

การหาค่าความเข้มที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม
Intensity Optimization to Improve Pan-sharpening

สุวรรณี พยับไชยกุล

Suwannee Phayapchaiyakun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Computer Science
Prince of Songkla University**

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การหาค่าความเข้มที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม
ผู้เขียน นางสาวสุวรรณี พยับไชยกุล
สาขาวิชา วิทยาการคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิมิต บุญภิรมย์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ กานต์สมเกียรติ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ

(นางสาวสุวรรณี พยับไขยกุล)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....
(นางสาวสุวรรณี พยับไชยกุล)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การหาค่าความเข้มที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม
ผู้เขียน นางสาวสุวรรณี พยับไชยกุล
สาขาวิชา วิทยาการคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมเป็นวิธีการสังเคราะห์ภาพสีที่มีความคมชัดจากการรวมข้อมูลภาพขาวดำที่มีความคมชัดเข้ากับภาพสีที่ขาดความคมชัด ซึ่งวิธีการหลอมรวมที่ง่ายและได้รับความนิยมมาก คือ ขั้นตอนวิธีที่อาศัยการแปลง Intensity-Hue-Saturation (IHS) แต่ขั้นตอนวิธีในกลุ่มนี้จะก่อให้เกิดปัญหา 2 ปัญหาใหญ่ ๆ คือ ปัญหาค่าเกินช่วง (Out-of-gamut) จากการแปลงระหว่างระบบสี RGB และ IHS แล้วค่าที่ได้ตกอยู่นอกลูกบาศก์ และปัญหาการผิดเพี้ยนของสีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความอิ่มตัวของสีและความเข้มแสงในระหว่างการหลอมรวม งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความอิ่มตัวของสีและความเข้มแสงเพื่อรักษาข้อมูลสีของภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต ดังนั้นจึงนำเสนอขั้นตอนวิธีการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมที่รักษาคุณภาพของสีได้มากที่สุดด้วยวิธีการแปลง improved Hue-Saturation-Lightness (iHSL) และปรับปรุงค่าความเข้มให้เหมาะสมด้วยวิธี Smooth Filter-based Intensity Modulation (SFIM) ซึ่งให้ภาพผลลัพธ์ที่ลดความผิดเพี้ยนของสีได้ดีกว่าวิธีการในกลุ่มพื้นฐาน IHS อื่น ๆ

Thesis Title Intensity Optimization to Improve Pan-sharpening
Author Ms.Suwannee Phayapchaiyakun
Major Program Computer Science
Academic Year 2015

ABSTRACT

Image fusion in remote sensing is usually called pan-sharpening, which is a useful method to synthesis a high resolution multispectral image (MS) from the combining of a high resolution panchromatic image (PAN) with a low resolution MS image. The popular fusion methods are intensity-hue-saturation (IHS)-based methods. However, the IHS-based methods have two major problems: (i) out-of-gamut due to transformation between red-green-blue (RGB) and IHS color systems and (ii) color distortion due to variation of saturation and intensity in image fusion. The proposed method studied on the relationship between intensity and saturation to preserve spectral information of the fusing THEOS images. Thus, we found a suitable color space, iHSL (improved hue-saturation-lightness) for pan-sharpening that can isolate the intensity or lightness component. The fusion method employs smooth filter-based intensity modulation technique to merge the spatial information from PAN with the intensity component from MS images. From the studied results, our method could preserve the spectral information better than the well-known IHS-based methods.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง คือ

รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต อินทจักร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา พร้อมทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้แก่ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิมิต บุญภิรมย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

อาจารย์ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ได้อย่างดียิ่ง

เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเอกสารต่าง ๆ

ทุนสนับสนุนนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเป็นผู้ช่วยนักวิจัย (Research Assistant) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่มอบทุนสนับสนุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้า

เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

คุณพ่อ คุณแม่ และน้องชาย ที่ให้การสนับสนุนคอยเป็นห่วงสุขภาพ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สุวรรณี พยับไขยกุล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(8)
รายการตาราง.....	(10)
รายการภาพประกอบ.....	(11)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินการ.....	2
1.5 สถานที่และเครื่องมือที่ใช้.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ดาวเทียมไทยโชด.....	5
2.2 ภาพถ่ายดาวเทียม.....	8
2.3 ระบบสี RGB และระบบสี IHS.....	9
2.4 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม.....	14
2.5 Gamut Problem in Linear and Nonlinear IHS Color Spaces.....	17
2.6 Improved Nonlinear Intensity-Hue-Saturation (iNIHS).....	19
2.7 Improved Hue-Lightness-Saturation (iHSL).....	21
2.8 การประเมินคุณภาพ.....	23
3 การวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนา.....	27
3.1 การหาค่าความเข้มที่เหมาะสม.....	27
3.2 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมวิธีการแปลง iNIHS.....	36
3.3 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมวิธีการแปลง iHSL.....	38
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	41
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	41
4.2 ผลการทดลอง.....	42
4.3 การประเมินคุณภาพ.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	52
ก ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ JCSSE 2012.....	53
ข ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ SICE 2013.....	61
ค ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ ICCAS 2014.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	75

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2.1 คุณสมบัติของกล้องบันทึกภาพ.....	6
3.1 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าตาต่างกัน.....	30
3.2 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ IHS-BT เมื่อกำหนดค่า k แตกต่างกัน.....	32
3.3 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ BT-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าตาต่างกัน.....	33
3.4 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ IHS-BT-SFIM เมื่อกำหนดค่า k แตกต่างกัน.....	35
3.5 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ iNIHS และ iNIHS-SFIM.....	37
3.6 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ iHSL และ iHSL-SFIM.....	40
4.1 ค่าของดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมจากวิธีการต่าง ๆ.....	45
4.2 ค่าของดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมจากวิธีการต่าง ๆ.....	47

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 การตอบสนองต่อสเปกตรัมของดาวเทียมไทยโชต.....	7
2.2 ภาพถ่ายจากดาวเทียมไทยโชต.....	7
2.3 การตอบสนองของสเปกตรัมแบบสัมพัทธ์ของดาวเทียมไทยโชต.....	8
2.4 แบบจำลองระบบสี RGB.....	9
2.5 แบบจำลองระบบสี IHS.....	10
2.6 แนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างระบบสี RGB และระบบสี IHS.....	13
2.7 การหลอมรวมรูปภาพด้วยวิธี IHS.....	14
2.8 การเปลี่ยนแปลงความอึมตัวของสีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสี.....	17
2.9 แบบจำลองระบบสี RGB IHS และ iNIHS.....	18
3.1 ผลของการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในวิธีกลุ่มพื้นฐาน IHS.....	28
3.2 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี IHS.....	28
3.3 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี BT.....	29
3.4 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน.....	30
3.5 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี SFIM.....	31
3.6 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน.....	31
3.7 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT.....	32
3.8 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี BT-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน.....	33
3.9 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี BT-SFIM.....	33
3.10 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT-SFIM เมื่อกำหนด k_2 แตกต่างกัน.....	34
3.11 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT-SFIM.....	35
3.12 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS.....	36
3.13 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน.....	37
3.14 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS-SFIM.....	38
3.15 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iHSL.....	38
3.16 ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมรูปภาพ iHSL-SFIM.....	39
3.17 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน.....	40
3.18 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iHSL-SFIM.....	40
4.1 ภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต.....	41
4.2 ภาพหลอมรวมที่ได้จากการแปลง iNIHS.....	42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.3 ภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iHSL.....	43
4.4 เปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการพื้นฐาน IHS.....	44
4.5 เปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการพื้นฐาน IHS.....	46

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตการดำเนินงานของการวิจัย ขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินงาน สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ดาวเทียมสำรวจโลกบันทึกข้อมูลภาพขาวดำหรือภาพแพนโครมาติก (Panchromatic: PAN) และภาพสีหลายช่วงคลื่นหรือภาพมัลติสเปกตรัม (Multispectral: MS) ซึ่งภาพทั้งสองมีรายละเอียดเชิงพื้นที่ รายละเอียดเชิงคลื่น รายละเอียดเชิงเวลาและรายละเอียดเชิงรังสีแตกต่างกัน โดยภาพ PAN มีรายละเอียดเชิงพื้นที่สูงแต่รายละเอียดเชิงคลื่นต่ำหรือภาพขาวดำที่มีความคมชัดสูง ส่วนภาพ MS มีรายละเอียดเชิงคลื่นสูงแต่รายละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำหรือภาพสีที่มีความคมชัดต่ำ ซึ่งการนำไปใช้งานทางด้านสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลกต้องการภาพสีที่มีความคมชัดสูง แต่เนื่องด้วยการออกแบบเซนเซอร์รับภาพของดาวเทียมคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างรายละเอียดเชิงพื้นที่ รายละเอียดเชิงคลื่น และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการบันทึกภาพ ทำให้ไม่สามารถถ่ายภาพตามความละเอียดที่ต้องการได้ จึงเกิดการพัฒนากลอมรวมรูปภาพสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมขึ้นเรียกว่า การปรับความคมชัดด้วยภาพ PAN (Pan-sharpening) เพื่อสร้างภาพ MS ใหม่ที่มีรายละเอียดเชิงพื้นที่และรายละเอียดเชิงคลื่นสูงในภาพเดียว โดยวิธีที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง คือ การแปลง Intensity-Hue-Saturation (IHS) ซึ่งวิธีที่ในกลุ่ม IHS เป็นวิธีการกลอมรวมที่รวดเร็ว แต่เกิดปัญหาการผิดเพี้ยนของสี เนื่องจากการแทนค่าความเข้ม (Intensity: I) ของภาพ MS ต้นฉบับด้วยค่าความเข้มของภาพ PAN ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวของสี (Saturation: S) ระหว่างการกลอมรวมส่งผลให้ภาพที่ได้จากการกลอมรวมเกิดปัญหาค่าออกนอกช่วงและการผิดเพี้ยนของสี

จากปัญหาข้างต้นวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการหาค่าความเข้มที่เหมาะสม สำหรับการกลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อแก้ปัญหาค่าออกนอกช่วงและลดปัญหาการ

ผิดเพี้ยนของสี ทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีรายละเอียดเชิงพื้นที่และเชิงคลื่นสูง เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา ออกแบบ พัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าความเข้มที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนวิธีการแปลง IHS ในการแก้ปัญหาค่าการผิดเพี้ยนของสี

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1. ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ ภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชด
2. ออกแบบวิธีการปรับปรุงค่าความเข้มของขั้นตอนวิธีพื้นฐาน Intensity-Hue-Saturation
3. ประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอเทียบกับวิธีการอื่น ๆ

1.4 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินการ

1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1) ศึกษางานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาเทคโนโลยีและเครื่องมือสำหรับงานวิจัย
- 3) วิเคราะห์และออกแบบวิธีหาค่า / ที่เหมาะสม
- 4) พัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพวิธีการที่ได้ออกแบบไว้
- 5) เขียนบทความวิจัยและเผยแพร่
- 6) จัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์

1.4.2 ระยะเวลาการดำเนินการ

มิถุนายน 2555 – มิถุนายน 2559

แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 1.1

1.5 สถานที่และเครื่องมือที่ใช้

1.5.1 สถานที่

ห้องปฏิบัติการปัญญาประดิษฐ์ (CS207) ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

1.5.2 เครื่องมือที่ใช้

1) ด้านฮาร์ดแวร์

1.1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล จำนวน 1 เครื่อง

- CPU : Intel Core2Duo 2.4 GHz
- Harddisk: 320 GB
- RAM : 2 GB

1.2) เครื่องพิมพ์ 1 เครื่อง

2) ด้านซอฟต์แวร์

2.1) ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 7

2.2) โปรแกรมประยุกต์ MATLAB R2011a

2.3) โปรแกรมประยุกต์ ENVI/IDL

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมพื้นฐาน IHS ที่มีการปรับปรุงค่า / เพื่อลดปัญหาการผิดเพี้ยนของสี

เนื้อหาในรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย บทที่ 2 ซึ่งจะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับภาพถ่ายดาวเทียม ระบบสี การปรับความคมชัดด้วยภาพแพน และการประเมินคุณภาพของภาพหลอมรวม ในส่วนบทที่ 3 อธิบายถึงการวิเคราะห์และออกแบบขั้นตอนวิธีการหาค่าความเข้มที่เหมาะสมสำหรับการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต ถัดมาในบทที่ 4 แสดงผลการทดลองและประเมินคุณภาพของภาพหลอมรวมที่ได้ และบทสุดท้ายบทที่ 5 เป็นบทสรุปผล ซึ่งจะกล่าวถึงปัญหา ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อของการทำวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน ที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาวิธีการหาค่าความเข้มที่เหมาะสมของภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต ที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ประกอบด้วย ดาวเทียมไทยโชต ภาพถ่ายดาวเทียม ระบบสี RGB ระบบสี IHS ระบบสี iNIHS ระบบสี iHSL การหลอมรวมรูปภาพ ปัญหาการผิดเพี้ยนของสี ปัญหาค่าเกินช่วง และการประเมินประสิทธิภาพทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

2.1 ดาวเทียมไทยโชต

ดาวเทียมไทยโชต (Thaichote) หรือดาวเทียมธีออส (Thailand Earth Observation System: THEOS) เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติดวงแรกของไทยที่สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (สทอภ.) พัฒนาร่วมกับบริษัท EADS Astrium ประเทศฝรั่งเศส ดาวเทียมไทยโชตขึ้นสู่อวกาศโดยจรวดนำส่ง Dnepr จากฐานเมือง Yasny ประเทศรัสเซีย เมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2551 เวลา 13.37 น. ตามเวลาประเทศไทย ซึ่งเป็นดาวเทียมวงโคจรต่ำ โดยมีวงโคจรสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ที่ความสูง 822 กิโลเมตร และได้มีการออกแบบให้โคจรผ่านเส้นศูนย์สูตรในเวลาประมาณ 10.00 น.

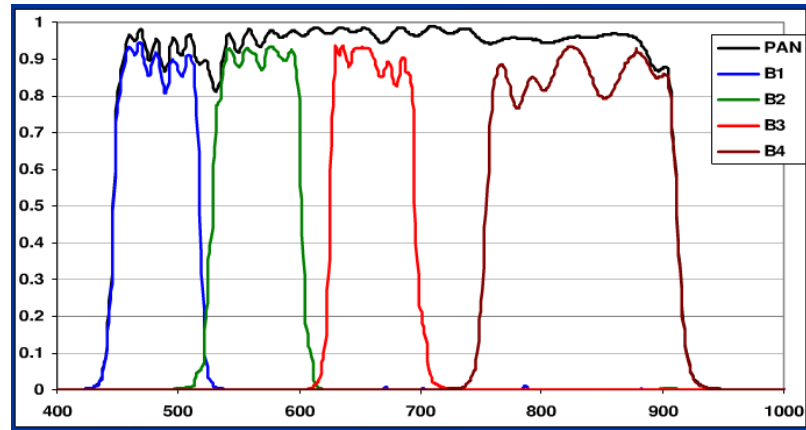
ดาวเทียมไทยโชตเป็นดาวเทียมแบบพาสซีฟ (Passive) ทำงานโดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ส่องกระทบพื้นโลกและสะท้อนกลับไปยังอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ด้วยเหตุนี้การบันทึกข้อมูลจึงทำได้เฉพาะเวลากลางวัน และไม่สามารถทำได้ในเวลากลางคืนหรือเวลาที่สภาพอากาศไม่เหมาะสม เช่น เมื่อมีเมฆ หมอก หรือฝนบดบังชั้นบรรยากาศ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเมฆเหนือประเทศไทย ดาวเทียมไทยโชตโคจรรอบโลก 1 รอบใช้เวลาประมาณ 101.4 นาที และจะโคจรมาที่จุดเดิมทุก ๆ 26 วัน

ดาวเทียมไทยโชต ประกอบด้วยกล้องบันทึกภาพ 2 ตัวด้วยกัน คือ กล้องบันทึกภาพขาวดำ (Panchromatic Telescope) และกล้องบันทึกภาพสีหลายช่วงคลื่น (Multispectral Camera) โดยกล้องแต่ละตัวมีอุปกรณ์ถ่ายเทประจุ (Charge Coupled Devices: CCDs) ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแสงที่สะท้อนจากพื้นโลกให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และบันทึกภาพด้วยหลักการที่เรียกว่า การกวาดภาพแบบแถบ (Pushbroom Scanning) ซึ่งกล้องทั้งสองตัวมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 ภาพ MS ของดาวเทียมไทยโชดมีทั้งหมด 4 ช่วงคลื่น คือ ช่วงคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ 3 ช่วงคลื่น ได้แก่ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared: NIR) ดังที่เห็นในภาพประกอบ 2.2 (ค) – (ง) ขณะที่ภาพ PAN เป็นภาพ ช่วงคลื่นเดี่ยวที่ครอบคลุมตั้งแต่ช่วงคลื่นที่สามารถมองเห็นได้และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ดังที่เห็นในภาพประกอบที่ 2.1 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความละเอียดเชิงพื้นที่ของภาพ PAN ที่มีความละเอียดในแนวตั้ง 2 m และภาพ MS ที่มีความละเอียดในแนวตั้ง 15 m ทำให้มีความแตกต่างกันในอัตราส่วน 1:7.5 ดังภาพประกอบที่ 2.2 (ก) – (ข) เมื่อมีการขยายภาพ MS ให้มีขนาดเท่ากับภาพ PAN จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสีและสารสนเทศเชิงพื้นที่

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของกล้องบันทึกภาพ

คุณสมบัติ	กล้องบันทึกภาพขาวดำ	กล้องบันทึกภาพสีหลายช่วงคลื่น
จำนวนช่วงคลื่น	1	4
ช่วงคลื่น (spectral resolution)	PAN: 450-900 nm	B1 (Blue) : 450-520 nm B2 (Green) : 530-600 nm B3 (Red) : 620-690 nm B4 (NIR) : 770-900 nm
ความละเอียดในแนวตั้ง (spatial resolution)	2 m	15 m
ความกว้างภาพถ่ายในแนวตั้ง	22 km	90 km
ความกว้างครอบคลุมในการถ่ายภาพ	ประมาณ 1000 km (±30)	ประมาณ 1100 km (±30)
ความละเอียดข้อมูล (radiometric resolution)	8 บิตต่อจุดภาพ	8 บิตต่อจุดภาพ



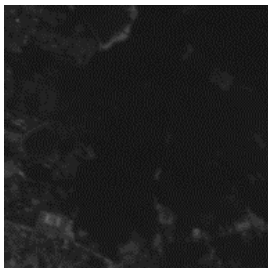
ภาพประกอบที่ 2.1 การตอบสนองของสเปกตรัมของดาวเทียมไทยโชต



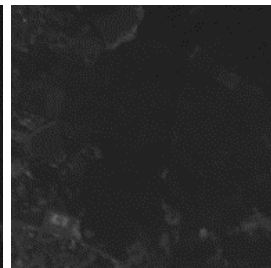
(ก) ภาพ PAN



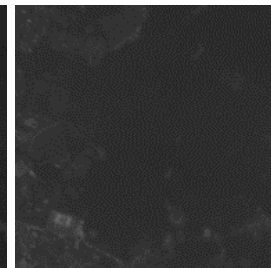
(ข) ภาพ MS แสดงสี RGB



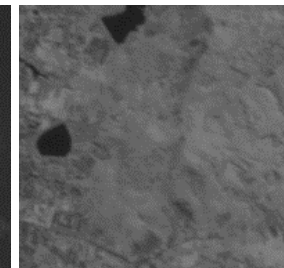
(ค) แบนด์สีแดง



(ง) แบนด์สีเขียว

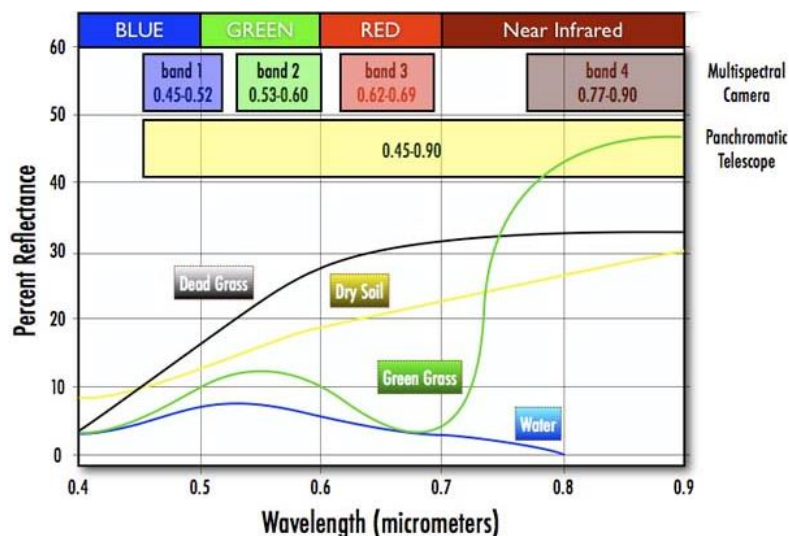


(จ) แบนด์สีน้ำเงิน



(ฉ) แบนด์ NIR

ภาพประกอบที่ 2.2 ภาพถ่ายจากดาวเทียมไทยโชต



ภาพประกอบที่ 2.3 การตอบสนองของสเปกตรัมแบบสัมพัทธ์ของดาวเทียมไทยโชต

ค่าของคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่ของภาพถ่ายดาวเทียมขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของพื้นที่นั้น ๆ เช่น บริเวณที่เป็นแหล่งน้ำ พื้นที่เพาะปลูก พื้นที่อาคาร เป็นต้น เนื่องจากวัตถุแต่ละชนิดมีการสะท้อนช่วงคลื่นที่แตกต่างกันตามที่แสดงในภาพประกอบที่ 2.3 ภาพมัลติสเปกตรัมจากดาวเทียมไทยโชตจึงเหมาะสำหรับการจำแนกโซนพืชพรรณเพราะมีการสะท้อนรังสีสูงในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

2.2 ภาพถ่ายดาวเทียม

2.2.1 ภาพแพนโครมาติก (Panchromatic)

เป็นภาพขาวดำที่มีความคมชัดสูง ซึ่งมีการไล่ระดับสีจากสีดำไปจนถึงสีขาว เรียกว่า ระดับสีเทา (Grey Scale) เหมาะสำหรับงานรังวัดและแปลภาพ

2.2.2 ภาพมัลติสเปกตรัม (Multispectral)

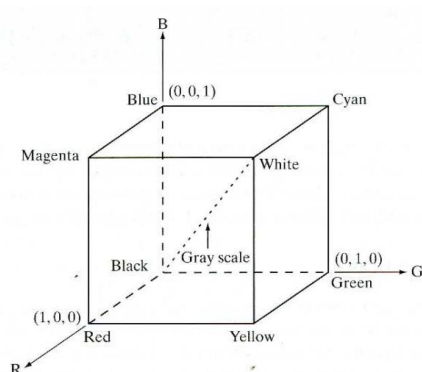
ภาพมัลติสเปกตรัม (Gonzalez and Woods, 2008) โดยทั่วไปจะมีข้อมูลนอกช่วงการมองเห็นของมนุษย์ อาจรวมถึงช่วงคลื่นอินฟราเรด อัลตราไวโอเล็ต เอ็กซเรย์ ข้อมูลเรดาร์ ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่สามารถแสดงภาพได้โดยการจับคู่แบนด์ที่แตกต่างกันไปยังองค์ประกอบของระบบสี RGB นอกจากภาพมัลติสเปกตรัมของดาวเทียมแล้ว ยังมีภาพมัลติสเปกตรัมในงานด้านอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น ภาพจากระบบโซนาร์ใต้น้ำ ภาพทางการแพทย์ เป็นต้น ข้อมูลภาพมัลติสเปกตรัมจะถูกเก็บในช่วงคลื่นต่อเนื่องด้วยความยาวคลื่นในช่วงแคบ ๆ โดยข้อมูลที่ได้จะแบ่งเป็นแถบสีหรือแบนด์ที่เรียกว่า สเปกตรัมแบนด์ (Spectral Bands) ซึ่งภาพสีจะประกอบด้วยสเปกตรัมของสามแบนด์ต่อหนึ่งจุดภาพ เหมาะสำหรับนำไปใช้งานด้านการเกษตร การป่าไม้ เป็นต้น

2.3 ระบบสี RGB และระบบสี IHS

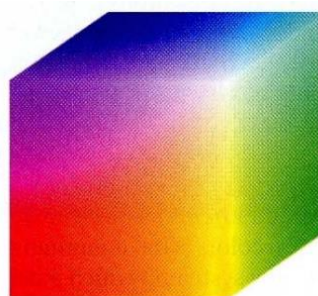
การประมวลผลภาพโดยทั่วไป เป็นการประมวลผลภาพที่เป็นค่าความเข้ม และมักไม่รวมถึงการประมวลผลภาพสี การเก็บภาพโดยทั่วไปฟิลเตอร์จะเป็นตัวแยกภาพสีแดง ภาพสีเขียว และภาพสีน้ำเงิน ซึ่งแต่ละภาพจะแสดงในรูปแบบค่าความเข้มเช่นเดียวกับภาพขาวดำ แม้ว่าระบบสี RGB (Red, Green, Blue Color System) จะใช้ในกล้องถ่ายภาพทั่วไปและจอแสดงผล แต่ในการรับรู้ทางการมองเห็นของมนุษย์สามารถอธิบายด้วยระบบสีอื่นที่สัมพันธ์กับการมองเห็นสีของมนุษย์โดยตรง ระบบสีหนึ่งที่ย่างและใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ ระบบสี IHS (Intensity-Hue-Saturation Color System)

2.3.1 ระบบสี RGB (RGB Color System)

ระบบสี RGB (Gonzalez and Woods, 2008) เป็นระบบสีที่ใช้ในการแสดงผลภาพ โดยมีสีปฐมภูมิ 3 สี คือ แดง เขียวและน้ำเงิน และมีสีทุติยภูมิ 3 สี คือ สีแดงม่วง (Magenta) สีฟ้าอมเขียว (Cyan) และสีเหลือง (Yellow) เมื่อนำระบบสี RGB มาแทนในระบบพิกัดฉาก แสดงด้วยลูกบาศก์หนึ่งหน่วย ดังภาพประกอบที่ 2.4 (ก) โดยสีปฐมภูมิจะอยู่ที่มุมบนแกน ส่วนสีทุติยภูมิจะอยู่ที่มุมระหว่างแกน จุดกำเนิดของลูกบาศก์ (0, 0, 0) แทนด้วย สีดำ และจุดที่อยู่ตรงข้ามกับจุดกำเนิด (1, 1, 1) แทนด้วย สีขาว และตำแหน่งที่มีการผสมสีแดง เขียว และน้ำเงิน ในปริมาณที่เท่ากันนั้น จะเรียกว่า ระดับสีเทา ซึ่งเป็นเส้นทแยงมุมที่ลากจากสีดำไปยังสีขาว ถ้านำลูกบาศก์ RGB มาเติมสีจะได้ภาพที่มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 2.4 (ข)



(ก)



(ข)

