

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การลดผลจากคลื่นหลายวิถีที่สถานีฐานจีพีเอสด้วยเวฟเลท

ผศ. ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ และ Professor Dr. Chris Rizos

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การลดผลจากคลื่นหลายวิถีที่สถานีฐานจีพีเอสด้วยเวฟเลท

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ. ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. Professor Dr. Chris Rizos	University of New South Wales

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ.และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสได้เข้ามามีบทบาทในงานสำรวจและการทำแผนที่มากขึ้น โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งสูง ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่รังวัดได้อาจจะมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นหลายชนิด เช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรของดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนของการหักเหในชั้นบรรยากาศ การเกิดคลื่นหลายวิถี และสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดขึ้นจากการใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องรับสัญญาณ การรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสในบริเวณที่มีพื้นผิวที่สะท้อนคลื่นอยู่รอบข้างเสาอากาศ เช่น ผนังตึก ถนน ยานพาหนะ เป็นต้น สิ่งต่างๆ เหล่านี้ล้วนทำให้เกิดคลื่นหลายวิถีในข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสได้ ส่งผลให้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ควรจะเป็นลดลงไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นหลายวิถีที่สถานีฐาน โดยใช้เวฟเลทเป็นเครื่องมือในการกรองคลื่นหลายวิถีทั้งที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง โดยทำการเก็บข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสแบบสถิติจำนวน 2 ชุด ข้อมูลชุดที่ 1 เป็นชุดข้อมูลที่มีเส้นฐานเป็นศูนย์ จึงไม่มีคลื่นหลายวิถีเกิดขึ้นมีเพียงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดเท่านั้น ส่วนข้อมูลชุดที่ 2 มีคลื่นหลายวิถีเกิดขึ้น เนื่องจากวงเสาอากาศไว้ใกล้กับกำแพงคอนกรีต จากนั้นจึงทำการแยกคลื่นหลายวิถีในข้อมูลชุดที่ 2 ออกจากสัญญาณรบกวน และขจัดออกไปจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสโดยการกรองด้วยเวฟเลท

ผลจากการวิจัยพบว่า หลังจากการกรองข้อมูลชุดที่ 2 ด้วยเวฟเลทในระดับที่ 1 สามารถขจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการวัดและลดขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสออกไปได้

คำสำคัญ: จีพีเอส คลื่นหลายวิถี เวฟเลท

Abstract

Nowadays GPS technology greatly plays crucial role on surveying and mapping community especially in high precision positioning. However, the GPS observations are contaminated by several types of biases such as the orbital bias, the atmospheric biases, multipath disturbance, and receiver noise. The multipath disturbance is one of the major error sources impacting on high precision GPS positioning. It is largely dependent on the receiver's environment since satellite signals can arrive at the receiver via multiple paths, due to reflections from nearby objects such as trees, buildings, vehicles, etc. To obtain accurate positioning results from GPS, it is necessary to minimize the magnitude of multipath disturbance in the GPS observations. Therefore, this research is to put emphasis on the use of wavelet decomposition technique for extracting or modeling multipath from both GPS pseudorange and carrier-phase observations. In this study, two sets of GPS data were collected in static mode. The first set of data is free from multipath effect because of the zero baseline configuration. On the contrary, the second set is seriously interfered by multipath effects as the receiver was put nearly a concrete wall. The multipath disturbance of the second data set was extracted and compared with the first data set.

The findings of this research indicate that both multipath disturbance and receiver noise were significantly reduced after the 1st level of wavelet decomposition was applied.

Keywords: GPS, Multipath, Wavelets

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
1. สรุปโครงการ (Executive Summary)	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ	3
1.5 ผลงาน/หัวข้อเรื่องที่น่าสนใจที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ	4
1.6 งบประมาณโครงการ	4
2. เนื้อหางานวิจัย	5
2.1 การปฏิบัติงานสนาม	5
2.2 การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล	10
2.3 สรุปผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล	15
3. ผลงานที่ได้จากโครงการ	17
รายการอ้างอิง	18
ภาคผนวก	19

1. สรุปโครงการ (Executive Summary)

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันงานรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส (Global Positioning System:GPS) ได้เข้ามามีบทบาทในงานสำรวจมากขึ้น โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งสูง เช่น งานโครงการควบคุมระดับประเทศ เป็นต้น เนื่องจากรางวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส ให้ตำแหน่งที่มีความละเอียดถูกต้องสูง ประหยัดเวลาในการออกสนาม สามารถปฏิบัติงานได้ทุกสภาพอากาศ และทุกสภาพพื้นที่ อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสนั้นอาจมีค่าคลาดเคลื่อนปนอยู่ด้วยเช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนจากวงโคจรดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนจากการแพร่กระจายของสัญญาณในชั้นบรรยากาศซึ่งอาจส่งผลให้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่ควรจะเป็นลดลง ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถถูกขจัดออกได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าต่าง

ด้วยข้อดีของการรังวัดด้วยระบบจีพีเอสที่สามารถปฏิบัติงานได้ทุกสภาพพื้นที่นั้นส่งผลให้การปฏิบัติงานในบริเวณชุมชนที่มีพื้นผิวที่สะท้อนคลื่นอยู่รอบข้างเสาอากาศไม่ว่าพื้นผิวนั้นจะอยู่ในแนวราบ คิง หรือเอียงคังเช่น ผนังตึก ถนน ผิวน้ำ ลานคอนกรีต ยานพาหนะ เป็นต้น สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดคลื่นหลายวิถี (Multipath) ในข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสได้ ซึ่งคลื่นหลายวิถีเป็นค่าคลาดเคลื่อนอีกชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสและมีอิทธิพลต่อความถูกต้องทางตำแหน่ง การปฏิบัติงานรังวัด โดยเลือกใช้เสาอากาศชนิดพิเศษหรือการหลีกเลี่ยงการทำงานในบริเวณที่มีโอกาสเกิดการสะท้อนของคลื่นนั้นอาจช่วยให้ขจัดคลื่นหลายวิถีออกไปได้บ้าง แต่ก็เป็นการยากที่จะหลีกเลี่ยงการทำงานในบริเวณที่ไม่มีการสะท้อนของคลื่นโดยสิ้นเชิง (Satirapod, Khoonphool และ Rizos, 2003) ฉะนั้นในการทำวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี ที่เกิดขึ้นที่สถานีฐานเพื่อให้ความถูกต้องทางตำแหน่งสูงขึ้น โดยใช้เวฟเลทเป็นเครื่องมือในการกรองสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นและขจัดคลื่นหลายวิถีออกไปจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส เนื่องจากการแปลงเวฟเลท(Wavelets Transform:WT) เป็นกลวิธีหนึ่งที่น่ามาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลสัญญาณ เช่น การกรอง หรือการบีบอัดสัญญาณ จากเดิมที่เคยใช้การแปลงแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform:FT) ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์คลื่นสัญญาณที่มีความคงตัว (Stationary Signal) เท่านั้น แต่เนื่องจากสัญญาณที่รับได้จากดาวเทียมจีพีเอสนั้นเป็นสัญญาณที่มีลักษณะไม่คงตัว(Non-Stationary Signal) จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการแปลงแบบฟูเรียร์กับคลื่นสัญญาณจีพีเอส (Satirapod, Ogaja, Wang, และ Rizos, C., 2001) อย่างไรก็ตามเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคนิคเวฟเลทได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยไม่มีข้อจำกัดเหมือนกับวิธีการแปลงแบบฟูเรียร์ จึงทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำเทคนิคการแปลงแบบเวฟเลทมาใช้กับคลื่นสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

1.2 วัตถุประสงค์

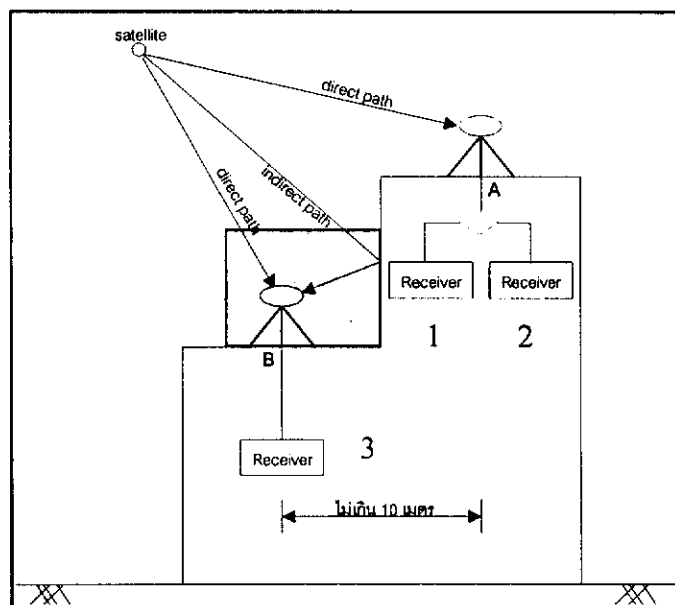
ในการวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อศึกษาถึงลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นในการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอส
- เพื่อศึกษานำวิธีการแปลงเวฟเลขและสามารถนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการกรองสัญญาณของคลื่นหลายวิถีที่มีอยู่ในคลื่นสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส
- เพื่อจัดทำแบบจำลองของคลื่นหลายวิถี (Multipath model) เพื่อนำไปใช้ในการขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี
- เพื่อกำหนดแนวทางในเชิงปฏิบัติสำหรับงานรังวัดด้วยระบบดาวเทียมจีพีเอสที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเวฟเลข
 2. เก็บข้อมูลในสนามโดยรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องกันเป็นเวลาอย่างน้อย 72 ชั่วโมง
ในงานวิจัยจะทำการรับสัญญาณจีพีเอส โดยแบ่งออกเป็นสองชุด ดังนี้
- ชุดที่ 1 วางเครื่องรับไว้ที่จุด A (ดังรูปที่ 1) ด้วยเครื่องรับ 2 เครื่องและเสาอากาศ 1 ชุด
 - ชุดที่ 2 วางเครื่องรับไว้ที่จุด B จำนวน 1 เครื่อง และเสาอากาศ 1 ชุด



