดลองจะใช้ข้อมูลภาพ Panchromatic (PAN) ขนาด 2449 x 613 พิกเซลกับภาพ Multispectral (RGB) ขนาด 612 x 153 พิกเซลซึ่งมีหลายแถบความยาวคลื่นจำนวน 3 ภาพ

การผสมภาพจากภาพรายละเอียดสูง-ความยาวช่วงคลื่นกว้าง (ภาพในระบบ PAN) และภาพความละเอียดต่ำ-ความยาวช่วงคลื่นแคบ (ภาพในระบบ TM หลายแถบความยาวคลื่น) ซึ่งจะใช้เฉพาะสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตความถี่ต่ำมีขนาดภาพเท่ากับ 1224 x 306 พิกเซล ซึ่งจะได้จากการแปลงเวฟเล็ตค่าความสว่างของภาพ LL จะถูกปรับให้เหมาะสมกับความสว่างภาพ PAN' ค่าความสว่างใหม่ ของภาพ LL คือ LP หลังจากนั้นจะแปลงค่าความสว่างใหม่ของระบบภาพ PCA และ IHS ดังหัวข้อถัดไป

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบ

4.2.1 ภาพต้นฉบับในระบบ Panchromatic

ภาพต้นฉบับในระบบ Panchromatic ที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 2449 x 613 พิกเซล



ภาพที่ 4.1 ภาพ Panchromatic ต้นฉบับ ขนาด 2,449 X 613 พิกเซล

4.2.2 ภาพต้นฉบับในระบบ Multispectral (RGB)

ภาพต้นฉบับในระบบ Multispectral (RGB) ที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 612 X 153 พิกเซล



ภาพที่ 4.2 ภาพ Multispectral แบนด์ R (RED) ต้นฉบับ ขนาด 612 X 153 พิกเซล



ภาพที่ 4.3 ภาพ Multispectral แบนด์ G (Green) ต้นฉบับ ขนาด 612 X 153 พิกเซล



ภาพที่ 4.4 ภาพ Multispectral แบนด์ B (Blue) ต้นฉบับ ขนาด 612 X 153 พิกเซล

4.3 ผลการทดสอบภาพในระบบ PCA ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต

จากการหลอมภาพด้วยวิธีที่นำเสนอในบทที่ 3 รูป 3.20 เป็นการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตจะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.5 แบนด์Lpของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.6 แบนด์LHpของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



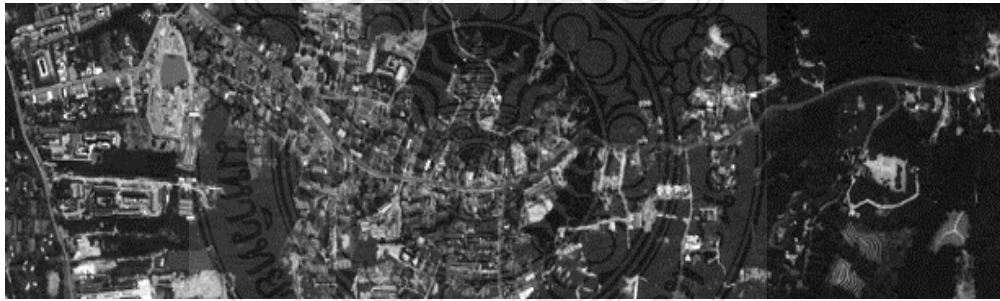
ภาพที่ 4.7 แบนด์HLPของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.8 แบนด์HHpของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.9 แบนด์PC1'ภายหลังการปรับปรุงภาพ



ภาพที่ 4.10 แบนด์PC2ที่ได้จากการแปลง PCA



ภาพที่ 4.11 แผนที่PC3ที่ได้จากการแปลง PCA



ภาพที่ 4.12 ผลลัพธ์จากการลดขนาดภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet Transform

ตารางที่ 4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสหสัมพันธ์ ของภาพต้นฉบับและอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (PSNR)จากการลดขนาดภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet Transform

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน standard deviation: SD		PSNR	Correlationระหว่างภาพ ต้นฉบับกับภาพผลลัพธ์
ภาพต้นฉบับ	ภาพผลลัพธ์		
38.361	36.071	68.87	0.774