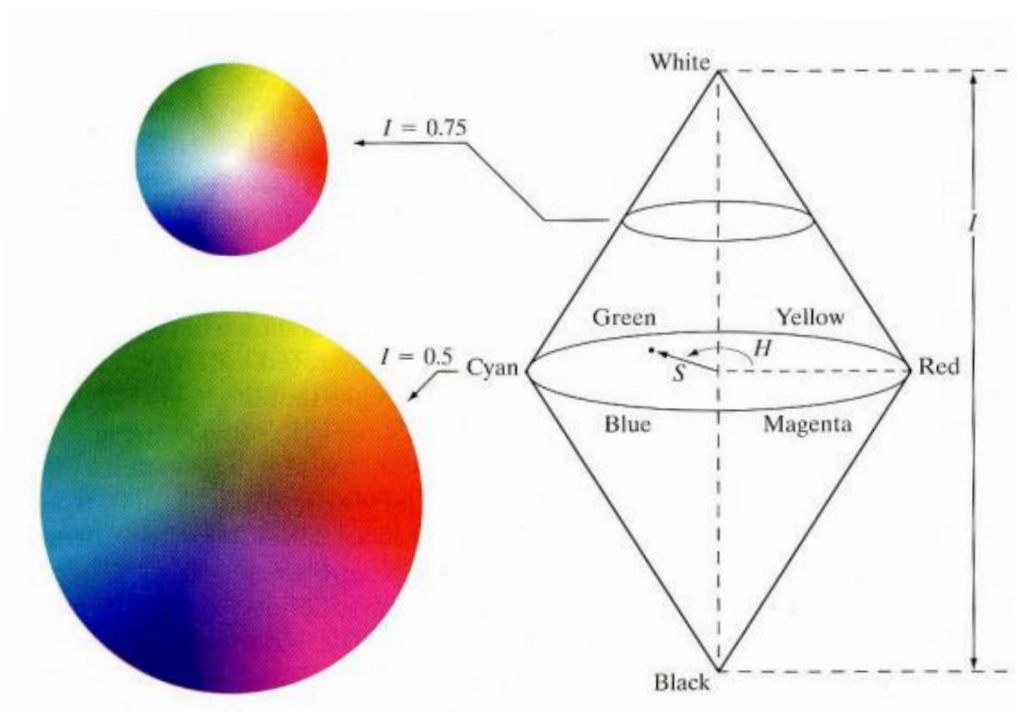
ภาพประกอบที่ 2.4 แบบจำลองระบบสี RGB (Gonzalez and Woods, 2008)

(ก) RGB Model (ข) RGB 24-bit color cube

2.3.2 ระบบสี IHS (Intensity-Hue-Saturation Color System)

ระบบสี IHS (Gonzalez and Woods, 2008) เป็นระบบสีที่มีองค์ประกอบของสีที่มองเห็น ประกอบไปด้วย เคนสี ความอิ่มตัวของสี และค่าความเข้ม ดังภาพประกอบที่ 2.5 และสามารถอธิบายค่าแต่ละค่าในระบบสี IHS ได้ดังนี้

- เคนสี (Hue: H) คือ มุมของวงกลม โดยที่ค่าเคนสีจะมีค่าระหว่าง 0-359 องศา ไล่ลำดับวนทวนเข็มนาฬิกา การเปลี่ยนแปลงของเคนเริ่มจากสีแดง (มีค่า $H = 0^\circ$) ไปยังสีเขียว ($H = 120^\circ$) และ จากสีเขียวไปยังสีน้ำเงิน ($H = 240^\circ$)
- ความอิ่มตัวของสี (Saturation: S) คือ ระยะทางจากตำแหน่งของสีโดยวัดจากแกนกลางของกรวย ถ้าค่าความอิ่มตัวของสีมีค่ามากขึ้น จะทำให้สีที่ได้ใกล้เคียงกับเคนสีที่แท้จริงมากขึ้น และค่าความความอิ่มตัวของสีมีค่าไม่เกิน 1
- ความเข้มของสี (Intensity: I) คือ ค่าที่ระบุว่า สีนั้นมีความเข้มหรือความระดับความสว่างมากเท่าใด ถ้าค่าความเข้มของสีมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้สีที่ได้มีส่วนประกอบของสีขาวมากขึ้น ในทางกลับกันถ้ามีค่าน้อยลงก็จะทำให้สีที่ได้มีส่วนประกอบของสีดำมากขึ้นเช่นกัน



ภาพประกอบที่ 2.5 แบบจำลองระบบสี IHS (Gonzalez and Woods, 2008)

2.3.3 การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็น IHS โดยใช้สมการเชิงเส้น

การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็น IHS โดยใช้สมการเชิงเส้น สามารถทำได้ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} I \\ H \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & 2\sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

เมื่อ R , G , และ B แทนค่าความเข้มของแบนด์สีแดง เขียว และน้ำเงิน โดยลำดับ ส่วน I , H , และ S แทนค่าความเข้ม เฉดสี และความอิ่มสี โดยลำดับ

2.3.4 การแปลงจากระบบสี IHS มาเป็น RGB โดยใช้สมการเชิงเส้น

การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็น IHS โดยใช้สมการเชิงเส้น สามารถทำได้ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ H \\ S \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

จะเห็นว่าเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของสมการที่ (2-2) เป็นส่วนกลับของสมการที่ (2-1)

2.3.5 การแปลงจากระบบสี RGB มาเป็น IHS โดยใช้สมการไม่เชิงเส้น

การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี IHS โดยใช้สมการไม่เชิงเส้น (Gonzalez and Woods, 2010) มีขั้นตอนดังนี้
คำนวณค่าเฉดสีตามสมการ

$$H = \begin{cases} \theta & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{if } B > G \end{cases} \quad (2-3)$$

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

ค่าความอิ่มตัวของสี กำหนดดังสมการที่ (2-4)

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (2-4)$$

ค่าความเข้มของสีคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (2-5)$$

2.3.6 การแปลงจากระบบสี IHS มาเป็น RGB โดยใช้สมการไม่เชิงเส้น

ในการแปลงจากระบบสี IHS เป็นระบบสี RGB โดยใช้สมการไม่เชิงเส้น (Gonzalez and Woods, 2008) จะต้องหาค่า RGB ที่สอดคล้องกันในช่วงค่าที่เหมือนกัน โดยสมการการแปลงจะขึ้นอยู่กับค่าเฉดสีว่าอยู่ในส่วนใดจาก 3 ส่วนที่แบ่งออกเป็น 120° เท่ากัน

RG sector ($0^\circ \leq H < 120^\circ$)

ถ้าค่าเฉดสีมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0° และน้อยกว่า 120° ค่า RGB จะถูกกำหนดด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} B &= I(1-S) \\ R &= I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\ G &= 3I - (R+B) \end{aligned} \quad (2-6)$$

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

ถ้าค่าเฉดสีมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 120° และน้อยกว่า 240° จะต้องลบค่าเฉดสีด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ตามสมการต่อไปนี้

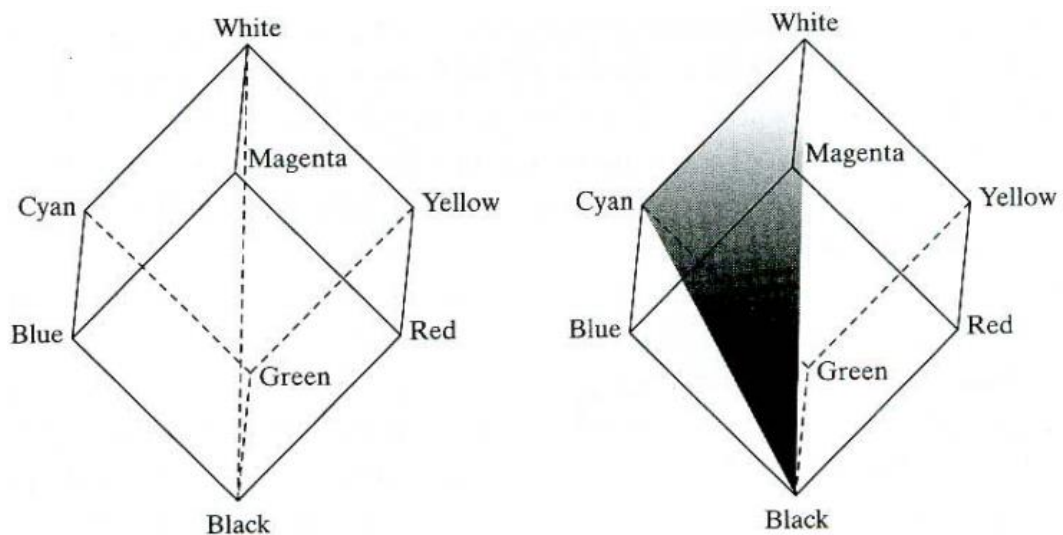
$$\begin{aligned} H &= H - 120^\circ \\ R &= I(1-S) \\ G &= I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\ B &= 3I - (R+G) \end{aligned} \quad (2-7)$$

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

ถ้าค่าเฉดสีมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 240° และน้อยกว่า 360° จะต้องลบค่าเฉดสีด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการที่ (2-8)

$$\begin{aligned} H &= H - 240^\circ \\ G &= I(1 - S) \\ B &= I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\ R &= 3I - (G + B) \end{aligned} \quad (2-8)$$

จากการได้ศึกษาขั้นตอนการแปลงจากระบบสี RGB ไปเป็นระบบสี IHS ตามสมการที่ (2-3) - (2-5) และการแปลงจากระบบสี IHS ให้กลับมาอยู่ในระบบสี RGB ตามสมการที่ (2-6) - (2-8) ซึ่งเป็นการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น โดยการย้ายแกนค่าความเข้มของระบบ RGB ให้อยู่ในแกนตั้ง ดังภาพประกอบที่ 2.6 รูปสามเหลี่ยมมุมฉากจาก Black-White-Cyan จะมีค่าเฉดสีเป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากองค์ประกอบของสีขาวและสีดำไม่มีผลต่อค่าเฉดสี ขณะที่ค่าความอิ่มตัวและค่าความเข้มของสีแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน

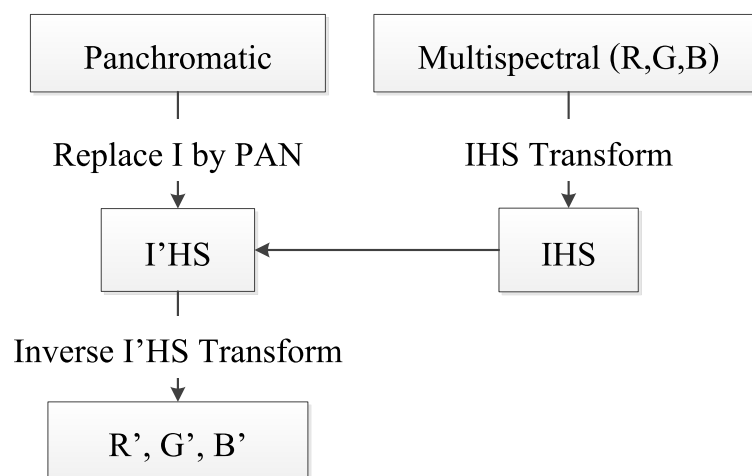


ภาพประกอบที่ 2.6 แนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างระบบสี RGB และระบบสี IHS

(Gonzalez and Woods, 2008)

2.4 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม (Image Fusion or Pan-sharpening)

การปรับความคมชัดด้วยภาพแพน (Pan-sharpening) เป็นกระบวนการหลอมรวมระหว่างภาพแพนโครมาติกกับภาพมัลติสเปกตรัม ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ข้อมูลให้มีความเหมาะสมต่อการตรวจสอบด้วยสายตาหรือการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ (Thomas *et al.*, 2008) โดยขั้นตอนวิธีที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง คือ การแปลง Intensity-Hue-Saturation (IHS) (Tu *et al.*, 2004) มีขั้นตอนวิธีดังภาพประกอบที่ 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 การหลอมรวมรูปภาพด้วยวิธี IHS

การหลอมรวมแบบ IHS ที่ใช้การแปลงเชิงเส้น มีขั้นตอนดังนี้

1. ขยายภาพมัลติสเปกตรัมให้มีขนาดเท่ากับภาพแพนโครมาติกแล้วแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี IHS

$$\begin{bmatrix} I \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{\sqrt{2}}{6} & -\frac{\sqrt{2}}{6} & -\frac{2\sqrt{2}}{6} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

โดยที่ R, G, B แทนค่าที่สัมพันธ์กันของภาพมัลติสเปกตรัมที่ขยายให้มีขนาดเท่ากับภาพแพนโครมาติก I แทนค่าความเข้มของภาพมัลติสเปกตรัม ส่วน $v1$ และ $v2$ แทนโครมาติก

2. แทนค่าความเข้ม I ด้วยค่าความเข้มของภาพแพนโครมาติก (PAN)
3. แปลงจากระบบสี IHS ให้กลับมาอยู่ในระบบสี RGB

จากขั้นตอนที่สองและสามสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (2-10) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PAN \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

โดยที่ R', G', B' แทนภาพมัลติสเปกตรัมที่หลอมรวมแล้ว และค่าเฉดสี (H) และค่าความอิ่มตัวของสี (S) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{v2}{v1}\right) \quad \text{และ} \quad S = \sqrt{v1^2 + v2^2} \quad (2-11)$$

จากขั้นตอนวิธีข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการการแปลงเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I + (PAN - I) \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I + \delta \\ v1 \\ v2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

โดยที่ $\delta = PAN - I$ และ $I = (R + G + B) / 3$

จากสมการที่ (2-10) - (2-12) ตามหลักการแปลง IHS เมื่อมีการแทนค่าความเข้ม I ด้วยค่าความเข้มของภาพแพนโครมาติก จะส่งผลให้ค่า H และ S มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการหลอมรวมด้วย (Tu *et al.*, 2004) ซึ่งสามารถพิสูจน์ค่า θ จากสมการที่ (2-3) ด้วยค่า δ ที่ได้จากสมการที่ (2-12) ดังนี้

$$\theta' = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R+\delta) - (G+\delta)] + [(R+\delta) - (B+\delta)]}{\left[((R+\delta) - (G+\delta))^2 + ((R+\delta) - (B+\delta))((G+\delta) - (B+\delta)) \right]^{1/2}} \right\} = \theta \quad (2-13)$$

จากสมการที่ (2-13) พบว่า $\theta' = \theta$ แสดงว่า ค่า H ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ปัญหาการผิดเพี้ยนของสี จึงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่า S ที่มีผลจากความแตกต่างระหว่าง PAN และ I จากสมการที่ (2-4) และ (2-12) ได้

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] = \frac{I - \min(R, G, B)}{I} \quad (2-14)$$

จากสมการที่ (2-14) เมื่อแทนค่าด้วย δ จะได้ค่า S' ของภาพหลอมรวมดังสมการ

$$\begin{aligned} S' &= 1 - \frac{3}{(R+\delta) + (G+\delta) + (B+\delta)} [\min((R+\delta), (G+\delta), (B+\delta))] \\ &= \frac{I - \min((R+\delta), (G+\delta), (B+\delta))}{PAN} \end{aligned} \quad (2-15)$$

จากสมการที่ (2-14) และ (2-15) จะเห็นว่า ค่า $S' \neq S$ นั่นคือ มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวของสี ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta S &= S' - S \\ &= \frac{I - \min((R+\delta), (G+\delta), (B+\delta))}{PAN} - \frac{I - \min(R, G, B)}{I} \\ &= I - \min(R, G, B) \left(\frac{\delta}{PAN \times I} \right) \end{aligned} \quad (2-16)$$

จากสมการที่ (2-16) ค่า ΔS เป็นผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของสี และความสัมพันธ์ระหว่าง S' และ S เป็นดังสมการที่ (2-17)

$$\frac{S'}{S} = \frac{\frac{I - \min((R+\delta), (G+\delta), (B+\delta))}{PAN}}{\frac{I - \min(R, G, B)}{I}} = \frac{I}{PAN} = \frac{I}{I + \delta} \quad (2-17)$$

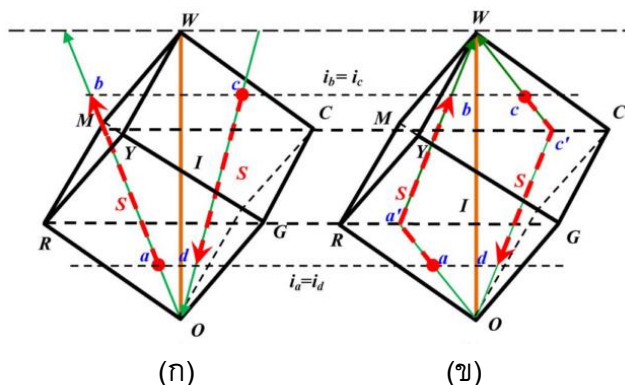
จากสมการที่ (2-17) จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวของสีสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสี โดยที่ δ เป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสีเมื่อค่า PAN และ I ต่างกันมาก

นอกจากปัญหาการผิดเพี้ยนของสีแล้ว ค่า PAN และ I ที่ต่างกันมาก ยังส่งผลให้เกิดปัญหา Out of Gamut อีกด้วย ซึ่งจะอธิบายต่อในหัวข้อถัดไป

2.5 Gamut Problem in Linear and Nonlinear IHS Color Spaces

การประมวลผลภาพสีในระบบสีอื่นนอกเหนือจากระบบสี RGB จะต้องแปลงกลับมาให้อยู่ในระบบสี RGB เพื่อแสดงผล หลังจากการแปลงกลับมาแล้ว ถ้าสีของจุดหนึ่งจุดใดตกอยู่นอกลูกบาศก์สี เราจะเรียกปัญหาที่เกิดขึ้นว่า ปัญหา Out of Gamut ซึ่งตัวดำเนินการทั้งการปรับขนาด (Scaling) และการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting) จะก่อให้เกิดปัญหา Out of Gamut วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการตัดส่วนเกินออก (Clipping) จะทำให้ภาพเสียความคมชัดและเกิดการผิดเพี้ยนของสี

การแก้ปัญหามา Out of Gamut โดยการหลีกเลี่ยงการตัดส่วนเกินออกสามารถทำได้ โดยเปลี่ยนจากระบบสี IHS มาใช้ระบบสี Improved Nonlinear Intensity-Hue-Saturation (INIHS) (Chien and Tsai, 2014) INIHS เป็นระบบสีที่แก้ปัญหามา Out of Gamut ด้วยการปรับส่วนที่เกินให้กลับเข้ามาอยู่ในลูกบาศก์สี ดังภาพประกอบที่ 2.8 โดยมีแนวคิดในการแบ่งลูกบาศก์สี RGB ออกเป็นสองส่วน แล้วทำการเทียบกับระบบสี IHS ทีละส่วนจนได้เป็นระบบสี INIHS ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.9

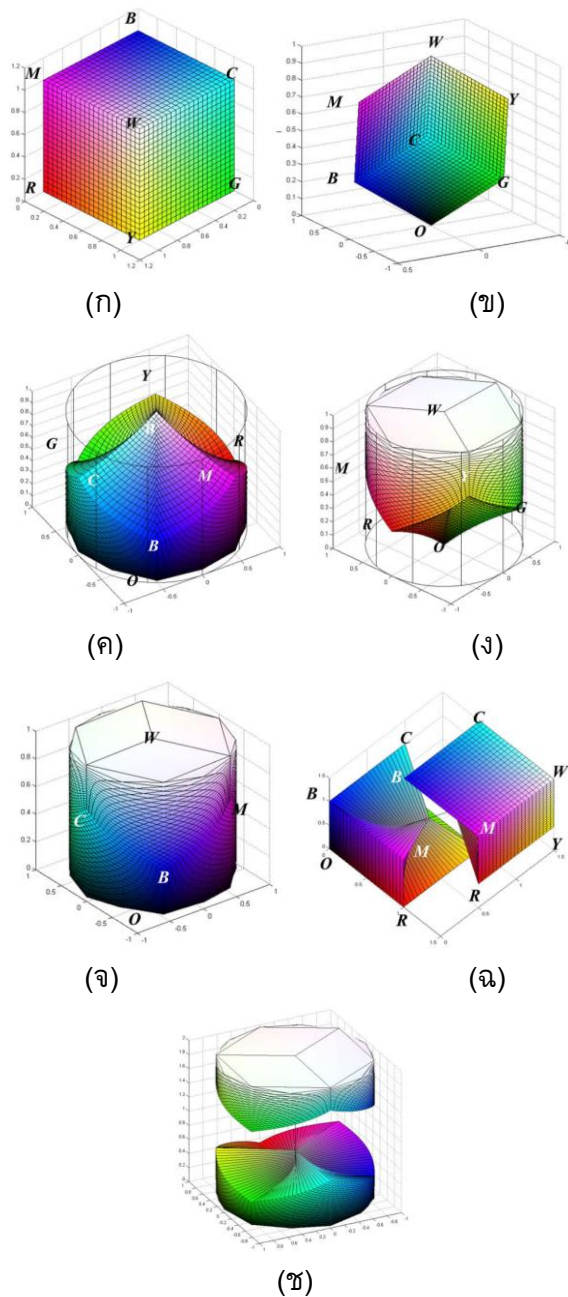


ภาพประกอบที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงความอิ่มตัวของสีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสี

(ก) การเปลี่ยนแปลงความอิ่มตัวของสีในระบบสี IHS

(ข) การเปลี่ยนแปลงความอิ่มตัวของสีในระบบสี INIHS

(Chien and Tsai, 2014)



ภาพประกอบที่ 2.9 แบบจำลองระบบสี RGB IHS และ iNIHS

(ก) ลูกบาศก์สี RGB (ข) แบบจำลอง IHS แบบเชิงเส้นบนพื้นฐานสี RGB

(ค) แบบจำลอง IHS แบบไม่เชิงเส้นบนพื้นฐานสี RGB

(ง) แบบจำลอง IHS แบบไม่เชิงเส้นบนพื้นฐานสี CMY

(จ) แบบจำลอง iNIHS จากการผสม (ค) และ (ง) ไว้ด้วยกัน

(ฉ) ลูกบาศก์สี RGB แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

(ช) ลูกบาศก์สี RGB ในแบบจำลอง iNIHS

(Chien and Tsai, 2014)

2.6 Improved Nonlinear Intensity-Hue-Saturation (iNIHS)

2.6.1 การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iNIHS

การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iNIHS สามารถทำได้โดย

$$\begin{aligned}
 \theta &= \frac{(2R-G-B)/2}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}}, I = \frac{R+G+B}{3} \\
 \text{if } B \leq G, & \text{ then } H = \cos^{-1}(\theta); \text{ else } H = 2\pi - \cos^{-1}(\theta) \\
 \text{if } i \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{\text{mod}120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ}, & \\
 \text{then } S &= 1 - \frac{3 \times \min(R, G, B)}{R+G+B} \text{ (conventional);} \\
 \text{else } S &= 1 - \frac{3(1 - \max(R, G, B))}{3 - (R+G+B)} \text{ (improved).}
 \end{aligned} \tag{2-18}$$

2.6.2 การแปลงจากระบบสี iNIHS เป็นระบบสี RGB สำหรับจุดสีในเจดสีครึ่งล่างของระบบสี iNIHS

การแปลงจากระบบสี iNIHS เป็นระบบสี RGB สามารถทำได้โดยวิธีการแปลงต่อไปนี้

RG sector ($0^\circ \leq H < 120^\circ$ and $i \leq 2/3 - |H - 60^\circ|/180^\circ$)

ถ้าค่าเจดสีอยู่ในส่วนนี้ จะถูกกำหนดด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 B &= I(1-S) \\
 R &= I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\
 G &= 3I - (R+B)
 \end{aligned} \tag{2-19}$$

GB sector ($120^\circ \leq H < 240^\circ$ and $i \leq 2/3 - |H - 180^\circ|/180^\circ$)

ถ้าค่าเจดสีอยู่ในส่วนนี้ จะต้องลบค่าเจดสีด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ตามสมการที่ (2-20)

$$\begin{aligned}
H &= H - 120^\circ \\
R &= I(1 - S) \\
G &= I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\
B &= 3I - (R + G)
\end{aligned} \tag{2-20}$$

BR sector ($240^\circ \leq H < 360^\circ$ and $i \leq 2/3 - |H - 300^\circ|/180^\circ$)

ถ้าค่าเฉดสีอยู่ในส่วนนี้ จะต้องลบค่าเฉดสีด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการ

$$\begin{aligned}
H &= H - 240^\circ \\
G &= I(1 - S) \\
B &= I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\
R &= 3I - (G + B)
\end{aligned} \tag{2-21}$$

2.6.3 การแปลงจากระบบสี iNIHS เป็นระบบสี RGB สำหรับจุดสีในเฉดสี ครึ่งบนของระบบสี iNIHS

การแปลงจากระบบสี iNIHS เป็นระบบสี RGB สามารถทำได้โดยวิธีการแปลง
ดังนี้

YC sector ($60^\circ \leq H < 180^\circ$ and $i > 1/3 + |H - 120^\circ|/180^\circ$)

ถ้าค่าเฉดสีอยู่ในส่วนนี้ จะต้องลบค่าเฉดสีด้วย 240° ก่อนจะหาค่า RGB ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
H &= H - 240^\circ \\
G &= I(1 - S) + S \\
B &= 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\
R &= 3I - (G + B)
\end{aligned} \tag{2-22}$$

CM sector ($180^\circ \leq H < 300^\circ$ and $i > 1/3 + |H - 240^\circ|/180^\circ$)

ถ้าค่าเฉดสีอยู่ในส่วนนี้ จะหาค่า RGB ตามสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 B &= I(1-S) + S \\
 R &= 1 - (1-I) \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\
 G &= 3I - (B+R)
 \end{aligned} \tag{2-23}$$

MY sector ($-60^\circ < H \leq 0^\circ$ and $i > 1/3 + (360^\circ - H)/180^\circ$ or $0^\circ < H \leq 60^\circ$ and $i > 1/3 + (H/180^\circ)$)

ถ้าค่าเฉดสีอยู่ในส่วนนี้ จะต้องลบค่าเฉดสีด้วย 120° ก่อนจะหาค่า RGB ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 H &= H - 120^\circ \\
 R &= I(1-S) + S \\
 G &= 1 - (1-I) \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\
 B &= 3I - (R+G)
 \end{aligned} \tag{2-24}$$

2.7 Improved Hue-Lightness-Saturation (iHSL)

Improved Hue-Lightness-Saturation (iHSL) (Hanbury and Serra, 2003) เป็นระบบสีที่แยกส่วนระหว่างระนาบของสีและค่าความเข้มของแสงออกจากกันอย่างชัดเจน ออกแบบภายใต้เงื่อนไขพื้นฐาน 3 ข้อ คือ 1. จุดสองจุดที่อยู่บนระนาบสีเดียวกันจะมีตัวแปรค่าสีเหมือนกัน 2. ตัวแปรความเข้มแสงสัมพันธ์กับเวกเตอร์สี 3. ระบบสีทุกระบบจะต้องแปลงไปยังระบบสี RGB แล้วแปลงกลับมาได้ จากเงื่อนไขข้อ 1 และ 2 ระบบสี iHSL จึงแยกส่วนที่เป็นสีและความเข้มแสงออกจากกันดังสมการที่ (2-25) – (2-33)

2.7.1 การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iHSL

การแปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iHSL ขั้นตอนแรกคำนวณค่าความสว่าง (Lightness: L) และคู่อันดับตำแหน่งค่าสี

$$\begin{bmatrix} L \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2125 & 0.7154 & 0.0721 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{2-25}$$