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสในสนาม

จุด A จะต้องเป็นบริเวณที่ไม่มีคลื่นหลายวิถี ส่วนจุด B เป็นจุดที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีคลื่นหลายวิถี ดังนั้นเราจึงเลือกบริเวณคาคฟ้าของอาคารวิทยานิเวศน์ จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย เป็นที่ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส และกำหนดให้จุด A เป็นสถานีฐาน (Base station)

3. ทำการประมวลผลข้อมูลที่รับวัดได้จากขั้นที่ 2 และหาลักษณะของคลื่นหลายวิถี เพื่อนำไปใช้สร้างแบบจำลองคลื่นหลายวิถี โดยในขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลด้วยวิธีลีสทส์แควร์ (Least-squares method) โดยใช้เทคนิคค่าต่างแบบสองครั้ง (Double differencing technique) กับเส้นฐานที่สั้นๆ จะได้เศษเหลือ (Residuals) ซึ่งประกอบไปด้วย สัญญาณรบกวน (Noise) และค่าคลาดเคลื่อนแบบมีระบบ (Systematic errors) เช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากการหักเหของคลื่นในชั้นบรรยากาศ และคลื่นหลายวิถีเป็นต้น และเนื่องจากคลื่นหลายวิถีจะเกิดขึ้นซ้ำเดิมในรอบ 1 วันดาราคติ ดังนั้นในการทดลองจึงทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่องกันอย่างน้อย 72 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบคลื่นหลายวิถีในแต่ละวันดาราคติ
4. ขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถีและวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยจะเริ่มจากการนำเอาแบบจำลองของคลื่นหลายวิถีทั้งที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลวันแรกในขั้นตอนที่ 3 ไปทำการเปรียบเทียบกับลักษณะของสัญญาณของข้อมูลในวันถัดไป แล้วทำการขจัดสัญญาณที่มีลักษณะเหมือนแบบจำลองออกไป จากนั้นก็จะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ว่ายังมีค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถีเหลืออยู่เล็กน้อยเพียงไร
5. สรุปผลการวิจัยและเขียนบทความวิจัย

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

รายละเอียดของแผนการดำเนินงานตลอดโครงการ ได้จัดทำในรูปแบบตารางดังแสดงด้านล่าง

ลำดับ	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ (เดือนที่)																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	■	■	■	■	■																			
2	เก็บข้อมูลในสนาม					■	■	■																	
3	ประมวลผลข้อมูลและทำการหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีเพื่อจัดทำแบบจำลองคลื่นหลายวิถี								■	■	■	■	■	■											
4	ขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถีและวิเคราะห์ผลที่ได้																				■	■	■	■	■
5	สรุปผลการวิจัยและเขียนบทความวิจัย																								■

1.5 ผลงาน/หัวข้อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ปีที่ 2 : ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์: Multipath Mitigation of GPS Base Station Using

Wavelets ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์: Survey Review

1.6 งบประมาณโครงการ

	ปีที่ 1	ปีที่ 2	รวม
1. หมวดค่าตอบแทน			
-ค่าตอบแทนหัวหน้าโครงการ	120,000 บาท	120,000 บาท	240,000 บาท
2. หมวดค่าวัสดุ			
-ค่าวัสดุอิเล็กทรอนิกส์			
-ค่าวัสดุสำนักงาน	30,000 บาท	30,000 บาท	60,000 บาท
3. หมวดค่าใช้จ่าย			
-ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานภาคสนาม			
-ค่าจ้างช่วยพิมพ์งาน			
-ค่าถ่ายเอกสาร			
-ค่าใช้จ่ายในการติดต่อกับนักวิจัยอาวุโสในต่างประเทศและการส่งผลงานวิจัยไปตีพิมพ์			
-ค่าตำราและเอกสารประกอบการวิจัย	90,000 บาท	60,000 บาท	150,000 บาท
-ค่าใช้จ่ายอื่นๆ			
รวมงบประมาณโครงการ	240,000 บาท	210,000 บาท	450,000 บาท

2. เนื้อหางานวิจัย

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการปฏิบัติงานภาคสนามและการประมวลผล และวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 การปฏิบัติงานสนาม

ในงานสำรวจรังวัดทุกชนิด ก่อนที่จะออกปฏิบัติงานสนาม ควรจะมีการวางแผนปฏิบัติงานเสมอ เพื่อให้งานสำเร็จลงตามเป้าหมายที่วางไว้รวมถึงประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายด้วย หลังจากวางแผนปฏิบัติงานเรียบร้อยแล้วจึงจะเริ่มงานสนามต่อไป ขั้นตอนการวางแผนปฏิบัติงานสนามของงานวิจัยนี้มีดังนี้

2.1.1 การวางแผนปฏิบัติงานเบื้องต้น

ขั้นตอนนี้จะเป็นการสำรวจพื้นที่ที่จะปฏิบัติงานโดยสังเขป ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ศาลฟ้าอาคารสูงเป็นจุดรับสัญญาณเพื่อให้สิ่งแวดลอมรอบข้างปราศจากพื้นผิวที่มีการสะท้อนของคลื่นหรือสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดคลื่นหลายวิถีได้ดังเช่นจุด A ในรูปที่ 1.1 และในขณะเดียวกันก็ต้องรับสัญญาณบริเวณใกล้เคียงกันในรัศมี 10 เมตรซึ่งจะต้องมีการเกิดคลื่นหลายวิถีด้วย(จุดB) ซึ่งบริเวณที่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปแบบที่ต้องการที่สุดคือ บริเวณศาลฟ้าของอาคารวิทยนิเวศน์ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นอาคารสูง 14 ชั้น

เพื่อให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส โดยแบ่งออกเป็นสองชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 วางเครื่องรับไว้ที่จุด A (ดังรูปที่ 1.1) ด้วยเครื่องรับ 2 เครื่องและใช้เสาอากาศร่วมกัน โดยต่อกล่องแยกสัญญาณเสาอากาศ (Antenna Splitter) เข้ากับเสาอากาศ 1 อันจากนั้นจึงต่อสายสัญญาณเข้าเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่อง คือเครื่องรับหมายเลข 1 และ 2

ชุดที่ 2 วางเครื่องรับไว้ที่จุด B จำนวน 1 เครื่อง (เครื่องรับหมายเลข 3) และใช้เสาอากาศ 1 อัน

จากการออกแบบการทดลอง จะเห็นได้ว่าตำแหน่งจุด A จะอยู่ในบริเวณที่ไม่มีการเกิดคลื่นหลายวิถี และกำหนดให้เป็นสถานีฐาน (Base Station) ส่วนตำแหน่งจุด B จะเป็นจุดที่มีคลื่นหลายวิถีเกิดขึ้น เนื่องจากติดตั้งใกล้กับกำแพงคอนกรีต

2.1.2 การเตรียมการเพื่อปฏิบัติงานสนาม

เนื่องจากในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการรังวัดแบบสถิตที่มีเสัฐานสั้น และจุดปลายของเสัฐานทั้งสองจุดสามารถมองเห็นกันและใกล้กัน ดังนั้นจึงตัดปัญหาเรื่องการเดินทางออกไปได้ แต่จะต้องทำการ

รังวัดเป็นเวลานานอย่างน้อย 72 ชั่วโมง หรือ 3 วัน ดังนั้นการเตรียมความพร้อมทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์จึงเป็นสิ่งสำคัญในขั้นตอนนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรตรวจสอบหน่วยความจำของเครื่องรับสัญญาณทุกครั้งก่อนออกปฏิบัติงาน