4.4 ผลการทดสอบภาพในระบบ IHSร่วมกับการแปลงเวฟเล็ต

จากการหลอมภาพด้วยวิธีที่นำเสนอในบทที่ 3 รูป 3.20 เป็นการหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับการแปลงเวฟเล็ตจะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.13 แบนด์ Lp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.14 แบนด์ LHp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.15 แบนด์ HLP ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.16 แบนด์ HHp ของภาพ PAN หลังผ่านการขบวนการ wavelet transform



ภาพที่ 4.17 ผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี IHSร่วมกับ Wavelet Transform

ตารางที่ 4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสหสัมพันธ์ ของภาพต้นฉบับและอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (PSNR) จากการหลอมภาพด้วยวิธี IHSร่วมกับ Wavelet Transform

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน standard deviation: SD		PSNR	Correlationระหว่างภาพ ต้นฉบับกับภาพผลลัพธ์
ภาพต้นฉบับ	ภาพผลลัพธ์		
38.361	37.916	38.87	0.943

จากผลการทดลอง ทำการเปรียบเทียบผล (ก) ภาพ PAN ต้นฉบับ (ข) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet Transform และ (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet Transform ตามลำดับ



(ก) ภาพ PAN ต้นฉบับ



(ข) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี PCA ร่วมกับ Wavelet Transform



(ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมภาพด้วยวิธี IHS ร่วมกับ Wavelet Transform

ภาพที่ 4.18 ภาพต้นฉบับเปรียบเทียบผลลัพธ์

ตารางที่ 4.3 สหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA โดยการทำให้ Matching Histogram

	Correlation	
	IHS	PCA
R-R'	0.933	0.774
G-G'	0.938	0.689
B-B'	0.954	0.693
Abs DiFF of S.D.		
$ SD_R - SD_{R'} $	20.34	15.56
$ SD_G - SD_{G'} $	20.98	14.93
$ SD_B - SD_{B'} $	19.96	15.78

ตารางที่ 4.4 สหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA โดยไม่ทำ Matching Histogram

	Correlation	
	HIS	PCA
R-R'	0.679	0.541
G-G'	0.391	0.205
B-B'	0.312	0.226
Abs DiFF of S.D.		
$ SD_R - SD_{R'} $	21.93	15.23
$ SD_G - SD_{G'} $	18.68	14.22
$ SD_B - SD_{B'} $	19.45	15.98

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จุดมุ่งหมายของงานปริญญาโทฉบับนี้คือพยายามหลอมข้อมูลภาพขาวดำ Panchromatic ที่มีความละเอียดสูงมาก กับภาพสี Multispectral ที่มีหลากหลายช่วงคลื่น เพื่อสร้างข้อมูลภาพผลลัพธ์ ที่สามารถเพิ่มความคมชัดและรายละเอียดในภาพให้สูงขึ้น ซึ่งมีหลายวิธี อาทิ lidar-multispectral stack, optical-SAR stack, RGB Color Composite, Brovey Transformation, IHS Transformation, Principal Component Analysis (PCA), Wavelet Transformation และ Ehler Fusion เป็นต้น แต่ในปริญญาโทฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการหลอมข้อมูลภาพด้วยวิธี Wavelet Transformation ร่วมกับอีกสองวิธีคือ IHS Transformation และ PCA Transformation ซึ่งวิธีการที่นำเสนอใหม่ทั้ง 2 วิธีนี้พบว่าสามารถเพิ่มรายละเอียดและความคมชัดของภาพผลลัพธ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากการเบี่ยงเบนมาตรฐาน Peak Signal-to-noise ratio : PSNR และสหสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งพบว่าวิธีการหลอมข้อมูลภาพด้วยวิธี Wavelet Transformation ร่วมกับ IHS Transformation ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 38.361 PSNR 38.87 และ สหสัมพันธ์มีค่า 0.943

ผลการทดสอบจาก คอมพิวเตอร์ รุ่น Dell Studio 1458
ระบบประมวลผล Intel core i5-520M (2.4GHz, 3MB L3 cache, Turbo Boost)
ระบบปฏิบัติการ Windows10
ใช้เวลาในการประมวลผลภาพประมาณ 900~1000 วินาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