จากสมการที่ (25) นำค่า C_1 และ C_2 มาคำนวณหาค่า C จะได้ค่า C มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (2-26)$$

และค่าเจดสีมีค่าอยู่ในช่วง $[0^\circ, 360^\circ]$ โดยคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } C = 0 \\ \arccos\left(\frac{C_1}{C}\right) & \text{if } C \neq 0 \text{ and } C_2 \leq 0 \\ 360^\circ - \arccos\left(\frac{C_1}{C}\right) & \text{if } C \neq 0 \text{ and } C > 0 \end{cases} \quad (2-27)$$

ค่าความอิ่มตัวของสีมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$

$$S = \frac{2C \sin(120^\circ - H^*)}{\sqrt{3}} \quad (2-28)$$

โดยที่

$$H^* = H - k \times 60^\circ \quad (2-29)$$

เมื่อ $k \in \{0,1,2,3,4,5\}$ ดังนั้น $0^\circ \leq H^* \leq 60^\circ$

2.7.2 การแปลงจากระบบสี iHSL เป็นระบบสี RGB

การแปลงจากระบบสี iHSL เป็นระบบสี RGB

$$C = \frac{\sqrt{3}S}{2 \sin(120^\circ - H^*)} \quad (2-30)$$

$$C_1 = C \cos(H) \quad (2-31)$$

$$C_2 = -C \sin(H) \quad (2-32)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.7875 & 0.3714 \\ 1.0000 & -0.2125 & -0.2059 \\ 1.0000 & -0.2125 & 0.9488 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

2.8 การประเมินคุณภาพ (Quality assessment)

การประเมินคุณภาพของการหลอมรวมรูปภาพสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท (Li *et al.*, 2010) คือ การประเมินคุณภาพทางตรง จะประเมินจากภาพหลอมรวมเทียบกับภาพมัลติสเปกตรัมต้นฉบับ ซึ่งใช้ในการวัดคุณภาพของวิธีการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม และการวัดคุณภาพทางอ้อมเป็นการประเมินคุณภาพสิ่งที่ได้จากการแยกวัตถุออกจากภาพหลอมรวม ซึ่งใช้ในการวัดคุณภาพขั้นตอนวิธีการจำแนกวัตถุในภาพ

การประเมินคุณภาพทางตรงสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การประเมินคุณภาพด้วยสายตา (Qualitative Quality) ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อจำกัดของการมองเห็นของมนุษย์ และการประเมินคุณภาพด้วยดัชนีทางสถิติ (Quantitative)

ในการวัดคุณภาพของภาพหลอมรวม ดัชนีสำหรับชี้วัดคุณภาพสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท คือ

- Different-based สำหรับการวัดคุณภาพเชิงสเปกเทรล โดยประเมินความแตกต่างระหว่างภาพหลอมรวมและภาพ MS ต้นฉบับ ดัชนีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ เช่น Spectral angle mapper (SAM) (Alparone *et al.*, 2007) Root mean square error (RMSE) (Karathanassi *et al.*, 2007) Erreur Relative Globale Adimensionnelle De Synthèse (ERGAS) (Alparone *et al.*, 2004) เป็นต้น
- Noise-based สำหรับประเมินสัญญาณรบกวนของภาพหลอมรวมโดยเทียบกับภาพ MS ต้นฉบับ ดัชนีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ เช่น Signal-to-noise ratio (SNR) (Damera-Venkata *et al.*, 2000) Peak signal-to-noise ratio (PSNR) (Damera-Venkata *et al.*, 2000) เป็นต้น
- Similarity-based สำหรับการวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัม โดยประเมินความเหมือนกันของโครงสร้างหรือข้อมูลที่ใช้ร่วมกัน ดัชนีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ เช่น Structure similarity index metric (SSIM) (Wang *et al.*, 2004) Correlation coefficient (CC) (Yang *et al.*, 2007) Quaternion theory-based quality index (Q4) (Alparone *et al.*, 2004) เป็นต้น
- Information and clarity-based สำหรับประเมินข้อมูลหรือความคมชัดของภาพหลอมรวม ดัชนีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ เช่น Standard deviation (SD) (Chen and Blum, 2005) Entropy (Vijayaraj *et al.*, 2004, Chen and Blum, 2005, Karathanassi *et al.*, 2007) เป็นต้น
- Overall-based สำหรับประเมินคุณภาพในทุกด้านของภาพหลอมรวมโดยเปรียบเทียบกับภาพ PAN และภาพ MS ต้นฉบับ ดัชนีที่อยู่ในกลุ่มนี้ คือ Objective image fusion performance measure (Q_{AB}^f) (Xydeas and Petrovic, 2000)

จากทั้ง 5 ประเภท ในงานวิจัยนี้ประเมินคุณภาพเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัม ซึ่งครอบคลุมดัชนี 2 ประเภท คือ Different-based และ Similarity-based โดยเลือกดัชนีที่นิยมใช้ในการประเมินคุณภาพ 4 ดัชนี ด้วยกัน คือ RMSE, ERGAS ในกลุ่ม Different-based และ CC, Q ในกลุ่ม Similarity-based

2.8.1 ค่ารากของความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE)

ค่ารากของความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยกำลังสอง ระหว่างภาพมัลติสเปกตรัมต้นฉบับ (B) กับภาพมัลติสเปกตรัมที่ได้จากการหลอมรวม (F) สามารถใช้วัดความถูกต้องของสเปกตรัม โดยการหาค่าเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปต่อจุดภาพที่เกิดจากการหลอมรวม ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$RMSE_k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sqrt{(B_k(i, j) - F_k(i, j))^2}}{N^2} \quad (2-34)$$

โดยที่ k แทนแบนด์ของข้อมูล โดย $k = 1, 2, 3, 4$

2.8.2 ค่าความผิดพลาดทั้งหมดจากการสังเคราะห์ (Erreur Relative Globale Adimensionnelle De Synthèse: ERGAS)

ดัชนีวัดความผิดพลาดจากการหลอมรวมข้อมูลทุกแบนด์เรียกว่า ดัชนี ERGAS ซึ่งเป็นชื่อในภาษาฝรั่งเศสที่มีความหมายว่า ค่าความผิดพลาดแบบไม่มีหน่วยเชิงสัมพัทธ์ทั้งหมดจากการสังเคราะห์ ค่า ERGAS ได้จากการคำนวณค่ารากของความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยกำลังสอง หรือค่า RMSE ที่แสดงไว้ในสมการที่ (34) ซึ่งได้กำหนดไว้ดังนี้

$$ERGAS = \frac{100h}{l} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{RMSE_k}{\mu_k} \right)^2} \quad (2-35)$$

เมื่อ $\frac{h}{l}$ เป็นอัตราส่วนความละเอียดเชิงพื้นที่ระหว่างภาพแพนโครมาติกและภาพมัลติสเปกตรัม ซึ่งสำหรับภาพดาวเทียมธีออส ส่วน $\frac{h}{l} = \frac{2}{15}$ เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพแบนด์ที่ k และ K แทนจำนวนแบนด์ของภาพมัลติสเปกตรัม ค่า ERGAS ที่มากกว่า 3 แสดงว่า วิธีการหลอมรวม

นั้น ๆ มีคุณภาพต่ำ ส่วนวิธีการหลอมรวมภาพที่ทำให้ค่า ERGAS ต่ำกว่า 3 แสดงว่า วิธีการหลอมรวมนั้น ๆ มีคุณภาพ

2.8.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: CC)

การวัดสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson จะแสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสองตัวแปรที่มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ คือ ถ้าข้อมูลแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงค่าที่ได้ คือ -1 แต่ถ้าค่าระดับความสัมพันธ์เคลื่อนเข้าสู่ 1 แสดงว่า ระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลภาพ A กับภาพ B โดยทั้งสองภาพนี้มีขนาดเท่ากัน คือ $N \times N$ จุดภาพ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho_{A,B} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (A_{i,j} - \bar{A})(B_{i,j} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (A_{i,j} - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (B_{i,j} - \bar{B})^2}} \quad (2-36)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของแต่ละคู่ สำหรับแบนด์ R, G, B ที่ยังไม่หลอมรวมกับแบนด์ที่ได้จากการหลอมรวมแล้ว คือ R', G', B' จะสามารถคำนวณและนำมาเปรียบเทียบในแต่ละคู่ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_{R,G} &, \rho_{R',G'} \\ \rho_{G,B} &, \rho_{G',B'} \\ \rho_{B,R} &, \rho_{B',R'} \end{aligned} \quad (2-37)$$

ค่าจากการวัดสเปกตรัมด้วยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ของภาพที่หลอมรวมแล้วกับแบนด์ที่ยังไม่หลอมรวมจะต้องไม่แตกต่างกันมาก เช่น สหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์ R กับ G ที่ยังไม่หลอมรวมคือ $\rho_{R,G} = 0.94$ ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างชุดเดียวกันแต่หลอมรวมแล้วคือ $\rho_{R',G'}$ จะต้องมีค่าใกล้เคียง 0.94 ด้วยเช่นกัน จึงถือว่ามีคามผิดเพี้ยนเชิงสเปกตรัมต่ำ

2.8.4 ดัชนีวัดคุณภาพ (Quality Index: Q)

Q (Wang and Bovik, 2002) เป็นดัชนีที่วัดภาพเดิม x กับภาพผลลัพธ์ y ที่มีการกำหนดไว้ดังนี้

$$Q = \frac{4\sigma_{xy}\bar{xy}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} \quad (2-38)$$

เมื่อ σ_{xy} เป็นค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ระหว่างภาพเดิม x กับภาพผลลัพธ์ y ส่วน \bar{x} และ \bar{y} เป็นค่าเฉลี่ย ความแปรปรวนของ x กับ y ถูกแทนด้วย σ_x^2 และ σ_y^2 โดยลำดับ สมการที่ (39) สามารถจัดเทอมต่างๆ ใหม่โดยคูณด้วย $\frac{\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x\sigma_y}$ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} \frac{2\bar{xy}}{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} \frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (2-39)$$

จะเห็นว่าเทอมแรก คือ $\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง x กับ y เทอมที่สองคือ $\frac{2\bar{xy}}{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}$ เป็นส่วนที่ใช้วัดไบอัสของค่า \bar{y} เมื่อเทียบกับ \bar{x} จากอสมการของ

Cauchy-Schwartz ค่านี้จะน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง สำหรับเทอมที่สาม $\frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าคอนทราสต์ (Contrast) ระหว่าง x กับ y โดยเทอมนี้จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง

เมื่อพิจารณาช่วงของค่าดัชนีในแต่ละเทอมจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ส่วนที่เหลืออีกสองเทอมมีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ ดังนั้นดัชนี Q จะแปรค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ ค่าดัชนีวัดคุณภาพ $Q=1$ แสดงว่า วิธีการประมวลผลนั้นๆ ไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลเสียไป นั่นคือ $Q=1$ ก็ต่อเมื่อ $x=y$ คือ ค่าทุกจุดภาพระหว่าง x กับ y เท่ากันทั้งหมด ในกรณีที่ x ไม่เท่ากับ y ค่า Q ก็จะลดลง

การคำนวณดัชนี Q ในสมการที่ (40) ค่าสถิติทุกตัวจะถูกคำนวณในบล็อก $N \times N$ ที่มีขนาดที่เหมาะสม โดย Wang และ Bovik ได้กำหนดให้ $N=8$ (Wang and Bovik, 2002) แต่ในการหลอมรวมข้อมูลภาพมัลติสเปกตรัม Alparone และคณะ (Alparone et al., 2004) ได้แนะนำให้กำหนด $N > 16$ จากการทำการเปรียบเทียบขนาดของบล็อกที่มีผลต่อค่า Q จะเห็นว่าที่ $N=32$ ค่า Q จะต่ำที่สุด

บทที่ 3

การวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบขั้นตอนวิธีในการหาค่าความเข้มที่เหมาะสม สำหรับการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม โดยจะกล่าวถึงวิธีการประมาณค่าความเข้มที่เหมาะสม เพื่อลดความผิดเพี้ยนของภาพที่จะหลอมรวม

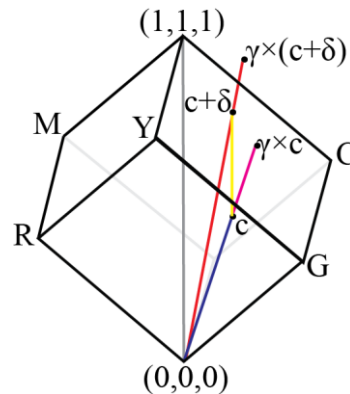
3.1 การหาค่าความเข้มที่เหมาะสม

จากบทที่ 2 ที่ได้กล่าวถึงการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งเป็นการปรับความคมชัดภาพมัลติสเปกตรัมด้วยภาพ PAN เป็นการดึงข้อมูลที่มีความละเอียดสูงจากภาพ PAN มาใส่ให้กับภาพ MS มีวิธีการที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับ คือ Intensity-Hue-Saturation (IHS) (Tu *et al.*, 2004) Brovey Transform (BT) (Pohl and Van Genderen, 1998) และ Smooth Filter-based Intensity Modulation (SFIM) (Liu, 2000) ซึ่งมีตัวดำเนินการทั้งการปรับสเกล (Scaling: γ) และการเลื่อนตำแหน่ง (Shifting: δ) ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังสมการที่ (3-1)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \gamma \times \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

โดยที่ $\gamma = I'/I$ และ $\delta = I' - I$ ซึ่งเป็นการหลอมรวมโดยการแทนค่าความเข้มด้วยภาพ PAN ($I' = PAN$)

การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมตามสมการที่ (3-1) ที่มีการใช้ตัวดำเนินการทั้งการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่งของสีในระหว่างการหลอมรวมทำให้เกิดปัญหา out-of-gamut เมื่อ γ และ δ มีค่ามาก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1



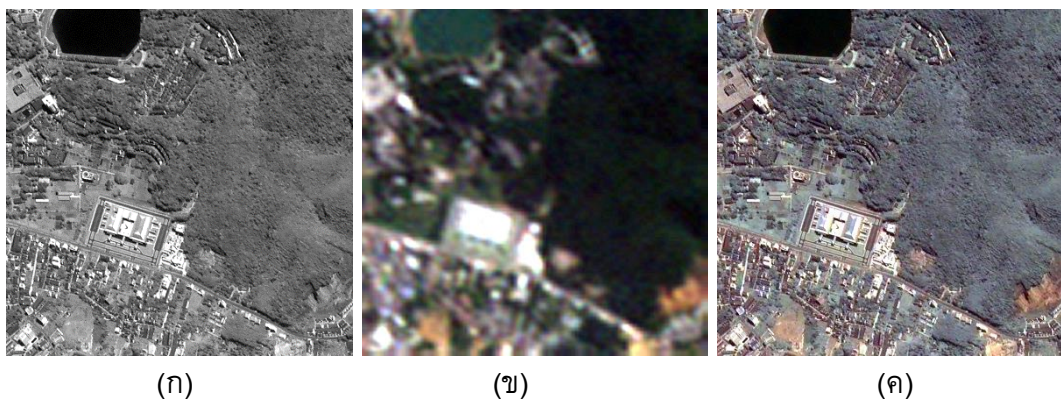
ภาพประกอบที่ 3.1 ผลของการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่งในวิธีกลุ่มพื้นฐาน IHS

จากวิธีการหลอมรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่กล่าวไปในเบื้องต้นสามารถที่จะนำมากำหนดเป็น 6 วิธีการดังนี้

1. IHS เป็นวิธีการที่ใช้ตัวดำเนินการเลื่อนตำแหน่งโดยกำหนดค่า $\gamma = 1$ และ $\delta = PAN - I$ จะได้แบบจำลอง IHS ดังสมการที่ (3-2)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + (PAN - I) \\ G + (PAN - I) \\ B + (PAN - I) \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

เมื่อทำการหลอมรวมภาพด้วยการแทนค่าความเข้มด้วยภาพ PAN คุณภาพของภาพผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับ ข้อมูลจากภาพ PAN ที่มีความแตกต่างกับค่าความเข้มของภาพ MS มากน้อยเพียงใด ถ้ามีความแตกต่างมากจะส่งผลให้เกิดปัญหา out-of-gamut ระหว่างการหลอมรวมทำให้ได้ภาพผลลัพธ์ที่มีความคมชัดต่ำดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.2



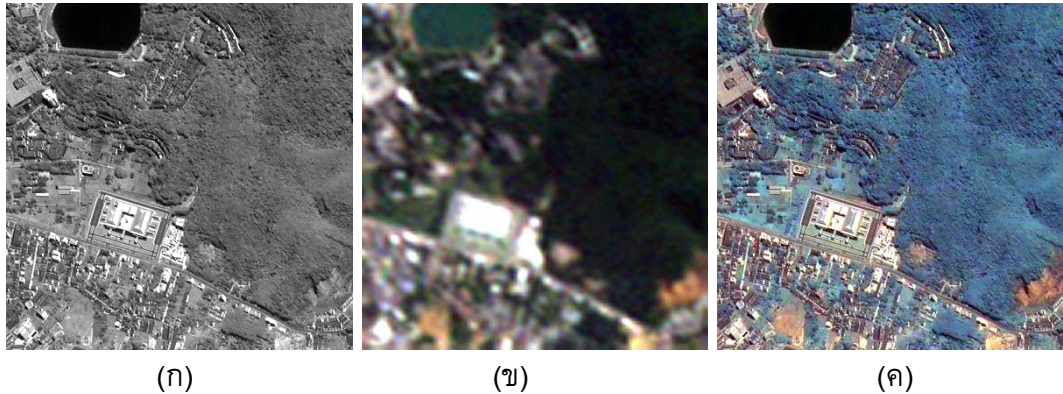
ภาพประกอบที่ 3.2 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี IHS

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม IHS

2. BT เป็นการหลอมรวมที่ใช้ตัวดำเนินการปรับสเกล โดยการกำหนดค่าสเกล $\gamma = PAN / I$ และ $\delta = 0$ ดังแสดงในสมการที่ (3-3)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{I} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

วิธีการนี้จะสังเคราะห์ภาพด้วยตัวดำเนินการปรับสเกล ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสี เนื่องจากค่าความเข้มตัวของสีเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนการหลอมรวม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.3



ภาพประกอบที่ 3.3 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี BT

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม BT

3. SFIM เป็นวิธีการที่ใช้ตัวดำเนินการปรับสเกล โดยกำหนดค่าของการปรับสเกลด้วยอัตราส่วนระหว่างภาพ PAN และภาพ PAN ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน $\gamma = PAN / PAN_L$ และ $\delta = 0$ ตามสมการที่ (3-4)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{PAN_L} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

ซึ่งตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในที่นี้ได้ทดลองด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ย (Mean Filter) โดยกำหนดขนาดของหน้าต่างต่างๆ กัน ดังภาพประกอบที่ 3.4 เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างเป็น 9x9 จะเห็นว่า ภาพมีลักษณะเป็นภาพซ้อนเนื่องจากขนาดหน้าต่างเล็กเกินไปจนทำให้ตัวกรอง

ความถี่ต่ำกรองค่าความถี่สูงปนออกมาด้วย จากการพิจารณาด้วยสายตาการกำหนดขนาดหน้าต่าง 25x25 ได้ภาพผลลัพธ์ที่ดีตั้งภาพประกอบที่ 3.5



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.4 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน

(ก) SFIM ขนาด 9x9 (ข) SFIM ขนาด 17x17 (ค) SFIM ขนาด 25x25

ตารางที่ 3.1 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน

SFIM	ws = 9	ws = 17	ws = 25
CC, MS	0.8787	0.8365	0.8256
CC, PAN	0.7856	0.8377	0.8512
RMSE, MS	0.0873	0.0402	0.0229
RMSE, PAN	0.0477	0.0513	0.0674
ERGAS	7.0172	3.2364	1.8477
QI	0.8224	0.8469	0.8540

จากตารางที่ 3.1 เมื่อพิจารณาค่าของดัชนีวัดคุณภาพพบว่า เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างแตกต่างกัน ถ้าขนาดหน้าต่างยังมีขนาดเล็กจะรักษาคุณภาพเชิงคลื่นได้ดีแต่ลดคุณภาพเชิงพื้นที่ลง และถ้ากำหนดหน้าต่างขนาดใหญ่ขึ้นก็จะให้ผลลัพธ์ในทางกลับกัน ดังนั้นเมื่อต้องกำหนดขนาดหน้าต่างที่เป็นตัวแทนสำหรับการหลอมรวม จึงได้เลือกขนาดหน้าต่าง 25x25 เนื่องจากให้ค่าดัชนีวัดคุณภาพของทั้งภาพด้วยค่า ERGAS และค่า Q เป็น 1.8477 และ 0.8540 ตามลำดับ โดยภาพผลลัพธ์ที่ดี จะให้ค่า ERGAS ต่ำกว่า 3 และค่า Q เข้าใกล้ 1



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.5 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี SFIM

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม SFIM

4. IHS-BT เป็นวิธีการที่ใช้ตัวดำเนินการทั้งการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง โดยกำหนด $\gamma = PAN / (I + k \cdot (PAN - I))$ และ $\delta = k \cdot (PAN - I)$ และมีค่า k เป็นตัวแปรเทรดออฟ (Trade-off) ตามสมการที่ (3-5)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{I + k \cdot (PAN - I)} \cdot \begin{bmatrix} R + k \cdot (PAN - I) \\ G + k \cdot (PAN - I) \\ B + k \cdot (PAN - I) \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

จากการทดลองโดยการปรับค่า k เมื่อพิจารณาด้วยสายตาพบว่า วิธีการนี้เกิดการผิดเพี้ยนของสีจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความอึดตัวของสีระหว่างการหลอมรวมเช่นเดียวกับวิธี BT ภาพหลอมรวมที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 3.6



(ก)

(ข)

(ค)

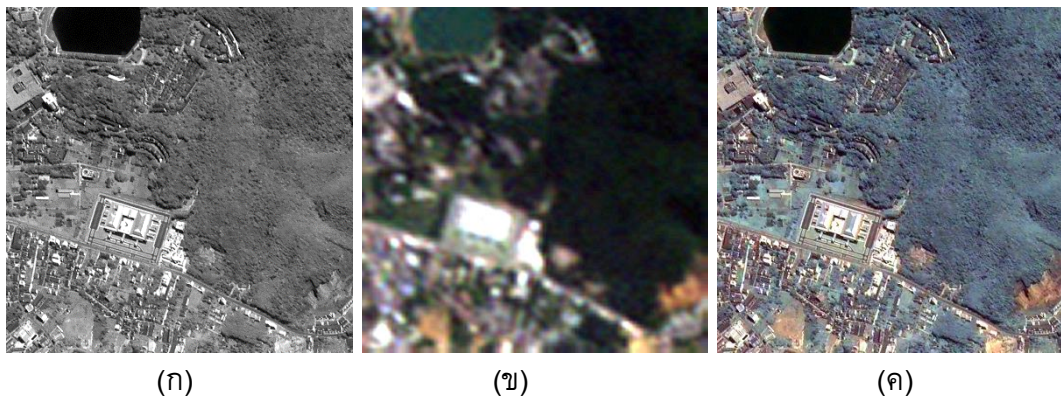
ภาพประกอบที่ 3.6 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT เมื่อกำหนดขนาดหน้าตาต่างกัน

(ก) IHS-BT, $k = 0.2$ (ข) IHS-BT, $k = 0.5$ (ค) IHS-BT, $k = 0.8$

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมดังตารางที่ 3.2 จะเห็นว่า ค่า ERGAS มีค่าเกิน 3.0 จึงสรุปได้ว่า ภาพหลอมรวมที่ได้จากวิธีการ IHS-BT ไม่มีคุณภาพดังแสดงการเปรียบเทียบในภาพประกอบที่ 3.7

ตารางที่ 3.2 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ IHS-BT เมื่อกำหนดค่า k แตกต่างกัน

IHS-BT	$k = 0.2$	$k = 0.5$	$k = 0.8$
CC, MS	0.5591	0.5652	0.5689
CC, PAN	0.9691	0.9812	0.9877
RMSE, MS	0.0837	0.0837	0.0837
RMSE, PAN	0.0337	0.0292	0.0259
ERGAS	6.7848	6.8918	6.9892
QI	0.7158	0.7144	0.7067



ภาพประกอบที่ 3.7 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT
(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม IHS-BT

5. BT-SFIM เป็นวิธีการที่ใช้ตัวดำเนินการทั้งการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง โดยกำหนด $\gamma = PAN / PAN_L$ และ $\delta = PAN_L - I$ ตามสมการที่ (6)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{PAN_L} \cdot \begin{bmatrix} R + (PAN_L - I) \\ G + (PAN_L - I) \\ B + (PAN_L - I) \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

ในการทดลองวิธีการนี้ได้กำหนดขนาดของตัวกรองแตกต่างกันได้ผลลัพธ์ดังภาพประกอบที่ 3.8 ซึ่งเกิดการผิดเพี้ยนของสีเช่นเดียวกับวิธี BT เมื่อเปรียบเทียบกับภาพต้นฉบับแสดงดัง

ภาพประกอบที่ 3.9 และพิจารณาค่าของดัชนีวัดคุณภาพในตารางที่ 3.3 พบว่า ค่า ERGAS มากกว่า 3 ดังนั้นภาพหลอมรวมไม่มีคุณภาพเช่นเดียวกับการประเมินด้วยสายตา



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.8 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี BT-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน

(ก) BT-SFIM ขนาด 9x9 (ข) BT-SFIM ขนาด 17x17 (ค) BT-SFIM ขนาด 25x25

ตารางที่ 3.3 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ BT-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน

BT-SFIM	ws = 9	w = 17	ws = 25
CC, MS	0.5645	0.5690	0.5705
CC, PAN	0.9706	0.9794	0.9831
RMSE, MS	0.0841	0.0838	0.0837
RMSE, PAN	0.0372	0.0300	0.0269
ERGAS	6.7699	6.8880	6.9633
QI	0.7149	0.7146	0.7080



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.9 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี BT-SFIM

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม BT-SFIM

6. IHS-BT-SFIM เป็นวิธีการที่ใช้ตัวดำเนินการทั้งการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง โดยกำหนด $\gamma = PAN / (I + k_1 \cdot (PAN_L - I))$ และ $\delta = k_2 \cdot (PAN_L - I)$ และมีค่า k_1 และ k_2 เป็นตัวแปรเทรคดอป ตามสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{I + k_1 \cdot (PAN_L - I)} \cdot \begin{bmatrix} R + k_2 \cdot (PAN_L - I) \\ G + k_2 \cdot (PAN_L - I) \\ B + k_2 \cdot (PAN_L - I) \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-7) มีการกำหนดตัวแปรเทรคดอปควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและความเข้มของสี 2 ตัวด้วยกัน คือ k_1 เป็นตัวแปรเทรคดอปของตัวดำเนินการปรับสเกล และ k_2 เป็นตัวแปรเทรคดอปของตัวดำเนินการเลื่อนตำแหน่ง โดยกำหนดให้ $k_1 = 1.0$ เนื่องจากภาพผลลัพธ์ของวิธีการ SFIM เกิดจากการกำหนดค่า $k_1 = 1.0$ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดี แล้วทำการทดลองต่อโดยการปรับ k_2 เป็น 0.1 0.2 และ 0.3 ตามลำดับ จะได้ภาพหลอมรวมแสดงดังภาพประกอบที่ 3.10 เมื่อพิจารณาควบคู่กับค่าดัชนีวัดคุณภาพในตารางที่ 3.4 พบว่า ในการกำหนดค่า $k_2 = 0.1$ ให้ภาพผลลัพธ์ที่รักษารายละเอียดเชิงคลื่นได้ดีกว่าค่าอื่น ๆ ดูได้จากค่า CC ที่เปรียบเทียบกับภาพ MS ต้นฉบับเป็น 0.8106 และการวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมทั้งภาพดูได้จากค่า ERGAS และ Q มีค่าเป็น 2.2813 และ 0.8490 ตามลำดับ จึงได้เลือกการตั้งค่า $k_1 = 1.0$ และ $k_2 = 0.1$ สำหรับวิธีการ IHS-BT-SFIM ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.11



