

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน
Wireless Sensor Network for Vibration Monitoring System

ณัฐนัน ฤทัยวรเศรษฐ์

Nutthanun Ruetaiworraseth

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสิ้นสะท้อน
ผู้เขียน นางสาวณัฐชนัน ฤทัยวเรศรัย
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐา จินดาเพ็ชร)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณรัช สันติอมรทัต)

.....กรรมการ
(ดร.ราชพร เขียนประสิทธิ์)

.....กรรมการ
(นางสาวเบญจวรรณ ธรรมวุฒิ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน
ผู้เขียน	นางสาวณัฐชนัน ฤทธิวรเศรษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนโดยใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่าย เวลาในการติดตั้งและซ่อมบำรุงระบบได้ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งาน ไม่มีข้อจำกัดของจำนวนและจุดติดตั้งของเซนเซอร์และสามารถเปลี่ยนจุดติดตั้งให้เหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารนั้นๆ ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ออกแบบสามารถใช้งานในระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนได้จริง โดยโปรแกรมสามารถแสดงผลกราฟของการสั่นสะเทือนตามเวลาจริงบนเว็บแอปพลิเคชันได้ จากการทดสอบความถูกต้องของค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระบบวัดได้ ซึ่งทำการทดสอบในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$ พบว่าระบบสามารถวัดความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนในแกน X, Y, Z ได้ถูกต้อง จากการทดลองทำให้ทราบค่าชดเชยของแกน X, Y, Z เป็น 5.8377, 0.7055 และ 1.4015 ตามลำดับ

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบหาจำนวนชุดข้อมูลที่เหมาะสมต่อการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งครั้ง พบว่าการส่งแพ็กเก็ตที่มีข้อมูลจำนวน 2 ชุดหรือ 32 ไบต์ต่อแพ็กเก็ต จะทำให้สถานีฐานสามารถรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จสูงสุด ในขณะที่การส่งข้อมูลจำนวน 8 ชุดหรือ 92 ไบต์ต่อแพ็กเก็ตจะใช้เวลาตอบสนองต่อระบบน้อยที่สุด แต่จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์สูญหายของแพ็กเก็ตมาก

คำสำคัญ: ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย, การเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคาร, การสั่นสะเทือนความถี่ต่ำ, เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ต, เวลาตอบสนองของระบบ

Thesis Title Wireless Sensor Network for Vibration Monitoring System
Author Miss Nutthanun Ruetaiworraseth
Major Program Computer Engineering
Academic Year 2010

ABSTRACT

This thesis introduces the vibration monitoring system using wireless sensor network. The advantage of wireless sensor network technology can reduce the installation time, diagnosis, and recovery costs. Wireless sensor network also gives the flexibility and the number of the installation to suit with the model of structural analysis. The design of wireless sensor network can be deployed to monitor the vibration real-time on web application. The acceleration correction test, in frequency range 0.8 - 10Hz and the amplitude range 0.0981 - 9.8100 m/s², show that our system can measure the frequency in three axes correctly. Measured acceleration result is linear. We also found that the calibration constants in X, Y, Z axis from the experiment are 5.8377, 0.7055 and 1.4015 respectively, to obtain the correct acceleration.

In addition, we found that the suitable packet size is two data sets or 32 bytes. Using this packet size, we can achieve the highest packet delivery ratio (PDR). In contrast, we can get the shortest end-to-end delay when sensor node uses eight data sets or 92 bytes. However, the system will have the smallest packet delivery ratio.

Keywords: Wireless Sensor Network, Vibration Monitoring System, Low Frequency Vibration, Packet Delivery Ratio, End-to-End Delay

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง.....	(9)
รายการภาพประกอบ.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 ระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน.....	2
1.2.2 ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	4
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 ลักษณะการเกิดคลื่น.....	6
2.1.1 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหว.....	6
2.1.2 การวัดขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์.....	7
2.1.3 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration).....	7
2.1.4 ผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคาร.....	8
2.2 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network).....	8
2.3 ออปแอมป์ (Op-Amp).....	9
2.3.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting amplifier).....	10
2.3.2 วงจรปรับแรงดันออฟเซต (Offset Voltage Compensation).....	11
2.4 โครงสร้างการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนด.....	11
2.5 แพ็กเก็ต CC2420 ของระบบปฏิบัติการ TinyOS.....	13
2.6 แพ็กเก็ต Serial ของระบบปฏิบัติการ TinyOS.....	14
บทที่ 3 การออกแบบระบบ.....	16
3.1 การทำงานของเซนเซอร์โหนด.....	17

สารบัญ

	หน้า
3.1.1 ส่วนประกอบด้านฮาร์ดแวร์.....	17
3.1.2 การออกแบบเซนเซอร์ โหนดด้านซอฟต์แวร์.....	20
3.2 การออกแบบสถานีฐาน.....	21
3.3 การออกแบบโปรแกรมบนเครื่องแม่ข่าย.....	23
3.4 การออกแบบฐานข้อมูล.....	23
3.5 การออกแบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ.....	23
บทที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูล.....	25
4.1 การทดสอบความถูกต้องของค่าการสันสะท้อนที่ระบบอ่านได้.....	25
4.1.1 การทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของระบบ.....	27
4.1.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ.....	36
4.2 การทดสอบหาจำนวนชุดข้อมูลที่เหมาะสมต่อหนึ่งแพ็กเก็ต.....	46
4.2.1 ผลการทดสอบ.....	47
4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	47
4.2.3 สรุปผลการทดสอบ.....	49
4.3 การทดสอบหาเวลาตอบสนองของระบบ.....	49
4.3.1 ผลการทดสอบ.....	49
4.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	50
4.3.3 สรุปผลการทดสอบ.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผล.....	52
5.2 ปัญหา.....	52
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	53
บรรณานุกรม.....	54
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก รายละเอียดเกี่ยวกับ Unode.....	57
ภาคผนวก ข แผนผังวงจร Voltage adjustable board.....	63

สารบัญ

	หน้า
ภาคผนวก ค ลายวงจร Voltage adjustable board.....	65
Top Silkscreen Overlay.....	66
Bottom Silkscreen Overlay.....	66
Top Layer.....	67
Bottom Layer.....	67
ภาคผนวก ง.....	68
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	75

รายการตาราง

	หน้า
ตาราง 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นดินไหวและอัตราเร่งของพื้นดิน	7
ตาราง 2-2 ความหมายของฟิลค์ในแพ็กเก็ตส่วนหัวของ CC2420	14
ตาราง 2-3 ความหมายของฟิลค์ในแพ็กเก็ตส่วนหัวของพอร์ตอนุกรม	15
ตาราง 3-1 รูปแบบแพ็กเก็ตของเซนเซอร์โหนด	21
ตาราง 3-2 โครงสร้างของฐานข้อมูล	23
ตาราง 4-2 พารามิเตอร์ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือน	28
ตาราง 4-2 ค่า R-squared ของกราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน X.32	32
ตาราง 4-3 ค่า R-squared ของกราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Y.33	33
ตาราง 4-4 ค่า R-squared ของกราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Z.34	34
ตาราง 4-5 พารามิเตอร์ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือน	36
ตาราง 4-6 ค่า R-squared ของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน X	40
ตาราง 4-7 ค่า R-squared ของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y	41
ตาราง 4-8 ค่า R-squared ของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z.....	42
ตาราง 4-10 จำนวนชุดข้อมูลที่ทำให้สถานีฐานรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากที่สุด	47
ตาราง 4-11 ระยะเวลาในการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดต้นทางไปยังสถานีฐาน.....	50

รายการภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1-1 ผลตอบสนองของแรงสั่นสะเทือนของโครงสร้างเพดาน	2
ภาพประกอบ 2-1 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวใกล้	6
ภาพประกอบ 2-2 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวไกล	6
ภาพประกอบ 2-3 โครงสร้างของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	8
ภาพประกอบ 2-4 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของออปแอมป์	9
ภาพประกอบ 2-5 วงจรสมมูลของ non-Ideal Op amp.....	9
ภาพประกอบ 2-6 ออปแอมป์ทางอุดมคติ.....	10
ภาพประกอบ 2-7 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	10
ภาพประกอบ 2-8 วงจรปรับแรงดันออฟเซตทางขาอินพุตบวก.....	11
ภาพประกอบ 2-9 วงจรปรับแรงดันออฟเซตทางขาอินพุตบวก.....	11
ภาพประกอบ 2-10 แสดงโครงสร้างการส่งข้อมูลจากโหนด.....	13
ภาพประกอบ 3-1 แผนภาพแสดงการออกแบบระบบโดยรวม.....	16
ภาพประกอบ 3-2 บอร์ด Unode	17
ภาพประกอบ 3-3 เซนเซอร์วัดแรงสั่นสะเทือน K-Beam 8393B.....	18
ภาพประกอบ 3-4 วงจรของบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้า.....	19
ภาพประกอบ 3-5 แผนผังการทำงานของเซนเซอร์โหนด	20
ภาพประกอบ 3-6 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของสถานีฐาน.....	22
ภาพประกอบ 3-7 โปรแกรมประยุกต์บนเว็บ	24
ภาพประกอบ 4-1 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบความถูกต้องของ.....	25
ภาพประกอบ 4-2 การยึดจับเซนเซอร์สั่นสะเทือน	27
ภาพประกอบ 4-3 ขั้นตอนการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบ	29
ภาพประกอบ 4-4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือน	30
ภาพประกอบ 4-5 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน X ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ	31
ภาพประกอบ 4-6 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Y ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ	32

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ 4-7 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Z ที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ	33
ภาพประกอบ 4-8 ขั้นตอนการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ	37
ภาพประกอบ 4-9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือน	38
ภาพประกอบ 4-10 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน X ที่ความถี่ค่าต่างๆ	39
ภาพประกอบ 4-11 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y ที่ความถี่ค่าต่างๆ	40
ภาพประกอบ 4-12 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z ที่ความถี่ค่าต่างๆ	41
ภาพประกอบ 4-13 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y	43
ภาพประกอบ 4-14 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y	44
ภาพประกอบ 4-15 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z	44
ภาพประกอบ 4-16 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z	44
ภาพประกอบ 4-17 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ต	47
ภาพประกอบ 4-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนองของระบบกับจำนวน hop	49
ภาพประกอบ 4-19 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์สูญหายของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้น	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันประเทศไทยได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของโลกค่อนข้างรุนแรง ดังจะเห็นได้จากการเกิดภัยพิบัติเช่นน้ำท่วมและแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในหลายประเทศ ทำให้เกิดความเสียหายและมีโอกาสที่อาคารสูงในบริเวณที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวจะเกิดความเสียหาย จึงจำเป็นต้องมีระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน (Vibration Monitoring System) เพื่อหาอัตราความเสียหายของการร้าว ทรุดหรือพังถล่มลงมาของตัวอาคาร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก ระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบันเป็นระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนแบบใช้สาย ซึ่งการใช้ทั้งสายไฟและสายส่งข้อมูล ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงสูง ใช้เวลาในการติดตั้งนาน และเป็นการจำกัดตำแหน่งติดตั้งของเซนเซอร์ อีกทั้งในการติดตั้งระบบอาจต้องเปลี่ยนจุดติดตั้งหลายครั้ง เพื่อหาจุดติดตั้งเซนเซอร์ที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารนั้นๆ จึงทำให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน

เมื่อพิจารณาระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ซึ่งเป็นระบบตรวจวัดข้อมูลจากสภาพแวดล้อมแล้วส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายไปยังเครื่องแม่ข่ายเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล จากข้อดีของอุปกรณ์เซนเซอร์ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายของสายไฟและสายส่งข้อมูลลงได้ ใช้เวลาในการติดตั้งและซ่อมบำรุงระบบน้อย อีกทั้งสามารถกำหนดและเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ได้อย่างอิสระ ดังนั้นระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจึงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนเพื่อแก้ไขปัญหาของระบบใช้สายแบบเดิมได้

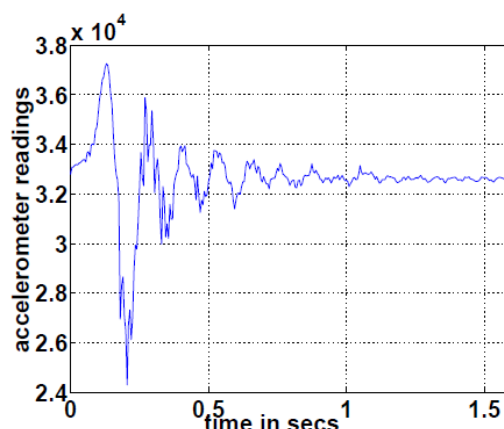
ระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนเป็นระบบที่ต้องการอัตราสุ่มเก็บสัญญาณ (Sampling rate) และค่าความละเอียดของข้อมูล (Sampling resolution) สูง จึงจะได้ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่สามารถนำไปวิเคราะห์หาความเสียหายของโครงสร้างอาคารได้ แต่อย่างไรก็ตามการสุ่มเก็บสัญญาณที่มีความละเอียดสูงด้วยอัตราสุ่มเก็บสัญญาณสูง ทำให้ต้องส่งข้อมูลขนาดใหญ่บ่อยครั้ง ระบบจึงต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ขนาดใหญ่และใช้พลังงานในการส่งมาก แต่ทั้งขนาดของแบนด์วิดท์และพลังงานเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย อีกทั้งระบบสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สาย จึงต้องคำนึงถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนและการสูญหายของข้อมูล ซึ่งจะทำให้ระบบได้รับข้อมูลจำนวนน้อยจนอาจไม่สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาความเสียหายของโครงสร้างอาคารได้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคารแบบเวลาจริงและศึกษาขนาดของข้อมูลต่อแพ็กเก็ตที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีโอกาสได้รับแพ็กเก็ตสูงสุด โดยศึกษาเปรียบเทียบเมื่อจำนวนเซนเซอร์โหนดที่มีอยู่ในระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังได้ศึกษาหาเวลาในการตอบสนองของระบบ เมื่อเพิ่มจำนวน hop ในการส่งข้อมูล ผลของการศึกษาจะเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายต่อไปในอนาคต

