

การใช้เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลสำหรับการประเมินความเสียหายจากน้ำท่วม: การทบทวนวรรณกรรม

ชาติชาย ไวยสุระสิงห์

บทคัดย่อ

กว่า 20 ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องและถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินความเสียหายจากภัยน้ำท่วมที่ครอบคลุมบริเวณพื้นที่ขนาดใหญ่และเข้าถึงลำบากได้เป็นอย่างดีพร้อมทั้งเสียค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการสำรวจภาคสนาม ดังนั้นบทความนี้จึงมีเป้าหมายที่จะทบทวนงานวิจัยต่างๆที่ใช้เทคโนโลยีนี้เพื่อการประเมินความเสียหายจากน้ำท่วม โดยโครงสร้างเนื้อหาแยกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกเกี่ยวข้องกับพัฒนาการของเทคนิคการสำรวจระยะไกลสำหรับประเมินความเสียหายของพื้นที่น้ำท่วม ในส่วนที่สองจะเป็นการประมาณความลึกน้ำท่วม (Flood Depth) ซึ่งเป็นดัชนีบอกระดับความรุนแรงของภัยน้ำท่วมที่เกิดขึ้น และในที่สุดท้ายจะทบทวนงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลเพื่อการประเมินผลกระทบของน้ำท่วมที่มีต่อผลผลิตทางการเกษตร

คำสำคัญ: การประเมินความเสียหายจากอุทกภัย เทคนิคการสำรวจระยะไกล การสร้างขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม ระดับความรุนแรงของภัยน้ำท่วม ความลึกน้ำท่วม

The Use of Remote Sensing Technology for Evaluation of Flood Damages: A Review Literature

Chattichai Waisurasingha

Abstract

For more than two decades, remotely sensed imagery has been used as a tool for delineating of the spatial extent of flooding and its impact over wide area with a cost effective manner in comparison to ground surveying. The aim of this article is to review previous attempts on flood damage assessment that used remotely sensed data and techniques. This paper is divided into three major sections. The first section focuses on the development of remote sensing techniques as a tool for assessing flood damages. The second section emphasizes the remote sensing techniques for estimating flood depth, which is the crucial indicator of flood hazard intensity. In order to estimate flood depth, a number of different approaches using remote sensing data (*e.g.*, radiometry-depth relation, satellite altimetry and SAR interferometry) have been discussed. The last section highlights some of the past attempts for assessing flood damage to agricultural areas.

Keywords: Flooded Damage Assessment, Remote Sensing Technique, Flood Delineation, Flood Hazard Intensity, Flood Depth

1. บทนำ

น้ำท่วมเป็นปัญหาภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นอยู่เป็นประจำในบริเวณพื้นที่เขตร้อนแถบเส้นศูนย์สูตรโดยเฉพาะอย่างยิ่งเขตพื้นที่มรสุม (Sanyal & Lu, 2004) ดังนั้นแผนที่แสดงแนวเขตพื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมจึงกลายเป็นสิ่งจำเป็นเร่งด่วนที่ขาดไม่ได้สำหรับการประเมินระดับความเสียหายและระดับความรุนแรงของน้ำท่วม (Kiage et al., 2005) และวิธีการแบบเดิมๆในอดีตที่ใช้กันมาในการทำแผนที่น้ำท่วมคือการสำรวจรังวัดภาคสนาม (Ground Surveying) ซึ่งมีเสียค่าใช้จ่ายสูงและใช้ระยะเวลานาน อีกทั้งบางบริเวณอาจเข้าถึงลำบากและมีพื้นที่ขนาดใหญ่โดยเหตุนี้ วิธีดั้งเดิมดังกล่าวมานี้จึงไม่เหมาะสมในการทำแผนที่พื้นที่น้ำท่วม (Proferti & Macintosh, 1997) Shamar et al. (1996) และ Brivio et al. (2002) กล่าวว่า ภายหลังจากการนำข้อมูลการสำรวจระยะไกลมาใช้กำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมนั้นทำให้การทำแผนที่น้ำท่วมนั้นสามารถถ่ายภาพครอบคลุมพื้นที่ประสบภัยได้ในบริเวณกว้างโดยจัดเป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดความคุ้มค่าในการดำเนินการ โดยเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลเองเพื่อการนี้ได้มีการปรับปรุงคุณภาพตลอดจนรูปแบบการบันทึกข้อมูลให้มีความละเอียดสูงขึ้นอันเป็นประโยชน์ต่อการทำแผนที่น้ำท่วมอย่างมาก โดยเหตุนี้เองบทความวิชาการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิจารณ์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำแผนที่น้ำท่วมและประเมินความเสียหายซึ่งถือได้ว่าเป็นวัตถุประสงค์ที่สำคัญของบทความนี้ ดังนั้นเนื้อหาในบทความนี้จึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ คือ (1) ส่วนที่เน้นวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำเทคนิคการสำรวจระยะไกลมาใช้ให้เป็นเครื่องมือสำหรับการกำหนดขอบเขตพื้นที่ประสบภัย (2) ส่วนที่เน้น

ไปที่การประเมินระดับความเสียหายจากความลึกน้ำท่วม และ (3) ส่วนสุดท้ายนั้นจะประเด็นการศึกษาไปที่การประเมินผลกระทบของน้ำท่วมพื้นที่เกษตรกรรม

2 การสำรวจระยะไกลกับการสร้างขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม

งานศึกษาวิจัยในอดีตต่างมากมายที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมมีเป็นจำนวนมาก (ตารางที่ 1) โดยสามารถแบ่งตามลักษณะของตัววัดสัญญาณ ได้ดังนี้ (1) งานวิจัยที่ใช้การสำรวจระยะไกลด้วยตัววัดเชิงแสง, (2) งานวิจัยที่ใช้การสำรวจระยะไกลด้วยตัววัดไมโครเวฟ และ (3) การวิจัยที่ใช้เทคนิคการผสมผสานหลายตัววัดสัญญาณ