(ก)

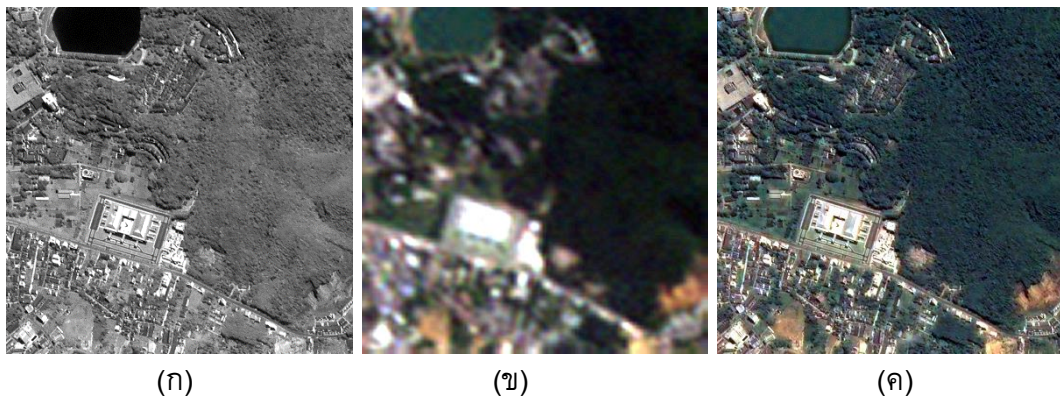
(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.10 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT-SFIM เมื่อกำหนด k_2 แตกต่างกัน
(ก) IHS-BT-SFIM $k_2 = 0.1$ (ข) IHS-BT-SFIM, $k_2 = 0.2$ (ค) IHS-BT-SFIM, $k_2 = 0.3$

ตารางที่ 3.4 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ IHS-BT-SFIM เมื่อกำหนดค่า k แตกต่างกัน

IHS-BT-SFIM	$k_1 = 1.0$		
	$k_2 = 0.1$	$k_2 = 0.2$	$k_2 = 0.3$
CC, MS	0.8106	0.7931	0.7729
CC, PAN	0.8743	0.8959	0.9156
RMSE, MS	0.0282	0.0338	0.0397
RMSE, PAN	0.0609	0.0546	0.0484
ERGAS	2.2813	2.7536	3.2484
QI	0.8490	0.8418	0.8324



ภาพประกอบที่ 3.11 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี IHS-BT-SFIM
(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม IHS-BT-SFIM

การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีการต่างๆ ข้างต้น ส่งผลให้ภาพผลลัพธ์เกิดปัญหา out-of-gamut และความผิดเพี้ยนของสี ซึ่งแต่ละวิธีมีการแก้ปัญหาต่างๆ กัน อย่างไรก็ตามวิธีการหลอมรวม IHS-BT ได้กำหนดตัวแปร k ซึ่งเป็นตัวแปรเทรตออฟควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าความอิ่มตัวและค่าความเข้มของสี เพื่อลดการผิดเพี้ยนของสี ขณะที่อีกวิธีการที่แก้ปัญหาได้น่าสนใจคือ BT-SFIM ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่มีรายละเอียดเชิงพื้นที่จากภาพ PAN มาหลอมรวม ในการทดลองทั้งหมดได้กำหนดให้วิธีการที่มีการนำตัวกรองความถี่ต่ำผ่านมาช่วยในการคัดเลือกข้อมูลใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยและกำหนดขนาดของหน้าต่างเท่ากันเป็นขนาด 25×25

3.2 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีการแปลง iNIHS

จากการศึกษาและหาวิธีในการหาค่าความเข้มที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาการผิดเพี้ยนของสี สำหรับการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมธีออส วิธีพื้นฐาน IHS พบว่า ปัญหาความผิดเพี้ยนของสีเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มตัวของสี ในระหว่างการหลอมรวม เนื่องจากการแปลงในระบบสี IHS ค่าความเข้มตัวของสีและค่าความเข้มมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ (2-13) - (2-17) จากนั้นยังพบระบบสีที่มีความน่าสนใจคือ ระบบสี iNIHS เนื่องจากเป็นระบบสีที่มีการแก้ปัญหา out-of-gamut โดยการดึงค่าสีที่ออกนอกช่วงให้กลับเข้ามาอยู่ในช่วง การหลอมรวมด้วยการแปลง iNIHS มีขั้นตอนดังนี้

1. ปรับขนาดของภาพมัลติสเปกตรัมให้มีขนาดเท่ากับภาพแพนโครมาติกด้วยวิธีการ Bicubic Interpolation
2. แปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iNIHS ตามสมการที่ (2-19) – (2-21)
3. แทนค่าความเข้มด้วยค่าความเข้มจากภาพ PAN
4. แปลงจากระบบสี iNIHS ให้กลับเข้ามาอยู่ในระบบสี RGB ตามสมการที่ (2-24) – (2-25)

ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 3.12 สังเกตว่าแม้จะเป็นระบบสีที่มีการแก้ปัญหา out-of-gamut แต่ยังคงเกิดปัญหาการผิดเพี้ยนของสี จึงได้ทดลองต่อเพื่อแก้ปัญหาค่าความเข้มที่เหมาะสม การประมาณค่าความเข้มที่เหมาะสมมีวิธีการที่น่าสนใจ คือ SFIM เป็นการหาอัตราส่วนของการปรับขนาดด้วยค่าความเข้มภาพ PAN และค่าของภาพ PAN ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จากการทดลองพบว่า การใช้ค่าปรับสเกลด้วยวิธี SFIM ได้ผลลัพธ์ที่ดีดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.13 และ 3.14 เนื่องจากสามารถรักษารายละเอียดเชิงคลื่นไว้ได้เมื่อมีการใส่รายละเอียดพื้นที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.12 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม iNIHS



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.13 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน
 (ก) iNIHS-SFIM ขนาด 9x9 (ข) iNIHS-SFIM ขนาด 17x17 (ค) iNIHS-SFIM ขนาด 25x25

จากภาพประกอบที่ 3.13 และค่าดัชนีวัดคุณภาพในตารางที่ 3.5 พบว่า เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างของตัวกรองความถี่ต่ำที่ขนาด 9x9 ค่าดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมทั้งภาพมีค่าที่ได้คุณภาพ แต่เมื่อตรวจสอบดูด้วยสายตาจะเห็นภาพมีลักษณะเป็นภาพซ้อนเนื่องจากตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้กรองค่าความถี่สูงออกมาด้วย ดังนั้นในการจะตัดสินใจว่าภาพหลอมรวมจะได้คุณภาพหรือไม่นั้นต้องอาศัยการประเมินคุณภาพด้วยสายตาควบคู่กับค่าดัชนีวัดคุณภาพ ทำให้วิธีการ iNIHS-SFIM ให้ภาพผลลัพธ์ที่มีคุณภาพเมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างเป็น 25x25 วัดค่า ERGAS และ Q ได้เป็น 1.4478 และ 0.8365 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ iNIHS และ iNIHS-SFIM

iNIHS	Substitution	WS = 9	WS = 17	WS = 25
CC, MS	0.5510	0.8784	0.8342	0.8246
CC, PAN	0.9494	0.7855	0.8299	0.8447
RMSE, MS	0.0224	0.0140	0.0156	0.0166
RMSE, PAN	0.0806	0.0829	0.0933	0.0958
ERGAS	1.8463	1.1585	1.3655	1.4478
QI	0.7740	0.9015	0.8465	0.8365



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.14 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS-SFIM

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม iNIHS-SFIM

3.3 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมวิธีการแปลง iHSL

เมื่อพิจารณาที่ระบบสี iHSL เป็นระบบสีที่ออกแบบภายใต้สมมติฐานที่ว่า สีและค่าความเข้มเป็นอิสระต่อกัน ดังที่แสดงการแปลงจากระบบสี RGB เป็น iHSL สมการที่ (2-25) – (2-29) จากจุดนี้เลือกที่จะใช้ iHSL เป็นระบบสีในการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมหรือส เพื่อลดปัญหาการผิดเพี้ยนของสี เมื่อได้ทำการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธีการแทนค่าความเข้มด้วยค่าของภาพ PAN โดยตรงจะได้ผลลัพธ์ดังภาพประกอบที่ 3.15 ยังคงเกิดความผิดเพี้ยนของสี และจากการวิเคราะห์การหลอมรวมที่ใช้ตัวดำเนินการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่งพบว่า ตัวดำเนินการทั้งสองทำให้เกิดการปัญหาการผิดเพี้ยนของสี จึงแก้ปัญหาโดยการคัดเลือกข้อมูลที่เหมาะสมไปหลอมรวมด้วยการหาอัตราส่วนข้อมูลระหว่างภาพ PAN และภาพ PAN ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านตามขั้นตอนวิธีการหลอมรวมรูปภาพ iHSL-SFIM ในภาพประกอบที่ 3.16



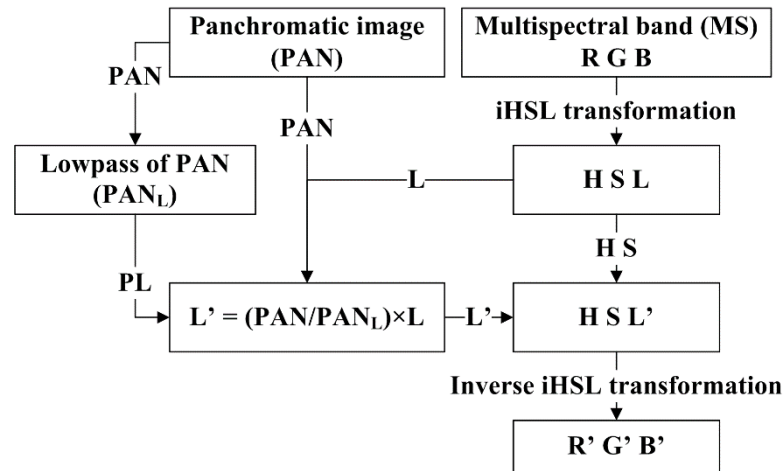
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.15 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iHSL

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม iHSL



ภาพประกอบที่ 3.16 ขั้นตอนวิธีการหลอมรวมรูปภาพ iHSL-SFIM

วิธีการหลอมรวม iHSL-SFIM มีขั้นตอนดังนี้

1. ขยายขนาดของภาพมัลติสเปกตรัมให้มีขนาดเท่ากับภาพแพนโครมาติกด้วยวิธี Bicubic Interpolation โดยที่พิกัดของภาพตรงกันแล้ว
2. แปลงจากระบบสี RGB เป็นระบบสี iHSL
3. ดึงข้อมูลเชิงพื้นที่จากภาพ PAN และคำนวณหาค่าของภาพ PAN_L ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้ตัวกรองค่าเฉลี่ยขนาด 25×25 จุดภาพ
4. แทนค่าความระดับความสว่าง L ด้วยค่า L' ดังสมการ

$$L' = (PAN / PAN_L) \times L \quad (3-8)$$

5. แปลงจากระบบสี iHSL ให้กลับมามีอยู่ในระบบสี RGB

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L' \\ L' \\ L' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7875 & 0.3714 \\ -0.2125 & -0.2059 \\ -0.2125 & 0.9488 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการนี้แสดงผลดังภาพประกอบที่ 3.17 และ 3.18 จากการหลอมรวมที่ได้คัดเลือกค่าความเข้มที่เหมาะสมจากการหาอัตราส่วนระหว่างภาพ PAN และค่าของภาพ PAN ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากเป็นตัวกรองเดียวกับที่ได้ทำการทดลองในวิธีการต่างๆ ข้างต้นพบว่า คุณภาพของหลอมรวมที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวกรองความถี่ต่ำ ถ้ากรองข้อมูลที่ได้ออกมาก็จะได้ภาพหลอมรวมที่มีคุณภาพ จากการทดลองเมื่อกำหนดขนาดของตัวกรองที่ 25×25 จะได้ผลลัพธ์ที่ดีตามค่าดัชนีวัดคุณภาพในตารางที่ 3.6



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.17 ภาพหลอมรวมด้วยวิธี iNIHS-SFIM เมื่อกำหนดขนาดหน้าต่างต่างกัน
(ก) iHSL-SFIM ขนาด 9x9 (ข) iHSL-SFIM ขนาด 17x17 (ค) iHSL-SFIM ขนาด 25x25

ตารางที่ 3.6 ผลของดัชนีวัดคุณภาพของวิธีการ iHSL และ iHSL-SFIM

iHSL	Substitution	WS = 9	WS = 17	WS = 25
CC, MS	0.5665	0.8906	0.8488	0.8368
CC, PAN	0.9890	0.7909	0.8413	0.8532
RMSE, MS	0.0222	0.0137	0.0156	0.0171
RMSE, PAN	0.0819	0.0830	0.0922	0.0960
ERGAS	1.9648	1.2361	1.3958	1.5066
QI	0.7403	0.8942	0.8391	0.8230



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 3.18 ภาพต้นฉบับและภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iHSL-SFIM
(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS (ค) ภาพผลลัพธ์จากการหลอมรวม iHSL-SFIM

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะนำเสนอผลทดลองตามวิธีการที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 และการประเมินคุณภาพของวิธีการหลอมรวมภาพ การวัดผลการทดลองสามารถทำได้สองส่วน คือ การตรวจสอบผลลัพธ์ด้วยสายตา และการใช้ดัชนีชี้วัดทางสถิติ

4.1 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

การแสดงผลการทดลองของวิธีการต่าง ๆ ที่นำเสนอ ได้นำข้อมูลภาพบางส่วน มาแสดง โดยภาพนี้ได้ปรับค่าความถูกต้องทางเรขาคณิตแล้ว บันทึกภาพถ่ายดาวเทียม ครอบคลุมพื้นที่บริเวณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และเขาคอหงส์ ภาพแพนโครมาติก ขนาด 720×720 จุดภาพ และภาพมัลติสเปกตรัม ขนาด 96×96 จุดภาพ ถ่ายเมื่อวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2553



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4.1 ภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชด

(ก) ภาพ PAN (ข) ภาพ MS แสดงสี RGB

4.2 ผลการทดลอง

ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ การหลอมรวมด้วยการแปลง iNIHS และ iHSL ในกลุ่มพื้นฐาน IHS ได้ผลลัพธ์ดังนี้

1. การปรับความคมชัดด้วยภาพแพนโครมาติกด้วยการแปลง iNIHS

ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธีแปลง iNIHS ได้ผลลัพธ์ดังภาพประกอบที่ 4.2 โดยภาพ (ก) เกิดจากการแปลง iNIHS แล้วแทนที่ค่าความเข้มด้วยภาพ PAN โดยตรงเช่นเดียวกับวิธีการ IHS จะเห็นว่าภาพผลลัพธ์เกิดความผิดเพี้ยนของสี ในขณะที่ภาพ (ข) ได้มีการคัดเลือกข้อมูลที่จะไปหลอมรวมด้วย SFIM ก่อนแล้วนำไปหลอมรวม พบว่าจะได้ภาพผลลัพธ์ที่รักษาความถูกต้องของค่าสีได้มากกว่า



(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 4.2 ภาพหลอมรวมที่ได้จากการแปลง iNIHS

(ก) iNIHS (ข) iNIHS-SFIM

2. การปรับความคมชัดด้วยภาพแพนโครมาติกด้วยการแปลง iHSL

สำหรับภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการหลอมรวมด้วยการแปลง iHSL ก็ได้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกับวิธีการ iNIHS ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3 เมื่อสังเกตภาพ (ก) ของทั้งวิธี iNIHS และ iHSL พบว่า วิธีการ iNIHS เกิดการผิดเพี้ยนของสีมากกว่าวิธีการ iHSL ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากระบบสี iHSL แยกส่วนที่เป็นสีและค่าความเข้มออกจากกันทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสีน้อยกว่า



(ก)

(ข)

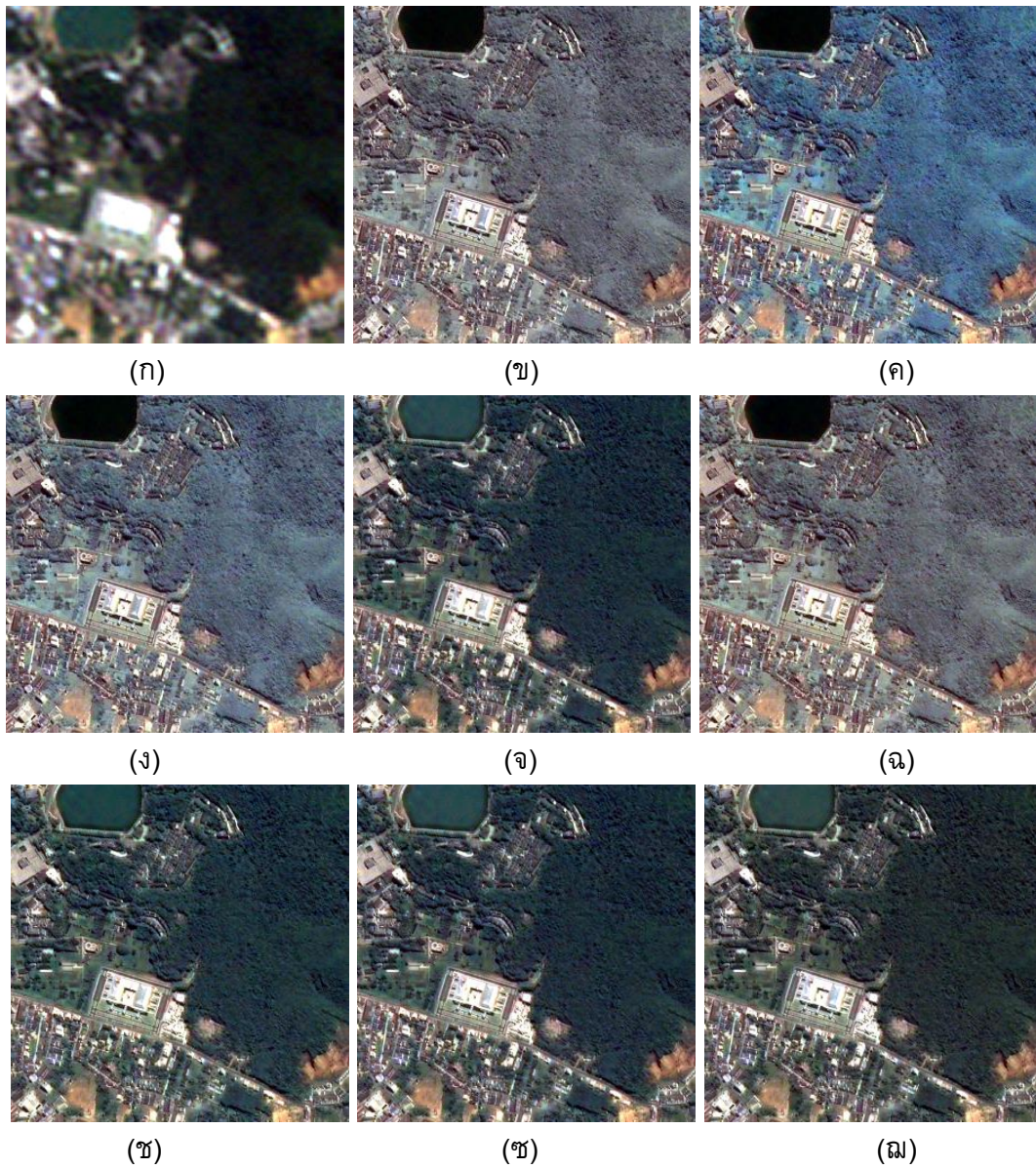
ภาพประกอบที่ 4.3 ภาพที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธี iHSL

(ก) iHSL (ข) iHSL-SFIM

4.3 การประเมินคุณภาพ

จากบทที่ 2 ในการประเมินคุณภาพของภาพหลอมรวมมี 2 วิธี คือ การประเมินคุณภาพด้วยสายตาและดัชนีทางสถิติ จึงได้นำภาพผลการทดลองข้างต้นเปรียบเทียบกับวิธีการต่าง ๆ ในกลุ่มขั้นตอนวิธีพื้นฐาน IHS ได้ตั้งภาพประกอบที่ 4.4 พบว่า วิธีการที่นำเสนอได้ผลลัพธ์ที่ดีทั้งในด้านความคมชัดและการรักษาคุณภาพของสีไว้ได้ และสำหรับการวัดคุณภาพด้วยดัชนีทางสถิติจะนำภาพจากภาพประกอบที่ 4.4 ไปวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (CC) ค่ารากของความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ค่าความผิดพลาดทั้งหมดจากการสังเคราะห์ (ERGAS) และดัชนีวัดคุณภาพ Q เปรียบเทียบกับภาพ PAN และภาพ MS ต้นฉบับ แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

จากภาพประกอบที่ 4.4 เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาจะเห็นว่า ภาพที่ได้จากวิธีการในกลุ่มที่ใช้ SFIM จะให้ภาพผลลัพธ์ที่รักษารายละเอียดเชิงคลื่นได้ดี เป็นไปตามค่าดัชนีที่แสดงในตารางที่ 4.1 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 0.82 ในส่วนของรายละเอียดเชิงพื้นที่จากการสังเกตด้วยสายตาพบว่า ภาพที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ มีความคมชัดใกล้เคียงกัน และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เทียบกับภาพ PAN มีค่าที่สูงในทุกๆ ภาพผลลัพธ์ เมื่อพิจารณาทั้งภาพพบว่า ภาพผลลัพธ์จากวิธีการ SFIM IHS-BT-SFIM iNIHS-SFIM และ iHSL-SFIM มีคุณภาพใกล้เคียงกัน แต่จากค่าดัชนีทางสถิติพบว่า ค่า ERGAS และ Q ของวิธีการ SFIM iNIHS-SFIM และ iHSL-SFIM มีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 1.5 และ 0.83 ตามลำดับ



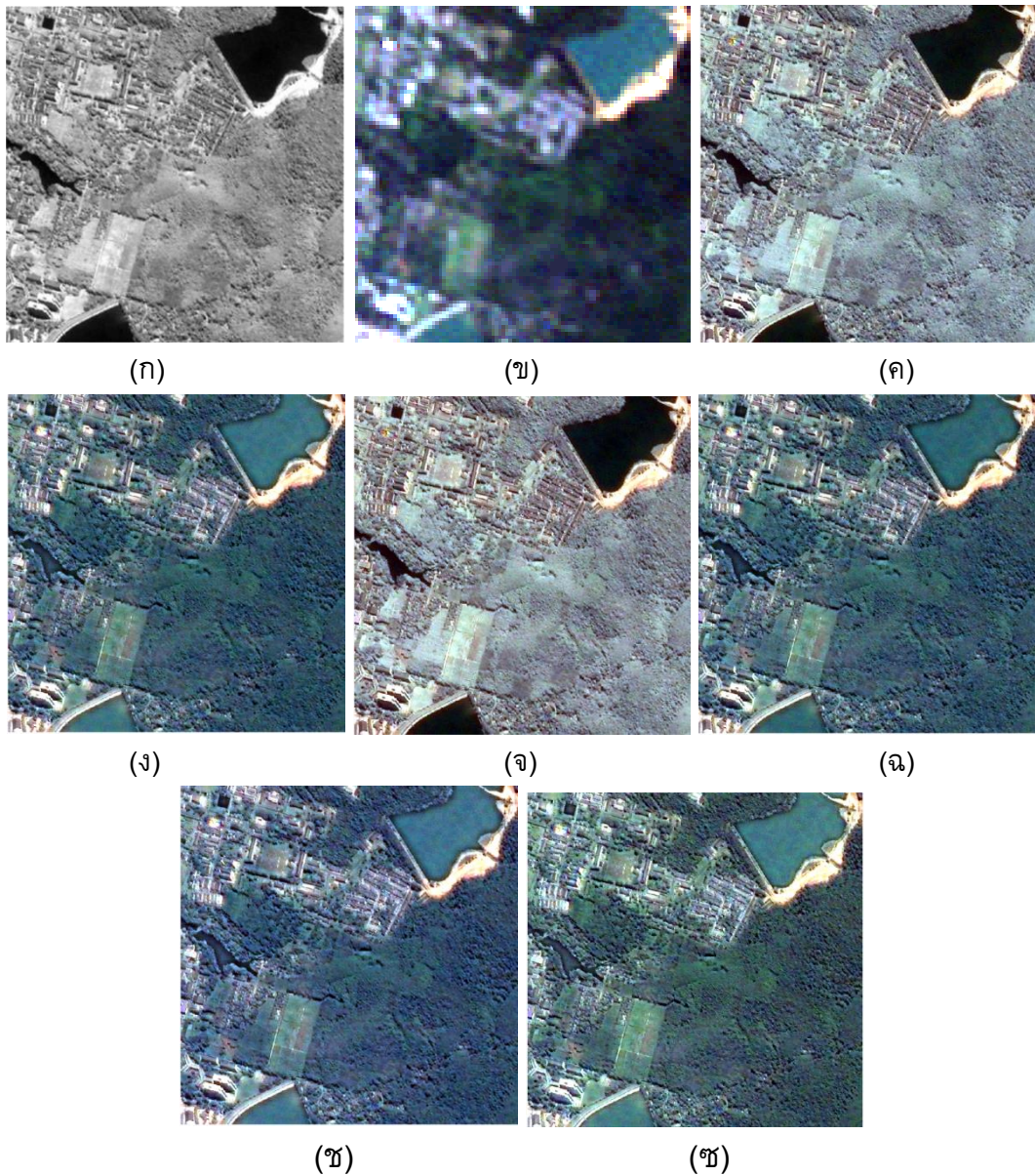
ภาพประกอบที่ 4.4 เปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการพื้นฐาน IHS

(ก) MS (ข) IHS (ค) BT (ง) IHS-BT (จ) SFIM (ฉ) BT-SFIM

(ช) IHS-BT-SFIM (ฌ) iNIHS-SFIM (ณ) iHSL-SFIM

ตารางที่ 4.1 ค่าของดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมจากวิธีการต่าง ๆ