1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 ระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน

ระบบเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน คือ ระบบที่ใช้ตรวจสอบความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างที่ได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนของสิ่งปลูกสร้างสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ลม กิจกรรมต่างๆของมนุษย์ (การเคลื่อนที่ เคลื่อนย้ายสิ่งของ การจราจร การระเบิด) ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินไหว เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร คลื่นแผ่นดินไหวมีความถี่ในช่วง 0.1 - 20 เฮิรตซ์ [8] แต่โดยทั่วไปความถี่ของแรงสั่นสะเทือนที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างอาคารอยู่ในช่วง 0 – 10 เฮิรตซ์ [1] โครงสร้างอาคารจะตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนในรูปแบบผลรวมของคลื่นไซน์ที่มีแอมพลิจูดลดลง (Decaying sinusoids) ดังเช่นการทดลองการสั่นสะเทือนของโครงสร้างเพดานบนระบบจริงใน [2] ที่ให้แรงกระตุ้นแบบทันทีทิศทางเดียว จะได้ลักษณะของคลื่นที่เป็นผลตอบสนองของแรงสั่นสะเทือนของโครงสร้างเพดาน ดังภาพประกอบ 1-1



ภาพประกอบ 1-1 ผลตอบสนองของแรงสั่นสะเทือนของโครงสร้างเพดาน

จากภาพประกอบ 1-1 จะพบว่า การสั่นสะเทือนของโครงสร้างเพดานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในเวลา 0.5 วินาที หากพิจารณาอัตราสุ่มเก็บสัญญาณตามทฤษฎีอัตราไนควิสต์ (Nyquist rate) ซึ่งกล่าวว่า อัตราสุ่มเก็บสัญญาณ (sampling rate) จะต้องมากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณที่สนใจ โดยหากใช้อัตราสุ่มเก็บสัญญาณ 50 เฮิร์ตซ์ จะสามารถเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ 50 ตัวอย่างต่อวินาที ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์หาความเสียหายของโครงสร้างอาคาร ดังนั้นจึงต้องใช้อัตราสุ่มเก็บสัญญาณที่สูงกว่าอัตราไนควิสต์

นอกจากนั้นในสภาพแวดล้อมของโครงสร้างอาคารจะมีสัญญาณรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้อยู่ในระดับสูง จึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราสุ่มเก็บสัญญาณให้สูงขึ้น เพื่อลดอัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนและสัญญาณสั่นสะเทือนลง และต้องเก็บข้อมูลที่ความละเอียดสูงเพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณ ด้วยเหตุนี้ อัตราสุ่มเก็บสัญญาณของระบบเฟ้าระวางการสั่นสะเทือนต้องมีค่าอย่างน้อย 1 กิโลเฮิร์ตซ์ [3]

บทความ [3] ได้นำเสนอระบบเฟ้าระวางการสั่นสะเทือนของสะพานโดยใช้โหนด MicaZ ของบริษัท CrossBow ใช้อัตราสุ่มเก็บสัญญาณ 1 กิโลเฮิร์ตซ์และเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนไว้ในหน่วยความจำแฟลช นอกจากนี้ยังได้นำเสนอโปรแกรม Senti (Structural Health moNIToRing toolKit) ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมการเลือกใช้โพรโทคอลสำหรับการใช้งานแต่ละรูปแบบ ในงานวิจัยนี้มีโพรโทคอลให้เลือก 3 รูปแบบ คือ โพรโทคอลบรอดแคสต์ (Broadcast) สำหรับใช้ส่งคำสั่งจากสถานีฐานไปยังเซนเซอร์โหนด โพรโทคอล MintRout [4] สำหรับใช้ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจากเซนเซอร์โหนด และโพรโทคอล FTSP [5] ซึ่งใช้การ งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญคลาดเคลื่อนของเวลา (Jitter) เป็นหลัก ซึ่งจากการทดสอบระบบจะมีความคลาดเคลื่อนของเวลาเพียง 5 ไมโครวินาที

บทความ [6] ได้นำเสนอการออกแบบระบบระบบเฟ้าระวางการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารโดยใช้โหนด Mica2 ของบริษัท Crossbow ใช้อัตราสุ่มเก็บสัญญาณ 100 เฮิร์ตซ์ และเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนไว้ในหน่วยความจำ EEPROM งานวิจัยนี้ได้แนะนำวิธีการบีบอัดข้อมูลการสั่นสะเทือนที่สามารถทำงานบนโหนดได้ โดยปรับปรุงวิธีการเข้ารหัสแบบ Wavelet ให้เหมาะสมกับการใช้งานบนโหนด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการเทียบเวลาระหว่างโหนดในระบบ โดยไม่ต้องปรับเวลาของโหนดในระบบให้เท่ากันทั้งระบบแต่ใช้วิธีการส่งค่าเวลาปัจจุบันของโหนดมาพร้อมกับแพ็กเก็ตข้อมูลการสั่นสะเทือน แล้วจึงปรับเทียบเวลาที่สถานีฐานเพื่อให้เวลาของโหนดในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

1.2.2 ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

จากบทความ [7] เป็นการศึกษาผลกระทบของการสูญหายของแพ็กเก็ตสัมพัทธ์กับระยะห่างระหว่างโหนด โดยเปลี่ยนแปลงขนาดของข้อมูล (payload) จำนวนแพ็กเก็ต และช่วงเวลาของการส่งข้อมูล โดยทดสอบบนระบบจริง ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 168 สำหรับประมวลผลและใช้โมดูลรับส่งข้อมูล XBee Pro ZNET 2.5 ของบริษัท MaxStream จากการทดลองพบว่า การสูญหายของแพ็กเก็ตจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของ payload และจำนวนของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้นในทางกลับกัน การสูญหายของแพ็กเก็ตจะลดลงเมื่อช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลแต่ละครั้งเพิ่มขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน
2. เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบพัฒนาระบบบนแพลตฟอร์มของ Unode
2. ออกแบบพัฒนาบนสภาพแวดล้อมซึ่งโหนดไม่เคลื่อนที่
3. ออกแบบและพัฒนาระบบโดยไม่คำนึงถึงพลังงาน
4. ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้วยการสั่นสะเทือนแบบคลื่นไซน์ ในช่วงความถี่ 0.8 - 10 เฮิรตซ์ และความเร่งของการสั่นสะเทือน $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$

1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

- ขั้นที่ 1: ศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนของอาคารจากแผ่นดินไหวและวิธีทดสอบการสั่นสะเทือน
- ขั้นที่ 2: ศึกษาเรื่องการวัดประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
- ขั้นที่ 3: ออกแบบและพัฒนาระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน
- ขั้นที่ 4: ทดสอบและปรับปรุงการทำงานของระบบโดยรวม
- ขั้นที่ 5: ทดสอบประสิทธิภาพของระบบและวิเคราะห์ผล
- ขั้นที่ 5.1: ทดสอบและวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือน เปรียบเทียบกับระบบสอบ

เทียบการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำมาตรฐานทุติยภูมิ (Very Low Frequency Secondary Vibration Calibration System)

ขั้นที่ 5.2: ทดสอบและวิเคราะห์ผลความเป็นเชิงเส้นของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฟ้าระวางการสั่นสะเทือน เปรียบเทียบกับระบบสอบเทียบการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำมาตรฐานทุติยภูมิ (Very Low Frequency Secondary Vibration Calibration System)

ขั้นที่ 5.3: ทดสอบและวิเคราะห์ผลการหาจำนวนชุดข้อมูลที่เหมาะสมต่อหนึ่งแพ็กเก็ตเมื่อเพิ่มจำนวนโหนดในระบบ โดยแต่ละโหนดเชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายเป็นเครือข่ายแบบดาวกระจาย

ขั้นที่ 5.4: ทดสอบและวิเคราะห์ผลการหาเวลาตอบสนองของระบบ เมื่อเพิ่มจำนวน hop ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ขั้นที่ 6: จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ และเอกสารต้นฉบับ (Manuscript) เพื่อตีพิมพ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฟ้าระวางการสั่นสะเทือนที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้
2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฟ้าระวางการสั่นสะเทือน

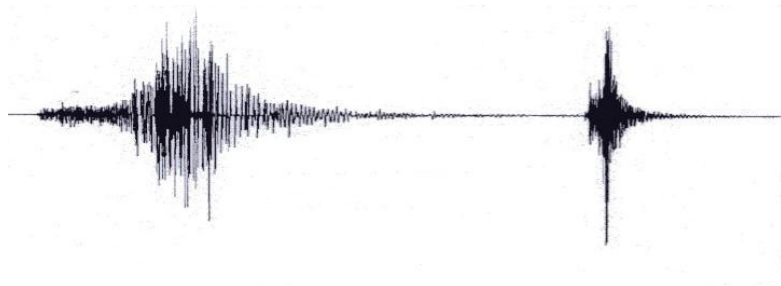
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลักษณะการเกิดคลื่น

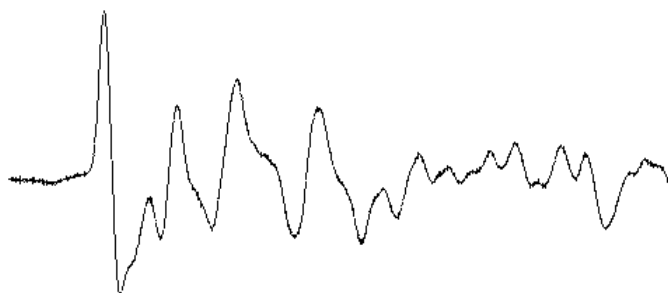
2.1.1 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหว

ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวใกล้ที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทย ดังภาพประกอบ 2-1 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวใกล้ที่มีศูนย์กลางเกิดที่บริเวณภาคตะวันตกเฉียงเหนือเกาะสุมาตราขนาด 9.0 ตามมาตราริกเตอร์ กับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีศูนย์กลางเกิดที่ประเทศพม่าขนาด 6.4 ตามมาตราริกเตอร์ เมื่อ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2547



ภาพประกอบ 2-1 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวใกล้

คลื่นแผ่นดินไหวไกลที่ตรวจวัดได้ในประเทศไทยแสดงดังภาพประกอบ 2-2 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีศูนย์กลางเกิดที่ประเทศชิลีขนาด 6.5 ตามมาตราริกเตอร์ เมื่อ 3 กันยายน พ.ศ. 2541 [9]



ภาพประกอบ 2-2 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวไกล

จากภาพประกอบ 2-1 และ 2-2 จะเห็นว่า คลื่นแผ่นดินไหวมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างรวดเร็วและมีหลายความถี่ ดังนั้นในการสุ่มเก็บตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวต้องใช้อัตรา

การสุมเก็บตัวอย่างสูง จึงจะได้ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความใกล้เคียงกับคลื่นจริงและทำให้สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลกระทบและความเสียหายจากคลื่นแผ่นดินไหวได้อย่างถูกต้อง

2.1.2 การวัดขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์

Richter Local Magnitude, M_L พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้วัดแผ่นดินไหวที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ตื้นและมีระยะศูนย์กลางแผ่นดินไหวน้อยกว่า 600 กิโลเมตร ขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์มีความสัมพันธ์กับอัตราเร่งของพื้นดิน ดังสมการ 2.1 หรือเทียบจากตาราง 2.1 ดังนี้

$$M_L = 2.2 + 1.8 \log a_0 \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้

M_L คือ ขนาดแผ่นดินไหวมาตราริกเตอร์

a_0 คือ อัตราเร่งของพื้นดิน หน่วย cm/s^2

ตาราง 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นดินไหวและอัตราเร่งของพื้นดิน

ขนาดแผ่นดินไหว (ริกเตอร์)	อัตราเร่งของพื้นดิน (cm/s^2)
1	0.2
2	0.8
3	2.8
4	10.0
5	39.8
6	128.8
7	501.2
8	1584.9

2.1.3 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration)

ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration: PGA) เป็นค่าที่มีความสำคัญในการออกแบบเชิงวิศวกรรมของอาคารในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวมีหน่วยเป็น ft/s^2 หรือ cm/s^2 หรือ เป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (g) หรือหน่วยเป็น gal (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g) ค่า PGA สามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือและจากการวิเคราะห์ คลื่นการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้ [9]

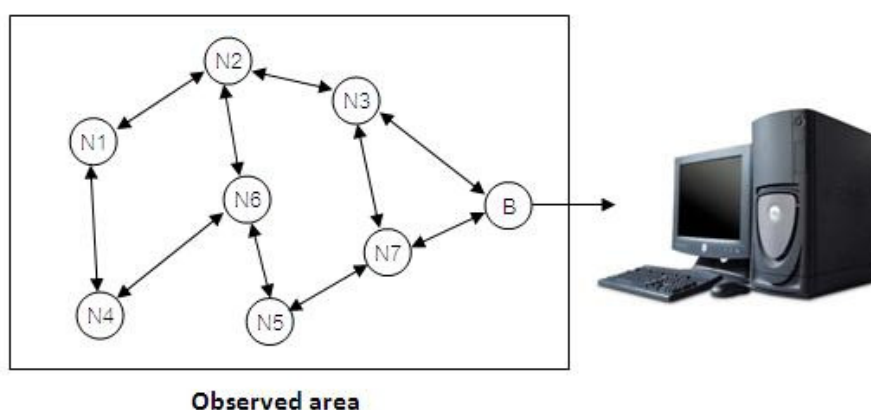
2.1.4 ผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคาร

การเกิดแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดแรงกระทำต่ออาคารในแนวนอนอย่างฉับพลันเป็นหลัก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อ โครงสร้างอาคารได้ แต่ความเสียหายของอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นดินไหวเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ดังนี้ [9]

1. ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว (Earthquake Characteristics) ได้แก่ ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน ระยะของการสั่นรุนแรงของพื้น และคาบการสั่นสำคัญของพื้นดิน
2. ลักษณะของสถานที่เกิดแผ่นดินไหว (Site Characteristics) ได้แก่ ระยะระหว่างศูนย์กลางแผ่นดินไหวถึงที่ตั้งของโครงสร้างอาคาร สภาพชั้นดินที่ตั้งอาคาร
3. ลักษณะของโครงสร้างอาคาร (Structural Characteristics) ได้แก่ คาบการสั่นตามธรรมชาติและค่า damping ของโครงสร้าง อายุและวิธีการก่อสร้าง การเสริมเหล็กให้โครงสร้างมีความเหนียว (Ductility)

2.2 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network)

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เป็นเทคโนโลยีที่ใช้เซนเซอร์โหนด (Sensor node : N) จำนวนมากเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของสภาพแวดล้อมที่สนใจ แล้วส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ความถี่ 2.4 GHz มายังสถานีฐาน (Base station : B) จากนั้นสถานีฐานจะส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกันผ่านพอร์ตอนุกรมเพื่อประมวลผล และนำไปสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ทำการศึกษาหรือตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้โดยอัตโนมัติ โครงสร้างของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนี้แสดงได้ดังภาพประกอบ 2-3

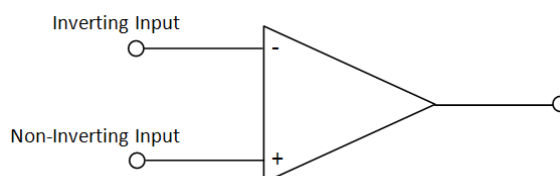


ภาพประกอบ 2-3 โครงสร้างของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (wireless sensor network) เป็นเทคโนโลยีที่กำลังพัฒนาและมีศักยภาพที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาที่คนไทยปัจจุบันประสบปัญหาอยู่ได้หลายด้านเช่น ระบบเตือนภัยพิบัติภัย (Disaster warning systems) [10] เพื่อพยากรณ์และเตือนภัยให้สามารถป้องกันและลดผลกระทบจากภัยธรรมชาติต่อประเทศไทย ระบบเฝ้าระวังและควบคุมทางด้านเกษตรกรรม (Monitoring and controlling systems for agriculture) [11] ที่ก่อให้เกิดการเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร ระบบขนส่งจราจรอัจฉริยะ (Intelligent transportation systems) [12] เพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัย ลดการจราจรหนาแน่น และเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งจราจร และระบบเฝ้าตรวจสอบและควบคุมเพื่อการรักษาสุขภาพและพยาบาล (Biomedical wireless sensor networks for intelligent medical systems) [13, 14]

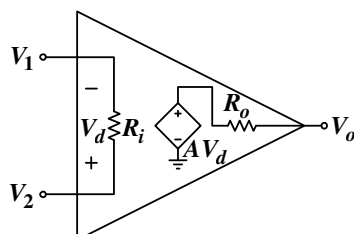
2.3 ออปแอมป์ (Op-Amp)

ออปแอมป์ (Op-Amp) [15] หรือวงจรรขยายเชิงดำเนินการ (Operational Amplifier) เป็นวงจรรวมเชิงเส้น (Linear Integrated Circuit) ที่มีการทำงานเป็นแบบ Voltage-controlled voltage source สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของออปแอมป์สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2-4



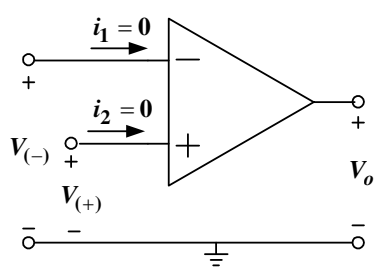
ภาพประกอบ 2-4 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของออปแอมป์

เมื่อพิจารณาถึงวงจรรภายในตัวออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ (Non-ideal) จะประกอบไปด้วยวงจรรวมมูล ดังภาพประกอบ 2-5



ภาพประกอบ 2-5 วงจรรวมมูลของ non-Ideal Op amp

ในการวิเคราะห์วงจรออปแอมป์จะใช้คุณลักษณะทางอุดมคติเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์วงจร โดยกำหนดให้อัตราขยายรูปเปิด A มีค่าเป็นอนันต์ ความต้านทานอินพุต R_i มีค่าเป็นอนันต์ และความต้านทานเอาต์พุต R_o มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะสามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2-6 ออปแอมป์ทางอุดมคติ

จากคุณลักษณะทางอุดมคติของออปแอมป์ดังภาพประกอบ 2-6 สามารถสรุปได้ว่ากระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์ทางด้านอินพุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการ (2.2) และแรงดันที่ขาบวกและขาลบจะมีค่าเท่ากัน ดังสมการ (2.3)

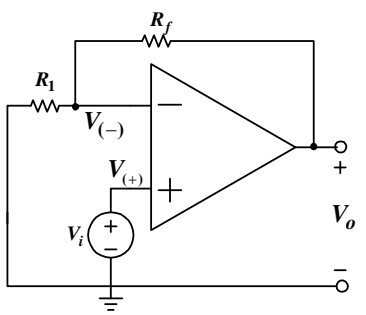
$$i_1 = 0, i_2 = 0 \text{ หรือ } i_1 = i_2 \tag{2.2}$$

$$V_{(+)} = V_{(-)} \tag{2.3}$$

ออปแอมป์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสัญญาณได้หลากหลายวงจร โดยในที่นี้จะยกตัวอย่าง วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส และวงจรรวมสัญญาณ

2.3.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส [15] คือ วงจรออปแอมป์ที่ออกแบบมาขยายสัญญาณอินพุตโดยไม่กลับเฟสสัญญาณ



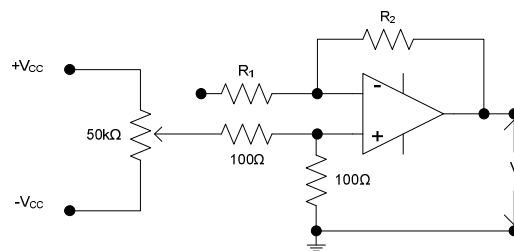
ภาพประกอบ 2-7 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

จากวงจรดังภาพประกอบ 2-7 จะได้สัญญาณเอาต์พุตดังสมการ (2.4)

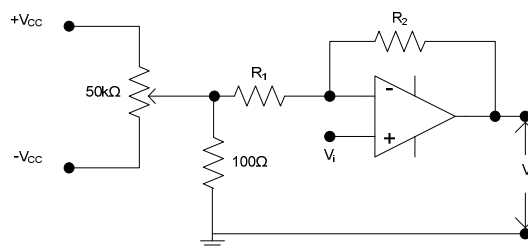
$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)V_i \quad (2.4)$$

2.3.2 วงจรปรับแรงดันออฟเซต (Offset Voltage Compensation)

วงจรปรับแรงดันออฟเซต [15] คือ วงจรออปแอมป์ที่ใช้ปรับแรงดันเอาต์พุตด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งซัดเซยให้กับอินพุตขาบวกหรืออินพุตขาลบโดยต่อผ่านตัวต้านทาน วิธีการต่อตัวต้านทานเข้ากับออปแอมป์แต่ละเบอร์เพื่อปรับแรงดันออฟเซตนี้ สามารถดูได้จากคู่มือการใช้งาน ซึ่งจะมีหลักการคล้ายคลึงกันแต่ไม่เหมือนกันทั้งหมด เช่น ออปแอมป์เบอร์ 741 สามารถต่อตัวต้านทานเพื่อปรับแรงดันออฟเซตได้ดังภาพประกอบ 2-8 และภาพประกอบ 2-9 โดยมีแรงดันเอาต์พุตดังสมการ (2.5)



ภาพประกอบ 2-8 วงจรปรับแรงดันออฟเซตทางขาอินพุตบวก



ภาพประกอบ 2-9 วงจรปรับแรงดันออฟเซตทางขาอินพุตบวก

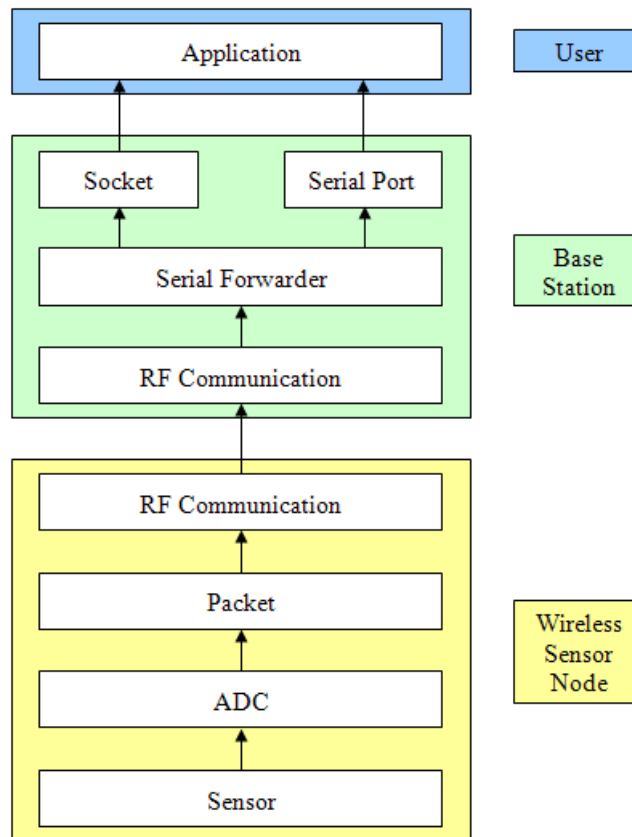
$$V_o = (V_{in+} - V_{in-}) \times \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.5)$$

2.4 โครงสร้างการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนด

จากภาพประกอบ 2-10 ได้แสดงโครงสร้างการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์โหนด กล่าวคือ เมื่อโหนดรับข้อมูลมาจากเซนเซอร์ จะแปลงข้อมูลจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณ

ดิจิตอลโดยใช้คอมโพเนนท์ ADC (Analog to Digital Converter) จากนั้นจึงนำมาข้อมูลมาใส่ในแพ็กเก็ตแล้วส่งออกสู่ช่องทางการติดต่อด้วยสัญญาณวิทยุซึ่งเชื่อมต่อเซนเซอร์โหนดกับสถานีฐาน (base station) เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งในที่นี้ก็คือระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย จากนั้น serial forwarder จะทำการอ่านแพ็กเก็ตที่ base station รับมาส่งออกทาง socket หรือ serial port ซึ่งขึ้นกับว่าใช้โปรแกรม serial forwarder ตัวใด หากเป็นโปรแกรม sf ก็จะส่งข้อมูลออกทาง socket แต่หากเป็นโปรแกรม seriallisten ก็จะส่งข้อมูลออกทาง serial port จากนั้นในส่วนผู้ใช้ (user) ก็จะนำข้อมูลที่ได้นี้ไปทำการประมวลผลต่อไป โดยสรุปแต่ละส่วนของโครงสร้างทำหน้าที่ดังนี้

- Sensor ทำหน้าที่เก็บข้อมูลจากสภาพแวดล้อม
- ADC ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับมาจาก sensor ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล
- Packet ทำหน้าที่รับข้อมูลที่เป็นสัญญาณดิจิตอลมาเก็บใส่ในแพ็กเก็ตก่อนจะส่งออกไปยังเครือข่ายสัญญาณวิทยุ
- RF Communication เป็นส่วนเชื่อมต่อที่ใช้รับส่งแพ็กเก็ต
- Serial Forwarder มี 2 รูปแบบ คือ การออกไปยัง socket และการส่งออกไปยัง serial port
- Application เป็นโปรแกรมที่รับข้อมูลจาก socket หรือ serial มาประมวลผล



ภาพประกอบ 2-10 แสดงโครงสร้างการส่งข้อมูลจากโหนด

2.5 แพ็กเก็ต CC2420 ของระบบปฏิบัติการ TinyOS

ลักษณะของแพ็กเก็ตที่ส่งผ่านคลื่นวิทยุ 2.4 GHz โดยใช้ชิป CC2420 [16] ในระบบปฏิบัติการ TinyOS [17] ของ Unode ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แพ็กเก็ตส่วนหัว แพ็กเก็ตข้อมูล และแพ็กเก็ตส่วนท้าย แพ็กเก็ตส่วนหัวมีขนาด 11 ไบต์ ประกอบด้วย 7 ฟิลด์ ซึ่งความหมายของแต่ละฟิลด์ในแพ็กเก็ตส่วนหัวของ CC2420 แสดงได้ดังตาราง 2-2 แต่ในการส่งแพ็กเก็ตจริง ฟิลด์ Length จะไม่ถูกส่งออกไปด้วย[18] ดังนั้นแพ็กเก็ตส่วนหัวที่ใช้ส่งแพ็กเก็ตจริงจะมีขนาด 10 ไบต์ ส่วนแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นข้อมูลที่ต้องการส่ง มีขนาดใหญ่สุด 115 ไบต์ และแพ็กเก็ตส่วนท้ายมีขนาด 2 ไบต์ แพ็กเก็ตส่วนท้ายเป็นฟิลด์ cyclic redundancy checking (CRC) ที่ใช้ตรวจสอบความผิดพลาดของแพ็กเก็ตที่ส่งออกไป