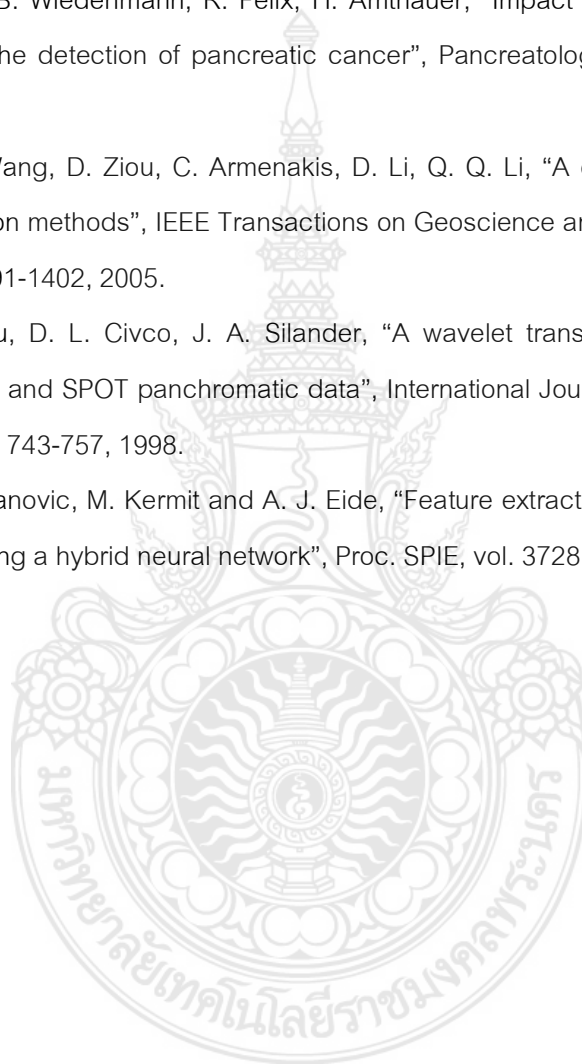
จากวิธีการต่างๆที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้นจะสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเป็นประโยชน์ต่อสังคม ประเทศชาติ และพัฒนาในวงการอุตสาหกรรมต่างๆได้ เช่น ภาพถ่ายดาวเทียมที่ช่วยทางการเกษตร การตรวจหาอาวุธหรือสิ่งเสพติดเพื่อช่วยในการตำรวจหรือทหารได้แต่ปัญหาที่สนใจและควรถูกนำมาทบทวนคือ เวลาในการประมวลผล ซึ่งหากการประมวลผลด้วยวิธีนี้ทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วต่ำจะทำให้สิ้นเปลืองเวลามาก หากสามารถพัฒนาโปรแกรมหรืออัลกอริทึมให้สั้นและรวดเร็วกว่านี้จะทำให้ลดระยะเวลาและพลังงานลงได้ ซึ่งอาจส่งผลถึงการนำไปใช้จริงหรือการแข่งขันในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์บางอย่างที่ต้องการประหยัดพลังงานให้มากขึ้นและมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมทางด้านโทรศัพท์มือถือประเภทสมาร์ตโฟน หรือเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กสมัยใหม่ เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