2.1 การประยุกต์ใช้งานสำรวจระยะไกลด้วยตัววัดเชิงแสงกำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม

โดยสามารถแบ่งการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมาในอดีตตามความละเอียดเชิงตำแหน่ง ได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

2.1.1 กลุ่มที่ใช้ข้อมูลความละเอียดเชิงตำแหน่งสูง (High spatial resolution data, <5 m) ซึ่งข้อมูลในกลุ่มนี้ได้แก่ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ โดยในยุคบุกเบิกของงานสำรวจระยะไกลก่อนการเกิดขึ้นของข้อมูลภาพถ่ายเทียมนั้น ภาพถ่ายทางอากาศถือเป็นแหล่งข้อมูลที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการทำแผนที่น้ำท่วม (อาทิ Schneider, 1966; Meyer & Welch, 1974) ผลการศึกษาของ Meyer & Welch (1974) บันทึกไว้ว่า ในการสำรวจหาพื้นที่น้ำท่วมนั้นข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากฟิล์มขาว-ดำแบบอินฟราเรดจะช่วยให้กำหนดขอบเขตนํ้าท่วมได้ดีกว่าการใช้ฟิล์มขาว-ดำแบบธรรมดา

ตารางที่ 1 งานศึกษาวิจัยทางด้านการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในการทำแผนที่น้ำท่วมจำแนกตามลักษณะตัววัดสัญญาณ (Sensor)

ตัววัดสัญญาณ	การปฏิบัติการ (ปี ค.ศ.)	ความละเอียดเชิงตำแหน่ง (m)	การสะท้อนเชิงคลื่น (μm)	ความถี่ในการเก็บข้อมูล	การประยุกต์ใช้	งานวิจัยอ้างอิง
Landsat MSS 1-3	1972-83	80	4 bands (0.5-0.6 μm to 0.8-1.1 μm)	18 วัน	กำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมด้วย Visible/NIR bands	Imhoff <i>et al.</i> , 1987; Wang <i>et al.</i> , 2002
Landsat TM 4-5	1982-93**	30/ 120	7 bands (0.45-0.5 μm to 2.08-2.35 μm); TM6: 10.4-12.5 μm	16 วัน		
Landsat ETM+ 7	1999	15/ 30/ 120	8 bands (0.45-0.5 μm to 2.08-2.35 μm); TM6: 10.4-12.5 μm ; Pan: 0.52-0.90 μm	16 วัน	กำหนดขอบเขตพท.น้ำท่วมโดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพหลังเหตุการณ์น้ำท่วม	Gianinetto <i>et al.</i> , 2006
SPOT 1-4***	1986-	10 m/ 20 m/ 1.15 km	4 bands (0.50-0.59 μm to 0.79-0.89 μm); Pan: 0.51-0.73 μm	26 วัน แต่แบบควบคุมองศาการกวาดภาพได้ (steerable)	กำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมด้วย NIR bands	Blasco <i>et al.</i> , 1992;

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ตัววัด สัญญาณ	การ ปฏิบัติการ	ความ ละเอียด เชิง ตำแหน่ง (m)	การสะท้อน เชิงคลื่น (μm)	ความถี่ใน การเก็บ ข้อมูล	การประยุกต์ใช้	งานวิจัยอ้างอิง
AVHRR	1970-	1.1 km	6 bands (0.58-0.68 μm to 11.5-12.5 μm)	2 ครั้งต่อวัน	ติดตาม สถานการณ์น้ำ ท่วม	Barton & Bart- hols, 1989; Gautam et al., 2005
MODIS	2000-	250 m/ 500 m/ 1 km	36 bands (0.4 m to 14.4 μm)	2 ครั้งต่อวัน		
SMMR	1978-1987	27 km - 55 km	0.8 cm/ 1.6 cm	2 ครั้งต่อวัน	ติดตาม สถานการณ์น้ำ ท่วมในเขตรม สม	Sipple et al., 1994; Jin, 1999;
SSM/I	1987-	15 km – 70 km	4 bands (0.35 cm to 1.5 cm	2 ครั้งต่อวัน		
ERS-1 ERS-2	1991-2000 1994-	30	C-band (5.6 cm); Polarization (VV)	35 วัน	กำหนดขอบเขต พื้นที่น้ำท่วมใน สถานการณ์ที่ พื้นที่ประสบภัย ถูกบดบังด้วย เมฆ	Bandji & Dautrebande, 1997; Ober- standler et al., 1997; Nico et al., 2000; Henry et al., 2006
ENVISAT	2002-	30	C-band (5.6 cm); Polarization (HH/VV/HV/VH)	35 วันหรือ น้อยกว่า (ควบคุม ทิศทางเสา อากาศได้)		
RADAR- SAT-1	1995-	10-100	C-band (5.6 cm); Polarization (HH)	24 วันหรือ น้อยกว่า (ควบคุม ทิศทางเสา อากาศได้)		

*เรียงตามปี คศ. ไม่ได้เรียงตามการประยุกต์ใช้งาน

Landsat 5 1984-ปัจจุบัน, *SPOT-4 HRV-IR (0.5-1.75 μm); SPOT-4 VEGETATION (0.43-1.75 μm)

อย่างไรก็ตาม ในการใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อทำแผนที่น้ำท่วมนั้นบ่อยครั้งที่จะต้องเผชิญกับสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมแก่การบินถ่ายภาพและนอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการขึ้นบินถ่ายภาพแต่ละครั้งค่อนข้างสูง ดังนั้น การสำรวจระยะไกลด้วยข้อมูลดาวเทียมถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายอีกทั้งยังมีดาวเทียมยังสามารถโคจรถ่ายภาพซ้ำ ณ ตำแหน่งเดิมได้อยู่ตลอดเวลา (Lane et al., 2003)