ตาราง 2-2 ความหมายของฟิลด์ในแพ็กเก็ตส่วนหัวของ CC2420

ชื่อฟิลด์	ตำแหน่งที่	ขนาด (byte)	Description
Length (Data Length)	0	1	จำนวนไบนารีของข้อมูลที่อยู่ในส่วนของ TOS_DATA
Fcf (Frame Control Field)	1-2	2	ใช้ในการระบุชนิดของแพ็กเก็ตว่าต้องการให้มีสัญญาณ ACK หรือไม่
Dsn (Data Sequence Number)	3	1	ลำดับของแพ็กเก็ตข้อมูล
Destpan (Destination Pan ID)	4-5	2	หมายเลขกลุ่มของเซนเซอร์โหนด
Dest (Destination Address)	6-7	2	หมายเลขของเซนเซอร์โหนดปลายทาง
Src (Source Address)	8-9	2	หมายเลขของเซนเซอร์โหนดต้นทาง
Type (Packet Type)	10	1	บอกถึงชนิดของแพ็กเก็ตที่ใช้ในการส่งข้อมูล

คำอธิบายเพิ่มเติม

- Length ค่าในฟิลด์นี้จะมีค่าเท่ากับขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ส่งมา
- Destpan ค่า default = 0x007D เราสามารถที่จะกำหนดค่า destpan ให้มีค่าเท่ากับค่าอื่นได้ตั้งแต่ 0x0000 – 0xFFFF
- Src ค่าในฟิลด์นี้จะคือ หมายเลขของเซนเซอร์โหนดที่สร้างแพ็กเก็ตนี้ขึ้นมา ซึ่งก็คือ หมายเลขของเซนเซอร์โหนดปัจจุบัน
- Type ค่าที่กำหนดในฟิลด์นี้ จะบอกว่าเป็นแพ็กเก็ตรูปแบบใด สามารถที่จะกำหนดเองได้

2.6 แพ็กเก็ต Serial ของระบบปฏิบัติการ TinyOS

ลักษณะของแพ็กเก็ตที่ส่งผ่านพอร์ตอนุกรม [19] ในระบบปฏิบัติการ TinyOS ของ Unode จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แพ็กเก็ตส่วนหัวและแพ็กเก็ตข้อมูล แพ็กเก็ตส่วนหัวมี

ขนาด 7 ไบต์ ประกอบด้วย 5 필ด์ซึ่งความหมายของแต่ละฟิลด์ในแพ็กเก็ตส่วนหัวของพอร์ต
 อนุกรมแสดงได้ดังตาราง 2-3

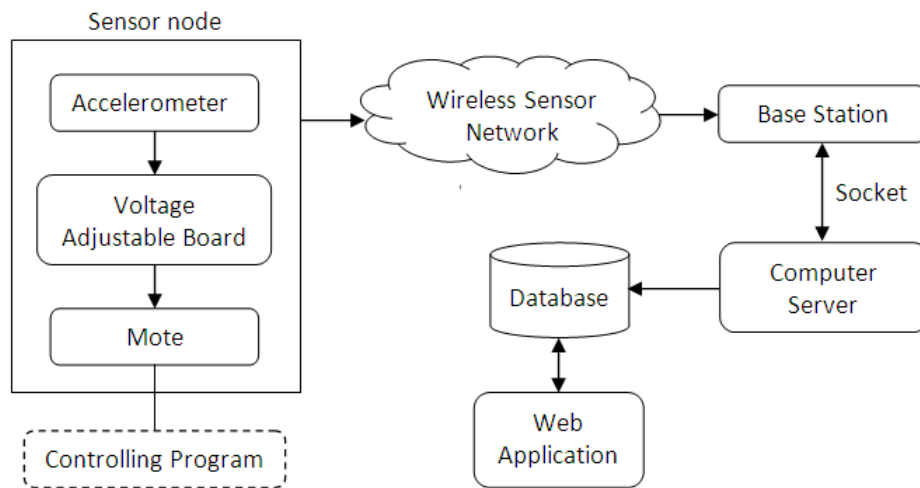
ตาราง 2-3 ความหมายของฟิลด์ในแพ็กเก็ตส่วนหัวของพอร์ตอนุกรม

ชื่อฟิลด์	ตำแหน่งที่	ขนาด (byte)	Description
Dest (Destination Address)	0-1	2	หมายเลขของเซนเซอร์ โหนดปลายทาง
Src (Source Address)	2-3	2	หมายเลขของเซนเซอร์ โหนดต้นทาง
Length (Data Length)	4	1	จำนวนไบต์ของข้อมูลที่อยู่ใน ส่วนของ TOS_DATA
Group	5	1	หมายเลขกลุ่มของเซนเซอร์ โหนด
Type (Packet Type)	6	1	บอกถึงชนิดของแพ็กเก็ตที่ ใช้ในการส่งข้อมูล

บทที่ 3

การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคารสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน คือ เซนเซอร์โหนด (Sensor node) สถานีฐาน (Base station) โปรแกรมบนเครื่องแม่ข่าย (Computer server) ฐานข้อมูล (Database) และโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ (Web application) ซึ่งแสดงได้ดังภาพประกอบ 3-1



ภาพประกอบ 3-1 แผนภาพแสดงการออกแบบระบบโดยรวม

จากภาพประกอบ 3-1 เมื่อเซนเซอร์สั่นสะเทือนตรวจจับแรงสั่นสะเทือนได้ จะแปลงการสั่นสะเทือนทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อก จากนั้นเซนเซอร์โหนดจึงแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วส่งแพ็กเก็ตข้อมูลแรงสั่นสะเทือนนี้ผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายไปยังสถานีฐาน เมื่อสถานีฐานได้รับข้อมูลแล้วจึงส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมไปยังเครื่องแม่ข่าย จากนั้นเครื่องแม่ข่ายจะอ่านข้อมูลแรงสั่นสะเทือนจากสถานีฐานแล้วเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล โดยผู้ใช้สามารถดูข้อมูลการสั่นสะเทือนของอาคารตามเวลาจริงผ่าน โปรแกรมประยุกต์บนเว็บได้

3.1 การทำงานของเซนเซอร์โหนด

เซนเซอร์โหนดทำหน้าที่วัดแรงสั่นสะเทือนของอาคารแล้วส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย 2.4 GHz ไปยังสถานีฐานซึ่งถูกติดตั้งอยู่ไกลออกไป การออกแบบเซนเซอร์โหนดประกอบด้วยการออกแบบด้านฮาร์ดแวร์และการออกแบบด้านซอฟต์แวร์

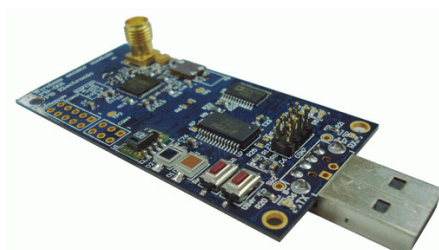
3.1.1 ส่วนประกอบด้านฮาร์ดแวร์

เซนเซอร์โหนดประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ 3 ส่วน คือ โหนด (Node) เซนเซอร์สั่นสะเทือน (Accelerometer) และบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage Adjustable Board)

3.1.1.1 โหนด

โหนดเป็นหน่วยประมวลผลและตัวส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ด Unode ดังภาพประกอบ 3-2 ซึ่งห้องวิจัย UbiNES (Ubiquitous Network Embedded System) ได้พัฒนาขึ้น บอร์ด Unode ถูกพัฒนามาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430F1611 ให้ทำงานร่วมกับชิปรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สาย CC2420 ในย่านความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ 250kbps [16] โดยมีซอฟต์แวร์ซึ่งฝังตัวอยู่บนหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียว (ROM) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของโหนด

Unode สนับสนุนการใช้งานอินพุตแอนะล็อก 12 บิต จำนวน 8 ช่องสัญญาณ และสามารถแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ในช่วงแรงดัน 0 – 2.5 โวลต์ การดาวน์โหลดซอฟต์แวร์และอัปเดตข้อมูลจากโหนดสามารถทำได้ผ่านพอร์ต Universal Serial Bus (USB) ระยะการรับส่งสัญญาณภายในอาคารสามารถทำได้ไกลสุด 50 เมตร ภายนอกอาคารสามารถทำได้ไกลที่สุด 125 เมตร นอกจากนี้ Unode ยังใช้พลังงานต่ำ โดยในโหมดการทำงาน (Active mode) จะใช้พลังงานไม่เกิน 23 มิลลิแอมป์ และในโหมดสแตนด์บาย (Standby mode) จะใช้พลังงานไม่เกิน 21 ไมโครแอมป์ Unode รองรับแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันไฟฟ้าในช่วง 2.1 โวลต์ ถึง 3.6 โวลต์



ภาพประกอบ 3-2 บอร์ด Unode

3.1.1.2 เซนเซอร์สั่นสะเทือน (Accelerometer)

เซนเซอร์สั่นสะเทือนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเซนเซอร์ของบริษัท Kistler รุ่น K-Beam 8393B [20] ดังแสดงในภาพประกอบ 3-3 เป็นเซนเซอร์ที่ใช้งานจริงในการวัดแรงสั่นสะเทือนของอาคาร



ภาพประกอบ 3-3 เซนเซอร์วัดแรงสั่นสะเทือน K-Beam 8393B

K-Beam 8393B เป็นเซนเซอร์สั่นสะเทือนแบบ 3 แกน (X, Y, Z) ที่สามารถวัดแรงสั่นสะเทือนทั้ง 3 แกนได้พร้อมกัน สามารถวัดแรงสั่นสะเทือนในช่วง -19.62 ถึง $+19.62 \text{ m/s}^2$ ที่ความถี่ $0 - 250 \text{ Hz}$ ได้ มีค่าตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือน (Sensitivity) 1000 mV/g โดย $1g$ จะเท่ากับ 9.81 m/s^2 มีค่าความละเอียดของการวัด (Resolution) $540 \mu\text{g}$ หรือ $5297.4 \mu\text{m/s}^2$ เซนเซอร์สั่นสะเทือน K-Beam 8393B รองรับแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง $+3.8$ ถึง $+32$ โวลต์ กระแสไฟฟ้าขนาด 4 มิลลิแอมป์ และเมื่อเซนเซอร์สามารถตรวจจับความสั่นสะเทือนได้จะแปลงแรงสั่นสะเทือนทางกลเป็นสัญญาณสั่นสะเทือนแอนะล็อกในช่วง -2 ถึง $+2$ โวลต์

3.1.1.3 การออกแบบวงจรปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage Adjustable Board)

วงจรปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณแอนะล็อกที่รับมาจากเซนเซอร์สั่นสะเทือนให้เหมาะสมกับการใช้งานกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลบน Unode เนื่องจากเซนเซอร์สั่นสะเทือนจะให้เอาต์พุตในช่วง -2 โวลต์ ถึง $+2$ โวลต์ แต่วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลบน Unode สามารถรับสัญญาณได้ในช่วง $0 - 2.5$ โวลต์ ดังนั้นจึงต้องปรับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณแอนะล็อกก่อนป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรบน Unode เพื่อให้สามารถอ่านค่าสัญญาณแอนะล็อกในช่วง -2 โวลต์ ถึง 0 โวลต์ได้

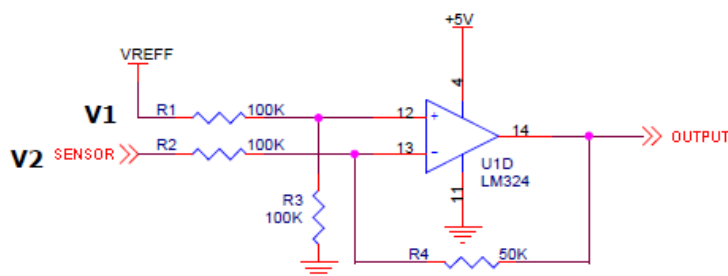
บอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าพัฒนาขึ้นจากวงจรปรับแรงดันออฟเซต ซึ่งแสดงวงจรได้ดังภาพประกอบ 3-4 โดยวงจรจะยกระดับสัญญาณขึ้น $+2.048$ โวลต์ (VREFF) และลดขนาดของสัญญาณลง 2 เท่า หรืออาจเรียกว่ามีอัตราขยายเท่ากับ 0.5 ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณแอนะล็อกที่จะป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรบน Unode จะมีค่าดังสมการ (3.1) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ปรับค่าแล้วจะมีขนาดสูงสุดเป็น 2 โวลต์จากยอดถึงยอด (V_{p-p}) ที่ระดับ

แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง +1.024 โวลต์ บอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจะต้องมีวงจรปรับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งหมด 3 ชุด เนื่องจากสัญญาณแอนะล็อกของเซนเซอร์สี่เส้นสะเทือนมี 3 สัญญาณแยกกันตามแกน (X, Y, Z) บอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าใช้เบตเตอร์แบบชาร์จประจุได้ขนาด 3.7 โวลต์เป็นแหล่งจ่ายไฟ

$$V_{OUT} = (V_{REF} - V_{SENSOR}) \times G \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดให้