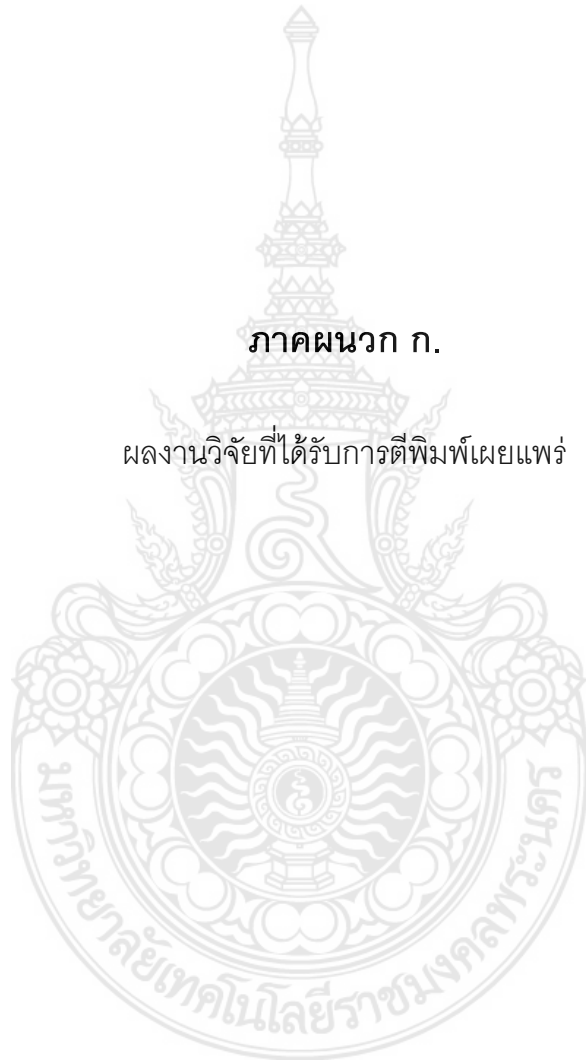
- [1] F. Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Chitwong. "Seam Removeval from Colour mosacking of MOS-1 MESSR Image" Proceeding of the 13th Asin Conference on Remote Sensing, Ulaanbaatar, Mongolia, pp. Q-5-6 – Q-5-6,7-11 Oct, 1989.
- [2] P. T. Wolter, C. A. Johnston, G. J. Niemi, "Mapping submergent aquatic vegetation in the US Great Lakes using Quickbird satellite data", International Journal of Remote Sensing, vol. 26, pp. 5255-5274, 2005. [11] Z. Tan, F. M. Bao, A. G. Li, B. Yang, Y. G. Gong, Digital Image Fusion. Xi'an Jiao Tong University Press, Xi'an, 2004.
- [3] N. Hinsamoth, F. Cheevasuvit, K. Dejhan, S. Mitatha, A. Somboonkeaw. "Mosaicing of Multi-Resolution Satellite Image." The 1998 IEEE Asian-Pacific Conference on Circuits and System, Chaingmai, Thailand, pp. FT22.1-1 –FT22.1-4, November 24-27, 1998.
- [4] L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli, F. Nencini, "Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity modulation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, pp. 2832-2839, 2004.
- [5] A. Jain, P. Moulin, M. I. Miller, K. Ramchandran, "Information-theoretic bounds on target recognition performance based on degraded image data", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, pp. 1153-1166, 2002.
- [6] R.C. Gonzales, Richard E. Woods. "Digital Image Processing." Second Edition, Addison Wesley Publishing Inc, 1992.
- [7] R. Lewis. "Practical digital image processing." Ellis Horwood Limited, England, 1990.
- [8] William K. Pratt. "Digital Image Processing." A Wiley-Interscience Publish, 1978.
- [9] S.C. Chapra, Raymond P. Canale. "Numerical Methods for Engineeis." 3rd Edition, McGraw-Hill Internation Editions, 1998.

- [10] M. M. Rahman, E. Csaplovics, "Examination of image fusion using synthetic variable ratio (SVR) technique", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, pp. 3413-3424, 2007.
- [11] J. Ruf, E. L. Haenninen, M. Boehmig, I. Koch, T. Denecke, M. Plotkin, J. Langrehr, B. Wiedenmann, R. Felix, H. Amthauer, "Impact of FDG-PET/MRI image fusion on the detection of pancreatic cancer", *Pancreatology*, vol. 6, pp. 512-519, 2006.
- [12] Z. J. Wang, D. Ziou, C. Armenakis, D. Li, Q. Q. Li, "A comparative analysis of image fusion methods", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, pp. 1391-1402, 2005.
- [13] J. Zhou, D. L. Civco, J. A. Silander, "A wavelet transform method to merge landsat TM and SPOT panchromatic data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, pp. 743-757, 1998.
- [14] V. Becanovic, M. Kermit and A. J. Eide, "Feature extraction from photographic images using a hybrid neural network", *Proc. SPIE*, vol. 3728, pp. 351-361, 1999.