2.1.2 กลุ่มที่ใช้ข้อมูลความละเอียดเชิงตำแหน่งปานกลาง (Medium Spatial Resolution Data (5-100 m) ข้อมูลในกลุ่มนี้ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat Multi-Spectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM) และ Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) และ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Système Pour l'Observation de la Terre (SPOT) ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในกลุ่มนี้ถูกนำมาใช้ในยุคเริ่มต้นของประยุกต์ใช้งานรับรู้ระยะไกลเพื่อการบรรเทาพิบัติภัยน้ำท่วมซึ่งนับเป็นการจัดปัญหาความขัดข้องของสภาวะอากาศที่ไม่เหมาะสมกับการบินถ่ายภาพของเครื่องบิน สำหรับการแยกพื้นที่เสียหายซึ่งปกคลุมด้วยน้ำออกจากพื้นที่ไม่เสียหายซึ่งปกคลุมด้วยแผ่นดินนั้นจะอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่รับสัญญาณในช่วงคลื่น Near Infrared และ Mid Infrared โดยในระยะแรกที่ใช้ Landsat MSS นั้นเกิดอุปสรรคในการตรวจวัดความเสียหายที่มีต่อพื้นที่เกษตรกรรมเนื่องจากความละเอียดของข้อมูล (80 เมตร) ไม่เพียงพอแก่การดำเนินงาน แต่ข้อจำกัดเหล่านี้ลดลงเมื่อความละเอียดของข้อมูลในช่วงคลื่นดังกล่าวของข้อมูล Landsat TM และ ETM+ เพิ่มขึ้น (30 เมตร) ซึ่งเพียงพอในการประเมินความเสียหายของพื้นที่เกษตร (Imhoff et al., 1987) และสามารถจำแนกพื้นที่เสียหายได้ละเอียดขึ้น โดยสามารถจำแนกพื้นที่น้ำท่วมขนาดใหญ่กว่า 0.6 เฮกเตอร์ได้ (France & Hedges, 1986) และดีขึ้นสำหรับ SPOT (20 เมตร) เป็นขนาด 0.5 เฮกเตอร์ (Smith, 1997) และจากการศึกษาในอดีตต่างๆ (อาทิ Imhoff et al., 1987, Gianinetto et al., 2006) พบว่าความถูกต้องของการใช้

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแบบ Optic ที่ความละเอียดระดับปานกลางนี้ข้อมูล Landsat ETM+ ซึ่งรับสัญญาณภายหลังจากระดับน้ำท่วมได้ลดลงไปแต่ยังคงทิ้งร่องรอยความเสียหายเอาไว้ โดยผลการศึกษาได้ความถูกต้องโดยรวมในระดับที่สูงถึง 85% อย่างไรก็ตามข้อมูลในกลุ่มนี้ค่อนข้างมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ในการถ่ายภาพ (Temporal Resolution) ที่น้อยเกินไป จึงเกิดข้อจำกัดคือในการบันทึกข้อมูลช่วงฤดูมรสุมที่มีเมฆมาบดบัง ทำให้การประเมินความเสียหายของพื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมต้องเลื่อนออกไปโดยอาจต้องเลื่อนไป 5-12 สัปดาห์ภายหลังจากเหตุการณ์น้ำท่วมนั้นๆ อันจะทำให้การประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นต่ำกว่าความเป็นจริง (Töyrä et al., 2002)

2.1.3 กลุ่มที่ใช้ข้อมูลความละเอียดเชิงตำแหน่งที่ค่อนข้างหยาบ (Coarse Spatial Resolution Data, >100 m) ข้อมูลในกลุ่มนี้ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) และ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) โดยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในกลุ่มนี้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความละเอียดเชิงเวลาโดยมีความถี่ในการบันทึกข้อมูลที่สูงมากซึ่งช่วยให้เกิดการหลีกเลี่ยงอุปสรรคของการบดบังของก้อนเมฆได้บ้างโดยการเลือกข้อมูลซึ่งถูกบันทึกในช่วงเวลาที่ไม่มีเมฆมาบดบังมาวิเคราะห์ และข้อมูลในกลุ่มนี้มีให้บริการฟรี ดังนั้นจึงมีงานศึกษาวิจัยในอดีตได้นำไปวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วม อาทิ Wang et al. (2002) โดยใช้ข้อมูลในช่วงคลื่น NIR ของภาพถ่ายดาวเทียม AVHRR มาวิเคราะห์ NDVI เพื่อจำแนกพื้นที่น้ำท่วมออกมา หรือ Gautam et al. (2005) ได้นำภาพถ่ายดาวเทียม MODIS มาติดตามความเสียหายจากพิบัติภัยของน้ำท่วมในเขตชายฝั่งตะวันออกของสหรัฐอเมริกาอันเกิดจากเฮริเคน Isabel ในช่วงปี ค.ศ. 2003 แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในกลุ่มนี้มีความละเอียดเชิงตำแหน่งที่ค่อนข้างหยาบทำให้การประเมินความเสียหายทำได้เฉพาะระดับภูมิภาคเท่านั้น

2.2 งานสำรวจระยะไกลด้วยดาววัดไมโครเวฟกำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม

ข้อมูลดาวเทียมกลุ่มนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการลดข้อจำกัดที่เกิดจากการบดบังของเมฆเนื่องจากความสามารถในการทะลุทวงของช่วงคลื่นไมโครเวฟ โดยสามารถจำแนกงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมาตามความละเอียดเชิงตำแหน่ง ได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