Fusion Methods		IHS	BT	IHS-BT	SFIM	BT-SFIM	IHS-BT-SFIM	iNIHS	iNIHS-SFIM	IHSL	IHSL-SFIM
CC, MS	R	0.6693	0.8046	0.7209	0.9018	0.7080	0.8927	0.8014	0.9012	0.6670	0.8762
	G	0.5697	0.5651	0.5680	0.8321	0.5699	0.8171	0.5656	0.8309	0.5628	0.8373
	B	0.4727	0.2888	0.4066	0.7431	0.4336	0.7220	0.2934	0.7418	0.4697	0.7969
	Avg	0.5706	0.5528	0.5652	0.8256	0.5705	0.8106	0.5534	0.8246	0.5665	0.8368
CC, PAN	R	0.9873	0.9357	0.9745	0.8133	0.9753	0.8368	0.9314	0.8074	0.9857	0.8379
	G	0.9968	0.9930	0.9956	0.8639	0.9960	0.8877	0.9872	0.8573	0.9990	0.8612
	B	0.9870	0.9359	0.9734	0.8763	0.9780	0.8985	0.9309	0.8695	0.9824	0.8606
	Avg	0.9904	0.9549	0.9812	0.8512	0.9831	0.8743	0.9498	0.8447	0.9890	0.8532
RMSE, MS	R	0.0837	0.0641	0.0764	0.0182	0.0799	0.0235	0.0288	0.0182	0.0260	0.0196
	G	0.0837	0.0837	0.0837	0.0229	0.0836	0.0281	0.0333	0.0172	0.0213	0.0172
	B	0.0837	0.1033	0.0911	0.0277	0.0877	0.0329	0.0416	0.0144	0.0193	0.0145
	Avg	0.0837	0.0837	0.0837	0.0229	0.0837	0.0282	0.0345	0.0166	0.0222	0.0171
RMSE, PAN	R	0.0346	0.0541	0.0419	0.1036	0.0385	0.0971	0.1013	0.1302	0.1147	0.1276
	G	0.0030	0.0044	0.0035	0.0670	0.0033	0.0604	0.0574	0.0979	0.0832	0.0980
	B	0.0349	0.0544	0.0422	0.0315	0.0388	0.0253	0.0249	0.0593	0.0478	0.0622
	Avg	0.0241	0.0377	0.0292	0.0674	0.0269	0.0609	0.0612	0.0958	0.0819	0.0960
ERGAS		7.0475	6.7137	6.8918	1.8477	6.9633	2.2813	2.7924	1.4478	1.9648	1.5066
QI		0.6999	0.7093	0.7144	0.8540	0.7080	0.8490	0.7626	0.8365	0.7403	0.8230



ภาพประกอบที่ 4.5 เปรียบเทียบภาพผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการพื้นฐาน IHS
 (ก) PAN (ข) MS (ค) IHS (ง) SFIM (จ) BT-SFIM (ฉ) IHS-BT-SFIM
 (ช) iNIHS-SFIM (ซ) iHSL-SFIM

จากภาพประกอบที่ 4.5 เป็นภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการหลอมรวมด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้ (ค) IHS (ง) SFIM (จ) BT-SFIM (ฉ) IHS-BT-SFIM (ช) iNIHS-SFIM (ซ) iHSL-SFIM และได้แสดงค่าดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าของดัชนีวัดคุณภาพของภาพหลอมรวมจากวิธีการต่าง ๆ

Fusion Methods	IHS	SFIM	BT-SFIM	IHS-BT-SFIM	iNIHS-SFIM	iHSL-SFIM
CC, MS	0.2927	0.7437	0.2982	0.7089	0.7436	0.7694
CC, PAN	0.9899	0.6678	0.9855	0.7371	0.6681	0.6449
RMSE, MS	0.0861	0.0118	0.0861	0.0148	0.0154	0.0129
RMSE, PAN	0.0266	0.0893	0.0265	0.0806	0.1017	0.0987
ERGAS	7.9080	1.0242	7.9080	1.3004	1.6178	1.2477
QI	0.6206	0.8936	0.6185	0.8813	0.8944	0.8959

บทที่ 5

บทสรุป

จากบทที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น ได้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย ทฤษฎี หลักการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์ออกแบบและพัฒนา และผลการทดลอง ใน บทนี้จะกล่าวถึงบทสรุป

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการปรับปรุงค่าความเข้มที่เหมาะสมสำหรับการ หลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมธีออส โดยได้นำเสนอวิธีการ iHSL-SFIM ในการประมาณค่าความ เข้มที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ตัวดำเนินการ ซึ่งเป็นการปรับสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง พบว่า การดำเนินการทั้งสองส่วนส่งผลให้เกิดปัญหาความผิดเพี้ยนของสี จึงจำเป็นต้องใช้การ คัดเลือกข้อมูลบางความถี่จากภาพ PAN ให้พอเหมาะกับการหลอมรวมโดยใช้ SFIM เป็นการ หาอัตราส่วนการใส่ข้อมูลระหว่างภาพ PAN ต้นฉบับและข้อมูลภาพ PAN ที่ผ่านตัวกรอง ความถี่ต่ำผ่าน จากนั้นนำไปหลอมรวมกับภาพ MS ต้นฉบับแล้วนำภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการวิธี ที่นำเสนอไปเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีในกลุ่มพื้นฐาน IHS ประกอบด้วย IHS, BT, IHS-BT, SFIM, BT-SFIM, IHS-BT-SFIM และ iNIHS-SFIM ด้วยการวัดคุณภาพทั้งทางสายตาและค่า ดัชนีทางสถิติ วิธีการที่นำเสนอให้ภาพผลลัพธ์ที่ดีในการวัดคุณภาพทั้งวัดด้วยสายตาและดัชนี ทางสถิติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจศึกษาการนำตัวกรองความถี่ต่ำผ่านมาช่วยในการ คัดเลือกค่าความเข้มที่เหมาะสมสำหรับการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งในส่วนของการ ทดลองได้ทำการทดลองกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยการหาค่าเฉลี่ยและขนาดของตัวกรองที่มี ผลต่อการหลอมรวม ซึ่งการนำไปพัฒนาต่อสามารถที่จะทดลองในการปรับชนิดของตัวกรองที่ นำมาคัดเลือกค่าความเข้มได้

บรรณานุกรม

- สาริต อินทจักร์ และ วิภาดา เวทย์ประสิทธิ์. 2553. การหลอมรวมข้อมูลสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมธีออส, รายงานวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (สทอภ.). 2012. Thailand Earth Observation System (THEOS) [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://theos.gistda.or.th>. (วันที่สืบค้น 28 มิถุนายน 2555)
- Alparone, L., Baronti, S., Garzelli, A. and Nencini, F., 2004. A global quality measurement of Pan-sharpened multispectral imagery, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 1, no. 4, pp. 313–317.
- Alparone, L., et al., 2007. Comparison of pansharpening algorithms: outcome of the (2006) GRS-S data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (10), 3012–3021.
- Chien, C.-L. and Tsai, W.-H., 2014. Image Fusion With No Gamut Problem by Improved Nonlinear IHS Transforms for Remote Sensing, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 52(1): 651-663.
- Choi, M. 2006. A New Intensity-Hue-Saturation Fusion Approach to Image Fusion With a Tradeoff Parameter, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 44, No. 6, pp. 1672-1682.
- Damera-Venkata, N., et al., 2000. Image quality assessment based on a degradation model. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9 (4), 636–635.
- Hanbury, A. and Serra J. 2002. A 3D-polar coordinate colour representation suitable for image analysis. submitted to *Computer Vision and Image Understanding*.
- Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. 2008. *Digital Image Processing*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, USA.
- Karathanassi, V., Kolokousis, P., and Ioannidou, S., 2007. A comparison study on fusion methods using evaluation indicators. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (10), 2309–2341.
- Ledley, R.S., Buas, M., and Golab, T.J. 1990. *Fundamentals of True-Color Image Processing*, Proc. 10th Int. Conf. Pat. Rec., pp. 791-795.

- Li, S., Li, Z. and Gong, J. 2010. Multivariate Statistical Analysis of Measures for Assessing the Quality of Image Fusion, *International Journal of Image and data fusion*, vol. 1, no. 1, pp. 47-66.
- Liu J. G., 2000. Smoothing filter-based intensity modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 21, no. 18, pp. 3461–3472.
- Marcello, J., Medina, A. and Eugenio, F. 2013. Evaluation of Spatial and Spectral Effectiveness of Pixel-Level Fusion Techniques, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 10, no.3, pp. 432-436.
- Pohl, C. and Van Genderen, J. L., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 19, no. 5, pp. 832–854.
- Thomas, C., Ranchin, T., Wald, L. and Chamussot, J. 2008. Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1301-1312.
- Tu, T.M., Cheng, W.C., Chang, C.P., Huang, P.S. and Chang, J.C. 2007. Best Tradeoff for High-Resolution Image Fusion to Preserve Spatial Details and Minimize Color Distortion, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 4, no. 2, pp. 302–306.
- Tu, T.M., Hsu, C.L., Tu, P.Y. and Lee, C.H. 2012. An Adjustable Pan-Sharpening Approach for IKONOS/QuickBird/GeoEye-1/WorldView-2 Imagery, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 1, pp. 125-134.
- Tu, T.M., Huang, P.S., Hung C.L. and Chang, C.P. 2004. A Fast Intensity-Hue-Saturation Fusion Technique With Spectral Adjustment for IKONOS Imagery, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol. 1, pp. 309-312.
- Tu, T.M., Su, S.C., Shyu, H.C. and Huang, P.S. 2001. A new look at IHS-like image fusion methods, *Information Fusion*, Vol. 2, pp. 177-186.
- Umbaugh, S.E. 2010. *Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIptools*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, New York, London.

- Wald, L., Ranchin, T. and Mangolini, M. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 63, no. 6, pp. 691–699.
- Wang, Z. and Bovik, A.C. 2002. A universal image quality index, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 9, pp. 81-84.
- Wang, Z., et al., 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transaction on Image Processing*, 13 (4), 600–612.
- Xydeas, C. and Petrovic, V., 2000. Objective image fusion performance measure. *Electronics Letters*, 36 (4), 308–309.
- Yang, X.H., et al., 2007. Fusion of multi-spectral and panchromatic images using fuzzy rule. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 12 (7), 1334–1350.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.**ผลงานตีพิมพ์**

เรื่อง	การหลอมรวมข้อมูลสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมธีออส
งานประชุมวิชาการ	JCSSE 2012 : 9th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering
สถานที่	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย กรุงเทพมหานคร
วันที่	22 – 25 ตุลาคม 2555

การหลอมรวมข้อมูลสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมธีออส

Image Fusion for THEOS Imagery

สาธิต อินทจักร¹ วิภาดา เวทย์ประสิทธิ์² และ สุวรรณี พยับไชยกุล³

ห้องปฏิบัติการปัญญาประดิษฐ์ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

E-mail: {sathit.i.¹, wiphada.w²}@psu.ac.th, 5410220069@email.psu.ac.th³

บทคัดย่อ

ภาพแพนโครมาติก (Panchromatic: PAN) และภาพมัลติสเปกตรัม (Multispectral: MS) ของดาวเทียมธีออส (THailand Earth Observation System: THEOS) มีสเปกตรัมต่างกัน การหลอมรวมสารสนเทศระหว่างภาพ PAN และภาพ MS เรียกว่า การปรับความคมชัดภาพ PAN (pan-sharpening) เพื่อนำมาแปลความหมายในพื้นที่ใหญ่ ในปัจจุบัน ได้มีพัฒนาขั้นตอนวิธีการหลอมรวมขึ้นจำนวนมาก โดยเฉพาะการหลอมรวมที่อาศัยการแปลง Intensity-hue-saturation (IHS) ที่สามารถปรับความคมชัดภาพ PAN ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเทคนิค IHS ทำให้เกิดการลดทอนสเปกตรัม เนื่องจากการตอบสนองสเปกตรัมที่ไม่เป็นไปอย่างธรรมชาติของเซ็นเซอร์ THEOS โดยเฉพาะพื้นที่ที่เป็นพืช บทความนี้เสนอขั้นตอนวิธี Context-driven เพื่อปรับปรุงดัชนีพืชพรรณ (Vegetation indexes: VIs) โดยอาศัยการปรับค่าทราสโวลด์และการปรับค่าทราสโวลด์แบบอัตโนมัติในการกำหนดโซนพืชพรรณ โดยแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การปรับความคมชัดภาพ PAN ด้วยเทคนิคการลดทอนสเปกตรัมต่ำสุด และการปรับปรุงโซนพืชพรรณโดยการเพิ่มสีเขียวตามธรรมชาติของโซนพืชพรรณ ซึ่งขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่ดีในการวิเคราะห์ด้วยสายตา นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพการหลอมรวมโดยการเพิ่มโซนพืชพรรณก่อนข้างดี

คำสำคัญ: การหลอมรวมข้อมูลภาพ, การลดทอนสเปกตรัม, การปรับความคมชัดภาพแพนโครมาติก, การแปลงเวฟเลต, ดาวเทียมธีออส

Abstract

Multispectral (MS) and panchromatic (PAN) data provided by THEOS (THailand Earth Observation System) have different spatial resolutions. Information combination between MS and PAN called pan-sharpening of THEOS images paves the way for the visual interpretation of large-area-scale applications. Recently, a lot of image fusion methods have been developed; especially, the intensity-hue-saturation (IHS)-based methods are well known in quick image pan-

sharpening. However, the IHS-based techniques produce color distortion due to the unnatural spectral response of THEOS sensors, particularly in vegetated areas. The proposed scheme uses a context driven method to improve vegetation indexes (VIs) by normalization and automatic threshold to declare the vegetation zones. The procedure consists of two steps: pan-sharpening by using the spectral distortion minimizing technique and vegetation enhancement by increasing the natural greenness of the vegetation zones. The proposed method provides very good results in terms of visual analysis. In addition, this method also improves the fusion quality by enhancing the vegetated zones quite well.

Keywords: image fusion, spectral distortion, pan-sharpening, wavelet transform, THEOS (Thailand Earth Observation System)

1. บทนำ

การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมเป็นกระบวนการรวมภาพแพนโครมาติกกับภาพมัลติสเปกตรัม เพื่อปรับความคมชัดด้วยภาพแพนโครมาติก (PAN-Sharpning) ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ข้อมูลให้มีสารสนเทศที่เหมาะสมต่อการตรวจสอบด้วยสายตาหรือการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ [1]

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานภาพถ่ายดาวเทียมในงานด้านต่าง ๆ โดยทั่วไปจะใช้ในการตรวจหาคุณลักษณะที่สำคัญจากข้อมูล (Feature detection) การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก (Change monitoring) การวิเคราะห์ระดับความลึกของน้ำ [2] ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานมีความต้องการภาพที่มีสารสนเทศสูงทั้งในเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัม แต่ในความเป็นจริงด้วยข้อจำกัดของเทคโนโลยีและต้นทุนการถ่ายภาพของดาวเทียมไม่สามารถถ่ายภาพที่มีคุณสมบัติทั้งสองอย่างได้

บทความนี้จึงได้เสนอขั้นตอนวิธีในการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมธีออส (THEOS's PAN-Sharpning: TPAN-Sharpning) ซึ่งพัฒนามาจากขั้นตอนวิธี Context-driven [3] โดยออกแบบกฎการหลอม

รวมทั้งทำให้ค่าความผิดเพี้ยนเชิงสเปกตรัมต่ำสุด [4] และยังคงรักษาสเปกตรัมของพืชพรรณไว้ได้มากที่สุด

บทความนี้ประกอบด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ หัวข้อที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 3 ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ หัวข้อที่ 4 ดัชนีวัดคุณภาพ หัวข้อที่ 5 ผลการทดลอง และหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปผล

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดาวเทียมธีออส

ธีออส [5] เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรดวงแรกของไทยที่ใช้กล้องถ่ายภาพ 2 ตัว คือ กล้องระบบช่วงคลื่นเดียวหรือกล้องแพนโครมาติก และ กล้องระบบหลายช่วงคลื่นหรือกล้องมัลติสเปกตรัม ที่ครอบคลุมช่วงคลื่นในช่วงการมองเห็นไปจนถึงช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared: NIR) และมีอัตราส่วนเรสโซลูชันของภาพ PAN และภาพ MS เท่ากับ 7.5 ซึ่งเรสโซลูชันต่างกันมาก ส่งผลให้คุณภาพของภาพหลอมรวมไม่ดีเท่าที่ควร

2.2 วิธีการปรับความคมชัดด้วยภาพแพนโครมาติก

การหลอมรวมข้อมูลภาพระหว่างภาพ PAN และภาพ MS โดยการดึงสารสนเทศความถี่สูงมาจากภาพ PAN มาใส่ให้ภาพ MS เพื่อขยายเรสโซลูชันให้เท่ากับภาพ PAN

วิธีการหลอมรวมรูปภาพสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท [1] คือ Projection-substitution, Relative spectral contribution และ Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures (ARSIS)

2.2.1 Projection-substitution

เป็นวิธีการหลอมรวมโดยการแทนที่ค่าความเข้มของภาพ MS ด้วยค่าความเข้มของภาพ PAN ซึ่งการแทนค่ามีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น Intensity-Hue-Saturation (IHS) [6]

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta_{IHS} \\ G + \delta_{IHS} \\ B + \delta_{IHS} \end{bmatrix}, \delta_{IHS} = PAN - I_3 \quad (1)$$

เมื่อ $I_3 = (R + G + B) / 3$ และ R, G, B แทนข้อมูลแบนด์ RGB ของภาพ MS ที่ปรับเรสโซลูชันให้เท่ากับภาพ PAN แล้ว จะได้ R', G', B' คือภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการหลอมรวม

2.2.2 Relative spectral contribution

วิธีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ถูกพัฒนาจากการแปลงเชิงเส้น IHS ที่มีการหลอมรวมภาพทั้ง 4 ช่วงคลื่นและสามารถปรับค่าตัวแปรได้ จึงเรียกวิธีการหลอมรวมในกลุ่มนี้ว่า “Tunable IHS-Brovey” [1, 7, 8]

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ NIR' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{l-1}{l} \delta_{IHS} \\ G + \frac{l-1}{l} \delta_{IHS} \\ B + \frac{l-1}{l} \delta_{IHS} \\ NIR + \frac{l-1}{l} \delta_{IHS} \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ $I_4 = (R + G + B + NIR) / 4$ และ $\delta_{IHS} = PAN - I_4$ โดยเพิ่มแบนด์ NIR ที่แทนภาพในย่านอินฟราเรดใกล้ของภาพ MS ที่ปรับเรสโซลูชันให้เท่ากับภาพ PAN แล้ว จะได้ NIR' คือภาพในย่านอินฟราเรดใกล้ของภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการหลอมรวม และ l เป็นตัวแปรปรับสัดส่วนระหว่างรายละเอียดเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัมของภาพหลอมรวม ถ้าค่า l มีค่ามากจะทำให้ภาพหลอมรวมมีรายละเอียดเชิงสเปกตรัมสูงแต่รายละเอียดเชิงสเปกตรัมจะต่ำลง และเมื่อค่า l มีค่าน้อยจะให้ผลในทางตรงกันข้าม

2.2.3 Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures (ARSIS)

หลักการของวิธี ARSIS คือ ค่าของจุดภาพไม่ควรถูกเปลี่ยนเพื่อแก้ปัญหาการผิดเพี้ยนเชิงสเปกตรัม จึงอาศัยพื้นฐานของการวิเคราะห์มัลติเรสโซลูชัน (Multiresolution analysis: MRA) ในการสังเคราะห์ค่าความถี่สูงจากภาพ PAN ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือ การแปลงเวฟเลต (Wavelet transform) [9, 10]

แนวคิดของ ARSIS โดยทั่วไปจะมีขั้นตอนวิธีดังต่อไปนี้

1. ดึงสารสนเทศจากภาพ PAN
2. ค้นหาสารสนเทศที่ขาดไปจากภาพ MS
3. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างภาพ PAN และภาพ MS แล้วสังเคราะห์ภาพ MS ให้มีเรสโซลูชันสูง

ขั้นตอนวิธีนี้จะมีโครงสร้างการดึงสารสนเทศแบบมัลติสเกล เพื่อให้แต่ละสเกลมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นคุณภาพของภาพหลอมรวมขึ้นอยู่กับ การเลือกสารสนเทศที่เหมาะสมมาหลอมรวม ซึ่ง Context-driven [3] เป็นแนวคิดที่มีการออกแบบตามหลักการของ ARSIS ที่จะกล่าวต่อไป

2.3 Context-driven

การหลอมรวมด้วยหลักการนี้ จะใช้หลักสถิติมาเป็นเครื่องมือสำหรับการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งที่จะปรับเปลี่ยนสารสนเทศความถี่สูงจากภาพ PAN ให้สอดคล้องกับภาพ MS ที่ตำแหน่งเดียวกัน นอกจากนี้ในการหลอมรวมยังมีการใช้เกณฑ์ทางสถิติเพื่อตัดสินใจว่า จะใส่หรือไม่ใส่สารสนเทศความถี่สูงจากภาพ PAN เข้าไปในแต่ละตำแหน่งของภาพ MS กฎการตัดสินใจนี้ ได้อาศัยการเปรียบเทียบเกณฑ์ทางสถิติที่วัดระดับความเข้ากันได้ของค่าความถี่ต่ำผ่านของภาพ PAN กับภาพ MS โดยกำหนดเป็นค่าเทรโซลด์เฉพาะขึ้นมา ซึ่งมีขั้นตอนการหลอมรวมดังนี้

- 1) สุ่มขยายภาพ MS ให้มีขนาดเดียวกับภาพ PAN
- 2) แยกองค์ประกอบของภาพ MS และภาพ PAN ด้วยการแปลงเวฟเลต โดยให้ D_{MS}^k และ D_{PAN}^k แทนสัมประสิทธิ์รายละเอียดของภาพ MS และภาพ PAN ตามลำดับ เมื่อ $k=H, V, D$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ตามแนวนอน แนวตั้ง และแนวเฉียงโดยลำดับ ส่วน C_{MS} และ C_{PAN} แทนสัมประสิทธิ์ของค่าประมาณจากภาพ MS และภาพ PAN ตามลำดับ

- 3) จำนวนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัมประสิทธิ์ค่าประมาณระหว่าง C_{MS} และ C_{PAN} ที่อยู่รอบตำแหน่งที่ (i, j) ภายในวินโดว์ขนาด $n \times n$ ซึ่งค่าที่คำนวณได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเฉพาะตำแหน่ง (i, j) (Local Correlation Coefficient: $LCC(i, j)$)
- 4) จำนวนค่าถ่วงน้ำหนัก $\gamma(i, j)$ ที่ใช้เป็นอัตราการใช้สารสนเทศจากภาพ PAN เข้าไปในภาพ MS ในแต่ละตำแหน่ง (i, j) ซึ่ง $\gamma(i, j)$ เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ C_{MS} กับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ C_{PAN} ที่ตำแหน่ง (i, j) ภายในวินโดว์ขนาด $n \times n$ ดังนั้นสมการสำหรับใช้สารสนเทศจากภาพ PAN เข้าไปในภาพ MS สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$D_{MS}^k(i, j) = \begin{cases} r(i, j)D_{MS}^k(i, j) & \text{ถ้า } |LCC(i, j)| \geq \theta \\ D_{MS}^k(i, j) & \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ $\forall k = H, V, D$ และ θ เป็นค่าพิสัย (Threshold) ที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ โดยขึ้นอยู่กับค่าสหสัมพันธ์ของภาพ PAN กับภาพ MS ในแต่ละแบนด์ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของวินโดว์ $n \times n$ ที่กำหนดในข้อ 3) ซึ่งขนาดของวินโดว์ n จะกำหนดจากสเปกตรัมเรโซลูชันกับอัตราส่วนของสเกลภาพที่จะนำมาหลอมรวม จากการศึกษาของ Aiazzi et al. [3] ที่ทดลองกำหนดขนาดวินโดว์ $7 \leq n \leq 11$ ดังนั้นค่าพิสัย θ สามารถกำหนดได้จากค่าสหสัมพันธ์ของภาพ PAN กับภาพ MS ในแต่ละแบนด์ นั่นคือ $\theta = 1 - \rho_l$ เมื่อ ρ_l คือค่าสหสัมพันธ์ของภาพ PAN กับภาพ MS แบนด์ที่ l

- 5) ทำการแปลงเวฟเล็ดแบบผกผัน เพื่อให้ได้ภาพที่หลอมรวม

$$MS_n^h = D_{MS}^k + C_{MS}; \quad \forall k = H, V, D \quad (4)$$

3. ขั้นตอนการหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมรีออส

3.1 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมรีออส

การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมรีออส (TPAN-Sharpning) ที่นำเสนอได้พัฒนามาจากอัลกอริทึม Context-driven โดยได้ออกแบบกฎการหลอมรวมตามเงื่อนไขที่ทำให้มีค่าความผิดพลาดเชิงสเปกตรัมต่ำสุด โดยรักษาสเปกตรัมเรโซลูชันไว้ให้ได้มากที่สุด โดยอาศัยการตั้งฉากกันของเวกเตอร์สัญญาณ

เมื่อมีสัญญาณของสเปกตรัมที่เก็บอยู่ในเวกเตอร์ \mathbf{v} และ $\hat{\mathbf{v}}$ โดยทั้งสองเวกเตอร์มีจำนวนสมาชิก L เท่ากัน เมื่อสัญญาณ $\mathbf{v} = \{v_1, v_2, \dots, v_L\}$ แทนจุดภาพของเวกเตอร์สเปกตรัมเดิม $\mathbf{v}^l = G^l(i, j)$ และ $\hat{\mathbf{v}} = \{\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_L\}$ เป็นเวกเตอร์ที่ได้จากการหลอมรวมของภาพ MS แบนด์ที่ l กับภาพ PAN นั่นคือ $\hat{\mathbf{v}}^l = \hat{G}^l(i, j)$ การวัดค่าความผิดพลาดของสเปกตรัมจะวัดด้วยความสัมพันธ์เชิงมุมของสเปกตรัม (Spectral Angle Mapper: SAM [11]) ของสองเวกเตอร์ใด ๆ ดังนี้

$$SAM(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{v}}) \equiv \arccos\left(\frac{(\mathbf{v}, \hat{\mathbf{v}})}{\|\mathbf{v}\|_2 \|\hat{\mathbf{v}}\|_2}\right) \quad (5)$$

แบบจำลองที่มีความผิดพลาดเชิงสเปกตรัมต่ำสุด (Spectral Distortion Minimizing: SDM) จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสเปกตรัมและสเปกตรัมค่า

การเปลี่ยนแปลงนี้จะแทนด้วยเวกเตอร์ $\hat{\alpha}_s(i, j) = \{\alpha_s^l(i, j), l = 1, 2, \dots, L\}$ และกำหนดให้เวกเตอร์ $\hat{G}^l(i, j) \equiv \{\hat{G}^{(l)}(i, j), l = 1, 2, \dots, L\}$ แทนเวกเตอร์ของจุดภาพจาก MS ที่ถูกขยายให้มีขนาดเท่ากับภาพ PAN