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



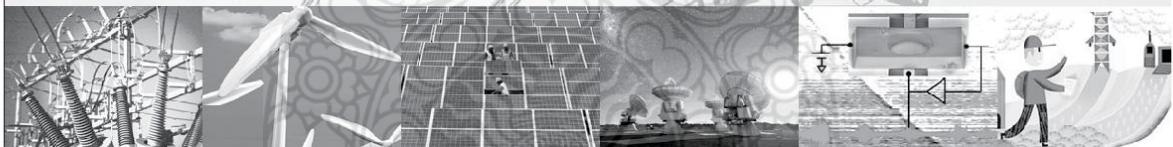


EENET2015

27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7th Electrical Engineering Network 2015
of Rajamangala University of Technology



Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
<http://www.eenet2015.org>

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสมด้วยการแปลงเวฟเล็ท

Image Fusion of the Remote Sensing Image Data Using Wavelet Combined Transformation

สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์¹ และ ณัฐพงศ์ ทัฬหะ²¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาชื่นสาย1 บางซื่อ กรุงเทพมหานคร E-mail: supoj.rexrojratt@gmail.com, nattapong100@gmail.com

บทคัดย่อ

การหลอมข้อมูลภาพเป็นเครื่องมือในการเอาข้อมูลการสำรวจจากระยะไกลที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน และมีลักษณะที่หลากหลายมารวมกันเพื่อให้ได้เป็นข้อมูลตัวแทนใหม่โดยจะได้ข้อมูลภาพที่มีคุณภาพดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหลอมภาพด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ทร่วมกับวิธี IHS หรือ Intensity-hue-saturation เปรียบเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเล็ทร่วมกับวิธี PCA หรือ Principal Component Analysis ผลการทดลองพบว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ทร่วมกับวิธี IHS จะให้ความละเอียดที่สูงขึ้นและมีค่ารายละเอียดเชิงคลื่นที่สูงขึ้น แต่วิธีการแปลงเวฟเล็ทร่วมกับวิธี PCA จะให้ความละเอียดที่สูงขึ้นเช่นกันแต่ค่ารายละเอียดเชิงคลื่นจะเสียหาย

คำสำคัญ: การหลอมภาพ, ไอเอชเอส, ทีซีโอ, การแปลงเวฟเล็ท

Abstract

The data fusion is implement to take the survey data remotely from difference sources and have various looks to be combined to get a new agents. To get better quality of data, we will present a method of fusion by wavelet transform with IHS Transformation method or PCA Transformation method. From the results showed that both IHS and PCA Transformation method able to be gotten high quality but the specifications of wave from damage is different.

Keywords: Fusion, IHS, PCA, Wavelet Transform

1. บทนำ

ภาพถ่ายดาวเทียมทั่วไปประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ภาพที่มีความละเอียดสูง หรือเรียกว่า Panchromatic และภาพที่มีความละเอียดต่ำ หรือเรียกว่า Multispectral แต่อย่างไรก็ตาม ภาพ Panchromatic จะมีแค่ 1 แบนด์คือดาวเทียมหนึ่งดวง ในขณะที่ ภาพ Multispectral ที่ได้เต็มไปด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มากและหลากหลายแบนด์ ดังนั้น เพื่อที่จะเก็บรวบรวมข้อมูลองค์ประกอบสเปกตรัมสูงกับภาพที่มี

ความละเอียดสูงเข้าด้วยกันจะใช้ขบวนการหลอมภาพ หรือที่ผ่านวิธีต่างๆซึ่งแต่ละวิธีต้องการที่จะปรับปรุงให้ข้อมูลภาพมีความชัดเจนและเด่นชัดมากยิ่งขึ้น ในบทความนี้จะนำเสนอการหลอมภาพด้วยการแปลงเวฟเล็ทร่วมกับวิธี IHS[1] และการแปลงเวฟเล็ทร่วมกับ PCA[2] ตามรายละเอียดในหัวข้อถัดมา

2 การหลอมข้อมูลภาพ

วิธีการที่ใช้ในการหลอมภาพนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี สำหรับวิธีพื้นฐานที่นิยมใช้ จะนำเสนอมืออยู่ด้วยกัน 3 วิธี วิธีที่นำมาประยุกต์คือ Wavelet, IHS และ PCA