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการรังวัดดาวเทียม มีดังนี้

1. เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบสองความถี่ จำนวน 3 เครื่อง
ยี่ห้อ LEICA รุ่น System 500
2. ขาดังกล้อง จำนวน 2 ชุด
3. สายต่อเสาอากาศกับเครื่องรับสัญญาณยาว 10 ม. จำนวน 2 เส้น
4. Antenna Splitter จำนวน 1 ชุด
5. ขาทราย จำนวน 2 ชุด
6. แบตเตอรี่แบบต่อภายนอก
7. อุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น เช่น ไฟฉาย สายไฟพร้อมเต้าเสียบ ถังทรายพร้อมเชือกเพื่อวางทับขากล้องให้มีน้ำหนักเพื่อต้านแรงลม เชือกหรือลวดเพื่อใช้ผูกขาดังกล้องยึดติดไว้กับตัวอาคารเพื่อไม่ให้ล้าหากมีลมพัดแรง เนื่องจากการทำงานบนอาคารฟ้าอาคารสูง

2.1.3 การเก็บข้อมูลในสนาม

ในขั้นตอนนี้เป็นการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสตามตำแหน่งที่ได้เลือกไว้ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสทั้งหมด 2 ครั้ง โดยกำหนดให้ใช้ค่าความถี่ในการรับข้อมูล (Sampling Rate) ต่างกันเพื่อให้เห็นถึงลักษณะของคลื่นหลายวิธีเมื่อใช้ข้อมูลที่มีอัตราถี่แตกต่างกันทั้งสองชุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

ข้อมูลปี พ.ศ. 2545

ทำการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน โดยเริ่มจากวันที่ 25 ตุลาคม 2545 เวลา 14:00 น. ถึงวันที่ 31 ตุลาคม 2545 เวลา 14:00 น. การรับสัญญาณดาวเทียมในครั้งนี้กำหนดให้รับสัญญาณทุกๆ 15 วินาที (Sampling Rate=15 second) ตัดสัญญาณที่ต่ำกว่า 10 องศาออกไปเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากการหักเหในชั้นบรรยากาศ และกำหนดให้จุด B ซึ่งวางเครื่องรับหมายเลข 3 นั้น อยู่ห่างจากกำแพงคอนกรีต 1.50 ม. รายละเอียดการบันทึกสัญญาณดาวเทียมของเครื่องรับแต่ละเครื่อง แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ถึง 2.3

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสวันที่ 25-31ต.ค. 2545
ของเครื่องรับหมายเลข 1

ลำดับ	ชนิดของข้อมูล	เริ่ม		สิ้นสุด	
		วันที่	เวลา	วันที่	เวลา
1	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	25/10/02	6:37:45	26/10/02	6:38:45
2	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	26/10/02	6:39:00	27/10/02	7:05:00
3	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	27/10/02	7:05:15	28/10/02	7:00:15
4	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	28/10/02	7:00:30	29/10/02	7:00:30
5	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	29/10/02	7:00:45	30/10/02	7:00:30
6	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	30/10/02	7:00:45	31/10/02	7:01:45

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสวันที่ 25-31ต.ค. 2545
ของเครื่องรับหมายเลข 2

ลำดับ	ชนิดของข้อมูล	เริ่ม		สิ้นสุด	
		วันที่	เวลา	วันที่	เวลา
1	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	25/10/02	6:37:45	26/10/02	6:38:45
2	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	26/10/02	6:39:00	27/10/02	7:05:00
3	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	27/10/02	7:05:15	28/10/02	7:00:15
4	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	28/10/02	7:00:30	29/10/02	7:00:30
5	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	29/10/02	7:00:45	30/10/02	7:00:30
6	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	30/10/02	7:00:45	31/10/02	7:01:45

ตารางที่ 2.3 แสดงรายละเอียดการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสวันที่ 25-31 ต.ค. 2545
ของเครื่องรับหมายเลข 3

ลำดับ	ชนิดของข้อมูล	เริ่ม		สิ้นสุด	
		วันที่	เวลา	วันที่	เวลา
1	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	25/10/02	6:37:45	26/10/02	6:38:45
2	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	26/10/02	6:39:00	27/10/02	7:05:00
3	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	27/10/02	7:05:15	28/10/02	7:00:15
4	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	28/10/02	7:00:30	29/10/02	7:00:15
5	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	29/10/02	7:00:30	30/10/02	7:00:30
6	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	30/10/02	7:00:45	31/10/02	7:01:30

หมายเหตุ วันที่และเวลาตามระบบเวลาUT

ข้อมูลปี พ.ศ. 2546

ทำการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องเป็นเวลา 3 วัน โดยเริ่มจากวันที่ 24 ตุลาคม 2546 เวลา 14:00 น. ถึงวันที่ 26 ตุลาคม 2546 เวลา 14:00 น. การรับสัญญาณดาวเทียมในครั้งนี้นำหนดให้รับสัญญาณทุกๆ 1 วินาที (Sampling Rate=1 second) ตัดสัญญาณที่ต่ำกว่า 10 องศาออกไป และนำหนดให้จุด B ซึ่งวางเครื่องรับหมายเลข 3 นั้น อยู่ห่างจากกำแพงคอนกรีต 1.00 ม. รายละเอียดการบันทึกสัญญาณดาวเทียมของเครื่องรับแต่ละเครื่องแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ถึง 2.6

ตารางที่ 2.4 แสดงรายละเอียดการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสวันที่ 24-26 ต.ค. 2546
ของเครื่องรับหมายเลข 1

ลำดับ	ชนิดของข้อมูล	เริ่ม		สิ้นสุด	
		วันที่	เวลา	วันที่	เวลา
1	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	10/24/03	07:53:03	10/24/03	20:12:04
2	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	10/25/03	00:58:24	10/26/03	00:58:14
3	$P_1 \varphi_1 P_2 \varphi_2$	10/26/03	01:12:07	10/27/02	01:58:57

ตารางที่ 2.5 แสดงรายละเอียดการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสวันที่ 24-26 ต.ค. 2546
ของเครื่องรับหมายเลข 2

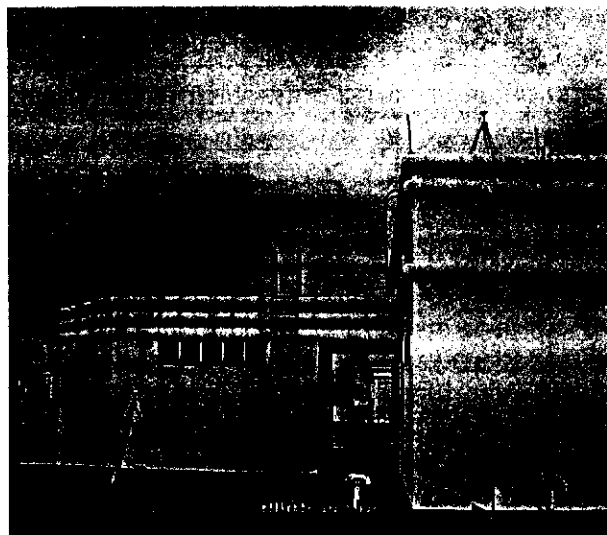
ลำดับ	ชนิดของข้อมูล	เริ่ม		สิ้นสุด	
		วันที่	เวลา	วันที่	เวลา
1	P ₁ ϕ ₁ P ₂ ϕ ₂	10/24/03	07:53:03	10/24/03	21:10:50
2	P ₁ ϕ ₁ P ₂ ϕ ₂	10/24/03	22:55:45	10/26/03	00:58:25
3	P ₁ ϕ ₁ P ₂ ϕ ₂	10/26/03	01:12:08	10/27/03	04:13:06

ตารางที่ 2.6 แสดงรายละเอียดการบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสวันที่ 24-26 ต.ค. 2546
ของเครื่องรับหมายเลข 3

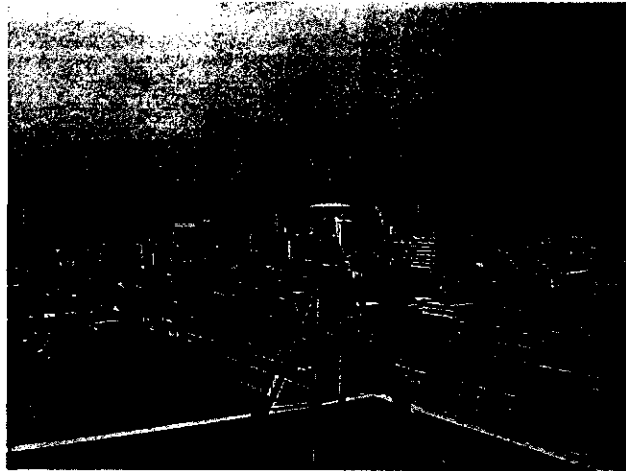
ลำดับ	ชนิดของข้อมูล	เริ่ม		สิ้นสุด	
		วันที่	เวลา	วันที่	เวลา
1	P ₁ ϕ ₁ P ₂ ϕ ₂	10/24/03	04:36:39	10/24/03	21:10:54
2	P ₁ ϕ ₁ P ₂ ϕ ₂	10/24/03	22:55:47	10/26/03	00:58:57
3	P ₁ ϕ ₁ P ₂ ϕ ₂	10/26/03	01:12:06	10/27/03	04:13:07