2.2.1 กลุ่มที่วิเคราะห์ด้วยดาววัดไมโครเวฟในระบบ Passive โดยข้อมูลดาวเทียมในกลุ่มนี้ได้แก่ ข้อมูลดาวเทียม Nimbus-7 ด้วยตัววัดชื่อ Scanning Multi-channel Microwave Radiometer (SMMR) (ปฏิบัติการระหว่าง 1978 ถึง 1987) และข้อมูลภาพดาวเทียม Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) ด้วยตัววัดชื่อ Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) (ปฏิบัติงานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 เป็นต้นมา) โดยข้อมูลดาวเทียมทั้งสองถูกนำมาใช้ติดตามพื้นที่น้ำท่วมในเขตรมรุ (e.g. Sipple et al. [1994], Jin [1999]) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของข้อมูลดาวเทียมในกลุ่มนี้คือ ความหยาบของข้อมูล (27 km) ซึ่งค่อนข้างหยาบมากสำหรับงานประเมินความเสียหายของน้ำท่วม (Smith, 1997)

2.2.2 กลุ่มที่วิเคราะห์ด้วยดาววัดไมโครเวฟในระบบ Active โดยข้อมูลดาวเทียมในกลุ่มนี้จะมีข้อได้เปรียบในประเด็นของความสามารถทะลุทะลวงเมฆขณะถ่ายภาพ นอกจากนี้ ยังมีความละเอียดเชิงตำแหน่งระหว่าง 5 ถึง 100 เมตร ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาใช้ติดตามความเสียหายของน้ำท่วม และข้อมูลในกลุ่มนี้ในระยะเริ่มต้นนั้น จะเป็นการปฏิบัติงานอยู่บนเครื่องบินซึ่งเรียกว่าระบบ Side-looking Airborne Radar (SLAR) โดยดำเนินการในช่วง X-band และ L-band (Lowry et al., 1981) โดยทำการบินถ่ายภาพพื้นที่น้ำท่วมในเขตลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิล แต่ข้อจำกัดในลักษณะเดียวกับการบินถ่ายภาพทางอากาศก็คือ ขณะบินถ่ายภาพต้องการเสถียรภาพของการบินถ่ายภาพ ทำให้ในช่วงที่ฝนตกหนักหรือลมพายุพัดรุนแรงไม่สามารถทำการบินถ่ายภาพได้ อีกทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ทำให้ในช่วงเวลา

ต่อมาการใช้ข้อมูลที่ได้รับส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศเชิงสังเคราะห์ที่รู้จักกันในชื่อ Synthetic Aperture Radar (SAR) ที่อยู่บนดาวเทียมซึ่งสามารถบินถ่ายภาพซ้ำได้ตลอดเวลาเป็นอีกทางเลือกสำหรับการถ่ายภาพขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมในทุกสภาวะอากาศ โดยข้อมูลดาวเทียมในกลุ่มนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องได้แก่ ERS-1/2 (C-band), Radarsat-1/2(C-band), Envisat(C-band), JERS-1 (L-band), Alos (L-band), และ Terrasar-X (X-band) ในการวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมด้วยข้อมูลในกลุ่มเรดาร์นี้ จะอาศัยคุณสมบัติการวัดการสะท้อนกลับของคลื่นเรดาร์ (Radar Backscattering) ที่ถูกส่งไปยังพื้นผิวและสะท้อนกลับมาโดยหากพื้นผิวมีลักษณะที่ราบเรียบ (Specular Surface) คลื่นที่ส่งไปและตกกระทบจะมีการหักเหไปในทิศทางอื่นโดยไม่สะท้อนกลับมายังตัววัดแต่ในทางกลับกันหาพื้นผิวที่สัญญาณไปตกกระทบนั้นมีลักษณะขรุขระจะมีสัญญาณสะท้อนกลับมา และเมื่อนำหลักการดังกล่าวมาวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วมจะพบว่าบริเวณที่มีน้ำท่วมนั้นจะปกคลุมด้วยผิวน้ำซึ่งลักษณะพื้นผิวราบเรียบ (Specular Surface) ทำให้ค่า Radar Backscatter ต่ำ ในทางกลับกันพื้นแผ่นดินซึ่งถือเป็นพื้นผิวที่ขรุขระจะมีค่า Radar Backscatter ที่สูง ดังนั้นงานศึกษาในอดีตอาทิ Townsend et al. (1998) นำเทคนิค Thresholding มาแบ่งแยกพื้นที่น้ำท่วมออกมาจากพื้นที่อื่นๆ อย่างไรก็ตาม สมมติฐานเรื่องค่า Radar Backscatter อาจจะไม่ได้ผลดีนักในพื้นที่ต่อไปนี้ อาทิ พื้นผิวนอนแบบแอสฟัลท์ พื้นผิวน้ำของแหล่งน้ำต่างๆ เนื่องจากค่าการสะท้อนกลับของ Radar ค่อนข้างต่ำเช่นกัน หรือแม้กระทั่งบางบริเวณที่เกิดเงาในขณะกวาดข้อมูลเช่นกัน ดังนั้นในการที่จะหลีกเลี่ยงการจำแนกผิดกลุ่มนี้ เทคนิคต่างๆในการวิเคราะห์ภาพ SAR จึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อาทิ Bandji & Dautrebande (1997) จึงได้มีการนำข้อมูลภาพดาวเทียม ERS-1 หลายช่วงเวลามาพิจารณาวิเคราะห์พื้นที่น้ำท่วม หรือแม้กระทั่งการใช้เทคนิคการแทรกสอดเชิงคลื่น (Radar Interferometry) มาวิเคราะห์ค่า Radar Coherence ของข้อมูลภาพดาวเทียมก่อนและหลังน้ำท่วม โดย Nico et al.