2.1 Wavelet Image Fusion

การหลอมภาพด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ท ขั้นตอนการแปลงด้วยวิธีเวฟเล็ท นั้นจะทำการแยกภาพต้นฉบับออกเป็น 2 ส่วน คือ แบนด์ความถี่ต่ำและแบนด์ความถี่สูง โดยสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของรายละเอียดด้วย Pyramidal algorithms [1] ซึ่งสัญญาณทั้ง 2 คือ สัมประสิทธิ์ของ Approximation และ Detail สามารถหาได้จาก

$$f(x) = \sum_k C_{jk} \varphi_{jk}(X) + \sum_l 1 * \sum_k d_{jk} \psi_{jk} \quad (1)$$

เมื่อ C_{jk} คือ สัมประสิทธิ์สเกลลิง (Scaling Coefficients)

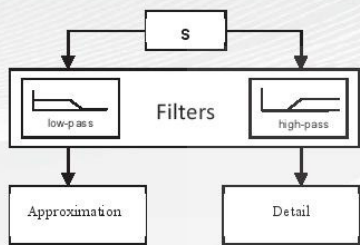
d_{jk} คือ สัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ท (Wavelet Coefficients)

จากรูปที่ 1 ในเทอมแรกของสมการที่ 1 เป็น approximate coefficient คือ สัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำและในเทอมที่ 2 คือ Detailed coefficient คือ สัญญาณองค์ประกอบความถี่สูง[4]

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)



รูปที่ 1 การแยกสัญญาณทั้ง 4 ตัวกรองแบบ 2 ช่องสัญญาณ ส่วนประกอบของสัญญาณองค์ประกอบความถี่สูงจะประกอบไปด้วย แบนด์ LH, HH และ DD ตามลำดับ

2.2 Intensity – Hue – Saturation Transformation

การแปลงด้วยวิธี IHS สำหรับเทคนิคการแปลง IHS นั้นได้ทำการแปลงภาพต้นฉบับในระบบสี RGB ที่เป็นภาพมีหลายช่วงความถี่ไปเป็น IHS ต้องนำมารวมกับภาพที่มีรายละเอียดเชิงพื้นที่สูง (Panchromatic) โดยจะทำการ Resampling ภาพทั้ง 2 ระบบให้มีความละเอียดของภาพต้นฉบับให้มีค่าเท่ากับภาพ Pan และแปลงภาพจากระบบ IHS กลับไปสู่ RGB จะทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีความคมชัดที่สูงขึ้นและมีรายละเอียดเชิงพื้นที่สูงขึ้นด้วยโดยวิธีคำนวณได้สมการดังต่อไปนี้[5]

$$\begin{pmatrix} I \\ V1 \\ V2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{V2}{V1} \right) \quad (3)$$

$$S = \sqrt{V1^2 + V2^2}$$

เมื่อ V1 และ V2 เป็น intermediate values

$$V1 = S \cos(H)$$

$$V2 = S \sin(H)$$

$$\begin{pmatrix} R'' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} PAN \\ V1 \\ V2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

2.3 Principal Component Transformation

การแปลงองค์ประกอบหลักด้วยวิธี PCA การแปลงข้อมูลภาพที่เป็นแบบ Multispectral ที่มีหลายแบนด์ไปเป็นแบนด์เดียวสามารถทำได้ด้วยวิธีการดังนี้ [6]

เริ่มจากคำนวณ covariance matrix Cx ตามสมการที่ (8)

$$Cx = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (xi-m)(xi-m)^T \quad (8)$$

เมื่อ x เป็น N-dimensional variable

m เป็น ค่าเฉลี่ยของแต่ละ

k เป็น จำนวนพิกเซลทั้งหมด

สำหรับองค์ประกอบหลัก Y_i สามารถเขียนได้โดย

$$Y_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \quad (9)$$

$$Y_i = a_i^T x \quad (10)$$

ดังนั้นการแปลงส่วนประกอบหลักทั้งหมด จะได้จากสมการที่ (11)

$$Y = A^T x \quad (11)$$

ขณะที่ A เป็น eigenvector matrix และ covariance matrix ใหม่(Y)มาจาก

$$C_y = A C_x A^T \quad (12)$$

เมื่อ Cx คือ diagonal matrix จะมี eigenvalue ของ Cx จาก

$$Cx = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{เมื่อ } \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_n \quad (5)$$