วัตถุประสงค์หลักของหลอมรวมตามวิธี SDM เพื่อลดสารสนเทศเชิงสเปกตรัมให้ใกล้เคียงกับภาพ MS เดิมให้มากที่สุดด้วยหลักเกณฑ์ของ SAM ดังนั้นจึงกำหนดให้

$$\bar{W}_0^{MS}(i, j) \equiv \hat{\alpha}_s(i, j)W_0^{(PAN)}(i, j) \quad (6)$$

ซึ่งเป็นการกำหนดเวกเตอร์ค่าประมาณของภาพ MS จากภาพ PAN ให้มีความผิดพลาดของ SAM ต่ำที่สุดของการใช้สารสนเทศที่เป็นรายละเอียดเชิงสเปกตรัม ($W_0^{(PAN)}$) เข้าไปในแต่ละตำแหน่ง (i, j) ให้ขนานกับเวกเตอร์ที่ได้จากการขยาย ในขณะที่ $\alpha_s^l(i, j)$ ถูกออกแบบให้มีความผิดพลาดของเรดิโอเมตริก (Radiometric) ต่ำที่สุดเช่นกัน จากเงื่อนไขต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถกำหนดสมการของการหลอมรวมโดยวิธีนี้ได้เป็น

$$\hat{G}^l(i, j) = \hat{G}^l(i, j) + \hat{\alpha}_s(i, j) \cdot W_0^{(PAN)}(i, j) \quad (7)$$

โดยที่เวกเตอร์ $\hat{\alpha}_s(i, j)$ จากแบนด์ที่ l ถูกกำหนดโดย

$$\hat{\alpha}_s(i, j) = \alpha_s^l(i, j) = \frac{\hat{G}^{(l)}(i, j)}{A^{(PAN)}(i, j)}, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

เมื่อ $A^{(PAN)}$ เป็นค่าประมาณจากการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ขั้นตอนการหลอมรวมภาพด้วยเวฟเล็ดตามหลักการ ARSIS ที่พัฒนาขึ้น จะใช้ภาพ MS สี่แบนด์ โดยให้ MS_j แทนข้อมูลภาพ MS ในแบนด์ที่ j ($j=1, 2, 3, 4$) ดังนั้นการหลอมรวมภาพมีขั้นตอนวิธีดังนี้

- 1) แยกองค์ประกอบของภาพ PAN ด้วยการแปลงเวฟเล็ดตามสมการ $W_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (9)$
 $W_\psi^l(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j, m, n}^l(x, y) \quad (10)$ เมื่อ $i = H, V, D$ และให้ D_{PAN}^k แทนสัมประสิทธิ์รายละเอียดของภาพ PAN เมื่อ $k = H, V, D$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ตามแนวอนแนวตั้ง และแนวเฉียง โดยลำดับ ส่วน C_{PAN} แทนสัมประสิทธิ์ของค่าประมาณจากภาพ PAN
- 2) ขยายภาพ MS_j ซึ่งเป็นภาพ MS ในแบนด์ที่ j ให้มีขนาดเท่ากับภาพ PAN แล้วนำไปเก็บไว้ในตัวแปร I
- 3) แยกองค์ประกอบของภาพ MS_j ด้วยการแปลงเวฟเล็ดตามสมการที่ (9) และ (10) โดยให้ D_{MS}^k แทนสัมประสิทธิ์รายละเอียดของภาพ MS เมื่อ $k = H, V, D$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ตามแนวอนแนวตั้ง และแนวเฉียงโดยลำดับ ส่วน C_{MS} แทนสัมประสิทธิ์ของค่าประมาณจากภาพ MS
- 4) จำนวนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสัมประสิทธิ์ค่าประมาณระหว่าง C_{MS} และ C_{PAN} ซึ่งค่าที่คำนวณได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งภาพ (Correlation Coefficient: CC) จำนวนค่า $\hat{\alpha}_s(x, y)$ ตามสมการ

$$\hat{\alpha}_s(i, j) = \alpha_s^l(i, j) = \frac{\hat{G}^{(l)}(i, j)}{A^{(PAN)}(i, j)}, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

เมื่อ $\forall x, y$ ที่เป็นตำแหน่งของจุดภาพ

- 5) ทำการหลอมรวมข้อมูลภาพตามกฎต่อไปนี้

$$D_{MS}^k(x, y) = \begin{cases} D_{MS}^k(x, y) D_{PAN}^k(x, y) & \text{ถ้า } CC * \alpha_s(x, y) > (D_{MS}^k(x, y))^2 \\ D_{MS}^k(x, y) & \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (12)$$

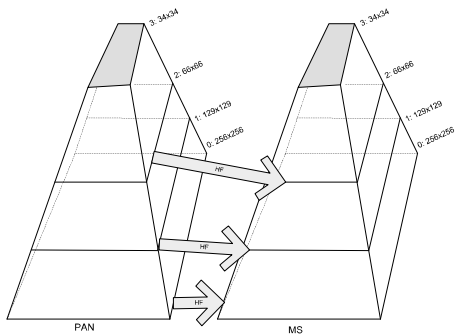
- 6) ทำการแปลง D_{MS}^k และ C_{MS} ด้วยเวฟเลตแบบผกผันตามสมการ

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} W_\varphi(j_0, m, n) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) + \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{i=H, V, D} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} W_\psi^i(j, m, n) \psi_{j, m, n}^i(x, y) \quad (13)$$

จะได้ $f(x, y)$ ซึ่งก็คือภาพ MS แบนด์ที่ j ที่มีเรสโซลูชันเท่ากับภาพ PAN

- 7) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 จนครบทุกแบนด์

ภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพถ่ายดาวเทียมหรือสที่ถ่ายเมื่อวันที่ 14 เมษายน 2552 โดยภาพที่ตัดมาเป็นภาพ PAN มีขนาด 256×256 จุดภาพ และภาพ MS มีขนาด 34×34 จุดภาพ การทำภาพ MS ให้มีขนาด 256×256 จุดภาพด้วยการประมาณค่าแบบไบคิวบิก แล้วใช้เวฟเลตวิเคราะห์มัลติเรสโซลูชันด้วยฟังก์ชัน Daubechies อันดับที่ 2 หรือ db2 ที่กำหนดให้มีสเกล 3 ระดับ ในรูปที่ 1 ได้จำลองการใส่ค่าข้อมูลจากภาพ PAN เข้าไปในภาพ MS โดยระดับที่ 0 มีขนาดเท่ากับภาพ PAN จะเห็นว่าภาพ MS ที่ระดับสเกลที่ 2, 1, และ 0 จะขาดความคมชัดที่เป็นค่าข้อมูลความถี่สูง (High Frequency: HF) ที่สามารถดึงได้จากภาพ PAN เพื่อไปหลอมรวมให้ภาพ MS มีเรสโซลูชันที่คมชัดใกล้เคียงกับภาพ PAN



รูปที่ 1 โครงสร้างพีระมิดแทนสารสนเทศในแต่ละสเกลของภาพถ่ายดาวเทียมหรือส



(ก) Context-driven (ข) TPAN-Sharpening

รูปที่ 2 การหลอมรวมภาพถ่ายดาวเทียมหรือส

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีความคิดเทียบเคียงสเปกตรัมต่ำกว่าวิธี Context-driven และควบคุมการแพร่ของสเปกตรัมไปยังตำแหน่งข้างเคียงได้ดีกว่า สังเกตได้จากหลังคาของตึกฟักทอง ซึ่งวิธี Context-driven ควบคุมการใส่สารสนเทศได้ไม่ค่อยดี ทำให้สีขาวแพร่ไปทางด้านซ้าย และบริเวณอื่นๆ

3.2 การปรับปรุงโซนพืชพรรณ

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) เป็นดัชนีที่นิยมใช้มากที่สุดของดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Indexes: VI) NDVI พัฒนาขึ้นจากภาพมัลติสเปกตรัมที่ใช้เพื่อตรวจสอบการจำแนกพืชที่ปกคลุมจากภาพถ่ายดาวเทียม [12] แต่ในโซนพืชพรรณของภาพ MS จะมีดีกว่าโซนอื่น เพราะโซนนี้จะมีการสะท้อนของแบนด์ RGB ที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อเราสนใจพืชพรรณที่ปกคลุม จึงต้องปรับปรุงภาพในโซนพืชพรรณ

การปรับปรุงภาพในโซนพืชพรรณจะใช้ VI เพื่อจำแนกโซน นี้ออกมาจากข้อมูลภาพแล้วจึงค่อยปรับปรุง Malpica [13] โดยใช้วิธีปรับสเปกตรัมของสีด้วยการแปลง IHS ค่า NDVI ถูกใช้ในการแก้ไขค่าสีแนวความคิดที่จะปรับปรุงภาพของ El-Mezouar และคณะ [14] ได้ปรับค่าในแบนด์สีเขียว เพื่อลดค่าความแตกต่างจากภาพ PAN การปรับค่าจะกระทำเฉพาะในพื้นที่ที่เป็นพืชพรรณ ซึ่งพื้นที่นี้ถูกกำหนดจากค่า NDVI

ส่วนอัลกอริทึมการปรับโซนพืชพรรณที่เสนอโดย Tu และคณะ [15] ได้ใช้เทคนิค Fast intensity-hue-saturation (FIHS) ที่กำหนดค่า $I_3 = (R + G + B) / 3$ ในการปรับเพิ่มค่าแบนด์สีเขียวเฉพาะพื้นที่ที่มีพืช โดยใช้ค่า VI จากสารสนเทศเชิงสเปกโทรสโกปีของโซนสูงของภาพ PAN ที่กำหนดไว้ดังนี้

$$VI = \frac{PAN - I_3}{PAN + I_3} \quad (14)$$

จากการทดลองกับค่าเทรสโวลต์หลาย ๆ ค่าพบว่า ค่า VI ตอบสนองต่อวัตถุอื่น ๆ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นเงา

จากประโยชน์ที่ได้รับจากสเปกโทรสโกปีของภาพ PAN El-Mezouar และคณะ [16] ได้นำเสนอค่า NDVI ใหม่โดยใช้ข้อมูลภาพที่หลอมรวมกับภาพ PAN แล้ว แบนด์ที่ใช้คือ NIR และ R ที่หลอมรวมแล้ว โดยดัชนีที่พวกเขาได้นำเสนอ คือ

$$HRNDVI = \frac{Fused\ NIR - Fused\ R}{Fused\ NIR + Fused\ R} \quad (15)$$

จากสมการที่ (15) El-Mezouar และคณะ [16] ได้ใส่ข้อมูลภาพ PAN เข้าไปดังนี้

$$HRNDVI = 2 \frac{NIR - R}{NIR + R - B + 4PAN - G} \quad (16)$$

โดยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ได้ทำการปรับปรุงโซนพืชพรรณตามสมการที่ (15)

การจำแนกโซนพืชพรรณออกจากภาพโดยกำหนดค่าเทรสโวลต์ด้วยค่าต่าง ๆ ของแต่ละวิธีคือ 0.22, 0.46, 0.45, และ 0.55 สำหรับ VI, NDVI, HRNDVI และ TPAN-Sharpening ตามลำดับ แล้วนำพื้นที่จากค่าดัชนีเหล่านี้ไปปรับปรุงภาพให้มีความสว่าง และมีสีของพืชพรรณต่าง ๆ ที่สุกใสขึ้น จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3



(ก) VI

(ข) NDVI



(ค) HRNDVI

(ง) TPAN-Sharpning

รูปที่ 3 การหลอมรวมข้อมูลโดยการปรับปรุงพื้นที่ที่มีพืช

จากรูปที่ 3 (ก) ภาพที่ได้จากการหลอมรวมไม่ค่อยสว่าง ทั้งนี้เพราะดัชนี VI ในสมการที่ (14) จำแนกโซนที่เป็นพืชได้ไม่ถูกต้องมากนัก ในรูปที่ 3 (ข) ส่วนที่เป็นขอบของอ่างเก็บน้ำถูกจำแนกเป็นโซนต้นไม้ ในรูปที่ 3 (ค) ส่วนที่เป็นถนนยังถูกจำแนกเป็นโซนพืชพรรณสำหรับวิธีที่พัฒนาขึ้นมาที่แสดงในรูปที่ 3 (ง) ใช้หลักการเดียวกับ HRNDVI แต่ใช้สูตรทั่วไปของ NDVI ที่หาค่าดัชนีพืชพรรณจากค่าความแตกต่างของข้อมูลในแบนด์ NIR กับแบนด์สีแดงตามสมการที่ (15) โดยใช้ภาพที่หลอมรวมจากอัลกอริทึมที่นำเสนอ ซึ่งตั้งสมมติฐานของการหลอมรวมเอาไว้ว่า จะต้องให้ค่าความผิดพลาดเชิงสเปกตรัมมีค่าต่ำที่สุด

4. ดัชนีวัดคุณภาพ

ในงานวิจัยนี้จะวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัม โดยดัชนีที่นิยมใช้ประเมินคุณภาพ 4 ดัชนีคือ ดัชนีวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัม ได้แก่ True Edge (TE), ดัชนีวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัม ได้แก่ CC และดัชนีวัดคุณภาพทั้งเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัม ได้แก่ ERGAS และ Q

- True Edge (TE)

ตัวดำเนินการโซเบล [17] ที่ใช้หาขอบวัตถุที่ปรากฏในภาพประกอบด้วยตัวดำเนินการเกรเดียนต์ตามแนวตั้งและแนวนอนในวินโดว์ขนาด 3×3 ค่าเกรเดียนต์ที่ได้จะนำมาหาผลรวมในปริภูมิยูคลิดเรียน เมื่อได้ขนาดของเกรเดียนต์ของแต่ละจุดภาพจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าเทรโซลด์ ถ้ามากกว่าจะเป็นขอบของวัตถุ เมื่อวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบที่แท้จริง TE^k ที่คำนวณจากขอบภาพแพนโครมาติก (Pan_{col}) กับภาพในแบนด์ที่ k ที่ได้จากการหลอมรวม (F_{col}^k) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$TE^k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (F_{col}^k(i,j)=1 \& Pan_{col}(i,j)=1)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (Pan_{col}(i,j)=1)} \quad (17)$$

- ค่าความผิดพลาดทั้งหมดจากการสังเคราะห์ (Erreur Relative Globale Adimensionnelle De Synthèse: ERGAS)
- ERGAS [18] สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{RMSE^2(B_i)}{M_i^2}} \quad (18)$$

โดยที่ h แทนความละเอียดของภาพรายละเอียดเชิงสเปกตรัมสูง ส่วน l แทนความละเอียดของภาพรายละเอียดเชิงสเปกตรัมต่ำ และ M_i แทนค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพแบนด์ที่ i เมื่อค่า ERGAS มีค่าต่ำแสดงว่า คุณภาพเชิงสเปกตรัมของภาพหลอมรวมมีคุณภาพสูง

- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: CC)
- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ [19] สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i,j)-F][X(i,j)-X]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i,j)-F]^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [X(i,j)-X]^2}} \quad (19)$$

โดยที่ F และ X แทนภาพ MS ต้นฉบับและภาพหลอมรวมที่มีขนาด $M \times N$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงระดับความสัมพันธ์ระหว่าง F และ X ถ้า F เท่ากับ X เมื่อค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้หนึ่ง

- ดัชนีวัดคุณภาพ Q (Quality Index: Q)

Q ที่นำเสนอโดย Wang และ Bovik [17] เป็นดัชนีที่วัดภาพเดิม x กับภาพผลลัพธ์ y ที่มีการกำหนดไว้ดังนี้

$$Q = \frac{4\sigma_{xy}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} \quad (20)$$

เมื่อ σ_{xy} เป็นค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ระหว่างภาพเดิม x กับภาพผลลัพธ์ y ส่วน \bar{x} และ \bar{y} เป็นค่าเฉลี่ย ความแปรปรวนของ x กับ y ถูกแทนด้วย σ_x^2 และ σ_y^2 โดยลำดับ ดัชนี Q จะแปรค่าอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ เมื่อค่าดัชนีวัดคุณภาพ $Q=1$ แสดงว่า วิธีการประมวลผลนั้น ๆ ไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลเสียไป นั่นคือ $Q=1$ ก็ต่อเมื่อ $x=y$ คือ ค่าทุกจุดภาพระหว่าง x กับ y เท่ากันทั้งหมด ในกรณีที่ x ไม่เท่ากับ y ค่า Q ก็จะลดลง

5. ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากวิธีการหลอมรวมแบบต่าง ๆ ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้นำข้อมูลภาพบางส่วนมาแสดง โดยภาพนี้ได้ปรับค่าความถูกต้องทางเรขาคณิตแล้ว และภาพที่ติดตามเป็นส่วนที่ไม่มีเมฆปกคลุม

การวัดผลการทดลองใช้การวัดเชิงตัวเลข โดยภาพ PAN จะถูกสุ่มให้มีขนาด 128×128 จุดภาพ ส่วนภาพ MS จะสุ่มเพื่อลดขนาดในอัตราส่วนเดียวกัน คือ มีขนาด 18×18 จุดภาพ แล้วใช้ภาพ MS ที่ได้จาก

ดาวเทียมเป็นภาพต้นแบบ สำหรับภาพที่หลอมรวมจากเทคนิคต่าง ๆ นำไปเปรียบเทียบและคำนวณค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพตามหัวข้อที่ 4 ดังนั้น ค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพการหลอมรวมในการทดลองนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบเชิงสัมพัทธ์

รูปที่ 4 เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการหลอมรวมภาพที่สุ่มลดขนาด เพื่อใช้ในการวัดค่าดัชนีเปรียบเทียบคุณภาพด้วยวิธีการหลอมรวมต่าง ๆ ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส ประกอบด้วยวิธี (ก) TPAN-Sharpning, (ข) Context-driven, (ค) HRNDVI, (ง) NDVI และ (จ) VI ผลลัพธ์จากการหลอมรวมของแต่ละวิธีถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยค่าดัชนีชี้วัดความคิดเพี้ยนเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ประกอบด้วยดัชนีวัดคุณภาพ Q, ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างภาพเดิมกับภาพ MS ที่ได้จากการหลอมรวมหรือ CC, การวัดคุณภาพเชิงสเปกตรัม TE และ ERGAS

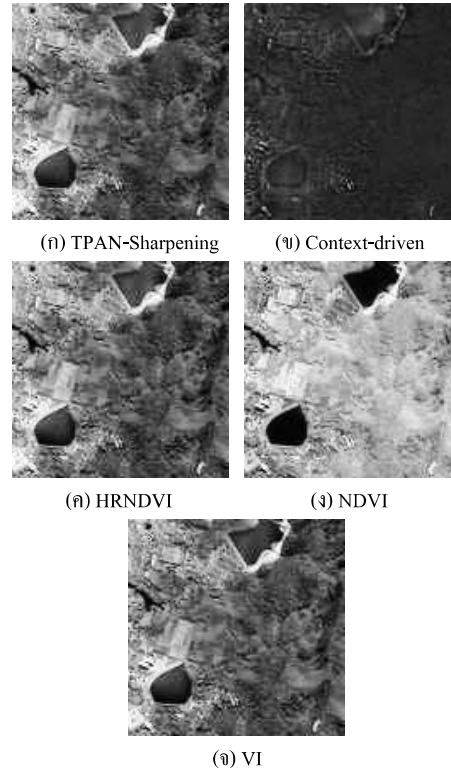
6. สรุปผล

การหลอมรวมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยวิธี IHS-based จะให้ผลลัพธ์ที่ดี ถ้ามีค่าสหสัมพันธ์สูงระหว่างองค์ประกอบของค่าความเข้ม I กับภาพ PAN จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมหรือออสปรากฏว่า ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้ม I กับภาพ PAN มีค่าประมาณ 0.65 เนื่องจากภาพ PAN ของดาวเทียมหรือออสมีช่วงคลื่นที่กว้าง เริ่มจากย่านความยาวคลื่นที่มองเห็นไปจนถึงย่านอินฟราเรดใกล้ ทำให้องค์ประกอบค่าความเข้ม I ที่ได้จากการหลอมรวม RGB มีความแตกต่างจากภาพ PAN ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาความคิดเพี้ยนของสี

ในบทความนี้ เราได้พัฒนาการหลอมรวมแบบ ARSIS โดยออกแบบการหลอมรวมให้มีความคิดเพี้ยนเชิงสเปกตรัมต่ำที่สุดและยังคงเรสโซลูชันให้ใกล้เคียงกับภาพ PAN มากที่สุด จากผลการวิเคราะห์การหลอมรวมภาพที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่า วิธีการหลอมรวมภาพที่พัฒนาขึ้นมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่สูงทั้งค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบนด์และค่าสหสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเดิมกับข้อมูลที่หลอมรวมแล้ว นอกจากนี้วิธีที่นำเสนอยังมีค่า Root Mean Square Errors (RMSE) ที่ต่ำมาก ซึ่งทั้งสามดัชนีชี้วัดนี้บ่งบอกว่า ความคิดเพี้ยนเชิงสเปกตรัมของวิธีที่พัฒนาขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ดี สำหรับความผิดพลาดเชิงสเปกตรัมที่วัดด้วยค่า TE ได้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่สูง คือ ประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณศูนย์ภูมิภาคเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (ภาคใต้) ที่สนับสนุนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหรือออส



รูปที่ 4 ภาพหลอมรวมของวิธีต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Thomas, T. Ranchin, L. Wald, and J. Chamusot, "Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 46, No. 5, pp. 1301-1312, 2008.
- [2] A. Kanno, Y. Koibuchi, and M. Isobe, "Statistical Combination of Spatial Interpolation and Multispectral Remote Sensing for Shallow Water Bathymetry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 8, no. 1, pp. 64-67, Jan. 2011.
- [3] B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti, and A. Garzelli, "Context-Driven Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Data Based on Oversampled Multiresolution Analysis," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 40, no. 4, pp. 2300-2312, 2002.
- [4] A. K. Jain, Fundamentals of Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- [5] โลกทัศน์จากดาวเทียมหรือออส, สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 1, ธันวาคม 2553
- [6] T. M. Tu, S. C. Su, H. C. Shyu, and P. S. Huang, "A new look at IHS-like image fusion methods," Inf. Fusion, vol. 2, no. 3, pp. 177-186, Sep. 2001.
- [7] M. Choi, "A New Intensity-Hue-Saturation Fusion Approach to Image Fusion With a Tradeoff Parameter," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 44, No. 6, pp. 1672-1682, 2006.

- [8] T. M. Tu, W. C. Cheng, C. P. Chang, P. S. Huang, and J. C. Chang, "Best Tradeoff for High-Resolution Image Fusion to Preserve Spatial Details and Minimize Color Distortion," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 4, no. 2, pp. 302–306, April 2007.
- [9] P. Pradhan, R. King, N.H. Younan, and D.W. Holcomb, "Estimation of the Number of Decomposition Levels for a Wavelet-Based Fusion Multiresolution Multisensory Image Fusion," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 44, no. 12, pp. 3674–3686, 2006.
- [10] B. Aiazzi, S. Baronti and M. Selva, "Image Fusion through Multiresolution Oversampled Decompositions," Image Fusion Algorithms and Applications, Edited by Tania Stathaki, Academic Press, 2008.
- [11] T. Ranchin, B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti, and L. Wald, "Image fusion—The ARSIS concept and some successful implementation schemes," ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 58, no. 1/2, pp. 4–18, Jun. 2003.
- [12] Y. Xie, Z. Sha, and M. Yu, "Remote sensing imagery in vegetation mapping: A review," J. Plant Ecol., vol. 1, no. 1, pp. 9–23, Mar. 2008.
- [13] J. A. Malpica, "Hue Adjustment to IHS Pan-Sharpener IKONOS Imagery for Vegetation Enhancement," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 4, no. 1, pp. 27–31, Jan. 2007.
- [14] M. Chikr El-Mezouar, N. Taleb, K. Kpalma, and J. Ronsin, "A New Intensity-Hue-Saturation Fusion Technique Imagery with Color Distortion Reduction for IKONOS," ICGST Int. GVIP J., vol. 9, no. 4, pp. 53–60, Dec. 2009.
- [15] T. M. Tu, H. T. Lu, Y. C. Chang, J. C. Chang, and C. P. Chang, "A New Vegetation Enhancement/Extraction Technique for IKONOS and QuickBird Imagery," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 6, no. 2, pp. 349–353, Apr. 2009.
- [16] M. Chikr El-Mezouar, N. Taleb, K. Kpalma, and J. Ronsin, "An IHS-Based Fusion for Color Distortion Reduction and Vegetation Enhancement in IKONOS Imagery," IEEE Geosci. Remote Sens., vol. 49, no. 5, pp. 1590–1602, Apr. 2011.
- [17] Z. Wang and A. C. Bovik, "A Universal Image Quality Index," IEEE Signal Processing Letters, vol. 9, pp. 81–84, Mar. 2002.
- [18] L. Wald, T. Ranchin, and M. Mangolini, "Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images," Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 63, no. 6, pp. 691–699, Jun. 1997.
- [19] S. Li, and B. Yang, "A New Pan-Sharpener Method Using a Compressed Sensing Technique," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 49, no. 2, pp. 738–746, Feb. 2011.

ตารางที่ 1 การวัดคุณภาพทั้งเชิงสเปกตรัมและสเปกตรัมจากค่าของตัววัดต่าง ๆ ของวิธีการหลอมรวม

ดัชนีวัดคุณภาพ	Band	TPAN-sharpening	Context-Driven	HRNDVI	NDVI	VI
Q	R	0.9492	0.9373	0.9377	0.9023	0.9348
	G	0.9722	0.9637	0.9492	0.8721	0.9551
	B	0.9818	0.9779	0.9673	0.9425	0.9590
	NIR	0.8401	0.7264	0.8606	0.8719	0.8703
ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างภาพเดิมกับภาพหลอมรวม	R	0.7423	0.3698	0.7740	0.4769	0.7421
	G	0.7749	0.4719	0.7141	0.0461	0.7043
	B	0.7577	0.4529	0.7078	0.2105	0.5909
	NIR	0.7975	0.4275	0.8620	0.8752	0.8734
TE	R	0.8550	0.6737	0.8550	0.9580	0.8969
	G	0.8893	0.6756	0.8492	0.7805	0.9198
	B	0.8340	0.6393	0.8454	0.9714	0.9256
	NIR	0.6145	0.7004	0.6145	0.7080	0.7233
ERGAS		1.7946	2.3962	2.1031	3.6113	2.0777

ภาคผนวก ข.**ผลงานตีพิมพ์**

เรื่อง	Vegetation Zone Enhancement of THEOS Imagery
งานประชุมวิชาการ	SICE 2013 Annual Conference : International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration.
สถานที่	Nagoya University, Nagoya, JAPAN
วันที่	September 14 – 17, 2013

Vegetation Zone Enhancement of THEOS Imagery

Sathit Intajag, Supaporn Kansomkeat, and Suwannee Phayapchaiyakun

Department of Computer Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand

(Tel : +66-74-28-8573; E-mail: sathit.i@psu.ac.th, supaporn.k@psu.ac.th, 5410220069@email.psu.ac.th)

Abstract: In this paper, THEOS (THailand Earth Observation System) images are synthesized to enhance the vegetation zones. The multispectral images were transformed by a spectral ratio to improve the color contrast of the vegetation areas. Combination of the ratios was selected for representing the multispectral bands to model the red, green, and blue channels for generating the true-color-composite image. A set of the selected band ratios was enhanced the spatial information by the pansharpening technique. By rendering color contrasts in spectrum with the good band ratio selection for the greenness areas, the proposed scheme offers a more informative picture for visual inspection and interpretation.

Keywords: Vegetation indexes, Spectral and Spatial Enhancement, Spectral ratios, Band selection, Data Fusion, Pansharpening.