- V_{OUT} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ปรับค่าแล้ว หน่วย โวลต์
- V_{REF} คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง มีค่าเท่ากับ +2.048 โวลต์
- V_{SENSOR} คือ แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณแอนะล็อกจากเซนเซอร์สี่เส้นสะเทือน
- G คือ อัตราขยาย มีค่าเท่ากับ 0.5

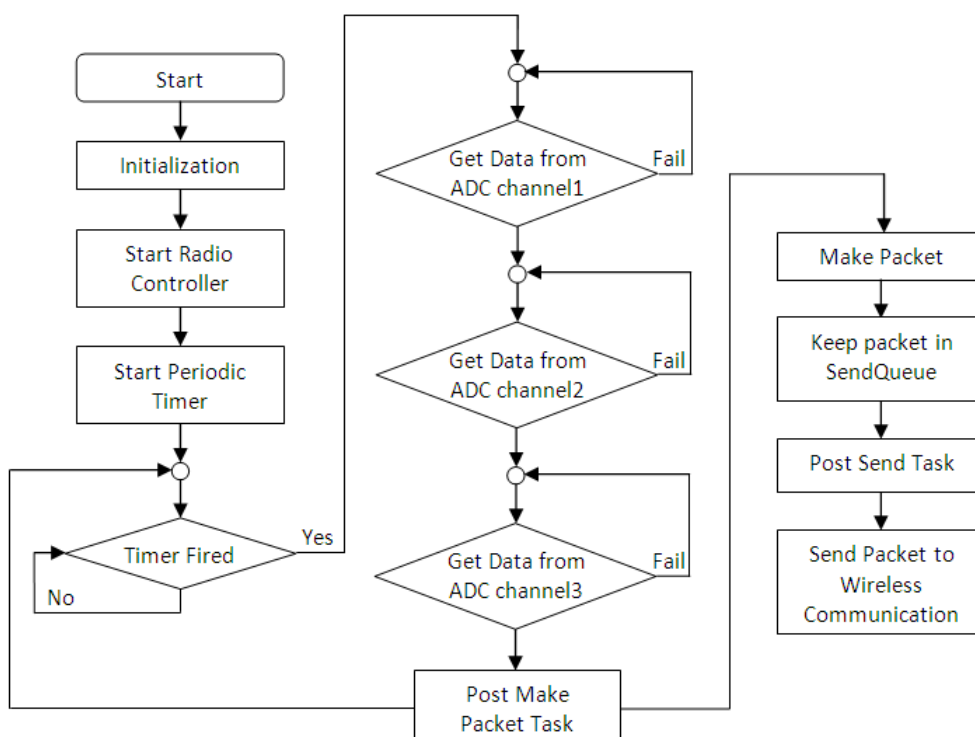


ภาพประกอบ 3-4 วงจรของบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

นอกจากหน้าที่การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าแล้ว บอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้ายังทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ให้กับเซนเซอร์สี่เส้นสะเทือน และเป็นแหล่งจ่ายไฟ 3.3 โวลต์ให้กับ Unode ด้วย ดังนั้นฮาร์ดแวร์ของเซนเซอร์โหนด ซึ่งประกอบด้วยโหนด เซนเซอร์สี่เส้นสะเทือนและบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจะใช้เบตเตอร์ชุดเดียวกัน ทำให้สะดวกต่อการดูแลและบำรุงรักษาเบตเตอร์เพียงชุดเดียว ในการนำไปใช้งานจริงสามารถรวม Unode และบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นบอร์ดเดียวกันได้ ซึ่งจะทำให้เซนเซอร์โหนดมีขนาดเล็กลง สามารถนำไปติดตั้งได้หลากหลายพื้นที่มากขึ้น นอกจากนี้บอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้ายังมีวงจรสำหรับชาร์จเบตเตอร์ผ่านพอร์ต USB ช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน สำหรับรายละเอียดแผนผังวงจรและลายวงจรของบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าสามารถดูเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ข และภาคผนวก ค

3.1.2 การออกแบบเซนเซอร์โหนดด้านซอฟต์แวร์

โปรแกรมควบคุมเซนเซอร์โหนด (Controlling Program) เป็นโปรแกรมซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของโหนด อัตราการสุ่มเก็บสัญญาณจากเซนเซอร์สี่หน้าสี่เหลี่ยม รวมถึงควบคุมการส่งข้อมูลออกทางคลื่นวิทยุ 2.4 GHz โปรแกรมควบคุมเซนเซอร์โหนดถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา nesC (Network Embedded System C) [21] ให้ทำงานบนระบบปฏิบัติการ TinyOS โดยโปรแกรมภาษา nesC ที่พัฒนาขึ้นจะถูกคอมไพล์ร่วมกับระบบปฏิบัติการ TinyOS และดาวน์โหลดเก็บไว้ในหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียวของ Unode แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมเซนเซอร์โหนดสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3-5 แผนผังการทำงานของเซนเซอร์โหนด

การทำงานของโปรแกรมควบคุมเซนเซอร์โหนดเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรมและเริ่มต้นการทำงานของส่วนควบคุมการสื่อสารทางคลื่นวิทยุ จากนั้นจึงกำหนดคาบเวลาของการเก็บข้อมูลแรงดันสี่เหลี่ยม ในงานวิจัยนี้ใช้คาบเวลา 1 มิลลิวินาที ซึ่งจะได้อัตราสุ่มเก็บสัญญาณเป็น 1 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อครบเวลาที่กำหนดโหนดจะเก็บข้อมูลแรงดันสี่เหลี่ยมจากช่องสัญญาณ ADC ที่ 1, 2 และ 3 โดยทำงานแยกกันในลักษณะของ Event - Driven หากสามารถเก็บข้อมูลได้สำเร็จก็จะบันทึกข้อมูลนั้นลงในตัวแปรเพื่อใช้สร้างแพ็คเกจข้อมูล แต่หากไม่สามารถ

เก็บข้อมูลได้สำเร็จ โหนดจะเก็บข้อมูลจากช่องสัญญาณ ADC นั้นใหม่ จากนั้นจึงสร้าง task สำหรับสร้างแพ็กเก็ตที่มีรูปแบบของแพ็กเก็ต ดังตาราง 3-1 โดยฟิลด์ seq คือ หมายเลขลำดับของแพ็กเก็ตมีขนาด 4 ไบต์ dataX, dataY และ dataZ คือข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ แต่ละฟิลด์มีขนาด 2 ไบต์ โดยข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนนี้ต้องแปลงค่าก่อนนำไปใช้งาน และ N คือ จำนวนชุดข้อมูล มีค่าตั้งแต่ 1-10

ตาราง 3-1 รูปแบบแพ็กเก็ตของเซนเซอร์โหนด

seq[N]	dataX[N]	dataY[N]	dataZ[N]
--------	----------	----------	----------

แพ็กเก็ตที่สร้างเสร็จแล้วจะถูกเก็บไว้ในแถวคอยแบบวงกลม (Circular queue) เพื่อรอการส่งออก จากนั้นโปรแกรมควบคุมเซนเซอร์โหนดจึงสร้าง Task สำหรับส่งแพ็กเก็ตออกสู่ช่องการสื่อสารไร้สาย 2.4 GHz โดยจะตรวจสอบจำนวนชุดข้อมูลให้ครบตามที่กำหนดไว้ก่อนแล้วจึงจะส่งแพ็กเก็ตออกไป

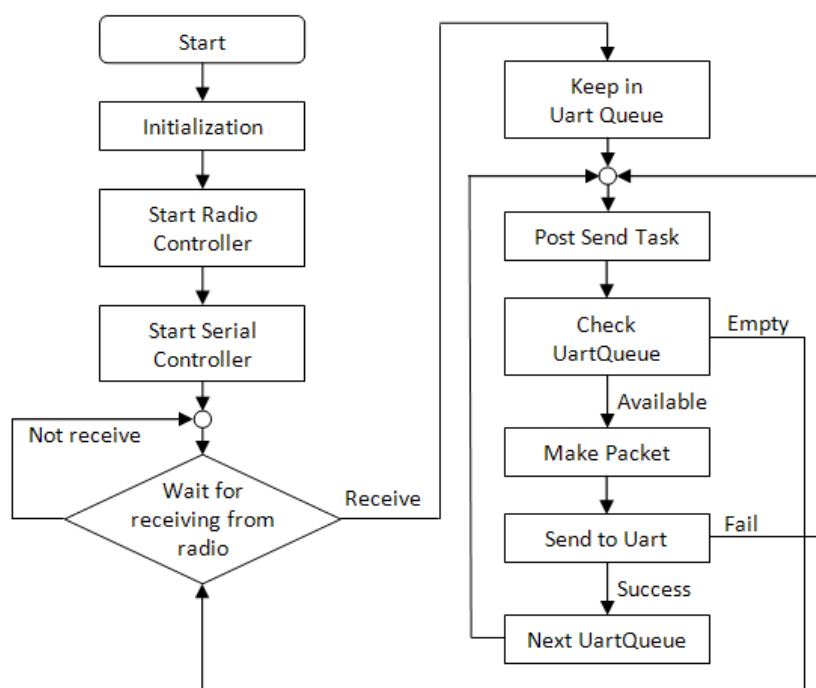
ในการออกแบบโปรแกรมให้ใช้ Task แทนการใช้ฟังก์ชันเพื่อสร้างแพ็กเก็ตและส่งแพ็กเก็ตออกสู่ช่องการสื่อสารไร้สาย จะทำให้สามารถสร้างแพ็กเก็ตและส่งแพ็กเก็ตออกได้ทันทีกับอัตราสุ่มเก็บสัญญาณของระบบโดยข้อมูลไม่เกิดการสูญหายในเซนเซอร์โหนดเอง และช่วยให้สามารถอ่านแพ็กเก็ตจากแถวคอยได้ไม่ต้องรอให้แพ็กเก็ตก่อนหน้าส่งเสร็จก่อน

เนื่องจากเซนเซอร์โหนดใช้อัตราสุ่มเก็บสัญญาณสูง ดังนั้นจะทำให้มีข้อมูลแรงสั่นสะเทือนจำนวนมากที่ต้องสร้างเป็นแพ็กเก็ต ซึ่งหากออกแบบโปรแกรมโดยใช้ Task จะทำให้ในระหว่างที่กำลังสร้างแพ็กเก็ตหนึ่งอยู่ จะสามารถรับข้อมูลแรงสั่นสะเทือนชุดใหม่ได้ ทำให้ไม่เกิดการสูญหายของข้อมูล ในส่วนของการใช้ Task เพื่อส่งแพ็กเก็ตออกสู่ช่องการสื่อสารไร้สาย เนื่องจากเซนเซอร์โหนดจะใช้เวลาในการส่งข้อมูลมากกว่าเวลาสร้างแพ็กเก็ต ดังนั้นในขณะที่กำลังส่งแพ็กเก็ตหนึ่งอยู่ จะมีแพ็กเก็ตที่สร้างเสร็จพร้อมที่จะส่งออกอยู่ในแถวคอยแล้ว การใช้ Task ในการทำงานจะช่วยให้สามารถอ่านแพ็กเก็ตจากแถวคอยได้โดยไม่ต้องรอให้ส่งแพ็กเก็ตก่อนหน้าเสร็จก่อน และทำให้แถวคอยมีพื้นที่ว่าง สามารถเก็บแพ็กเก็ตใหม่ได้ จึงช่วยลดการสูญหายของแพ็กเก็ตลง

3.2 การออกแบบสถานีฐาน

สถานีฐานทำหน้าที่รับแพ็กเก็ตจากช่องการสื่อสารไร้สาย 2.4 GHz แล้วส่งให้เครื่องแม่ข่ายผ่านทางพอร์ตอนุกรม สถานีฐานถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ Unode เช่นเดียวกับเซนเซอร์

โทนคร มีโปรแกรมควบคุมการทำงานซึ่งพัฒนาขึ้นด้วยภาษา nesC ทำงานบนระบบปฏิบัติการ TinyOS ซึ่งฝังตัวในหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียวของ Unode แผนผังการทำงานของสถานีฐานสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3-6



ภาพประกอบ 3-6 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของสถานีฐาน

การทำงานของโปรแกรมควบคุมสถานีฐาน เริ่มจากกำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรมรวมถึงสร้างแถวคอย UART ซึ่งมีการจัดแถวคอยแบบวงกลม แล้วจึงเริ่มต้นการทำงานของส่วนควบคุมการสื่อสารทางคลื่นวิทยุและเริ่มต้นการทำงานตัวควบคุมการสื่อสารทางพอร์ตอนุกรม จากนั้นจึงรอข้อมูลที่ถูกส่งมาจากคลื่นวิทยุ เมื่อได้รับข้อมูลแล้วจะนำข้อมูลเข้าสู่แถวคอย UART เพื่อรอการส่ง แล้วจึงสร้าง Task เพื่อส่งข้อมูลออกทางพอร์ตอนุกรม ในขณะที่หากได้รับข้อมูลมาเพิ่ม โปรแกรมจะนำข้อมูลเข้าสู่แถวคอยในลำดับถัดไป โดยทำงานแยกกับการส่งแพ็คเกจออกทางพอร์ตอนุกรม ทำให้ข้อมูลไม่สูญหายไปในช่วงเวลาการส่งแพ็คเกจออกทางพอร์ตอนุกรม