หมายเหตุ วันที่และเวลาตามระบบเวลาUT

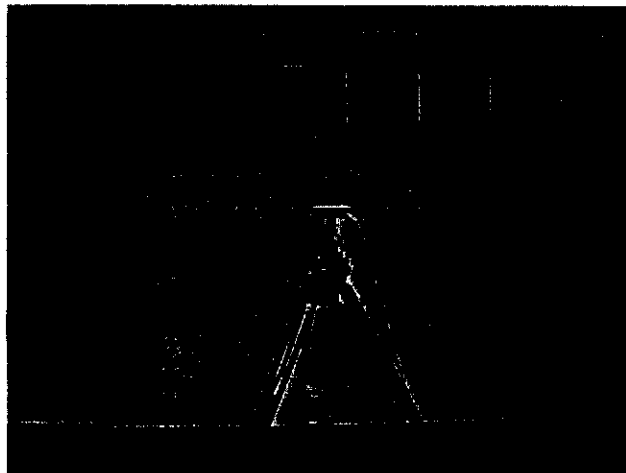
ตำแหน่งที่วางเสาอากาศเพื่อรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสบนคาค้ำอาคารวิทยนิเวศน์ แสดงในรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 แสดงการวางอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม GPS บนอาคารวิทยนิเวศน์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แสดงการวางเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่จุด A



รูปที่ 2.3 แสดงการวางเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่จุด B

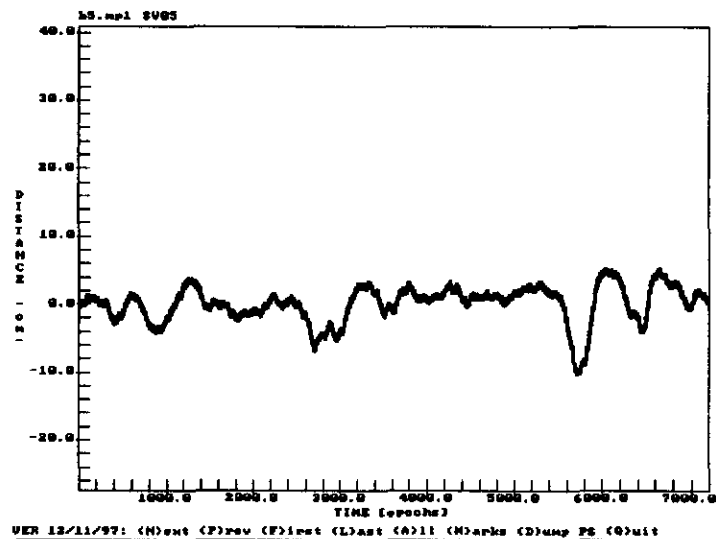
2.2 การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากได้ทำการเก็บข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแล้ว จะต้องนำข้อมูลที่ได้อมาทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สนใจ โดยใช้ซอฟต์แวร์เข้ามาช่วยในการประมวลผล โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.1 การตรวจสอบข้อมูล

ก่อนที่จะนำข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสไปประมวลผลเพื่อหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง จำเป็นต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลเพื่อค้นหาช่วงเวลาที่เกิดคลื่นหลายวิถีอย่างคร่าวๆ ของข้อมูลในแต่ละวันเพื่อจะได้เลือกช่วงเวลาในการประมวลผลให้ตรงกับช่วงเวลาที่เกิดคลื่นหลายวิถี โดยใช้ซอฟต์แวร์ TEQC เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบคุณภาพ (UNAVCO, 2005) ข้อมูลที่จะนำมาตรวจสอบคุณภาพต้องจัดให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานของข้อมูลจีพีเอสซึ่งเรียกว่า RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ก่อน จึง

จะสามารถนำข้อมูลไปตรวจสอบคุณภาพได้ ซอฟต์แวร์ TEQC เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการดอส (DOS) ซึ่งทำการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลดาวเทียม โดยสร้างไฟล์ผลลัพธ์ที่มีขนาดของคลื่นหลายวิถีในรูปแบบของไฟล์นามสกุล mp1 (XXX.mp1) ซึ่งสามารถแสดงขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์ในรูปแบบกราฟเส้น โดยแยกตามหมายเลขดาวเทียม ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์ จากดาวเทียม หมายเลข PRN05 (ที่จุด B)

แกนนอนในรูป 2.4 แสดงช่วงเวลาที่เกิดคลื่นหลายวิถีมีหน่วยเป็น epoch รูปที่ 2.4 แสดงขนาดของคลื่นหลายวิถีจากดาวเทียม SV05 เมื่อวางเสาอากาศไว้ที่จุด B (ข้อมูลชุดที่ 2) โดยแกนตั้งแสดงขนาดของคลื่นหลายวิถี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบหาช่วงเวลาที่เกิดคลื่นหลายวิถีจากข้อมูลชุดที่ 2 ของข้อมูลทั้งหมดต่อไป และเมื่อทำการตรวจสอบหาช่วงเวลาที่เกิดคลื่นหลายวิถีอย่างคร่าวๆ ได้แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลทั้งสองประเภท ต่อไป

2.2.2 การประมวลผลเพื่อหาลักษณะของคลื่นหลายวิถี

สำหรับงานวิจัยนี้ได้จัดเตรียมข้อมูลจีพีเอสไว้ 2 ชุด คือ

ข้อมูลชุดที่ 1 ได้จากเครื่องรับหมายเลข 1 และหมายเลข 2 ซึ่งใช้เสาอากาศอันเดียวกัน และวางอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดคลื่นหลายวิถีได้น้อยหรือไม่มีคลื่นหลายวิถีเกิดขึ้นเลย

ข้อมูลชุดที่ 2 ได้จากเครื่องรับหมายเลข 3 ซึ่งวางเสาอากาศไว้ในตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดคลื่นหลายวิถีในข้อมูลจีพีเอสได้ เนื่องจากสัญญาณไปกระทบกับพื้นผิวอื่น ก่อนที่จะเดินทางเข้ามายังเสาอากาศ

เนื่องจากคลื่นหลายวิถีสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ดังนั้นการคำนวณหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีจึงต้องทำการคำนวณกับข้อมูลทั้งสองชนิด

2.2.2.1 การหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์

ลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์นั้นพิจารณาได้จากขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลทั้งสองชุด ซึ่งได้จากการนำข้อมูลจีพีเอสในรูปแบบ RINEX มาทำการคำนวณด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองจากโปรแกรม MATLAB จากความสัมพันธ์ดังนี้ (Rizos, 1997)

$$MP_1 + K_1 = P_1 - \frac{9525}{2329} \varphi_1 + \frac{7200}{2329} \varphi_2 \quad (2.1)$$

$$K_1 = (n_1 - 0.9697n_2)/1.2844 \quad (2.2)$$

- เมื่อ MP_1 คือ ขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์จากคลื่นส่ง L_1
 φ_1 และ φ_2 คือ ค่าเฟสของคลื่นส่ง L_1 และ L_2
 n_1 คือ จำนวนลูกคลื่นเต็มลูกของคลื่นส่ง L_1
 n_2 คือ จำนวนลูกคลื่นเต็มลูกของคลื่นส่ง L_2
 P_1 คือ ซูโดเรนจ์ของคลื่นส่ง L_1
 K_1 คือ ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่และจำนวนลูกคลื่นเต็มลูกหรือเลขปริศนาของคลื่นส่ง L_1

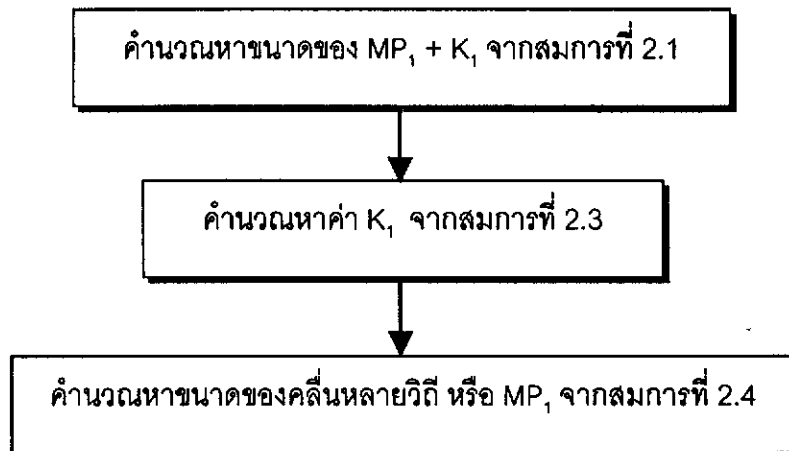
ตัวแปรต่างๆในสมการข้างต้นมีหน่วยเป็นเมตรและถ้าไม่มีคลื่นหลุดเกิดขึ้นในข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ค่าของตัวแปร K_1 จะมีค่าคงที่ จากสมการที่ (2.1) จะเห็นได้ว่าหากต้องการหาขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์(MP_1) จะต้องขจัดค่า K_1 ออกไปก่อน และจากการศึกษาของ Han และ Rizos(1997) พบว่าหากมีข้อมูลซูโดเรนจ์เป็นจำนวนมากหรือใช้ข้อมูลในช่วงเวลายาวนาน ค่า K_1 ในสมการที่ (2.2) สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทางด้านขวามือทั้งหมดจากสมการที่ 2.1 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า K_1 ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงเวลาใกล้เคียงกันเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง เมื่อต้องการหาขนาดของคลื่นหลายวิถี (MP_1) ณ เวลาใดๆ ดังสมการต่อไปนี่

$$K_1 = \sum (MP_1 + K_1) \times \frac{1}{n} \quad ; n = \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมดใน 2 ชั่วโมง} \quad (2.3)$$