(2000) ซึ่งพบว่า พื้นที่น้ำท่วมนั้นจะมีค่า Radar Coherence ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างของ Radar Backscatter แต่ละช่วงเวลาที่ต่ำมาก และยังพบว่า เทคนิคนี้ให้ผลดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thresholding ต่อมา Horritt et al. (2001) ได้เสนอแนะการนำข้อมูลภาพดาวเทียม ERS-1 หลายช่วงเวลามาผสมกัน โดยนำภาพดาวเทียมก่อนน้ำท่วม ขณะท่วม และหลังน้ำท่วม มาให้ผสมกันโดยให้สีแดง เขียว และน้ำเงิน ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า บนภาพถ่ายผสมสีนั้นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมนั้นจะเห็นเป็นสีบานเย็น (Magenta) และผลการศึกษาได้รับความถูกต้องในการจำแนกพื้นที่น้ำท่วมที่สูง

ในเวลาต่อมาไม่นานการศึกษาด้านภาพ SAR ทดลองใช้ข้อมูล Polarization ชนิด Quad-polarization (HH, HV, VH, VV) ในการรับส่งสัญญาณ อาทิ Henry et al. (2006) ได้นำเอาภาพดาวเทียม ENVISAT ซึ่งรับส่งแบบ HH และ HV มาวิเคราะห์ร่วมกับ ERS-2 ซึ่งเป็นการรับส่งแบบ VV พบว่า ให้ความถูกต้องในการจำแนกข้อมูลน้ำท่วมที่สูงมากถึง 90% ซึ่งดีกว่าการใช้เพียงข้อมูล ERS-2 ซึ่งเป็นการรับส่งแบบ VV เพียงอย่างเดียว อนึ่งการรับส่งแบบ VV การสะท้อนของสัญญาณจะลดลงขณะที่มีลมแรง ก่อนหน้านี้นี้ไม่นาน Bangdadi et al. (2001) ได้สรุปไว้ว่า ข้อมูลภาพดาวเทียม SAR ที่รับส่งสัญญาณในช่วงคลื่น C-band แบบ VV นั้นจะให้ผลลัพธ์ในการจำแนกพื้นที่น้ำท่วมได้ไม่ดีเท่ากับแบบที่รับส่งสัญญาณแบบ HH โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลดาวเทียมที่เป็นการรับสัญญาณช่วงเวลาที่เกิดลมแรง โดยเหตุนี้ ข้อมูลดาวเทียมที่รับสัญญาณในลักษณะนี้ได้แก่ ENVISAT และ RADARSAT-1/2 ได้รับการยอมรับให้เป็นข้อมูลดาวเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประเมินหรือติดตามพิบัติภัยน้ำท่วม Adam et al. (1998) ได้ทำแผนที่พื้นที่น้ำท่วมที่ Peace-Athabasca Delta ประเทศแคนาดา ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องที่สูงถึง 90% และต่อมากการศึกษาของ Dewan et al. (2006) ก็ได้นำภาพดาวเทียม RADARSAT-1 มาใช้วิเคราะห์น้ำท่วมที่เมืองดากาบังกลาเทศ เช่นกันและนับเป็นการยืนยันผลในลักษณะ

ใกล้เคียงกันด้วยการจำแนกแบบ Maximum Likelihood โดยมีความถูกต้องสูงถึง 88% ดังนั้นจะเห็นว่า ข้อมูลดาวเทียมในระบบ SAR นั้น จะมีค่าความถูกต้องค่อนข้างดีและไม่มีข้อจำกัดเรื่องสภาพอากาศ แต่ทว่า ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความถี่ของการเก็บข้อมูล คือ ไม่สามารถถ่ายภาพในช่วงเวลาที่เกิดน้ำท่วมสูงสุดได้

2.3 การสำรวจระยะไกลด้วยเทคนิคการผสมผสานตัววัดหลากหลายสัญญาณกำหนดขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม

เทคนิคการผสมผสานตัววัดหลายสัญญาณนี้จัดเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการประเมินความเสียหายจากพื้นที่น้ำท่วม โดยอาศัยข้อดีทั้งจากตัววัดสัญญาณแบบ Optic และจากตัววัดสัญญาณแบบ Microwave มาผสมผสานกันกล่าวคือ ตัววัดสัญญาณแบบ Optic ด้วยช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ช่วยในการจำแนกพื้นที่น้ำท่วมออกจากพื้นที่อื่นๆ ขณะที่ข้อมูลภาพดาวเทียมแบบ SAR ซึ่งบันทึกขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมเอาไว้ (Töyrä, 2002) และการผสมผสานข้อมูล (Hybrid Sensor) ยังทำให้โอกาสในการประเมินพิบัติภัยได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น อาทิ Töyrä (2002) นำเอาข้อมูล RADARSAT ผสมผสานกับข้อมูล SPOT มาวิเคราะห์ขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ข้อมูลจากตัววัดใดตัววัดหนึ่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเกิดข้อจำกัดในการบันทึกข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น หากใช้เพียงข้อมูล SAR เพียงอย่างเดียวอาจเกิดข้อจำกัดในพื้นที่ภูเขาที่ให้สัญญาณใกล้เคียงกับพื้นที่น้ำท่วม และจากการนี้เอง Yang et al. (1999) ได้ทำการใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat จำแนกพื้นที่ส่วนที่เป็นภูเขาออกมาและนำมาซ้อนทับกับข้อมูลภาพดาวเทียม RADARSAT เพื่อทำการจำแนกเฉพาะส่วนที่เป็นพื้นที่น้ำท่วมออกมาซึ่งผลที่ได้ก็จะมีค่าความถูกต้องที่ดีมากขึ้น

3. การประมาณความลึกน้ำท่วม (Flood Depth) ด้วยเทคนิคการรับรู้ระยะไกล

สำหรับการประมาณความลึกของน้ำท่วมด้วยเทคนิคการรับรู้ระยะไกลมีด้วยกันหลายเทคนิค ดังนี้ (1) ความสัมพันธ์เชิงคลื่นและความลึก (2) การแทรกสอดเชิง

คลื่น และ (3) การผสมผสานเข้ากับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, [DEM])

3.1 ความสัมพันธ์เชิงคลื่นและความลึก (Radiometry-depth Relationship)