เมื่อสร้าง Task สำหรับส่งแพ็คเกจออกทางพอร์ตอนุกรมแล้ว Task จะตรวจสอบแถวคอย UART ว่ามีข้อมูลอยู่ในแถวคอยพร้อมจะส่งหรือไม่ หากไม่มีข้อมูลในแถวคอยก็จะกลับสู่ขั้นตอนการรอข้อมูลจากคลื่นวิทยุ แต่หากมีข้อมูลในแถวคอยโปรแกรมจะนำข้อมูลมาสร้างเป็นแพ็คเกจแล้วจึงส่งข้อมูลออกทางพอร์ตอนุกรม แล้วจึงเลื่อนตำแหน่งข้อมูลที่จะส่งออกไปยังตำแหน่งถัดไป รวมถึงรีเซ็ตค่าตัวแปรให้พร้อมใช้งานสำหรับตำแหน่งถัดไปของข้อมูลในแถวคอย

จากนั้นจึงสร้าง Task สำหรับส่งแพ็กเก็ตตำแหน่งถัดไปออกทางพอร์ตอนุกรมเช่นเดียวกับรอบแรก และจะวนซ้ำการทำงานแบบนี้ไปเรื่อยๆ

3.3 การออกแบบโปรแกรมบนเครื่องแม่ข่าย

เครื่องแม่ข่ายทำหน้าที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานผ่านพอร์ตอนุกรมและแปลงข้อมูลจากแพ็กเก็ตที่รับมาจากสถานีฐานเป็นความเร่งการสั่นสะเทือน ดังสมการ (3.2) ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่แปลงค่าแล้วจะถูกเก็บลงในฐานข้อมูล โปรแกรมควบคุมการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน และโปรแกรมอ่านและแปลงข้อมูลการสั่นสะเทือนถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษาจาวา

$$A = \frac{((0.00061 \times N_{ADC}) - V_{cal}) \times 19.62}{S} \quad (3.2)$$

เมื่อกำหนดให้

- A คือ ความเร่งการสั่นสะเทือน (m/s^2)
- N_{ADC} คือ ข้อมูลแรงสั่นสะเทือนที่ส่งมาจากสถานีฐาน
- V_{cal} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเซนเซอร์ไม่มีการสั่น (โวลต์)
- S คือ ค่าการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือน (โวลต์/ $9.81 m/s^2$)

3.4 การออกแบบฐานข้อมูล

ฐานข้อมูลทำหน้าที่เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนซึ่งประกอบด้วย หมายเลขโหนดที่เก็บข้อมูลแรงสั่นสะเทือนนี้ (NodeID) หมายเลขแพ็กเก็ต (Seq) ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่แปลงค่าแล้วทั้ง 3 แกน (AccelX, AccelY, AccelZ) รวมถึงวันที่ (Date) และเวลาที่บันทึกข้อมูลนี้ลงฐานข้อมูล (Time) ซึ่งแสดงได้ดังตาราง 3-2

ตาราง 3-2 โครงสร้างของฐานข้อมูล

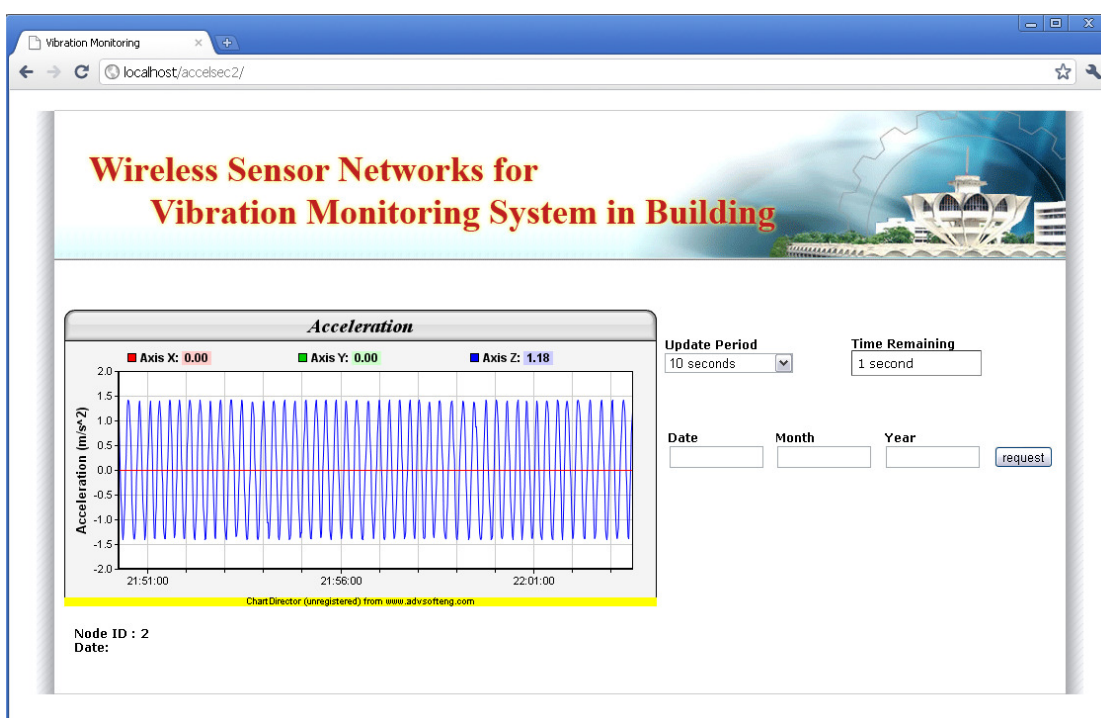
NodeID	Seq	AccelX	AccelY	AccelZ	Date	Time
--------	-----	--------	--------	--------	------	------

3.5 การออกแบบโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ

โปรแกรมประยุกต์บนเว็บทำหน้าที่แสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบกราฟตามเวลาจริง (Real time) โดยอ่านข้อมูลการสั่นสะเทือนจากฐานข้อมูล โปรแกรมประยุกต์ถูก

พัฒนาขึ้นด้วยภาษา Hypertext Preprocessor (PHP) และ Javascript โดยใช้เทคนิค Asynchronous JavaScript and XML (Ajax) ทำให้สามารถอัปเดตเฉพาะส่วนของกราฟแสดงความเร่งของการสั่นสะเทือนได้โดยไม่ต้องโหลดข้อมูลใหม่ของทั้งหน้าเว็บ ช่วยลดประมวลผลที่เครื่องแม่ข่ายลง โปรแกรมประยุกต์จึงแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของกราฟและตอบสนองต่อผู้ใช้ได้อย่างรวดเร็ว

โปรแกรมประยุกต์บนเว็บจะแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร่งของการสั่นสะเทือนตามเวลาจริง ส่วนด้านล่างของกราฟจะแสดงรายละเอียดของหมายเลขโหนดและวันที่ได้ตรวจวัดการสั่นสะเทือนนี้ ด้านซ้ายของกราฟจะมีส่วนให้ผู้ใช้สามารถปรับเวลาการอัปเดตกราฟบนหน้าเว็บ (Update Period) ซึ่งสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 1 - 20 วินาทีและจะแสดงการนับเวลาถอยหลังไว้ในส่วน Time Remaining นอกจากนี้ผู้ใช้อย่างยังสามารถดูข้อมูลการสั่นสะเทือนย้อนหลังได้อีกด้วย โดยสามารถป้อนวันที่ที่ต้องการดูข้อมูลแล้วกด request เพื่อร้องขอข้อมูลจากฐานข้อมูล จากนั้นหน้าเว็บก็จะแสดงกราฟและรายละเอียดของข้อมูลการสั่นสะเทือนด้านล่างของกราฟ หน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ของโปรแกรมประยุกต์บนเว็บแสดงได้ดังภาพประกอบ 3-7



ภาพประกอบ 3-7 โปรแกรมประยุกต์บนเว็บ

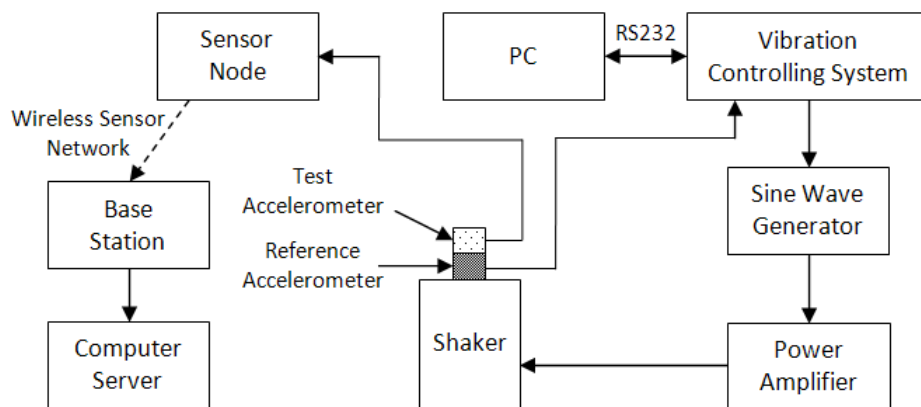
บทที่ 4

การทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูล

บทนี้จะนำเสนอการทดสอบประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบเครือข่ายไร้สายสำหรับเฟิร์มแวร์การสั่นสะเทือนของอาคารที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ประเด็น ได้แก่ การทดสอบความถูกต้องของค่าแรงสั่นสะเทือนที่ระบบอ่านได้ การทดสอบหาขนาดของบัพเฟอร์ที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มจำนวนเซนเซอร์โหนดในระบบ และการทดสอบหาเวลาตอบสนองของระบบ เมื่อเพิ่มจำนวน hop ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

4.1 การทดสอบความถูกต้องของค่าการสั่นสะเทือนที่ระบบอ่านได้

การทดสอบความถูกต้องของค่าการสั่นสะเทือนที่อ่านได้จากระบบที่ได้ออกแบบไว้จะทดสอบเปรียบเทียบกับระบบสอบเทียบการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำมาตรฐานทุติยภูมิ (Very Low Frequency Secondary Calibration System) โดยแบ่งเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบ และการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ การติดตั้งอุปกรณ์ของการทดสอบทั้งสองแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-1



ภาพประกอบ 4-1 แผนภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบความถูกต้องของค่าการสั่นสะเทือนที่ระบบอ่านได้

จากภาพประกอบ 4-1 อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ระบบที่ได้ ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะเรียกว่า ระบบสั่นสะเทือนทดสอบ ส่วนที่สองคือระบบสอบเทียบการ

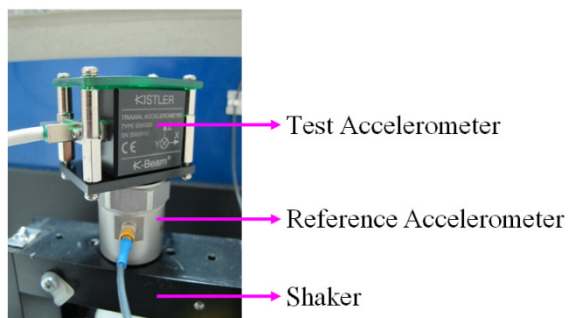
ต้นสะเทือนความถี่ต่ำมาตรฐานทุกขงุมิ ซึ่งจะเรียกว่า ระบบต้นสะเทือนอ้างอิง และส่วนสุดท้ายคือ ระบบให้กำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ซึ่งใช้แทนสัญญาณการต้นสะเทือน

ระบบต้นสะเทือนทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วน ส่วนแรก คือ เซนเซอร์ โหนด (Sensor Node) ซึ่งใช้เซนเซอร์ต้นสะเทือนหรือเซนเซอร์ต้นสะเทือนทดสอบ (Test Accelerometer) Kistler K-Beam® รุ่น 8393B2 โดยสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 0 – 250 เฮิรตซ์ ส่วนที่สองคือสถานีฐาน (Base Station) และส่วนสุดท้ายคือเครื่องแม่ข่าย (Computer Server) 1.66GHz Intel® Atom™ Processor N280 มีหน่วยความจำขนาด 1GB

ระบบต้นสะเทือนอ้างอิงประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วน คือ คอมพิวเตอร์ (PC) 3.2GHz Pentium มีหน่วยความจำขนาด 512MB และเซนเซอร์ต้นสะเทือนอ้างอิง (Reference Accelerometer) PCB Peizotronics® 301A10 ICP [22] ซึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 0.3 ถึง 14,000 เฮิรตซ์ โดยโปรแกรม SPEKTRA CS18 ในคอมพิวเตอร์จะแสดงความถี่เฉลี่ยและความเร่งการต้นสะเทือน RMS หลังเสร็จการทดสอบในแต่ละครั้ง

ระบบให้กำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ประกอบด้วยอุปกรณ์ 5 อย่าง คือ คอมพิวเตอร์ (PC) ซึ่งเป็นเครื่องเดียวกันกับระบบต้นสะเทือนอ้างอิง เครื่องควบคุมการต้นสะเทือน (Vibration Controlling System) เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave Generator) เครื่องขยายสัญญาณ (Power Amplifier) และเครื่องสั่น (Shaker) ELECTRO-SEIS® APS113-AB [23] การทำงานจะเริ่มจากผู้กำหนดความถี่และความเร่งการต้นสะเทือนที่ต้องการด้วยโปรแกรม SPEKTRA CS18 ในคอมพิวเตอร์ (PC) จากนั้นข้อมูลนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องควบคุมการต้นสะเทือนเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับควบคุมการต้นสะเทือนให้อยู่ในช่วงที่กำหนด และข้อมูลนี้จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์เพื่อกำเนิดสัญญาณ จากนั้นคลื่นไซน์จะถูกขยายกำลังด้วยเครื่องขยายสัญญาณก่อนส่งไปยังเครื่องสั่น เครื่องสั่นก็จะทำให้เกิดการสั่นในแนวตั้งฉากกับพื้นด้วยสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่และความเร่งการต้นสะเทือนที่กำหนดไว้