ดังนั้นขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลยูโดเรนท์หาได้จากผลต่างของสมการที่ (2.1) และ (2.3) ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.4

$$MP_1 = P_1 - \frac{9525}{2329} \phi_1 + \frac{7200}{2329} \phi_2 - \sum (MP_1 + K_1) \times \frac{1}{n} \quad (2.4)$$

โดยสามารถสรุปขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลยูโดเรนท์

2.2.2.2 การหาลักษณะของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง

สำหรับคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเฟสของคลื่นส่งนั้นจะพิจารณาจากค่าเศษเหลือของค่าต่างครั้งที่สอง จากการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด ในขั้นตอนการประมวลผลพื้นฐาน ได้ใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลพื้นฐาน SNAP ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย มหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ นครซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย การประมวลผลจะแบ่งออกเป็น 2 เส้นฐาน คือ

- เส้นฐาน 1 จุดปลายของเส้นฐานทั้งสองอยู่ที่จุด A โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องรับหมายเลข 1 และ 2 มาประมวลผลร่วมกัน ซึ่งเส้นฐานดังกล่าวก็คือเส้นฐานที่มีความยาวเท่ากับศูนย์

- เส้นฐาน 2 จุดปลายของเส้นฐานอยู่ที่จุด A และ B โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องรับหมายเลข 1 และ 3 มาประมวลผลร่วมกัน ซึ่งเส้นฐานดังกล่าวจะมีความยาวประมาณ 10 เมตร และเป็นเส้นฐานขนาดสั้น

การประมวลผลสัญญาณเพื่อให้ได้ค่าเศษเหลือนั้นจะเลือกใช้ข้อมูลจีพีเอสในช่วงเวลาที่คาดว่าจะเกิดคลื่นหลายวิถี ซึ่งมีคลื่นหลายวิถีเกิดขึ้นกับคู่ดาวเทียมหลายคู่

2.2.2.3 การขจัดคลื่นหลายวิถีด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลท

เนื่องจากคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ ส่วนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการวัดเป็นสัญญาณในย่านความถี่สูง ดังนั้นเพื่อทำการแยกคลื่นหลายวิถีออกจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส ในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลทแยกคลื่นหลายวิถีและสัญญาณรบกวนออกจากกัน และเนื่องจากคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่งจึงต้องทำการกรองข้อมูลทั้งสองชนิด ซึ่งมีรายละเอียดและลำดับขั้นตอนดังนี้

กำหนดให้

สัญญาณ 1 ได้แก่ ขนาดของ MP, ในข้อมูลชุดที่ 1 เมื่อพิจารณาข้อมูลซูโดเรนจ์ หรือค่าเศษเหลือจากสัญญาณ 1 เมื่อพิจารณาข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง

สัญญาณ 2 ได้แก่ ขนาดของ MP, ในข้อมูลชุดที่ 2 เมื่อพิจารณาข้อมูลซูโดเรนจ์ หรือค่าเศษเหลือจากสัญญาณ 2 เมื่อพิจารณาข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง

เนื่องจากสัญญาณ 1 ได้จากข้อมูลชุดที่ 1 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีสัญญาณเป็นศูนย์ ดังนั้นสัญญาณ 1 จึงเป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดเพียงอย่างเดียว ส่วนสัญญาณ 2 ได้จากข้อมูลชุดที่ 2 ซึ่งทำการวางเสาอากาศไว้ใกล้กับกำแพงคอนกรีตจึงมีโอกาสเกิดคลื่นหลายวิถีได้ ดังนั้นสัญญาณ 2 จึงเป็นข้อมูลที่มีทั้งสัญญาณรบกวนและคลื่นหลายวิถีเมื่อใช้เวฟเลทกรองสัญญาณ 2 ข้อมูลจะถูกแยกออกเป็นเทอมของสัญญาณในย่านความถี่สูง(สัญญาณรบกวน) ซึ่งพฤติกรรมของสัญญาณรบกวนจะมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) และเทอมของสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ(คลื่นหลายวิถี) หากเทอมของสัญญาณในย่านความถี่สูงที่แยกออกมาได้จากการกรองสัญญาณ 2 คือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดเหมือนกับที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ 1 แล้ว ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนทั้งสองชุดจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเทอมของสัญญาณในย่านความถี่ต่ำที่แยกออกมาจากการกรองสัญญาณ 2 ด้วยเวฟเลท ก็คือคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลดาวเทียมจีพีเอส

ขั้นตอนการกรองสัญญาณด้วยเวฟเลท

1) ทำการกรองสัญญาณ 2 ด้วยเวฟเลทเพื่อแยกสัญญาณรบกวนและคลื่นหลายวิถีออกจากกัน ส่วนสัญญาณ 1 ไม่ต้องทำการกรอง เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนเพียงอย่างเดียว ในการกรองครั้งนี้ถือเป็นการกรองในระดับที่ 1

2) คำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากสัญญาณทั้งสองชุด เพื่อทดสอบว่าเทอมของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสัญญาณ 2 (Noise₂) คือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัด เหมือนกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดในสัญญาณ 1 (Noise₁) หรือไม่ โดยค่า

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากสัญญาณ 1 คือ σ_1 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากสัญญาณ 2 คือ σ_2

3) เปรียบเทียบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง σ_1 และ σ_2 โดยใช้การทดสอบสถิติ F-Test แบบสองทาง ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าความแปรปรวนของสองประชากร โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งสองชุด ได้แก่ Noise₁ และ Noise₂ นั้นเป็นกลุ่มประชากรที่มีการกระจายตัวแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน โดยตั้งสมมติฐานเพื่อการทดสอบดังนี้

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad ; \text{Noise}_2 \text{ คือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัด}$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \quad ; \text{Noise}_2 \text{ ไม่ใช่สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัด}$$

หากผลการทดสอบพบว่าไม่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากสัญญาณทั้งสองชุดมีความคล้ายคลึงกันหรือมีพฤติกรรมเหมือนกัน ดังนั้น Noise₂ จึงเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัด และเทอมของสัญญาณในย่านความถี่ต่ำที่คิดว่าคลาดเคลื่อนหลายวิธีที่แยกออกจากการกรองสัญญาณ 2 ก็คือคลื่นหลายวิธีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลชุดที่ 2 จริง ซึ่งก็หมายความว่าได้ทำการแยกคลื่นหลายวิธีออกจากสัญญาณ 2 สำเร็จ หากผลทดสอบพบว่าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แสดงว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากสัญญาณทั้งสองชุดไม่มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งก็หมายความว่ายังมีคลื่นหลายวิธีปนอยู่ในสัญญาณ 2 จึงต้องทำการกรองด้วยเวฟเลทในระดับที่ 2 และทำการทดสอบทางสถิติอีกครั้ง หากพบว่าผลการทดสอบสมมติฐานยังปฏิเสธสมมติฐาน H_0 จะต้องทำการกรองด้วยเวฟเลทในระดับต่อไปจนกว่าจะไม่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (ทำการกรองจนกว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Noise₂ จะเท่ากับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Noise₁)

4) เมื่อผลการทดสอบทางสถิติไม่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 แล้วให้ทำการขจัดคลื่นหลายวิธีออกไปจากสัญญาณ 2 โดยนำเทอมของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำไปลบออกจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ได้จากเครื่องรับ ดังนั้นจึงเหลือเพียงข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ปราศจากคลื่นหลายวิธี

2.3 สรุปผลจากการวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส เพื่อศึกษาถึงลักษณะของคลื่นหลายวิธีที่เกิดขึ้นกับข้อมูล และการศึกษาถึงผลจากการขจัดคลื่นหลายวิธีออกไปจากข้อมูลดาวเทียมจีพีเอสด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลท โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยอัตราที่ข้อมูล 1 วินาที และ 15 วินาที เพื่อ

เปรียบเทียบความแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ได้ เมื่อใช้อัตราถี่ข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลจากคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลชูโคเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ลักษณะของคลื่นหลายวิถีทั้งที่เกิดขึ้นกับข้อมูลชูโคเรนจ์และที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเฟสของคลื่นส่งนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบเดียวกัน โดยคลื่นหลายวิถีของข้อมูลในวันที่สองจะเกิดขึ้นก่อนคลื่นหลายวิถีของข้อมูลในวันแรกประมาณ 4 นาที และมีรูปแบบเดียวกัน
- ขนาดของคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสในปี พ.ศ.2546 มีขนาดใหญ่กว่าคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลในปีพ.ศ.2545 เนื่องจากข้อมูลในปีพ.ศ.2545 ได้ทำการวางเสาอากาศของเครื่องรับหมายเลข 3 ที่จุด B(ดังรูปที่ 3.1) ห่างจากกำแพงคอนกรีต 1.50 ม. ส่วนข้อมูลในปีพ.ศ.2546 จุด B ห่างจากกำแพงคอนกรีตเพียง 1.00 ม. ซึ่งทำให้คลื่นหลายวิถีมีขนาดใหญ่กว่า
- สำหรับคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลชูโคเรนจ์ เมื่อใช้ข้อมูลที่มีอัตราถี่ต่างกันจะสามารถขจัดคลื่นหลายวิถีออกไปได้จากการกรองด้วยเวฟเลทในระดับที่ต่างกันด้วย โดยข้อมูลที่มีอัตราถี่ 15 วินาที จะสามารถขจัดคลื่นหลายวิถีออกไปได้จากการกรองด้วยเวฟเลทในระดับที่ 4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และสามารถขจัดคลื่นหลายวิถีได้เร็วกว่าข้อมูลที่มีอัตราถี่ 1 วินาที
- สำหรับคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเฟสของคลื่นส่งนั้นจะสามารถขจัดออกไปได้จากการกรองด้วยเวฟเลทในระดับที่ 1 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ทั้งข้อมูลที่มีอัตราถี่ 15 วินาที และ 1 วินาที ดังนั้นการเลือกใช้อัตราถี่ของข้อมูลที่แตกต่างกันในการประมวลผลจึงไม่ส่งผลต่อการขจัดคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นกับข้อมูลชนิดนี้
- จากผลการกรองด้วยเวฟเลทในระดับที่ 1 กับข้อมูลชูโคเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง พบว่า สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดและสามารถขจัดคลื่นหลายวิถีออกไปได้โดยพิจารณาได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ลดลงไปกว่าร้อยละ 74

3. ผลงานที่ได้จากโครงการ

ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่จะใช้วิธีการนี้ในการขจัดคลื่นหลายวิถีในข้อมูลเฟสของคลื่นส่งและข้อมูลซูโคเรนจ์ออกไปได้ โดยคณะผู้วิจัยได้นำผลงานจากงานวิจัยไปนำเสนอ ณ ที่ประชุมระดับนานาชาติด้านงานรังวัดดาวเทียม (International Symposium on GPS/GNSS 2003) ที่ประเทศญี่ปุ่น และก็ได้รับการตอบรับให้ไปนำเสนอด้วยวาจา ณ ที่ประชุมดังกล่าว เมื่อปลายปี พ.ศ. 2546

Satirapod C., Khoonphool R., and Rizos C. (2003) Multipath Mitigation of Permanent GPS Station Using Wavelets, Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS 2003, Tokyo, Japan, 15-18 November.

จากนั้นคณะผู้วิจัยก็ได้ทำการปรับปรุงบทความที่ส่งไปนำเสนอที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติที่ประเทศญี่ปุ่น เพื่อส่งไปตีพิมพ์ที่วารสาร Survey Review ซึ่งเป็นวารสารที่เป็นที่ยอมรับในสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจและถูกจัดอยู่ในฐานข้อมูล ISI และมีค่า Impact factor ของปี 2003 เท่ากับ 0.196 บทความที่ส่งไปนั้นได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์ในวารสาร Survey Review ฉบับเดือนมกราคม พ.ศ. 2548 โดยไม่มีการแก้ไขแต่อย่างใด (ดูบทความฉบับสมบูรณ์ได้ในภาคผนวก)

Satirapod C. and Rizos C. (2005) Multipath Mitigation By Wavelet Analysis for GPS Base Station Applications, Survey Review, 38(295), 2-10.

รายการอ้างอิง

- Han, S. and Rizos, C. (1997). Multipath effects on GPS in mine environment, 10th International Congress on the International Society for Mine Surveying, Fremantle, Australia, 2-6 November, 447-457.
- Rizos, C. (1997). Principles and practice of GPS surveying, Monograph 17, School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, 555pp.
- Satirapod, C., Ogaja, C., Wang, J. and Rizos, C. (2001). An Approach to GPS analysis incorporating Wavelet Decomposition. Artificial Satellites, 36(2), 27-35.
- Satirapod C., Khoonphool R., and Rizos C. (2003). Multipath Mitigation of Permanent GPS Station Using Wavelets, proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS 2003, Tokyo, Japan, 15-18 November.
- UNAVCO (2005). TEQC. The Toolkit for GPS/GLONASS Data[Online]. Available from:
http://www.unavco.ucar.edu/data_support/software/visualization/qcview.html [2005, June 15]

ภาคผนวก

(บทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสาร Survey Review ฉบับเดือนมกราคม พ.ศ. 2548)

MULTIPATH MITIGATION BY WAVELET ANALYSIS FOR GPS BASE STATION APPLICATIONS

Chalermchon Satirapod¹ and Chris Rizos²

¹Geo-Image Technology Research Unit, Department of Survey Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

²Satellite Navigation and Positioning Group
School of Surveying and Spatial Information Systems
The University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia

ABSTRACT

It is well known that multipath disturbance is one of the major error sources impacting on high precision GPS positioning. The multipath disturbance is largely dependent on the receiver's environment since satellite signals can arrive at the receiver via multiple paths, due to reflections from nearby objects such as trees, buildings, vehicles, etc. Although the multipath effect can be reduced by choosing sites without multipath reflectors or by using choke-ring antennas to mitigate the reflected signal, it is difficult to eliminate all multipath effects from GPS observations. Since the geometry between the GPS satellites and a specific receiver-reflector location repeats every sidereal day, multipath tends to exhibit the same pattern between consecutive days. This repetition can then be useful for verifying the presence of multipath through the analysis of observations made at a static receiver on different days. In this study, the authors apply a wavelet decomposition technique to extract multipath from GPS observations. The extracted multipath signature is then applied directly to the GPS observations to correct for the multipath effects. The results show that the proposed method can be used to significantly mitigate the multipath effects at a permanent GPS station.

INTRODUCTION

GPS carrier phase observations are widely used for all high precision static and kinematic positioning applications. The least-squares estimation method is usually employed for the processing of such GPS observations. The least-squares method is based on the formulation of a mathematical model consisting of the functional model and the stochastic model. If the function model is adequate, the residuals obtained from the least-squares solution should be randomly distributed. However, the GPS observations are contaminated by several types of biases such as the orbital bias, the atmospheric biases, multipath disturbance, and receiver noise. A double-differencing technique is commonly used for constructing the functional model as it can eliminate or reduce many of the troublesome GPS biases (i.e. the atmospheric biases, the receiver and satellite clock biases, and the orbital bias). However, some un-modelled biases still remain in the GPS observations, even after such data differencing. Multipath is a major residual error source in the double-differenced GPS observables, and it can have a significant impact on the positioning results.

To obtain accurate positioning results from GPS it is necessary to minimise the magnitude of multipath disturbance of the GPS observations. Recently, some wavelet-based techniques have been introduced in the field of GPS data processing (e.g., [4], [5], [11], [13]). These methods have addressed some potential applications such as signal de-noising, outlier detection, bias separation and data compression. A new technique using wavelet decomposition is proposed for extracting or modelling multipath from GPS carrier-phase observations. The technique is first applied in order to decompose GPS double-differenced residuals into low-frequency bias and high-frequency noise terms. The extracted bias component is then applied directly to the

GPS observations to correct for the trend introduced by this error component. The remaining terms, largely characterised by the GPS range observations and high-frequency measurement noise, are expected to give the best linear unbiased solutions from a least-squares process.

This paper is organised as follows. An introduction to existing multipath mitigation techniques is presented. The theory of wavelet decomposition and its application to GPS data processing is then described. A discussion of experimental results and analyses are presented in a subsequent section. Finally, some concluding remarks are made.

MULTIPATH MITIGATION TECHNIQUES

Multipath is a phenomenon whereby satellite signals can arrive at the receiver via multiple paths, due to reflections from nearby objects such as trees, buildings, the ground, water surfaces, vehicles, etc. It can be reduced by choosing sites without multipath reflectors or by using choke-ring antennas to mitigate the reflected signal. However, it is difficult to eliminate all multipath effects from GPS observations only through careful site selection and the use of special antenna types. For example, in structural monitoring applications it may not be possible to find suitable antenna sites that are *not* susceptible to multipath.