$$(6)$$

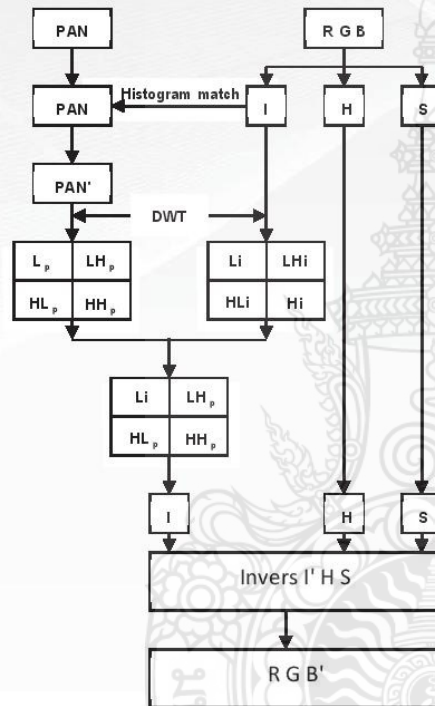
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

3. การหลอมภาพด้วย IHS ร่วมกับ Wavelet transform

ขั้นตอนการหลอมรวมภาพ IHS กับ Wavelet สามารถทำได้ด้วยขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนที่น่าเสนอด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับ IHS

เริ่มจากการนำภาพต้นฉบับ RGB มาแปลงเข้าสู่โหมด IHS แล้วนำเฉพาะแบนด์ I ไปทำแมชชีนฮิสโตแกรม (Matching Histogram) กับภาพที่มีความละเอียดสูง (PAN) ได้ผลลัพธ์เป็นภาพ PAN' แล้วนำไปผ่านฟังก์ชันการแปลงเวฟเล็ต เช่นเดียวกับ แบนด์ I และนำเฉพาะชั้นแบนด์ Li แทนในชั้นแบนด์ Lp ของภาพ PAN ไปแทน และแปลงเวฟเล็ตกลับมา จะได้ I'HS และแปลงกลับไปเป็น RGB' ได้เป็นภาพผลลัพธ์ใหม่

4. การหลอมภาพด้วย PCA ร่วมกับ Wavelet transform

สำหรับขั้นตอนการหลอมรวมภาพด้วยวิธีการหลอมภาพด้วยเวฟเล็ตร่วมกับพีซีเอ จะทำเช่นเดียวกับวิธีการให้หัวข้อที่ 3 ในรูปที่ 2

5. ผลลัพธ์

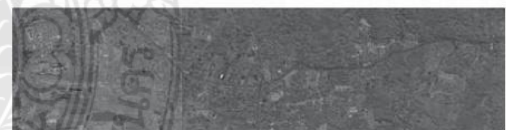
ผลการทดลองพบว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ต ร่วมกับวิธี IHS จะให้ความละเอียดที่สูงขึ้นและมีค่ารายละเอียดเชิงคลื่นที่สูงขึ้น แต่วิธีการแปลงเวฟเล็ตร่วมกับวิธี PCA จะให้ความละเอียดที่สูงขึ้นเช่นกันแต่ค่ารายละเอียดเชิงคลื่นจะเสียหายไป



รูปที่ 3 ภาพต้นฉบับของ Panchromatic ที่มีความละเอียดสูง



รูปที่ 4 ภาพต้นฉบับของ Multispectral



รูปที่ 5 ภาพผลลัพธ์ของการแปลงเวฟเล็ต และวิธี IHS



รูปที่ 6 ภาพผลลัพธ์ของการแปลงเวฟเล็ต และวิธี PCA

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

จากตารางที่ 1 เป็นผลของการทำ Matching Histogram ระหว่างภาพ PAN กับแบนด์ 1 ของภาพ Multispectral ก่อนเข้าสู่กระบวนการแปลงเวฟเล็กร่วมกับ IHS และ PCA โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการทำ Matching Histogram จะให้ค่าสหสัมพันธ์มีความกับภาพต้นฉบับอย่างมีนัยสำคัญ ทั้ง 3 แบนด์ สำหรับตารางที่ 2 แสดงค่าสหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA โดยไม่ใช้ Matching Histogram [7],[8]