ในการทดสอบความถูกต้องของค่าการต้นสะเทือนที่ระบบอ่านได้นั้น จะต้องคำนึงถึงแรงต้นสะเทือนที่ให้กับเซนเซอร์ต้นสะเทือนทดสอบและเซนเซอร์ต้นสะเทือนอ้างอิง โดยเซนเซอร์ทั้งสองต้องได้รับแรงต้นสะเทือนที่เท่ากัน ผลทดสอบนี้จึงจะถูกต้องและน่าเชื่อถือ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงได้ยึดเซนเซอร์ทั้งสองให้เสมือนเป็นวัตถุชิ้นเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 4-2 เพื่อให้เซนเซอร์ทั้งสองได้รับแรงต้นสะเทือนที่เท่ากันและป้องกันการกระเพื่อมระหว่างเซนเซอร์ทั้งสอง



ภาพประกอบ 4-2 การยึดจับเซนเซอร์สั่นสะเทือน

4.1.1 การทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความถูกต้องของความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ระบบสั่นสะเทือนทดสอบสามารถอ่านได้เปรียบเทียบกับความถี่ของระบบอ้างอิง ซึ่งจะทดสอบในช่วงความถี่ 0.4 – 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$ แต่เนื่องจากระบบให้กำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์สามารถให้กำเนิดสัญญาณที่มีความเร่งการสั่นสะเทือนมากที่สุดต่างกันในแต่ละความถี่ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงได้กำหนดพารามิเตอร์ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือนให้สอดคล้องกับระบบให้กำเนิดสัญญาณและขอบเขตของงานวิจัย ดังแสดงในตาราง

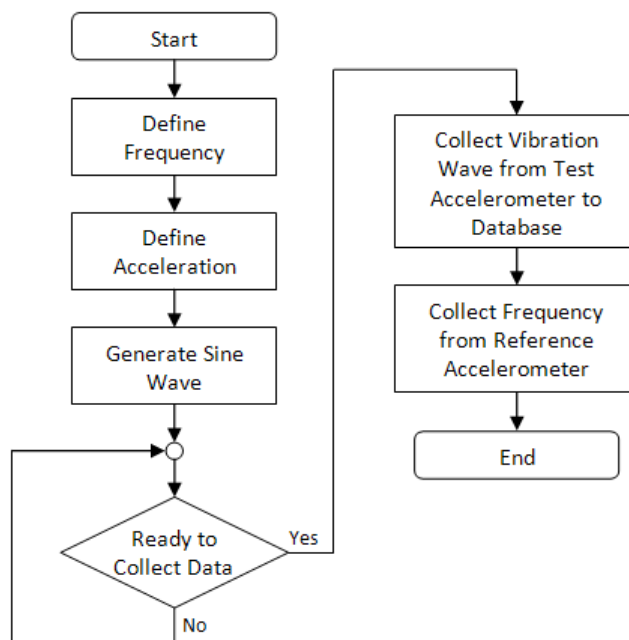
4-1

ตาราง 4-1 พารามิเตอร์ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือน
ที่ใช้ในการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่

	ความเร่งการสั่นสะเทือน (m/s^2)				
	A=0.0981	A=0.4905	A=0.9810	A=4.9050	A=9.8100
ความถี่ (เฮิรตซ์)	0.4	0.8	1.6	2.8	6
	0.8	1.2	2	3.2	7
	1.2	1.6	2.4	3.6	8
	1.6	2	2.8	4	9
	2	2.4	3.2	6	10
	2.4	2.8	3.6	8	
	2.8	3.2	4		
	3.2	3.6	6		
	3.6	4	8		
	4	6	10		
	6	8			
	8	10			
	10				

ขั้นตอนการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-3 โดยเริ่มจากการสร้างแรงสั่นสะเทือนให้กับเครื่องสั่น ซึ่งจะต้องกำหนดเวลาของการสั่น ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือนผ่านโปรแกรม SPEKTRA CS18 ในคอมพิวเตอร์ (PC) เมื่อเครื่องสั่นเริ่มทำงาน จะเริ่มสั่นจากความถี่ต่ำ ความเร่งการสั่นสะเทือนสูงก่อน แล้วเครื่องควบคุมการสั่นสะเทือนจึงจะส่งสัญญาณไปควบคุมเครื่องสั่นให้ปรับการสั่นจนได้ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือนที่กำหนดไว้ ซึ่งตรวจสอบค่าความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนนี้ได้จากโปรแกรม SPEKTRA CS18 จากนั้นเมื่อเครื่องสั่นด้วยความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนที่กำหนดไว้แล้ว จึงเริ่มเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของระบบทดสอบ และเมื่อการสั่นเสร็จสิ้นลง โปรแกรม SPEKTRA CS18 จะแจ้งความถี่เฉลี่ยการสั่นสะเทือนของระบบอ้างอิง แล้วจึงเก็บข้อมูลความถี่เฉลี่ยลงในฐานข้อมูล ส่วนระบบทดสอบก็จะมีข้อมูลการสั่นสะเทือนในรูปแบบไทม์

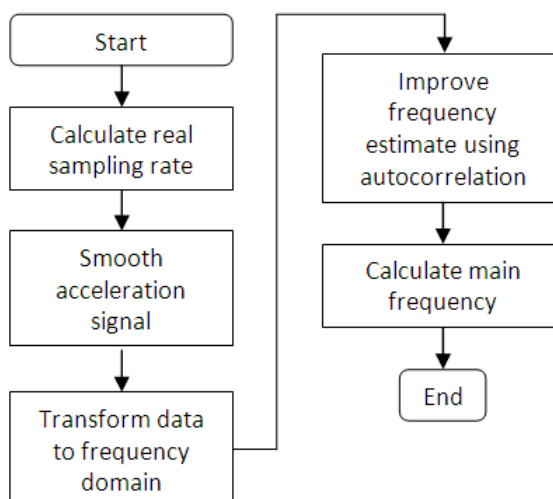
โดเมน (Time domain) เก็บไว้ในฐานข้อมูล จึงเป็นอันเสร็จสิ้นการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งในแต่ละกรณี จะทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง



ภาพประกอบ 4-3 ขั้นตอนการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบ

4.1.1.1 ผลการทดสอบ

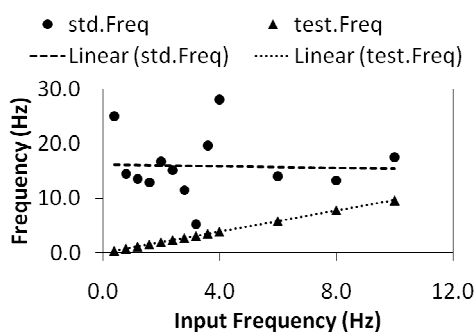
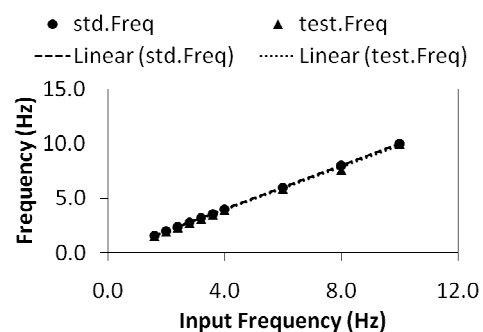
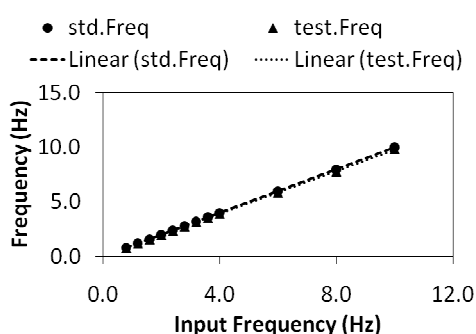
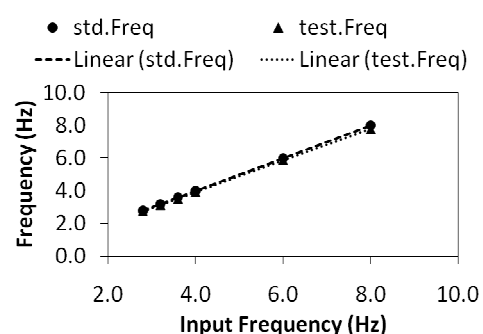
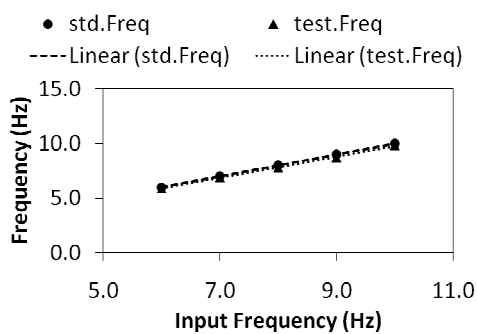
จากการทดสอบข้างต้น จะได้ค่าความถี่เฉลี่ยของการสั่นสะเทือนของเซนเซอร์ สั่นสะเทือนอ้างอิง และคลื่นการสั่นสะเทือนที่อยู่ในโหมดโดเมนของเซนเซอร์สั่นสะเทือนทดสอบ ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์คลื่นการสั่นสะเทือนเพื่อหาความถี่ก่อนจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถี่ของระบบสั่นสะเทือนอ้างอิง ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือนแสดงได้ดัง ภาพประกอบ 4-4



ภาพประกอบ 4-4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือน

เนื่องจากข้อมูลคลื่นการสั่นสะเทือนที่เก็บได้จะสูญหายไปบางส่วน ทำให้ช่วงเวลาระหว่างข้อมูล 2 ตัวอย่างไม่เท่ากัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือน จึงต้องคำนวณอัตราสุ่มเก็บสัญญาณเฉลี่ยจากข้อมูลการสั่นสะเทือนที่เก็บได้ก่อน แล้วจึงนำอัตราสุ่มเก็บสัญญาณที่คำนวณได้ไปใช้ในกรองสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตัดสัญญาณรบกวน จากนั้นจึงแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนจากโดเมนของเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ (frequency domain) แล้วนำสัญญาณการสั่นสะเทือนไปปรับปรุงการประมาณความถี่โดยใช้วิธี autocorrelation จากนั้นจึงคำนวณหาความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือนของระบบระบบสั่นสะเทือนทดสอบ

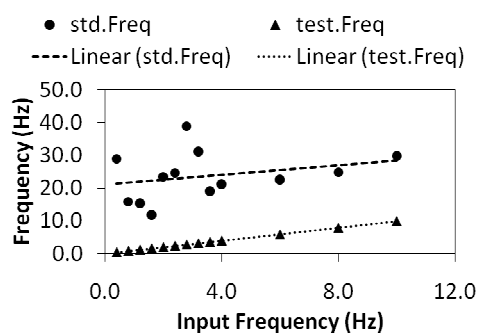
จากการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือน จะได้ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ระบบสั่นสะเทือนทดสอบสามารถวัดได้ในการทดสอบแต่ละครั้ง ซึ่งแต่ละกรณีจะทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง ความถี่ของการสั่นสะเทือนของแต่ละกรณีจะคำนวณได้จากค่ามัธยฐานของความถี่ของการสั่นสะเทือนทั้ง 5 ครั้ง เมื่อนำค่ามัธยฐานของความถี่ของการสั่นสะเทือนของระบบทดสอบมาเปรียบเทียบกับความถี่ของการสั่นสะเทือนของระบบอ้างอิง จะได้กราฟผลตอบแทนต่อความถี่ (Frequency Response) ดังภาพประกอบ 4-5 – 4-7 โดยมีความคลาดเคลื่อนแสดงเป็นค่า R-squared ดังตาราง 4-2 – 4.4 ซึ่งค่า R-squared ที่มีค่าเท่ากับ 1 จะหมายถึงค่าที่อ่านได้ไม่มีความผิดพลาดใดๆ

(ก) ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 m/s^2 (ค) ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.9810 m/s^2 (ข) ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.4905 m/s^2 (ง) ความเร่งการสั่นสะเทือน 4.9050 m/s^2 (จ) ความเร่งการสั่นสะเทือน 9.8100 m/s^2

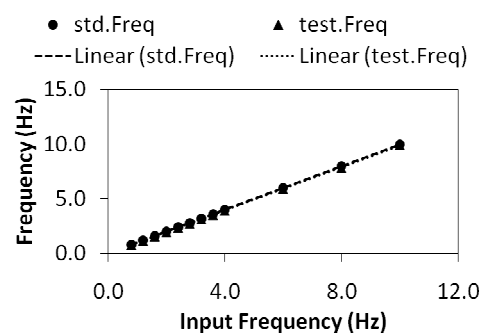
ภาพประกอบ 4-5 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน X
ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ

ตาราง 4-2 ค่า R-squared ของกราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน X

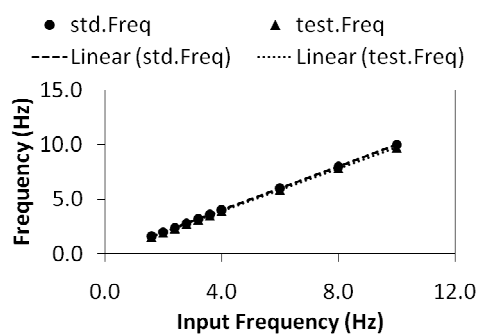
Acceleration (m/s^2)	R-squared std.	R-squared test
0.0981	0.0012	0.9999
0.4905	1	0.9999
0.9810	1	0.9988
4.9050	1	0.9999
9.8100	1	0.9987