Islam & Sado (2001) ได้จำแนกความลึกพื้นที่น้ำท่วมโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม NOAA AVHRR โดยการจำแนกแบบควบคุม (Supervised Classification) และนำค่า Training data ของแต่ละความลึกโดยพิจารณาจาก DEM ที่ตำแหน่งต่างๆเทียบกับระดับตลิ่ง พวกเขาพบว่า วิธีการนี้เหมาะสำหรับบริเวณที่น้ำค่อนข้างใสไม่เหมาะกับน้ำขุ่นซึ่งไม่เหมาะกับงานน้ำท่วมที่น้ำค่อนข้างขุ่น ดังนั้นต่อมา Kiage et al. (2005) ใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม RADARSAT ถ่ายในโหมด ScanSAR ภายหลังจากระดับน้ำท่วมสูงสุดผ่านไปแล้วประมาณ 9 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์ความลึกของน้ำท่วมบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยพื้นผิวน้ำท่วมบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำนี้ลักษณะจะไม่ราบเรียบเหมือนกับพื้นที่น้ำท่วมอื่น ทำให้สามารถสร้างค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างระดับน้ำบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำและค่าการสะท้อนเชิงคลื่น โดยค่า Correlation ที่ได้เป็นบวกมาก ($R^2 = 0.7-0.94$) และนำไปประเมินระดับความลึกของน้ำที่ท่วมบริเวณชายฝั่งได้ผลลัพธ์ค่อนข้างดี แต่วิธีการนี้กลับไม่เหมาะกับลักษณะน้ำท่วมที่ท่วมบริเวณตัวเมืองซึ่งเต็มไปด้วยตึกและอาคารเนื่องจากตัวโครงสร้างอาคารจะทำให้เกิดการสะท้อนของ Radar หลายครั้งอันจะทำให้ค่า Radar Backscatter สูงมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ซึ่งถูกน้ำท่วมแบบอื่นๆ

3.2 การแทรกสอดเชิงคลื่น (Interferometry) ในการหาความลึกของน้ำ

Alsdorf et al. (2000) ได้ทำการใช้ข้อมูล SAR ที่ถ่ายด้วยกระสวย SIR-C ที่ช่วงคลื่น C-band รับส่งแบบ HH ซึ่งมีการวนซ้ำกลับมาถ่ายภาพ ณ ตำแหน่งเดิมใน 24 ชั่วโมง นำมาวัดการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำบริเวณที่เป็นน้ำท่วมในเขตพืชพรรณ (Flooded Vegetation) ในพื้นที่แถว Sloimoes Amazon โดยใช้เทคนิคการวัดการแทรกสอดเชิงคลื่นตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ใน

การศึกษาพบว่า สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของน้ำได้ในระดับ 7-11 cm. แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดสำหรับข้อมูลดาวเทียมเรื่องของความถี่ของวงโคจร

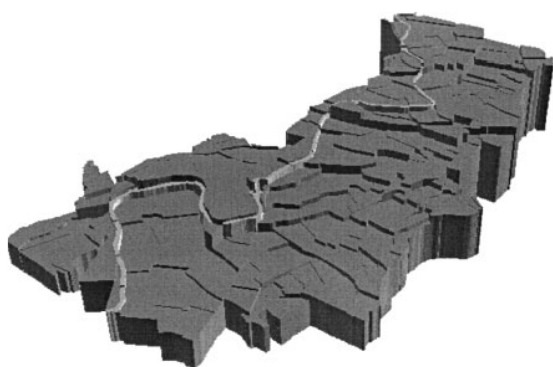
3.3 การบูรณาการข้อมูลดาวเทียมกับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขเพื่อตรวจวัดความลึกของน้ำท่วม

ในการนำข้อมูลดาวเทียมมาบูรณาการเข้ากับข้อมูล DEM เพื่อวิเคราะห์ความลึกของน้ำหรือระดับน้ำนั้นสามารถกระทำได้ใช้หลักพื้นฐานที่ว่า หากข้อมูลขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมและลักษณะภูมิประเทศบริเวณพื้นที่ศึกษาพร้อมครบ ค่าระดับของน้ำ (Water Level) สามารถที่จะคำนวณได้จากข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ Oberstandler et al. (1997) ได้ทำการหาขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม ERS-1 และนำขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมที่ได้มาหาค่าระดับของน้ำจากโดยพิจารณาค่าความสูงจากเส้นชั้นความสูงบนแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:5000 แล้วนำไปวิเคราะห์หาความลึกของน้ำ ผลที่ได้เทียบกับการสำรวจภาคสนามแล้วพบว่า มีค่าแย้งที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับ 10-50 cm. อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับการทำงานบนพื้นที่ขนาดใหญ่และค่อนข้างราบ ในเวลาต่อมา Raclot (2006) ได้นำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศซึ่งถ่ายภาพหลังจากน้ำท่วมสูงสุด 10 ชั่วโมงมาประเมินความลึกของน้ำ โดยข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ขอบเขตพื้นที่น้ำท่วม และแบ่งพื้นที่น้ำท่วมออกเป็นพื้นที่ย่อยๆตามกรอบต่างๆ เช่น สันฝาย สันเขื่อน หรือถนน และในแต่ละส่วนย่อยๆนี้จะถูกนำมาพิจารณาระดับของน้ำท่วม ดังรูปที่ 1 และผลจากการนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ระดับความลึกน้ำท่วม

4. การเฝ้าผลกระทบของน้ำท่วมนาข้าวโดยใช้งานสำรวจระยะไกล

ในส่วนตัวอันนี้จะได้มุ่งเน้นประเด็นการทบทวนวรรณกรรมไปที่การประยุกต์ใช้งานสำรวจระยะไกลในการติดตามความเสียหายของพื้นที่เกษตรอันเนื่องมาจากน้ำท่วมซึ่งเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปีในพื้นที่เขตมรสุมของทวีปเอเชีย อันได้แก่ ประเทศในกลุ่มอินโดจีน เอเชียใต้