1. INTRODUCTION

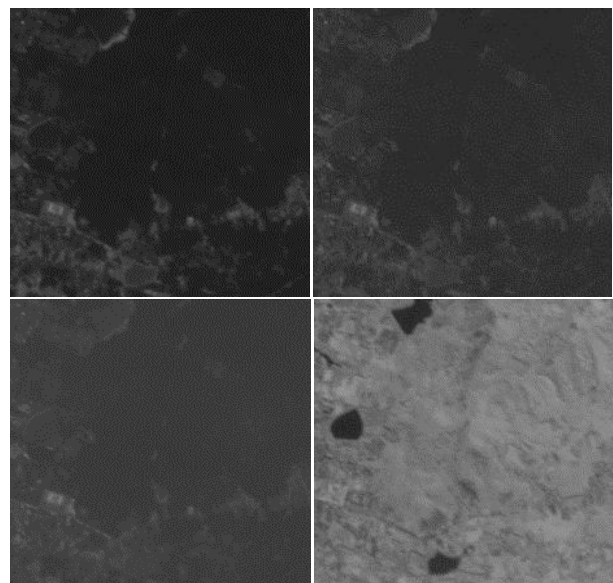
THEOS satellite [1] can be employed for frequent revisiting of areas for natural resource and monitoring environment consisting of numerous applications such as in agricultural monitoring, coastal monitoring, forestry management, and land using analyses. These applications need a high resolution image and high spectral information for visual interpretation and machine vision.

This paper contributes a vegetation zones enhancement algorithm of the THEOS imageries. The algorithm provides good quality of images for vegetation visualization. Miloud Chikr El-Mezouar et al. [2] proposed a method that was one of very good enhancement methods by employing the vegetation indexes. However, those methods need to declare the threshold value to identify the vegetation areas. If user cannot provide an optimal threshold value, these methods will affect the greenness not only the vegetation zones but also the other areas.

Our new inspired technique proposes the fusion process for enhancing a vegetation zone by using a spectral ratio [3]. The procedure is achieved in two steps: spectral enhancement by using the spectral ratio [3,4] and pansharpening by using intensity-hue-saturation and Brovey transforms (IHS-BT) fusion technique [5,6]. In the spectral improvement, the ratio images were selected for enhancing the vegetation areas by using a combination of the optimal index factor and index of three-dimensionality [7] to reduce the number of bands and using a correlation between the band ratios and the multispectral data to choose three bands: red-green-blue (RGB) for generating a true-color-composite image.

2. SPECTRAL RATIOS

Spectral ratio is an image operation, also known as image division. The division in remote sensing is probably an arithmetic operator that is most widely applied to geological, ecological and agricultural applications. This operator is employed to detect the



(a) Multispectral bands of THEOS: Red, Green, Blue, and NIR (top left to bottom right, respectively).



(b) Panchromatic image

Fig.1 PSU image was taken in April 14, 2009.

magnitude of the differences between spectral bands. These differences may be symptomatic of particular land cover types. Thus, a band ratio between near-infrared (NIR) and red might be expected to be close to one for an object which reflects equally in both of these spectral bands. On the other hand, ratio values will be more than one if the NIR reflectance is higher than the reflectance in the visible red band, such as in the case of vigorous vegetation.

The ratio is given by

$$R_{i/j} = \frac{B_i}{B_j} \quad (1)$$

where B_i and B_j denote the i^{th} and j^{th} bands of the multispectral images.

A commonly applied the operator is to avoid overflow, in case a number is divided by zero. For an 8-bit image, the value range is shifted upward by 1; thus, the image at interval [0, 255] is changed to [1, 256]. Ratio image $R_{i/j}$ is real number, which the value range is [1/256, 1] in the case of absorption.

In remote sensing, brightness approximation of a spectral band ratio is a major advantage to enhance the spectral or color characteristics of the image features by decreasing variations in scene illumination [4]. In the ideal case of band ratio, the pixel values in each area of multispectral images that represents the objects with the same spectral signature will result in the same band ratio values no matter whether they are under direct illumination or in shadow.

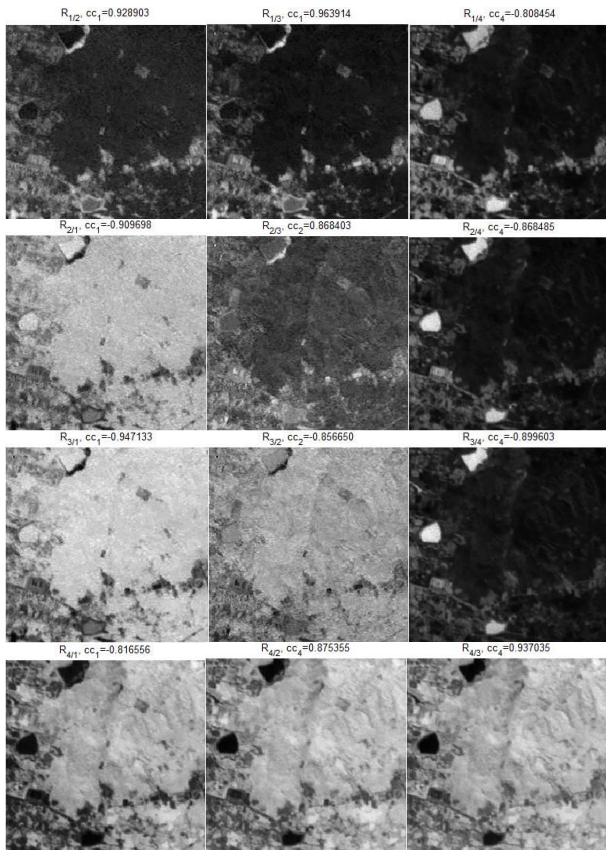


Fig.2 Spectral ratios of the multispectral images.

Fig. 2 illustrates the spectral ratios of the multispectral images which cover Prince of Songkla University (PSU) as seen in Fig. 1. The number of ratio combinations from a multispectral data set n bands is $n(n-1)$; thus, for the THEOS data $n = 4$, $4(4-1)$ or 12 different ratio images, $R_{i/j}$, $i, j = 1, 2, 3, 4$, and $i \neq j$.

In mathematical concept, the ratio images $R_{i/j}$ and $R_{j/i}$ are reciprocal and have the same information; however, they are different for image display to visual inspection. In this case, notice on the ratio images $R_{1/2}$ and $R_{2/1}$ are different as seen from a correlation coefficient cc_l :

$$cc_l = \frac{E(R_{i/j}B_l) - E(R_{i/j})E(B_l)}{\sqrt{V(R_{i/j})V(B_l)}}, \quad (2)$$

Where E denotes the expected function. $l = 1, 2, 3, 4$ for four bands of multispectral data. Thus, $cc_1 = 0.928903$ denotes the correlation between spectral ratio $R_{1/2}$ and red band B_1 ; whereas $cc_1 = -0.909698$ endows the correlation with spectral ratio $R_{2/1}$ coincides with the red band B_1 . However, the spectral ratio $R_{2/1}$ is a negative picture.

cc_l in Fig. 2 represents the highest matching between the spectral ratios and the multispectral images from Fig. 1(a), such as $R_{1/2}$ has the highest correlation with the red band as shown in Fig. 3 at the band ratio 1/2. However, the ratio images correlated by only bands $l = 1, 2$, and 4 , which did not include the blue band ($l = 3$) having to declare for generating a true color image. Fig. 3 illustrates the correlation coefficient cc_l between each band ratio of Fig. 2 and the multispectral bands: Red, Green, Blue, and NIR.

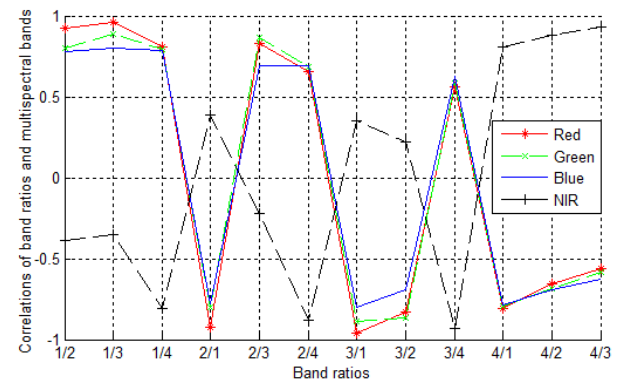


Fig.3 Correlation coefficient between the band ratios and the multispectral images.

For enhancement a vegetation area, the negative images were transformed to the same properties of the multispectral data. In this case, cc_l values of the visible bands least than zero were formulated by

$$R'_{i/j} = \max(R_{i/j}) - R_{i/j} \quad (3)$$

where $\max(R_{i/j})$ denotes the maximum value of band

ratio $R_{i/j}$. Consequently, the correlation coefficients of the negative images have to change from the minus to plus sign.

Band selection to enhance the vegetation zones is not easy to formulate. With the increasing number of bands from the combinations of band ratios, the proposed method has to choose three bands that enhance the vegetation areas for appropriate computer display. In our algorithm, a correlation coefficient was used to reduce and to select the band ratios. To reduce the number of ratio combinations, the correlation within band ratios that consists of two indexes for band selection [7] was employed. The first index employs the optimal index factor (OIF) proposed by Chavez et al. [8], which provided to select the ratio images to represent the RGB of the multispectral bands. The OIF for selecting three bands: i, j , and k is defined as

$$OIF = \frac{\sigma_i + \sigma_j + \sigma_k}{|\rho_{ij}| + |\rho_{ik}| + |\rho_{jk}|} \quad (4)$$

where σ_i is the standard deviation of the band ratio i and ρ_{ij} is the correlation coefficient of the band ratios i and j . The second index applies three-dimensionality index ($3Dinx$) for selection three band ratio: i, j , and k , which is defined as

$$3Dinx = \sqrt{1 + 2\rho_{ij}\rho_{ik}\rho_{jk} - \rho_{ij}^2 - \rho_{ik}^2 - \rho_{jk}^2} \quad (5)$$

To obtain the three-band enhanced vegetation from twelve band ratios, our algorithm generates 3-combinations of 12 band ratios and measures the contained information of the three bands by OIF , $3Dinx$ and cc_l .

In the first step to select the three bands, the maximum value of $3Dinx$ is chosen, which contains the bands: i, j , and k ($i, j, k = 1, 2, 3, \dots, 12$; for four multispectral bands). Therefore, the set of $\{i, j, k\}$ is discovered from the maximum value of OIF . This step is repeated 20 rounds to generate the 20 sets of $\{i, j, k\}$ which is ordered by descending of $3Dinx$ values.

Table 1 Measurement indexes: $3Dinx$, IOF , and cc_l for selecting the set of three bands $\{i, j, k\}$.

	$\{i, j, k\}$	$3Dinx$	IOF	cc_l
1	{4, 8, 9}	0.687	0.264	1.515
2	{4, 5, 9}	0.672	0.246	2.132
3	{1, 8, 9}	0.665	0.224	2.059
4	{1, 5, 6}	0.647	0.207	2.676
5	{4, 6, 8}	0.635	0.214	1.619
6	{4, 5, 6}	0.622	0.199	2.236
7	{1, 6, 8}	0.615	0.180	2.162
8	{1, 5, 3}	0.598	0.165	2.607
9	{4, 8, 12}	0.588	0.347	1.540
10	{4, 5, 12}	0.576	0.330	2.158

For the second step, the enhanced vegetation bands are selected with the highest matching from the 20 sets of $\{i, j, k\}$ by using $cc_l = cc_i + cc_j + cc_k$. Table 1

demonstrates the three measurement indexes: $3Dinx$, IOF , and cc_l for selecting the set of three bands $\{i, j, k\} = \{1, 5, 6\}$ to represent the RGB bands.



Fig.4 RGB composition of original bands (left) and band ratios of $R_{1/2}$, $R_{2/3}$, and $R_{2/4}$ (right).

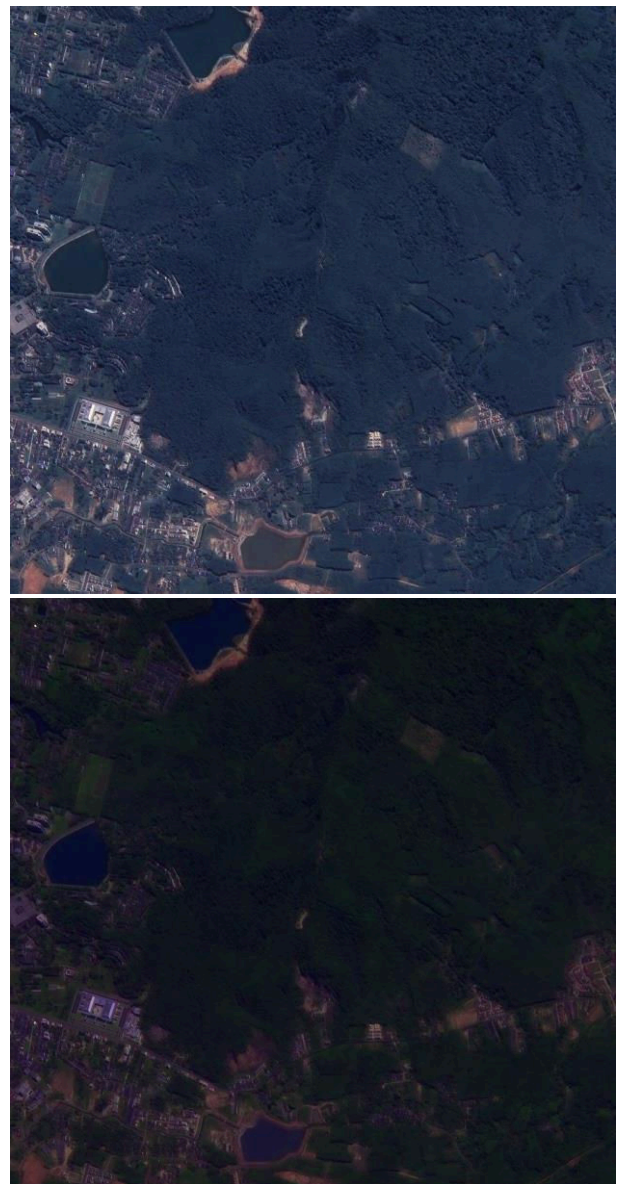


Fig.5 Pansharpening of original spectrum (top) and pansharpening of spectral ratios (bottom).

The proposed algorithm selects the band ratios for enhancement the vegetation areas, which the bands

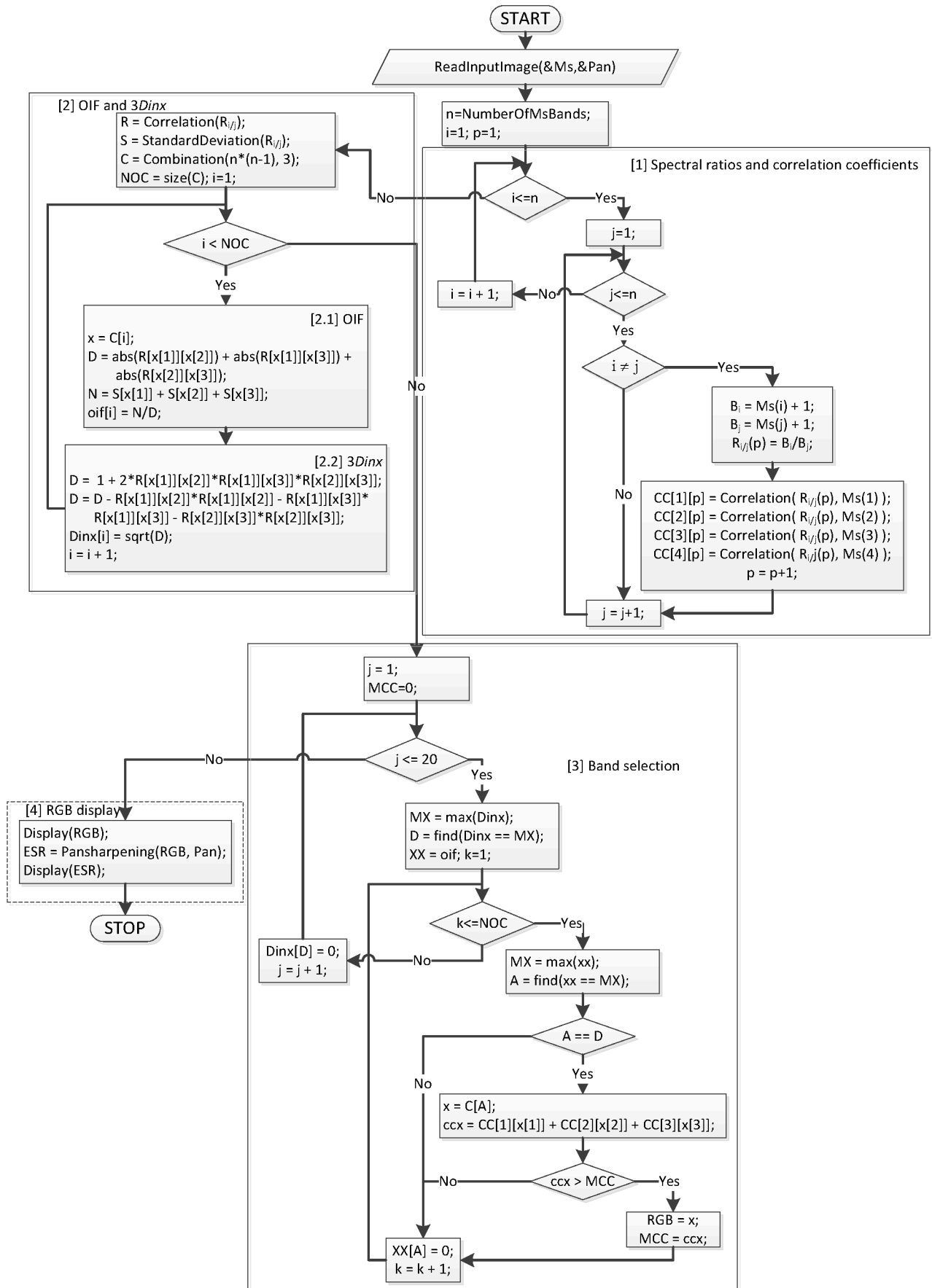


Fig.6 Vegetation zone enhancement algorithm.

represent the RGB channels. RGB composition of the selected ratios {1, 5, 6} equals to the band ratios $R_{1/2}$, $R_{2/3}$, and $R_{2/4}$; respectively, as illustrated in Fig. 4. The enhanced spectra from Fig. 4 are improved spatial information by using pansharpening [6] as shown in Fig. 5.

3. VEGETATION ENHANCEMENT ALGORITHM

The algorithm to enhance the vegetation zones of THEOS imageries by using a spectral ratio is described by a flowchart as shown in Fig. 6. The designed algorithm comprises of four blocks: [1] spectral ratios and correlation coefficients, [2] *OIF* and *3Dinx*, [3] band selection, and [4] RGB Display.

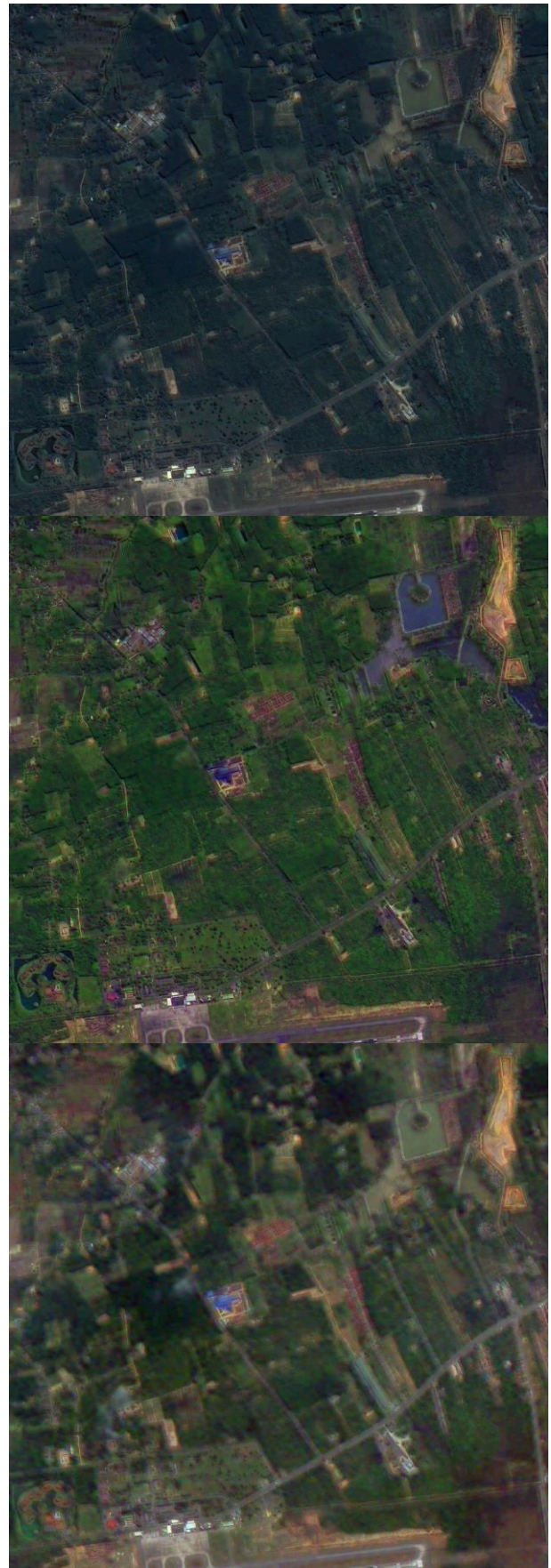
The first block is used to calculate the spectral ratios and the correlation coefficient between the ratios and multispectral data as described in eq. (1) and (2), respectively.

The second block is employed to calculate the measurement indexes which consist of *OIF* and *3Dinx* as defined in eq. (4) and (5), respectively. These indexes are used to declare a set of ratio images for representing the RGB bands. This block initially prepares the correlation coefficients and standard deviations of the ratio images in the matrix R_{ij} . R_{ij} has the size $M \times P$, where M denotes the size of each ratio image in the form of column vector. P is the number of ratio images that equal to $n(n-1)$. The member of the set to represent RGB bands is three. The number of 3-combinations of $n(n-1)$ ratio images is calculated. For four multispectral bands of THEOS, ($n=4$), the 3-band combinations of 12 equal to 1320, which are the number of combination (NOC) for sets of 3-band $\{i, j, k\}$. In the loop, *OIF* and *3Dinx* of bands $\{i, j, k\}$ are calculated in the block [2.1] and [2.2], respectively.

The third block is a band selection. *3Dinx* values are searched the maximum values which coincide with the maximum values of *OIF*. If the set $\{i, j, k\}$ coincides between the maximum value of *3Dinx* and *OIF*; then calculate a summation of the 3-bands $\{i, j, k\}$ correlations. The summation value is compared to find the maximum value which implies to the 3-bands $\{i, j, k\}$ having the highest matching the multispectral band RGB.



(a) Original RGB multispectral image (left) and the ratio image (right).



(b) Spatial enhancements: Original, Band ratios, BCET (top to bottom).

Fig.7 Hat Yai International Airport.

The last block is employed to display RGB bands and enhance the spatial resolution by a pansharpening method. The selected spectral ratio bands RGB is increased the spatial resolution as the same size by the panchromatic image, which employs IHS-BT fusion technique [6].

4. DATA AND EXPERIMENTAL RESULTS

The image data sets of THEOS used in this paper were taken over Songkhla province, Thailand. Sub-images of PSU as shown in Fig. 1, taken in April 14, 2009. The panchromatic image has the size of 960×960 pixels and the corresponding R, G, B, and NIR of the multispectral bands has the size of 128×128 pixels. The picture consists of rubber plantations, forest, residential area, road and water.

Other sub-image data set used for testing the algorithm was taken as the same scene by Fig. 1. The panchromatic image has the size of 1440×1440 pixels and the corresponding RGB of the multispectral bands has the size of 192×192 pixels as showed in Fig. 7(a). This picture is Hat Yai International Airport consisting of agricultural areas especially rubber plantations, residential area, road, runway and water.

Vegetation areas of Fig. 7(a) were enhanced by the spectral ratios with the selected band, $\{i, j, k\}=\{2,5,3\}$. This figure is improved the spatial information by the pansharpening method as seen in Fig. 7(b) [6]. The top of Fig. 7(b) was spatial enhancement of the original multispectral bands. The middle of Fig. 7(b) was shown the proposed method. The bottom of Fig. 7(b) was color enhancement by using balance contrast enhancement technique (BCET) [7, 9] and following by the pansharpening.

5. CONCLUSION

The paper proposed spectral enhancement algorithm by using a spectral ratio to contrast the vegetation zones in the multispectral images of THEOS satellite. The image ratio combinations generated the true-color composition. To generate true-color composition, our method uses three measurement indexes for selecting the ratio images. The three indexes consist of optimal index factor, index of three-dimensionality and correlation between the ratio images and the multispectral data. The optimal index factor and the index of three-dimensionality were employed to reduce the solution space. The correlation was provided to select the set of three ratio images by the maximum value to match by multispectral images and to define red, green, and blue bands for a true-color display system. Consequently, the spectral enhanced images were combined with the panchromatic image to increase the spatial resolution by using the pansharpening method. From the experimentation, the proposed algorithm has a drawback for some sets of image data; especially, the data have less vegetation area and more water area. However, the synthesized bands by spectral

ratios of the proposed method could improve the image contrast and provide a more informative picture for visual inspection and interpretation.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Faculty of Science Research Fund, Prince of Songkla University. The authors would like to thanks Geo-Informatics and Space Technology Development Agency for the THEOS images.

REFERENCES

- [1] Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization) Ministry of Science and Technology, *Space Vision from THEOS*, Bangkok: Amarin Printing, 2010.
- [2] M. Chikr El-Mezouar, N. Taleb, K. Kpalma and J. Ronsin, "An IHS-based fusion for color distortion reduction and vegetation enhancement in IKONOS imagery", *IEEE Geosci. Remote Sens.*, Vol. 49, No. 5, pp. 1590-1602, 2011.
- [3] J. B. Adams and A. R. Gillespie, *Remote Sensing of Landscapes with Spectral images a physical modeling approach*, Cambridge, 2006.
- [4] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 6th Edition, John Wiley & Sons, 2008.
- [5] T.-M. Tu, C.-L. Hsu, P.-Y. Tu and C.-H. Lee, "An Adjustable Pan-Sharpener Approach for IKONOS/QuickBird/GeoEye-1/WorldView-2 Imagery", *IEEE Journal of Selected Topic in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 5, No. 1, pp. 125-134, 2012.
- [6] Sathit Intajag and Supaporn Kansomkeat, "Enhanced vegetation index of THEOS imagery by pan-sharpening", *Inter. Conf. on Inf. Sci. and Digital Content technol. (ICIDT) 8th*, pp. 524 – 529, 2012.
- [7] Jian Guo Liu and P. J. Mason, *Essential image processing and GIS for remote sensing*, John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [8] P.S. Chavez, G.L. Berlin, and L.B. Sowers, "Statistical method for selecting Landsat MSS ratios", *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8, 1982, pp. 23–30.
- [9] J.G. Liu, "Balance contrast enhancement technique and its application in image colour composition", *International Journal of Remote Sensing*, 12, 1991, pp. 2133–2151.

ภาคผนวก ค.