ตารางที่ 1 สหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA

โดยการทำ Matching Histogram

	Correlation	
	IHS	PCA
R-R'	0.933	0.774
G-G'	0.938	0.689
B-B'	0.954	0.693
Abs DIFF of S.D.		
$ SD_R - SD_{R'} $	20.34	15.56
$ SD_G - SD_{G'} $	20.98	14.93
$ SD_B - SD_{B'} $	19.96	15.78

ตารางที่ 2 สหสัมพันธ์และค่าเบี่ยงเบนด้วยวิธี IHS และ PCA

โดยไม่ทำ Matching Histogram

	Correlation	
	IHS	PCA
R-R'	0.679	0.541
G-G'	0.391	0.205
B-B'	0.312	0.226
Abs DIFF of S.D.		
$ SD_R - SD_{R'} $	21.93	15.23
$ SD_G - SD_{G'} $	18.68	14.22
$ SD_B - SD_{B'} $	19.45	15.98

6. สรุป

จากวิธีที่นำเสนอพบว่าวิธีการหลอมภาพด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็กร่วมกับ IHS จะสามารถเก็บความละเอียดเชิงพื้นที่ได้ดีกว่าวิธีการหลอมภาพด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็กร่วมกับ PCA โดยผลที่สูงของสหสัมพันธ์ (Correlation) ที่มีค่าสูงกว่า และสามารถเพิ่มรายละเอียดของข้อมูลภาพผลลัพธ์ให้สูงขึ้นได้ด้วยการทำ Matching Histogram ดังตารางที่ 1 เปรียบเทียบกับตารางที่ 2 ที่ไม่มีการทำ Matching Histogram

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. T. Wolter, C. A. Johnston, G. J. Niemi, "Mapping submergent aquatic vegetation in the US Great Lakes using Quickbird satellite data", International Journal of Remote Sensing, vol. 26, pp. 5255-5274, 2005. [11] Z. Tan, F. M. Bao, A. G. Li, B. Yang, Y. G. Gong, Digital Image Fusion. Xi'an Jiao Tong University Press, Xi'an, 2004.
- [2] M. M. Rahman, E. Csaplovcics, "Examination of image fusion using synthetic variable ratio (SVR) technique", International Journal of Remote Sensing, vol. 28, pp. 34133424, 2007.
- [3] L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli, F. Nencini, "Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity modulation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, pp. 2832-2839, 2004.
- [4] J. Ruf, E. L. Haenninen, M. Boehmig, I. Koch, T. Denecke, M. Plotkin, J. Langrehr, B. Wiedenmann, R. Felix, H. Amthauer, "Impact of FDG-PET/MRI image fusion on the detection of pancreatic cancer", Pancreatology, vol. 6, pp. 512-519, 2006.
- [5] A. Jain, P. Moulin, M. I. Miller, K. Ramchandran, "Information-theoretic bounds on target recognition performance based on degraded image data", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, pp. 1153-1166, 2002.
- [6] Z. J. Wang, D. Ziou, C. Armenakis, D. Li, Q. Q. Li, "A comparative analysis of image fusion methods", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, pp. 1391-1402, 2005.
- [7] J. Zhou, D. L. Civco, J. A. Silander, "A wavelet transform method to merge landsat TM and SPOT panchromatic data", International Journal of Remote Sensing, vol. 19, pp. 743-757, 1998.
- [8] V. Becanovic, M. Kermit and A. J. Bide, "Feature extraction from photographic images using a hybrid neural network", Proc. SPIE, vol. 3728, pp. 351-361, 1999.

ประวัติการผู้เขียน

ชื่อ นามสกุล นาย สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์
 วัน เดือน ปีเกิด 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2527
 ภูมิลำเนา 44 หมู่ 7 ต.บางรักใหญ่ อ.บางบัวทอง จ.นนทบุรี 11110
 ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมไฟฟ้า
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ
 2551

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมไฟฟ้า
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2558

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน
 อธิการส่วนตัว

ผลงานวิจัยการประชุมวิชาการ

สุพจน์ เล็กโรจน์รัตน์¹, ณัฐพงศ์ พันธุ์² เทคนิคการหลอมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมผสม
 ด้วยการแปลงเวฟเล็ต "Image Fusion of the Remote Sensing Image Data Using Wavelet
 Combined Transformation" *Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering
 Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)*