ฟิลิปปินส์ เกาหลีและ ญี่ปุ่น เป็นต้น การศึกษาในอดีต อาทิ Yamagata et al. (1988) นำข้อมูลแบนด์ 3 และแบนด์ 4 ของดาวเทียม Landsat TM ซึ่งเป็นแบนด์ในช่วงคลื่น (สีแดงและ Infrared ตามลำดับ) มาวิเคราะห์ความเสียหายของน้ำท่วมที่มีต่อนาข้าว โดยผลของการศึกษาสามารถประเมินความเสียหายของผลผลิตของนาข้าวที่ถูกน้ำท่วมได้ และยิ่งไปกว่านั้น Okamoto & Fukuhara (1996) ได้นำข้อมูลแบนด์ 4 ของดาวเทียม Landsat TM มาประเมินผลผลิตต่อไร่ของพื้นที่ที่ถูกน้ำท่วม ภายหลังจากนั้นต่อมา Lee & Lee (2003) นำภาพดาวเทียมแบบ SAR หลายช่วงเวลามาผสมสี โดยนำภาพดาวเทียมของพื้นที่ที่ถูกลิขกรรมก่อนน้ำท่วม ขณะท่วม และหลังน้ำท่วม มาผสมสีแบบสีแดง เขียว น้ำเงิน ผลที่ได้คือ นาข้าวที่เสียหายจะแสดงเป็นสีบานเย็น (Magenta) ขณะที่นาข้าวที่ถูกน้ำท่วมแต่ไม่เสียหายจะปรากฏเป็นสีแดง และในการศึกษาของเขาได้จำแนกพื้นที่เสียหายจากน้ำท่วม, ไม่เสียหายจากน้ำท่วมและพื้นที่น้ำไม่ท่วมออกจากกันโดยใช้ตัวจำแนกแบบ Maximum Likelihood ผลลัพธ์จากการศึกษานี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลความเสียหายจริงในสนามซึ่งพบว่า มีความถูกต้องโดยรวมสูงมากถึงร้อยละ 90



รูปที่ 1. ภาพมุมมอง 3 มิติของระดับน้ำที่ถูกพิจารณาขึ้นมาโดยการศึกษาของ Raclot (2006). จะเห็นว่าพื้นที่น้ำท่วมถูกแบ่งออกเป็นพื้นที่ย่อย (ภาพจาก Raclot, 2006)

5. สรุป

ในการประเมินความเสียหายของน้ำท่วมซึ่งครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่และเข้าถึงลำบาก ข้อมูลและเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลมีส่วนสำคัญในการช่วยลดระยะเวลาและต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทำงาน โดยในระยะเริ่มต้นของการใช้เทคโนโลยีกับงานด้านนี้จะเริ่มต้นด้วยการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งรับสัญญาณด้วยตัววัดแบบ Optic อย่างไรก็ตาม การใช้ข้อมูลในกลุ่มนี้ยังคงมีข้อจำกัดโดยพื้นที่เสียหายที่ถูกบดบังด้วยเมฆจะไม่สามารถถ่ายภาพพื้นที่เสียหายได้ ต่อมา มีการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่รับสัญญาณด้วยตัววัดแบบ Microwave ผลก็คือ สามารถที่จะถ่ายภาพได้ในทุกสภาพอากาศแต่ทว่าเฉพาะข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในกลุ่ม Microwave เพียงอย่างเดียวอาจจะเกิดความผิดพลาดในการประมวลผลทำให้ต้องมีการผสมผสานเข้ากับข้อมูลดาวเทียมที่รับสัญญาณแบบตัววัด Optic ซึ่งในบทความนี้เรียกว่าวิธีการแบบผสมผสานหลายตัววัด (Multi-sensor Approach) นอกจากนี้เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความลึกของน้ำอันเป็นข้อมูลสำคัญที่บอกถึงระดับความรุนแรงของน้ำท่วมและนอกจากนี้ในส่วนสุดท้ายได้เน้นเนื้อหาไปที่การประเมินความเสียหายของพื้นที่นาข้าวโดยวิธีการที่ได้รับการศึกษาค่อนข้างดีคือวิธีการผสมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมแบบ SAR หลายช่วงเวลา คือ ภาพที่ถูกถ่ายก่อนน้ำท่วม, ขณะท่วม และภายหลังจากน้ำท่วม แล้วนำมาผสมสีและทำการจำแนกพื้นที่ออกเป็น พื้นที่เสียหายจากน้ำท่วมออกมาซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างสูงมาก

เอกสารอ้างอิง

- Adam, S., Wiebe, J., Pietroniro, A. (1998). Radarsat flood mapping in the Peace-Athabasca Delta, Canada, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol 24, 69–79.
- Alsdorf, D.E., Melack, J.M., Dunne, T. Mertes, L.A., Hess, L.L., Smith, L.C. (2000). Interferometric radar measurements of water level changes on