[17] described two techniques, namely Multipath Elimination Technology and Multipath Elimination Delay Lock Loop, used to mitigate multipath at the receiver signal processing level. Most modern GPS receivers now employ similar algorithms. However, multipath cannot be completely removed and the residuals may still be too large to ignore when high accuracy positioning results are required. It is therefore essential to investigate post-reception data processing techniques for mitigating the effect of multipath. Fortunately the multipath disturbance has a periodic characteristic and is repeated every sidereal day for a static receiver if the antenna environment remains the same. Several post-reception methods to mitigate multipath have been proposed. [8] suggested a technique that requires a preparation of 'maps' of the multipath environment surrounding the GPS antenna. The limitation of this technique is that it will only work well if the antenna environment remains unchanged. [1] proposed a technique that relies on the analysis of the signal-to-noise-ratio (SNR) values of GPS signals. However, this technique cannot be used in real-time. [2] proposed the use of a 'multipath template' for mitigating multipath. [9] also proposed the use of finite impulse response (FIR) filters to extract or eliminate multipath. However, the limitation of such techniques is that signals (for example, crustal deformation) falling in the same frequency band as the FIR filters will be filtered out [6]. An effective technique based on the use of an adaptive filter to extract and eliminate multipath was suggested by [7]. This is due to the fact that GPS observation noise tends to change with time, it is therefore more appropriate to use an adaptive filter rather than a fixed filter for the purpose of multipath mitigation. The implementation of such a technique is dependent on the selection of appropriate value for the step-size parameter and the filter length. Further investigations are still needed on post-reception techniques.

WAVELET TRANSFORM

Wavelet Transform (WT) is a new tool for signal analysis that can provide, simultaneously, time and frequency information of a signal sequence. WT has many potential applications in filtering, sub-band coding, data compression and multi-

processing GPS signals [10]. However, an optimal level for the decomposition of multipath disturbance must be decided upon.

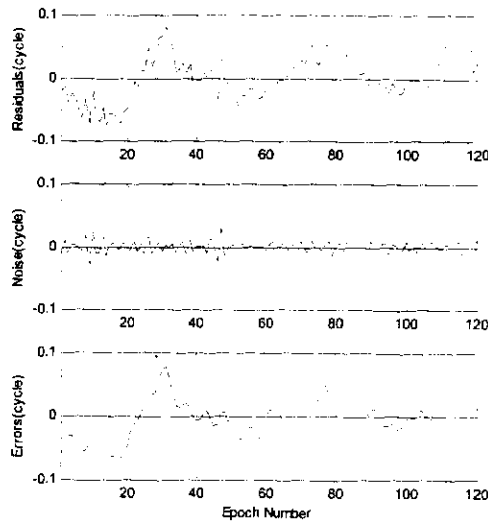


Fig. 2 Signal extraction using wavelets.

Top: Original DD residuals. Middle: Extracted noise component. Bottom: Extracted systematic component.

EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSES

Data Acquisition

The experiment was carried out on top of the Vidhyanives building at the Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, using data collected by three dual-frequency GPS receivers (Leica system 500). The data were collected in static mode from 25 October 2002 to 28 October 2002 at a 15-second data rate. In order to investigate the noise characteristics for this receiver type, data were collected by connecting a pair of receivers (the first and second receivers) to the same antenna at Station 'A'. Station 'A' can be considered as a multipath-free site since it has a very good observing environment (see figure 3). The third receiver was used to collect data at Station 'B', which is very close to a concrete wall (see figure 4). The baseline length between A and B is about 8 metres. Figure 5 illustrates the configuration of the experiment.



Fig. 3 Station 'A' on top of the Vidhyanives building, Chulalongkorn University.

MULTIPATH MITIGATION BY WAVELET ANALYSIS FOR GPS

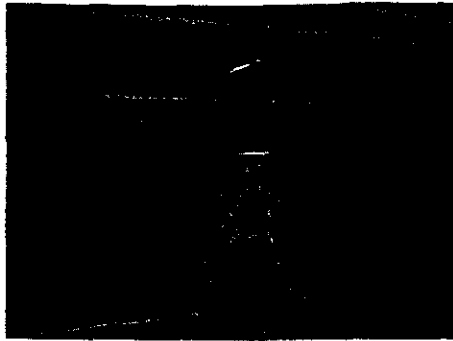


Fig. 4 Station 'B' on the Vidhayanives building, Chulalongkorn University.

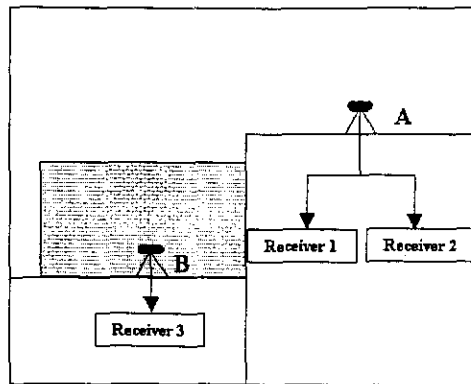


Fig. 5 Configuration of the experiment

In relation to the configuration shown in figure 5, the following can be noted:

- The double-differenced carrier-phase residuals obtained from the first receiver and the second receiver represents only observation noise because the other error sources are eliminated due to the use of the same antenna for both receivers. This configuration is known as the 'zero baseline' test.
- Since the baseline length is only about 8 metres, errors such as ionospheric, tropospheric and orbit biases are assumed to be essentially zero. The double-differenced carrier-phase residuals obtained from the first (or second) receiver and the third receiver, therefore, exhibit only multipath and observation noise.

Data Processing

In this investigation the TEQC software was used to check the multipath effect on all the satellites tracked. As expected, significant multipath effects were found on many satellite signals at Station 'B'. The data obtained from stations 'A' and 'B' were then processed using the SNAP baseline software to produce DD residuals for all satellite pairs. The DD residuals show multipath disturbance for many satellite pairs such as PRN8-7, PRN15-14, PRN26-18, and PRN31-2. Figure 6 shows an example of multipath series on DD carrier-phase observations from four consecutive days for satellite pair PRN8-7.

C SATIRAPOD AND C RIZOS

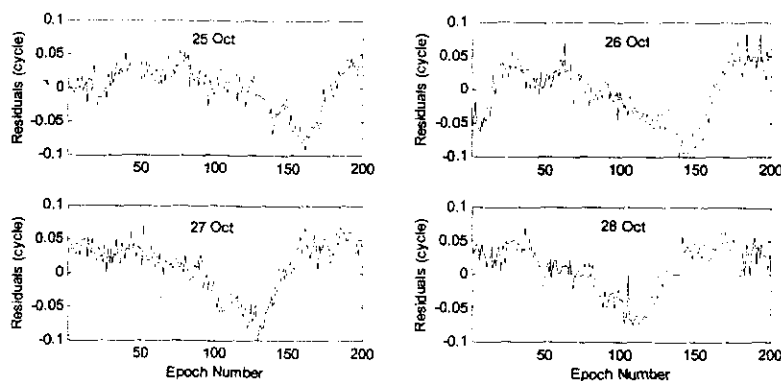


Fig. 6 Multipath series on DD carrier-phase observations (PRN8-7) for four consecutive days.

The zero baseline data collected at Station 'A' was also processed using the SNAP baseline software. The DD residuals obtained from the zero baseline should represent the true GPS observation noise. Figure 7 shows the DD residuals obtained from the zero baseline for satellite pair PRN8-7.

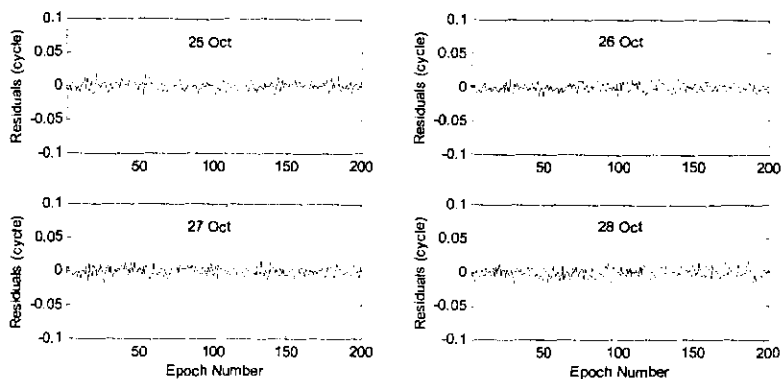


Fig. 7 DD residuals obtained from zero baseline for PRN8-7 between 25 and 28 Oct 2002.

The wavelet transform was used to decompose the DD residuals from the short baseline into low-frequency bias and high-frequency noise terms for each satellite pair. Three levels of decomposition were performed, resulting in the high-frequency noise term at each level. Since the results showed a similar trend for all satellite pairs, extracted high-frequency and low-frequency terms at different decomposition levels were plotted against the original DD observations for the satellite pair PRN8-7 only in figure 8. In figure 8(a), the black line denotes multipath series on DD carrier-phase observations, while the grey line shows the zero baseline DD residuals. Figures 8(b) to 8(d) show the extracted multipath component (in black) and noise component (in grey) at 1st, 2nd and 3rd decomposition levels respectively.