ผลงานตีพิมพ์

เรื่อง	Spectral Preservation of Pan-sharpening for THEOS Imagery
งานประชุมวิชาการ	ICCAS 2014 : 14 th International Conference on Control, Automation and Systems
สถานที่	KINTEX, Gyeonggi-do, Korea
วันที่	October 22 – 25, 2014

Spectral Preservation of Pan-sharpening for THEOS imagery

Suwannee Phayapchaiyakun¹, Sathit Intajag², and Thani Jintasuttisak³

Department of Computer Science, Faculty of Science
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, 90110

¹5410220069@email.psu.ac.th, ²sathit.i@psu.ac.th, ³thani.jin@gmail.com

Abstract: Image fusion in remote sensing is usually called pan-sharpening, which is a useful method to synthesis a high resolution multispectral image (MS) from the combining of a high resolution panchromatic image (PAN) with a low resolution MS image. The popular fusion methods are intensity-hue-saturation (IHS)-based methods. However, the IHS-based methods have two major problems: (i) out-of-gamut due to transformation between red-green-blue (RGB) and IHS color systems and (ii) color distortion due to variation of saturation and intensity in image fusion. The proposed method studied on the relationship between intensity and saturation to preserve spectral information of the fusing THEOS images. Thus, we found a suitable color space, iHSL (improved hue-saturation-lightness) for pan-sharpening that can isolate the intensity or lightness component. The fusion method employs smooth filter-based intensity modulation technique to merge the spatial information from PAN with the intensity component from MS images. From the studied results, our method could preserve the spectral information better than the well-known IHS-based methods.

Keywords: Pan-sharpening, Image fusion, Intensity-hue-saturation (IHS) transform, improved Hue-Lightness-Saturation (iHLS) transform, THEOS imagery.

1. INTRODUCTION

Pan-sharpening is a process of the combination between a high-resolution panchromatic image and low-resolution multispectral images. It is an information synthesis for visual inspection and image interpretation [1]. In general, pan-sharpening algorithm consists of following steps:

- Up-sample MS to the same spatial resolution of PAN.
- Retrieve high spatial information of PAN and find the missing information of MS.
- Combine the high spatial information with the low-resolution MS by modeling the relationship between MS and PAN bands.

From the past decades, many pan-sharpening methods have been proposed and can be divided into 3 types [1]-[2]. The first type consists of methods based on multi-resolution analysis (MRA) which employs spatial filters to exact the high resolution from PAN and inject into MS, e.g., wavelet transformation, Laplacian pyramids, contourlet transformation, etc. The second type composes methods based on component substitution (CS) which uses color space transformation, such as, IHS-based method and principle component analysis (PCA). The last type is established in the conjunction with CS and MRA. Popular fusion methods are IHS-based techniques [3]. These techniques are well known as the quick pan-sharpening. However, these methods have two major problems: out-of-gamut and color distortion due to replacing the intensity component by PAN. Generally, the IHS-based methods do not preserve the spectral information; because, the saturation depending on the intensity component. When the intensity values were modified from the fusion process, the saturation values were changed too. The changing values of the saturation and

the intensity might be effected to out of space of RGB color model.

Out-of-gamut problem can be solved by clipping techniques [4], which consist of RGB clipping, intensity clipping, and saturation clipping. In addition, there are other ways to prevent the gamut problem without using clipping techniques, such as, improved nonlinear-IHS (iN-IHS) transformation [4]. The saturation component of iNIHS transform is adjusted within the maximum attainable saturation range.

Considering pan-sharpening techniques based on IHS transformation can describe by scaling and shifting operation [3]-[4] in the RGB space as follows:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \gamma \times \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

when $\gamma = 1$, the transformation uses only shifting operation, and when $\delta = 0$, the transformation establishes only scaling operation. Pan-sharpening techniques based on IHS transformation are identified in terms of γ and δ usually having gamut problem and color distortion; because, both saturation and intensity components were modified.

To avoid out-of-gamut, enhance spatial data, and preserve spectral data, we introduce another color model to process a pan-sharpening technique that is an improved hue-saturation-lightness or iHSL transformation [5]. In this color model, chromatic data (hue and saturation components) of images are isolated from achromatic or lightness component. However, the fusion process has to modify the intensity component for improving the spatial information of MS images. In the intensity modify process, smooth filter-based intensity modulation or

SFIM technique [3] is adapted carefully to improve the spatial information of THEOS imagery [6].

This paper is organized as following: Section 2 reviews a pan-sharpening based on IHS transformation, which consists of a simple fusion and no gamut problem fusion in the iNIHS color model. The proposed algorithm is described in Section 3. Experimental results and comparisons are discussed in Section 4. Finally, the last section includes the conclusions and discussions.

2. IHS-BASED FUSION METHODS

Image fusion in remote sensing is usually called pan-sharpening which is a useful method to fuse a high-resolution PAN with a low-resolution MS to enhance spatial resolution of MS images. IHS-based fusion is a popular method; because, it operates easily and fast. The fusing results depend on merging data between the intensity component of MS and PAN image, which introduces in two kinds of the fusion methods. First kind is a simple method arranging from adding PAN directly to MS like Brovey transform (BT) to smooth filter-based intensity modulation (SFIM). This kind of fusion has not much considering the gamut problem. Second type uses the merging data as the same with first kind; however, this type of fusion tries to prevent out-of-gamut by improving IHS color model to nonlinear.

2.1 Simple image fusion methods

Pan-sharpening methods in simple fusion of IHS-based color model consists of BT and SFIM methods. These methods can be modeled in general form of shifting and scaling as defined in Eq. (1). However, the merging data establishes the parameter $\gamma = I'/I$, and $\delta = I' - I$, where I denotes the intensity component from MS images as given by:

$$I = (R + G + B)/3.$$

When R, G , and B stand for red, green, and blue channels of MS images. I' is a panchromatic image, PAN .

The simple fusion methods could be categorized in six methods as follows:

1) IHS fusion method uses only shifting operation that is $\gamma = 1$ and $\delta = PAN - I$; thus, the fusion is formulated as:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + (PAN - I) \\ G + (PAN - I) \\ B + (PAN - I) \end{bmatrix} \quad (2)$$

The fused image synthesizes spatial information by substitution $I' = I + (PAN - I) = PAN$. The quality of fusion results depend on PAN data. When PAN data do not coincidence with the intensity component, I . The fused image might be a low contrast, if the fusion process introduces a gamut problem.

2) BT fusion method uses only a scaling operation, since

$\delta = 0$ and $\gamma = PAN/I$.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{I} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

The fused image synthesizes spatial information from the scaling values γ , which produces color distortion; because, the saturation values is changed by the scale value. 3) SFIM fusion method employs only a scaling factor, $\gamma = PAN/PAN_L$ and $\delta = 0$.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{PAN_L} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

The fused image synthesizes spatial information from substitution $I' = (PAN/PAN_L)(I + (PAN_L - I)) = PAN$, which produces color distortion as the same with BT method. However, the quality results depend on PAN_L providing from smoothing filter.

4) IHS-BT fusion method uses both scaling and shifting operations: $\gamma = PAN/(I + k(PAN - I))$ and $\delta = k(PAN - I)$. Where k denotes a tradeoff parameter [3].

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{I + k(PAN - I)} \begin{bmatrix} R + k(PAN - I) \\ G + k(PAN - I) \\ B + k(PAN - I) \end{bmatrix} \quad (5)$$

The fused image is synthesized by substitution of $I' = (PAN/(I + k(PAN - I)))(I + k(PAN - I)) = PAN$, which produce color distortion from changing values of the saturation component.

5) BT-SFIM fusion method provides both scaling and shifting operations: $\gamma = PAN/PAN_L$ and $\delta = PAN_L - I$.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{PAN_L} \begin{bmatrix} R + (PAN_L - I) \\ G + (PAN_L - I) \\ B + (PAN_L - I) \end{bmatrix} \quad (6)$$

The fused image is synthesized from substitution of $I' = (PAN/PAN_L)(I + (PAN_L - I)) = PAN$, which produces color distortion from changing values of the saturation component.

6) IHS-BT-SFIM fusion method uses both scaling and shifting operations: $\gamma = PAN/(I + k_1(PAN_L - I))$ and $\delta = k_2(PAN_L - I)$. The k_i is defined as the module selection parameter [3].

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{PAN}{I + k_1(PAN_L - I)} \begin{bmatrix} R + k_2(PAN_L - I) \\ G + k_2(PAN_L - I) \\ B + k_2(PAN_L - I) \end{bmatrix} \quad (7)$$

The fused image is synthesized from substitution of $I' = (PAN/(I + k_1(PAN_L - I)))(I + k_2(PAN_L - I)) = PAN$, which produces color distortion from changing values of the saturation component.

The above methods are easy ways to fuse satellite images; however, the fused images have out-of-gamut and color distortion as seen in Fig. 1. To improve the color distortion, IHS-BT method uses tradeoff parameter, (k), to control the change rate of saturation and intensity. Another interesting method is BT-SFIM methods use of a low-pass filter to produce the sufficient spatial resolution from PAN for pan-sharpening. However, they still have out-of-gamut problem.

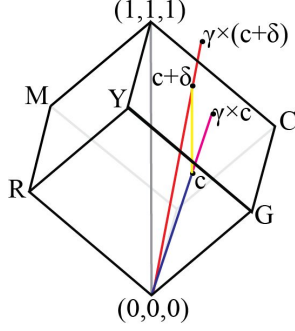


Fig. 1 The effects of shifting and scaling operations of IHS-based methods.

2.2 iNIHS fusion method

To solve out-of-gamut problem, Chien *et al.* proposed iNIHS color space [4]. The concept of iNIHS color space is divided RGB cube into two parts; then, the saturation component is adjusted within the maximum attainable saturation range of the RGB cube.

2.2.1 RGB to iNIHS transformation

In iNIHS color model, intensity component, I , is given by Eq. (8) and hue component, H , is formulated by Eq. (10). A condition to separate RGB cube into the lower part and upper part for adjusting the saturation values is $I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ}$; thus, the saturation component, S , is provided by Eq. (11).

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (8)$$

$$\theta = \frac{(2R - G - B)/2}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \quad (9)$$

$$H = \begin{cases} \cos^{-1} \theta & \text{if } B \leq G \\ 2\pi - \cos^{-1} \theta & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$S = \begin{cases} 1 - \frac{3 \times \min(R, G, B)}{R + G + B} & \text{if } I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \\ 1 - \frac{3(1 - \max(R, G, B))}{3 - (R + G + B)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

2.2.2 iNIHS to RGB transformation

iNIHS transforms to RGB color model, which consists of two part to archive the maximum attainable saturation range. The lower part of iNIHS space is calculated by:

$$\text{RG sector } \left(0^\circ \leq H < 120^\circ \text{ and } I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \right)$$

$$B = I(1 - S)$$

$$R = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (12)$$

$$G = 3I - (R + B)$$

$$\text{GB sector } \left(120^\circ \leq H < 240^\circ \text{ and } I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \right)$$

$$H = H - 120^\circ$$

$$R = I(1 - S)$$

$$G = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (13)$$

$$B = 3I - (R + G)$$

$$\text{GB sector } \left(240^\circ \leq H < 360^\circ \text{ and } I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \right)$$

$$H = H - 240^\circ$$

$$G = I(1 - S)$$

$$B = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (14)$$

$$R = 3I - (G + B)$$

The upper part of iNIHS space is calculated as the following.

$$\text{YC sector } \left(60^\circ \leq H < 180^\circ \text{ and } I > \frac{1}{3} + \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \right)$$

$$H = H - 240^\circ$$

$$G = I(1 - S) + S$$

$$B = 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (15)$$

$$R = 3I - (G + B)$$

$$\text{CM sector } \left(180^\circ \leq H < 300^\circ \text{ and } I > \frac{1}{3} + \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \right)$$

$$B = I(1 - S) + S$$

$$R = 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (16)$$

$$G = 3I - (B + R)$$

$$\text{MY sector } \left(-60^\circ < H \leq 0^\circ \text{ or } 0^\circ < H \leq 60^\circ \right) \text{ and } \left(I > \frac{1}{3} + \frac{|H_{mod120^\circ} - 60^\circ|}{180^\circ} \right)$$

$$H = H - 120^\circ$$

$$R = I(1 - S) + S$$

$$G = 1 - (1 - I) \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \quad (17)$$

$$B = 3I - (R + G)$$

2.2.3 iNIHS fusion

From Eq. (13) of GB sector, iNIHS fusion by intensity substitution $I' = \gamma \times I$ is a scaling in RGB color space, which is given by:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'(1 - S) \\ I' \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] \\ 3I' - (R' + G') \end{bmatrix} = \gamma \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (18)$$

Pan-sharpening directly substitutes the adapted intensity component, I' , by I . In our study, I' are defined by:

$$I' = PAN = \frac{PAN}{I} \times I = \gamma_1 \times I \quad (19)$$

$$I' = \frac{PAN}{PAN_L} \times I = \gamma_2 \times I \quad (20)$$

where PAN_L is the smoothed version of PAN image by using 25×25 mean filter. Eq. (19) is the intensity substitution by PAN and Eq. (20) substitutes by the sufficient high spatial information of PAN .

From the fusion process in Eq. (18), the intensity component, I , is replaced by PAN image. The fused image will keep hue data as the same with MS data as shown in Eq. (22); however, saturation is changed as seen in Eq. (24).

$$I' = \frac{R' + G' + B'}{3} = \gamma \times I = PAN \quad (21)$$

$$\theta' = \frac{\gamma(2R - G - B)/2}{\gamma\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} = \theta \quad (22)$$

$$S = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R + G + B} = I - \frac{\min(R, G, B)}{I} \quad (23)$$

$$S' = I' - \frac{\min(R', G', B')}{I'} = \gamma S \quad (24)$$

From Eq. (24) as seen $S' \neq S$, variation of saturation causes color distortion; thus, the relationship between S' and S is shown as follows:

$$\frac{S'}{S} = \gamma = \frac{I'}{I} \quad (25)$$

From Eq. (19)-(20), the spatial data are put into the fusion process by

$$\gamma_1 = \frac{PAN}{I}, \quad \gamma_2 = \frac{PAN}{PAN_L} \quad (26)$$

These methods have color distortion like BT and BT-SFIM method, respectively. In iNIHS color model, we could summarize the fusion algorithm as the following steps.

Step 1: Calculate I and H of MS images by Eq. (8)-(10).

Step 2: Identify the color points in the lower or upper part of the iNIHS space by

If $I \leq \frac{2}{3} - \frac{|H_{mod120^\circ - 60^\circ}|}{180^\circ}$, color points are in the lower part of the iNIHS space. Thus, the fusion process of this part is

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \gamma \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (27)$$

Otherwise, the color points are in the upper part of the iNIHS space and the fusion in this part is

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \gamma' \times \begin{bmatrix} 1 - R \\ 1 - G \\ 1 - B \end{bmatrix} \quad (28)$$

where $\gamma' = (1 - PAN)/(1 - I)$.

3. iHSL METHOD

Improved hue-saturation-lightness or iHSL color space isolates achromatic, L , from chromatic information, (H and S) [5]. From assumption of the isolation, RGB color is projected onto the achromatic axis and chromatic plane, which Hanbury and Serra [5] proposed three prerequisites for determining a suitable color space for image analysis.

1) Two distinct points which have the same projection onto the chromatic plane, have the same chromatic parameters.

2) The brightness parameters associated with a color vector and with its projection onto chromatic plane must be norms.

3) Every system for the representation of color images must be reversible with respect to the RGB standard.

Thus, iHSL color system belongs to the above conditions which might be adapted for improving the pan-sharpening results.

3.1 RGB to iHSL transformation

RGB to iHSL transformation can be calculated by:

$$\begin{bmatrix} L \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2125 & 0.7154 & 0.0721 \\ 1.0000 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0.0000 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (30)$$

$$H = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } C = 0 \\ \cos^{-1}\left(\frac{C_1}{C}\right) & \text{if } C \neq 0 \text{ and } C_2 \leq 0 \\ 360^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{C_1}{C}\right) & \text{if } C \neq 0 \text{ and } C_2 > 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$S = \frac{2C \sin(120^\circ - H^*)}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

$$H^* = H - k \times 60^\circ \quad (33)$$

where $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ so that $0^\circ \leq H^* \leq 60^\circ$.

3.2 iHSL to RGB transformation

iHSL to RGB transformation can be given as follows:

$$C = \frac{\sqrt{3}S}{2 \sin(120^\circ - H^*)} \quad (34)$$

$$C_1 = C \cos(H) \quad (35)$$

$$C_2 = -C \sin(H) \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.7875 & 0.3714 \\ 1.0000 & -0.2125 & -0.2059 \\ 1.0000 & -0.2125 & 0.9488 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

From Eq. (37), we can be rewritten for fusion process to separate the brightness from chromatic data by Eq. (38).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ L \\ L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7875 & 0.3714 \\ -0.2125 & -0.2059 \\ -0.2125 & 0.9488 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

3.3 iHSL Fusion Algorithm

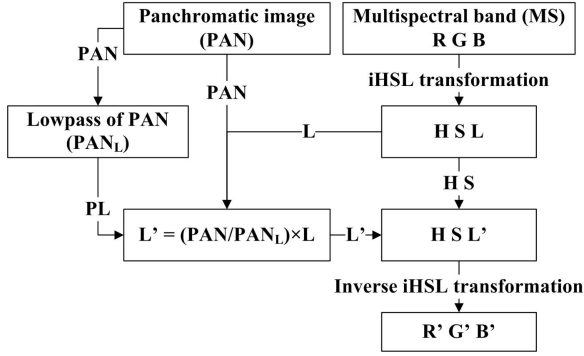


Fig. 2 Spectral preservation method of pan-sharpening.

In our algorithm, iHSL color model is employed to preserve the spectral information and the SFIM technique provides to merge the spatial resolution and to avoid out-of-gamut problem. The proposed algorithm, iHSL-SFIM, for preserving the spectral information of pan-sharpening is derived as following steps.

Step 1: Up-sampling spatial resolution of MS data to the size of PAN.

Step 2: Transform R, G, B bands of MS data to iHSL color space by Eq. (29)-(33).

Step 3: Retrieving high spatial information from PAN image, PAN , and calculating the low-pass filter of PAN image, (PAN_L) .

Step 4: Merge the spatial information of PAN and the brightness, L .

$$L' = (PAN/PAN_L) \times L. \quad (39)$$

Step 5: Replace L by L' , and transform iHSL to RGB color space.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L' \\ L' \\ L' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7875 & 0.3714 \\ -0.2125 & -0.2059 \\ -0.2125 & 0.9488 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

In this fusion algorithm, the chromatic information are isolated from achromatic component. When the spatial data from PAN image merge with the brightness component of MS data, only the achromatic data are modified. The chromatic data or spectral of the high spatial resolution of MS images still keep as the same with the original MS data.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

THEOS data set for testing our algorithm was taken in April, 14 2009 covers Hat Yai District, Songkhla province, Thailand. The spatial resolution of MS and PAN images are 15 m and 2 m, respectively. The sub-images for testing have the size of panchromatic 720×720 pixels (Fig. 3(a)) and the corresponding RGB of the MS bands have the size of 96×96 pixels (Fig. 3(b)).

The fusion parameters of each method, that use for comparison, are set the same values. The tradeoff parameters consist of $k = 0.5$, $k_1 = 1.0$, and $k_2 = 0.1$. SFIM techniques use mean filter with the size 25×25 .

4.1 Visual inspection

For visual inspection, Fig. 3 illustrates the original and fused images using pan-sharpening methods. The comparison results by using IHS, BT, IHS-BT, SFIM, BT-SFIM, IHS-BT-SFIM, iNIHS-SFIM and iHSL-SFIM fusion methods are shown in Fig. (c)-(j), respectively.

4.2 Quantitative Analysis

For the quantitative analysis, spatial resolution and spectral information are evaluated. Measurement methods use to compare pan-sharpening algorithms as introduced in [7], which we select root-mean-square-error (RMSE) and relative dimensionless global error in synthesis (ERGAS) from different-based measurement. For similarity-based, correlation coefficient (CC) and quality index (Q) values are provided for assessment. Table 1 illustrates numerical results from comparison of spatial preservation, which compares the fused results with PAN data. Table 2 shows numerical comparisons of the spectral information, which compares the down-sampling fused results and original MS data.

Table 1 CC and RMSE between PAN and fused images.

Methods	CC	RMSE
IHS	0.9904	0.0241
BT	0.9549	0.0377
IHS-BT	0.9812	0.0292
SFIM	0.8512	0.0674
BT-SFIM	0.9831	0.0269
IHS-BT-SFIM	0.8743	0.0609
iNIHS-SFIM	0.8447	0.0958
iHSL-SFIM	0.8532	0.0960

Table 2 CC, RMSE, ERGAS and Q between the spectral bands of the MS and fused images.

Methods	CC	RMSE	ERGAS	Q
IHS	0.5706	0.0837	7.0475	0.6999
BT	0.5528	0.0837	6.7137	0.7093
IHS-BT	0.5652	0.0837	6.8918	0.7144
SFIM	0.8256	0.0229	1.8477	0.8540
BT-SFIM	0.5705	0.0837	6.9633	0.7080
IHS-BT-SFIM	0.8106	0.0282	2.2813	0.8490
iNIHS-SFIM	0.8246	0.0166	1.4478	0.8365
iHSL-SFIM	0.8368	0.0171	1.5066	0.8230

5. CONCLUSION AND DISCUSSION

This paper proposed the pan-sharpening method, iHSL-SFIM, by using iHSL color model to preserve the

spectral data and providing SFIM to synthesis the spatial resolution of the fused images. The fused results of the proposed methods were compared with IHS-based methods consisting of IHS, BT, IHS-BT, SFIM, BT-SFIM, IHS-BT-SFIM, iNIHS-SFIM. The numerical comparisons were illustrated on Table 1 and 2. The proposed method could preserve the spectral data better than the IHS-based methods as seen from the Tables and Fig. 3. However, spatial data of the proposed method do not better than IHS-based methods as seen from Table 1. For out-of-gamut problem of the THEOS data sets, only IHS-based fusion methods have a few pixels out of the RGB space. Our method and iNIHS-SFIM do not have out-of-gamut problem.

REFERENCES

- [1] C. Thomas, T. Ranchin, L. Wald, and J. Chamusot, "Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 5, pp. 1301-1312, 2008.
- [2] S. Baronti, B. Aiazzi, M. Selva, A. Garzelli, and L. Alparone, "A Theoretical Analysis of the Effects of Aliasing and Misregistration on Pansharpened Imagery," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 5, No. 3, pp. 446-453, 2011.
- [3] T.-M. Tu, C.-L. Hsu, P.-Y. Tu and C.-H. Lee, "An Adjustable Pan-sharpening Approach for IKONOS/QuickBird/GeoEye-1/WorldView-2 Imagery," *IEEE Journal of Selected Topic in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 5, No. 1, pp. 125-134, 2012.
- [4] C.-L. Chien and W.-H. Tsai, "Image Fusion With No Gamut Problem by Improved Nonlinear IHS Transforms for Remote Sensing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 1, pp. 651-663, 2014.
- [5] A. Hanbury and J. Serra, "A 3D-polar coordinate colour representation suitable for image analysis," *submitted to Computer Vision and Image Understanding*, 2002.
- [6] S. Intajag and S. Kansomkeat, "Enhanced Vegetation Index of THEOS Imagery by Pan-sharpening," *Information Science and Digital Content Technology (ICIDT), 2012 8th International Conference on*, Vol. 3, pp. 524-529. IEEE, 2012.
- [7] S. Li, Z. Li and J. Gong, "Multivariate Statistical Analysis of Measures for Assessing the Quality of Image Fusion," *International Journal of Image and data fusion*, Vol. 1, No. 1, pp. 47-66, 2010.

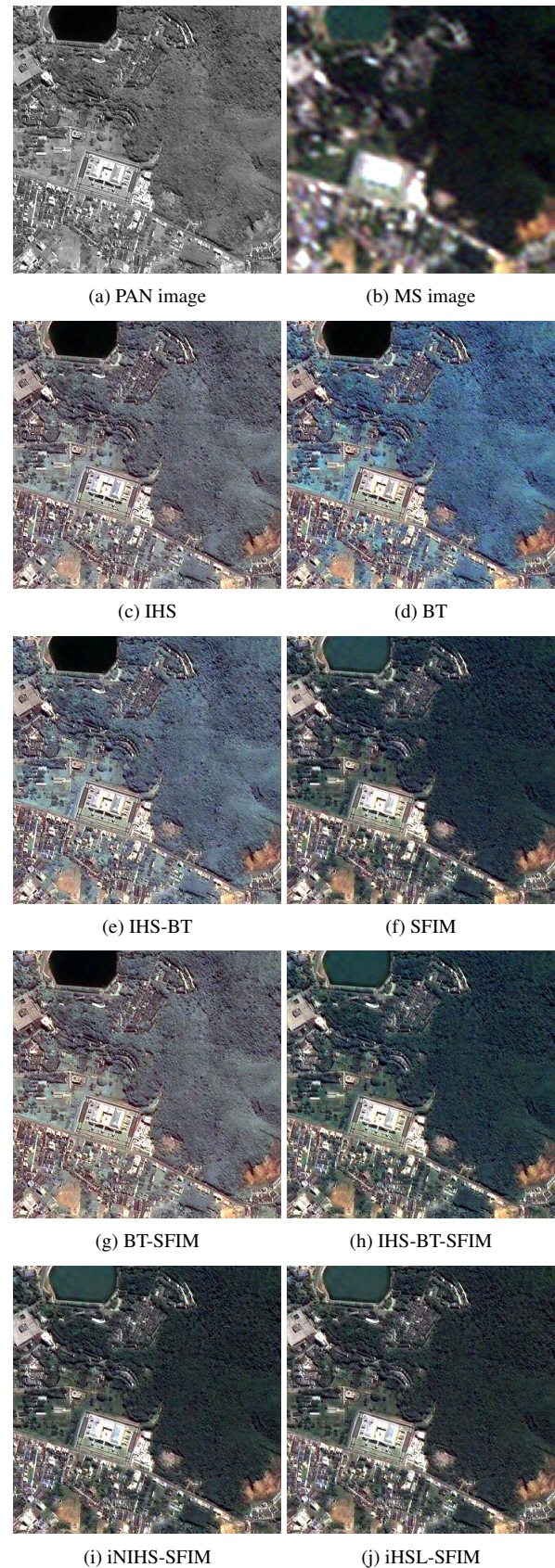


Fig. 3 Visual comparisons of pan-sharpening methods.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวสุวรรณี พยับไชยกุล	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5410220069	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนสนับสนุนนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเป็นผู้ช่วยนักวิจัย (Research Assistant) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ประจำปีการศึกษา 2554

ทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2555 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สาริต อินทจักร์ วิภาดา เวทย์ประสิทธิ์ และสุวรรณี พยับไชยกุล. 2555. การหลอมรวมข้อมูลสำหรับภาพถ่ายดาวเทียมธีออส. The 9th Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE2012). กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย, 31 พฤษภาคม – 1 มิถุนายน 2555. หน้า 64-70.

Intajag, I., Kansomkeat, S., and Phayapchaiyakun, S. Vegetation Zone Enhancement of THEOS Imagery. SICE 2013 Annual Conference. Nagoya University, Nagoya, Japan, Sep. 14–17, 2013, pp.2110-2115.

Phayapchaiyakun, S., Intajag, I., and Jintasuttisak, T. Spectral Preservation of Pan-sharpening for THEOS Imagery. 14th International Conference on Control, Automation and Systems. KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 22-15, 2014. pp.686-691.