- the Amazon floodplain, *Nature*, Vol 404, 174–177.
- Badji, M., Dautrebande, S. (1997). Characterization of flood inundated areas and delineation of poor drainage soils using ERS-1 SAR imagery, *Hydrological Processes*, Vol 11, 1441–1450.
- Bangdadi, N., Bernier, R., Gauthier, R., Neeson, I. (2001). Evaluation of C-band SAR data for wetland mapping, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 22, 71–88.
- Barton, I.J., Barthols, J.M. (1989). Monitoring floods with AVHRR, *Remote Sensing of Environment*, Vol 30, 89–94.
- Blasco, F., Bellan, M.F., Chaudhury, M.U. (1992). Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT data, *Remote Sensing of Environment*, Vol 39, 167–178.
- Brivio, P.A., Colombo, R., Maggi, M., Tomasoni, R. (2002). Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 23, 429–441.
- Dewan, A.M., Kankam-Yeboah, K., Nishigaki, M. (2006). Synthetic Aperture Radar (SAR) data for mapping river water in urban landscape: A case study of Greater Dhaka, Bangladesh, *Journal Japan Society Hydrology and Water Resource*, Vol 19, 44–54.
- France, M. J., Hedges, P.D. (1986). A hydrological comparison of Landsat TM, Landsat MSS, and black and white aerial photography, *Proceedings of the 7th International Symposium ISPRS (International Society of Photogrammetry And Remote Sensing) Commission VII*, 12-16 August 1986, Delft, The Netherlands, 717–720.
- Gautam, R., R.P. Singh, M. Kafato (2005). Changes in ocean properties associated with Hurricane Isabel, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 26, 643–649.
- Gianinetto, M., A. Villa, G. Lechi (2006). Postfood damage evaluation using Landsat TM and ETM+ data integrated with DEM, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 44, 236–243.
- Henry, J.B., Chastanet, P. Fella, K., Desnos, Y.L. (2006). Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 27, 1921–1929.
- Horritt, M.S., Mason, D.C., Luckman, A.J. (2001). Flood boundary delineation from Synthetic Aperture Radar imagery using a statistical active contour model, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 22, 2489–2507.
- Imhoff, M.L., Vermillion, C., Story, M.H., Choudhury, A.M., Gafoor, A., Polcyn, F. (1987). Monsoon flood boundary delineation and damage assessment using space borne imaging radar and Landsat data, *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, Vol 53, 405–413.
- Islam, M.M., Sado, K., (2001). Flood damage and modeling using satellite remote sensing data with GIS: case study of Bangladesh. *Remote Sensing and Hydrology 2000* (M. Owe, K. Brubaker, J. Ritchie and A. Rango, editors), IAHS Publication, Oxford, 455–458.
- Jin, Y.Q., (1999). Flooding index and its regional threshold value for monitoring floods in China from SSM/I data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 20, 1025–1030.

- Kiage, L.M., Walker, N.D., Balasubramanian, S., Babin, A., Barras, J. (2005). Applications of RADARSAT-1 synthetic aperture radar imagery to assess hurricane-related flooding of coastal Louisiana, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 26, 5359–5380.
- Lane, S.N., James, T.D., Pritchard, H. Saunders, M. (2003). Photogrammetric and laser altimetric reconstruction of water levels for extreme flood event analysis, *Photogrammetric Record*, Vol 18: 293–307.
- Lee, K.S., Lee, S.I. (2003). Assessment of post-flooding conditions of rice fields with multi-temporal satellite SAR data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 24, 3457–3465.
- Lowry, R.T., Langham, E.J., Murdy, N. (1981). A preliminary analysis of SAR mapping of Manitoba flood, May 1979, *Proceedings of the 5th Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing*, 10-15 June 1979, Sioux Falls, South Dakota, USA, 316–323.
- Meyer, W., Welch, R. I. (1974). Water resource management, *Manual of Remote Sensing Volume 2: Interpretation and Application* (R.G. Reeves, A. Anson and D. Landen, editors), Keuffel & Esser Company, New York, 1432–1442.
- Nico, G., M. Pappalepor, M., Pasquariello, G. Refice, A., Samarelli, S. (2000). Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods: A GIS application, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, 1619–1631.
- Oberstadler, R., Honsch, H., Huth, D. (1997). Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping: a case study in Germany, *Hydrological Processes*, Vol 11, 1415–1425.
- Okamoto, K., Fukuhara, M. 1996. Estimation of paddy field area using the area ratio of categories in each pixel of Landsat TM, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 17, 1735–1749.
- Proferti, G., Macintosh, H. (1997). Flood management through Landsat TM and ERS SAR data: a case study, *Hydrological Processes*, Vol 11, 1397–1408.
- Raclot, D. (2006). Remote sensing of water levels on floodplains: a spatial approach guided by hydraulic functioning, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 27, 2553–2574.
- Sanyal, J., Lu, X.X. (2004). Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: a review, *Natural Hazards*, Vol 33, 283–301.
- Schneider, W.J. (1966). Water resources in the Everglades, *Photogrammetric Engineering*, Vol 32, 958–965.
- Sipple, S.J., Hamilton, S.K., Melack, J.M. (1994). Determination of inundation area in the Amazon River floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference, *Remote Sensing of Environment*, Vol 48, 70–76.
- Smith, L.C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review, *Hydrological Processes*, Vol 11, 1427–1439.

- Shamar, P.K., Chopra, R. , Verma, V.K., Thomas, A. (1996). Flood management using remote sensing: the Punjab (India) experience, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 17, 3511–3521.
- Töyrä, J., Pietroniro, A., Martz, L.W., Prowse, T.D. (2002). A multi-sensor approach to wetland flood monitoring, *Hydrological Processes*, Vol 16, 1569–1581.
- Townsend, P.A. (1998). Detection of hydro period in forested wetlands using multi-temporal Radarsat imagery, *Proceedings of the RADARSAT ADRO Final Symposium*, 13–15 October 1998, Montréal, Quebec, (Saint Hubert, Quebec, Canadian Space Agency), unpaginated CD-ROM.
- Wang, Y., Colby, J.D., Mulcahy, K.A. (2002). An efficient method for mapping flood extent in costal floodplain using Landsat TM and DEM data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 23, 3681–3696.
- Yamagata, Y., Akiyama, T. (1988). Flood damage analysis using mulitemporal Landsat Thematic Mapper data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 9, 503–514.
- Yang, C., Zhou, C., Wan, Q. (1999). Deciding the flood extent with Radarsat SAR data and image fusion, *Proceeding of the 20th Asian Conference of Remote Sensing*, 22–25 November 1999, Hong Kong, unpaginated CD-ROM.