Analysis of Results

The results obtained in the previous section have been tested for the equality of standard deviations of the two samples: the real GPS observation noise obtained from zero baseline and the extracted noise component at each level of decomposition. The commonly used two-tailed F-test was chosen to test if the standard deviations of the

MULTIPATH MITIGATION BY WAVELET ANALYSIS FOR GPS

two samples are equal. Since GPS observation noise changes with time implies a non-stationarity property for the GPS signal, the standard deviation value calculated using an entire data span should not be used in the statistical test

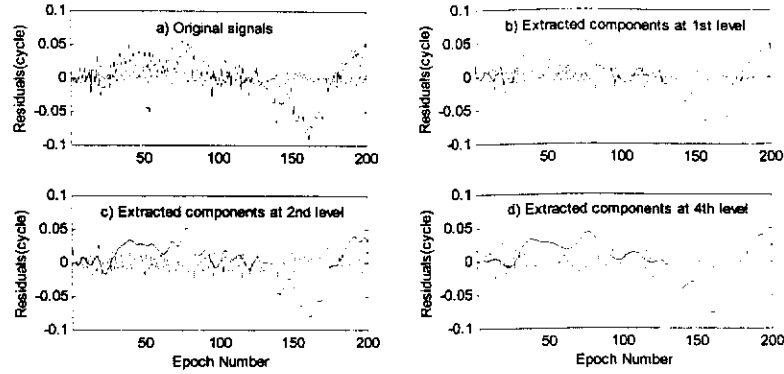


Fig. 8 Comparison of the extracted bias and noise components at different decomposition levels using wavelets and original observations for PRN8-7 on 25 Oct 2002.

. We therefore restricted the time span to 5 minutes for the tests. A total of ten standard deviation values for each data set were calculated using the 5-min data span. The F hypothesis test is defined as [16]:

$$H_0 : \sigma_1 = \sigma_2 \text{ (Null hypothesis)}$$

$$H_a : \sigma_1 \neq \sigma_2 \text{ (Alternative hypothesis)}$$

σ_1 denotes the standard deviation value calculated from the real GPS observation noise, while σ_2 is the standard deviation value calculated from the extracted noise component at each decomposition level. 5% significance level was used for the hypothesis testing. Table 1 shows a summary of the results obtained from the hypothesis testing. It is clearly seen from table 1 that the largest number of acceptances of the null hypothesis is achieved from the extracted noise component at the 1st level of decomposition. Similar results can also be obtained from different days and for other satellite pairs. It can be concluded that the use of 1st level wavelet decomposition produces the best fit to the multipath disturbance signal.

Table 1. Summary of results using F-test at 5% significance level

Decomposition level	Null hypothesis (H_0)	
	No. of Accept	No. of Reject
1 st level	8	2
2 nd level	6	4
3 rd level	3	7

In a further investigation, we attempted to evaluate the effectiveness of the wavelet decomposition technique. The multipath series of DD carrier-phase observations (PRN8-7) for four consecutive days, as displayed in figure 6, were removed using the 1st level wavelet decomposition technique. Figure 9 illustrates the results for carrier-phase multipath for the four consecutive days.

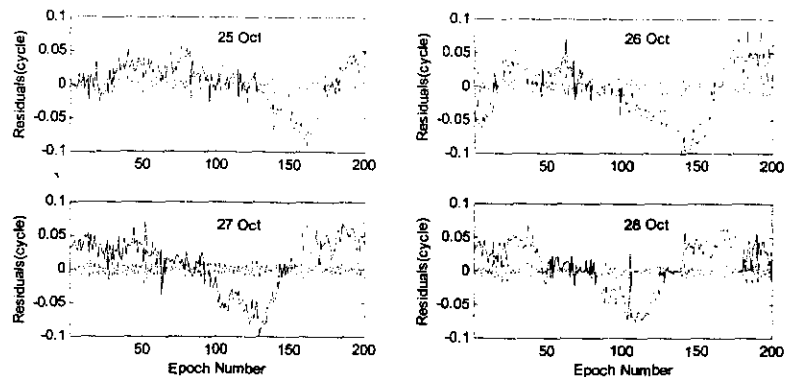


Fig. 9 Applying the 1st level of wavelet decomposition to multipath series on DD carrier-phase observations (PRN8-7) for four consecutive days.

The black line in each subplot represents the original multipath series, while the grey line is the time series after the multipath disturbance has been removed. The results are summarised in Table 2.

Table 2. *Standard deviation of carrier-phase time series before and after multipath reduction using wavelets (unit: cycle)*

Data set used	Multipath reduction	
	Before	After
Day 1 (25 Oct)	0.0318	0.0076
Day 2 (26 Oct)	0.0415	0.0085
Day 3 (27 Oct)	0.0388	0.0082
Day 4 (28 Oct)	0.0345	0.0074

The results from Table 2 clearly demonstrates the performance of the proposed method. Carrier-phase multipath has been significantly reduced.

CONCLUDING REMARKS

In this paper, multipath mitigation techniques and wavelet transform have been briefly reviewed, and a new multipath mitigation technique based on the use of wavelet decomposition has been proposed. The optimal level for wavelet decomposition of multipath disturbance has been identified. The results from the proposed method indicate that carrier-phase multipath can be removed, leaving only the GPS observation noise. The proposed method can therefore be used to correct for multipath at permanent GPS stations which support many differential positioning applications.

ACKNOWLEDGMENTS

The research is supported by a TRF new researcher grant from the Thailand Research Fund (TRF). The authors would like to thank Dr. Clement Ogaja of Space Geodesy Analysis Centre, Geoscience Australia, for his valuable suggestions. This paper is based on a paper presented at the 2003 International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Japan, 15-18 November 2003.

MULTIPATH MITIGATION BY WAVELET ANALYSIS FOR GPS

References

1. Axelrad, P., Comp, C.J. and MacDoran, P.F., 1994. Use of signal-to-noise ratio for multipath error correction in GPS differential phase measurements: methodology and experimental results. *7th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, Salt Lake City, Utah, 20-23 September, 655-666.
2. Bishop, G., Coco, D., Kappler, P. and Holland, E., 1994. Studies and performance of a new technique for mitigation of pseudorange multipath effects in GPS ground stations. *Proceedings of the 1994 ION National Technical Meeting*, San Diego, California, January, 231-242.
3. Chui, C.K., 1992. *An Introduction to Wavelets*, Academic Press, Inc., Boston, 264 pages.
4. Collin, F., and Warnant, R., 1995. Applications of the wavelet transform for GPS cycle slip correction and comparison with Kalman filter. *Manuscripta Geodaetica*, 20:161-172.
5. Fu, W.X., and Rizos, C., 1997. The applications of wavelets to GPS signal processing. *10th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, Kansas City, Missouri, 16-19 September, 1385-1388.
6. Ge, L., Han, S., and Rizos, C., 2000. Multipath mitigation of continuous GPS measurements using an adaptive filter. *GPS Solutions*, 4(2), 19-30.
7. Ge, L., Han, S., and Rizos, C., 2002. GPS multipath change detection at permanent GPS stations. *Survey Review*, 36(283): 306-322.
8. Haji, G.A., 1990. The multipath simulator: a tool toward controlling multipath. *2nd Symp. on GPS Applications in Space*, Hanscom AFB, February.
9. Han, S., and Rizos, C., 1997. Multipath effects on GPS in mine environments. *Xth Int. Congress of the Int. Society for Mine Surveying*, Fremantle, Australia, 2-6 November, 447-457.
10. Khoonphool, R., and Satirapod, C., 2003. Reduction of multipath effect at GPS base station with the use of wavelets. *Proceeding of the National Conference on Mapping and Geo-Informatics 2003*, Bangkok, Thailand, 18-20 November (in preparation).
11. Ogaja, C., Rizos, C., Wang, J. and Brownjohn, J., 2001. Towards the implementation of on-line structural monitoring using RTK-GPS and analysis of results using the wavelet transform. *10th FIG Int. Symp. on Deformation Observations*, Orange, California, 19-22 March, 284-293.
12. Olivier, R., and Vetterli, M., 1991. Wavelets and signal processing. *IEEE Sig. Processing*, October, 14-38.
13. Satirapod, C., 2001. Improving the accuracy of static GPS positioning with a new stochastic modelling procedure. *14th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION'2001*, Salt Lake City, Utah, 11-14 September, 2196-2205.
14. Satirapod, C., 2002. *Improving the GPS Data Processing Algorithm for Precise Static Relative Positioning*. PhD thesis, School of Surveying & Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 131pp.
15. Satirapod, C., Ogaja, C., Wang, J. and Rizos, C., 2001. An approach to GPS analysis incorporating wavelet decomposition. *Artificial Satellites*, 36(2), 27-35.
16. Snedecor, G.W., and Cochran, W.G., 1989. *Statistical Methods*. 8th Edition, Iowa State University Press.
17. Townsend, B., and Fenton, R., 1994. A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in an L1 GPS receiver. *7th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, Salt Lake City, Utah, 20-23 September, 143-148.
18. Wickerhauser, M., 1994. *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*. AK Peters Ltd., Wellesley, Massachusetts. 486 pages.