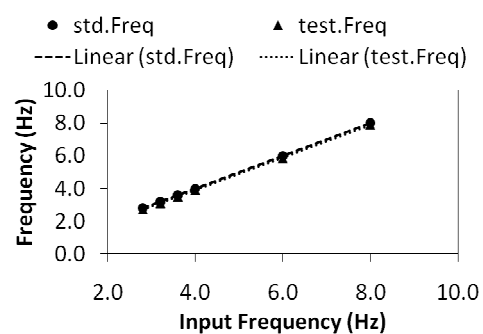
(ก) ความเร่งการสั่นสะเทือน $0.0981 m/s^2$



(ข) ความเร่งการสั่นสะเทือน $0.4905 m/s^2$

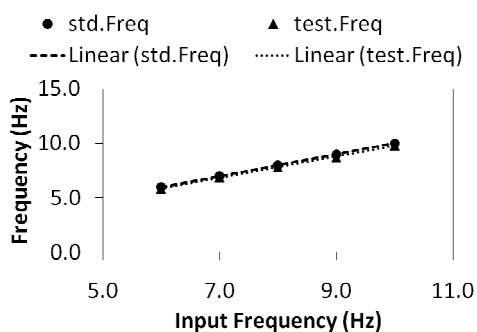


(ค) ความเร่งการสั่นสะเทือน $0.9810 m/s^2$



(ง) ความเร่งการสั่นสะเทือน $4.9050 m/s^2$

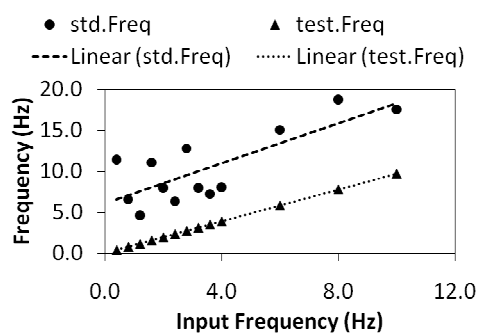
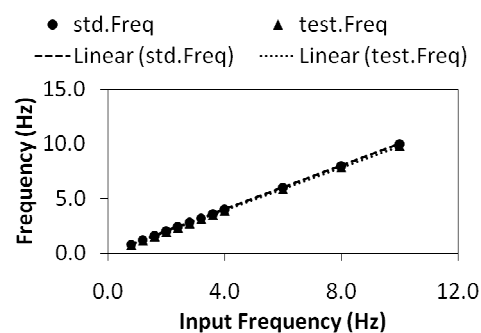
ภาพประกอบ 4-6 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Y
ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ

(จ) ความเร่งการสั่นสะเทือน 9.8100 m/s²

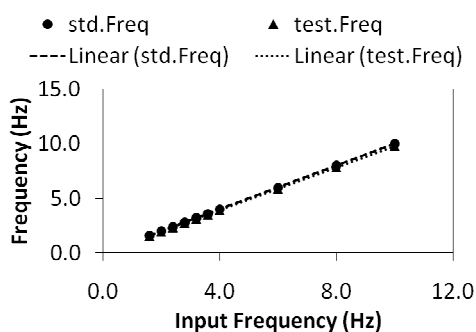
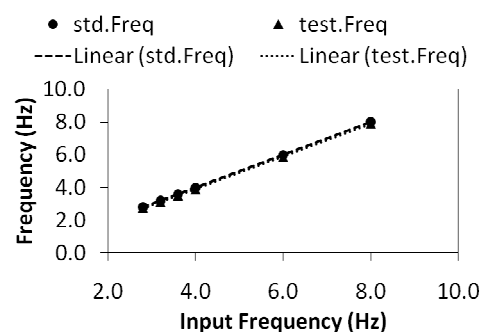
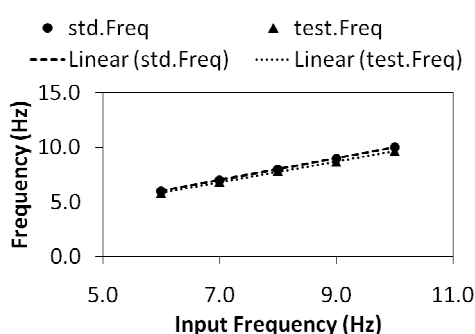
ภาพประกอบ 4-6 (ต่อ) กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Y ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ

ตาราง 4-3 ค่า R-squared ของกราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Y

Acceleration (m/s ²)	R-squared std.	R-squared test
0.0981	0.0835	0.9999
0.4905	1	0.9999
0.9810	1	0.9999
4.9050	1	0.9999
9.8100	1	0.9986

(ก) ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 m/s²(ข) ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.4905 m/s²

ภาพประกอบ 4-7 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Z ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ

(ค) ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.9810 m/s^2 (ง) ความเร่งการสั่นสะเทือน 4.9050 m/s^2 (จ) ความเร่งการสั่นสะเทือน 9.8100 m/s^2

ภาพประกอบ 4-7 (ต่อ) กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Z ที่ความเร่งการสั่นสะเทือนค่าต่างๆ

ตาราง 4-4 ค่า R-squared ของกราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน Z

Acceleration (m/s^2)	R-squared std.	R-squared test
0.0981	0.6087	1
0.4905	1	1
0.9810	1	1
4.9050	1	0.9998
9.8100	1	0.9994

จากภาพประกอบ 4-4 – 4-7 จะเห็นว่าผลการทดสอบการตอบสนองต่อความถี่ของการสั่นสะเทือนทั้งแกน X, Y, Z ให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกัน คือ ระบบสั่นสะเทือนทดสอบและระบบสั่นสะเทือนอ้างอิงสามารถวัดความถี่ของการสั่นสะเทือนได้เทียบเท่ากับความถี่ของการ

สิ้นสะท้อนจริงที่กำหนดจากโปรแกรม SPEKTRA CS18 สังเกตได้จากกราฟที่ซ้อนกันสนิท ยกเว้นที่การสิ้นสะท้อนที่มีความถี่การสะท้อนเท่ากับ 0.0981 m/s^2 ซึ่งระบบสิ้นสะท้อนอ้างอิงไม่สามารถวัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนได้ถูกต้อง ได้ผลการตอบสนองความถี่เป็นกราฟที่ไม่เป็นเส้นตรง ในขณะที่ระบบสิ้นสะท้อนทดสอบสามารถวัดความถี่ได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงการทดสอบการสิ้นสะท้อนซึ่งมีความถี่การสิ้นสะท้อน $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$

4.1.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากกราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของการสิ้นสะท้อนของระบบทดสอบ ซึ่งทำการทดสอบในช่วงความถี่ $0.4 - 10$ เฮิรตซ์ ที่ความถี่การสิ้นสะท้อน $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$ จะมีค่า R-squared น้อยที่สุดของแกน X, Y, Z เป็น $0.9987, 0.9986$ และ 0.9994 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงว่าระบบทดสอบสามารถวัดค่าความถี่ของการสิ้นสะท้อนได้ถูกต้องเทียบเท่ากับความถี่ของการสิ้นสะท้อนจริงที่กำหนดจากโปรแกรม SPEKTRA CS18 จากค่า R-squared จะสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบได้จากสมการ (4.1) ดังนั้นจะได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากที่สุดของการวัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนแกน X, Y, Z ของระบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.13% 0.14% และ 0.06% ตามลำดับ

$$\%Error = (1 - R - squared) \times 100 \quad (4.1)$$

จากกราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของการสิ้นสะท้อนของระบบอ้างอิง จะพบว่าระบบอ้างอิงสามารถวัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนทั้งสามแกนได้เท่ากับความถี่ของการสิ้นสะท้อนจริงที่กำหนดจากโปรแกรม SPEKTRA ในช่วงความถี่ $0.4 - 10$ เฮิรตซ์ ที่ความถี่การสิ้นสะท้อน $0.4905 - 9.8100 \text{ m/s}^2$ โดยไม่มีความผิดพลาด แต่ไม่สามารถวัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนที่ความถี่ 0.0981 m/s^2 ซึ่งเป็นความถี่การสิ้นสะท้อนระดับต่ำได้

4.1.1.3 สรุปผลการทดสอบ

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสิ้นสะท้อนที่ได้ออกแบบไว้สามารถนำไปใช้วัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนในช่วงความถี่ $0.4 - 10$ เฮิรตซ์ ที่ความถี่ของการสิ้นสะท้อน $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$ ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดของการวัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนแกน X, Y, Z เป็น 0.13% 0.14% และ 0.06% ตามลำดับ โดยระบบทดสอบสามารถวัดความถี่ของการสิ้นสะท้อนที่ความถี่การสิ้นสะท้อนระดับต่ำได้ถูกต้องมากกว่าที่ความถี่การสิ้นสะท้อนระดับสูง

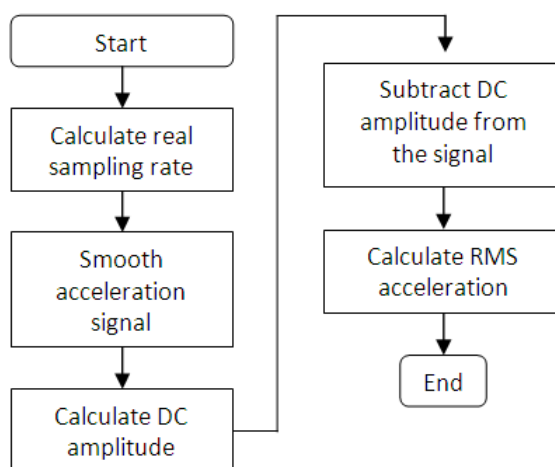
4.1.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความถูกต้องแบบเชิงเส้นของความเร่งการสั่นสะเทือนที่ระบบทดสอบสามารถอ่านได้เปรียบเทียบกับระบบอ้างอิง ซึ่งจะเน้นทดสอบเพื่อดูแนวโน้มของความถูกต้องหรือความผิดพลาดของความเร่งการสั่นสะเทือนว่ามีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงหรือไม่ ซึ่งเครื่องมือวัดที่มีคุณภาพดีจะมีความเป็นเชิงเส้นสูง หรือมีความผิดพลาดน้อยในช่วงการวัดที่ระบุไว้ ดังนั้นช่วงความเร่งการสั่นสะเทือนที่มีแนวโน้มความถูกต้องหรือความผิดพลาดเป็นเส้นตรงจะแสดงถึงช่วงที่ระบบสามารถใช้งานได้ การทดสอบความเป็นเชิงเส้นจะทดสอบในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 ถึง 17.6580 m/s^2 แต่เนื่องจากระบบให้กำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์สามารถให้กำเนิดสัญญาณที่มีความเร่งการสั่นสะเทือนมากที่สุดต่างกันในแต่ละความถี่ ดังนั้นการทดสอบนี้จึงได้กำหนดพารามิเตอร์ความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนให้สอดคล้องกับระบบให้กำเนิดสัญญาณและขอบเขตของงานวิจัย ดังแสดงในตาราง 4-5

ตาราง 4-5 พารามิเตอร์ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือน
ที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ

	ความถี่ (เฮิรตซ์)				
	f=0.8	f=2.0	f=3.2	f=6.0	f=10.0
ความเร่งการสั่นสะเทือน (m/s^2)	0.0981	0.0981	0.0981	0.0981	0.0981
	0.1962	0.4905	0.4905	0.9810	1.9620
	0.2943	0.9810	0.9810	1.9620	3.9240
	0.3924	1.4715	1.4715	2.9430	5.8860
	0.4905	1.9620	1.9620	3.9240	7.8480
	0.5886	2.4525	2.4525	4.9050	9.8100
	0.6867	2.9430	2.9430	5.8860	11.7720
	0.7848		3.4335	6.8670	13.7340
	0.8829		3.9240	7.8480	15.6960
			4.4145	8.8290	17.6580
		4.9050	9.8100		

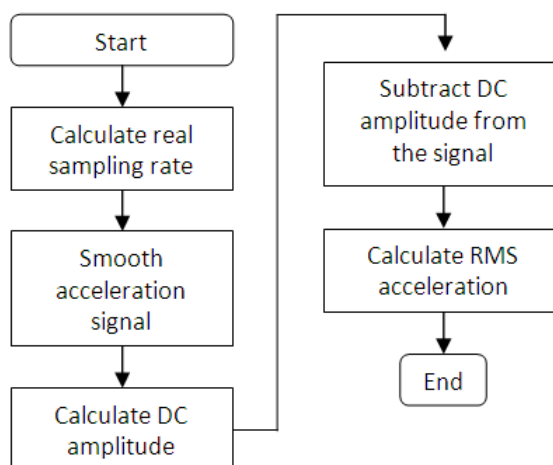
ขั้นตอนการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของระบบแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-8 โดยเริ่มจากการสร้างแรงสั่นสะเทือนให้กับเครื่องสั่น ซึ่งจะต้องกำหนดเวลาของการสั่น ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือนผ่านโปรแกรม SPEKTRA CS18 ในคอมพิวเตอร์ (PC) เมื่อเครื่องสั่นเริ่มทำงาน จะเริ่มสั่นจากความถี่ต่ำ ความเร่งการสั่นสะเทือนสูงก่อน แล้วเครื่องควบคุมการสั่นสะเทือนจึงจะส่งสัญญาณไปควบคุมเครื่องสั่นให้ปรับการสั่นจนได้ความถี่และความเร่งการสั่นสะเทือนที่กำหนดไว้ ซึ่งตรวจสอบค่าความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนนี้ได้จากโปรแกรม SPEKTRA CS18 จากนั้นเมื่อเครื่องสั่นด้วยความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนที่กำหนดไว้แล้ว จึงเริ่มเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของระบบทดสอบ และเมื่อการสั่นเสร็จสิ้นลง โปรแกรม SPEKTRA CS18 จะแจ้งความเร่งการสั่นสะเทือน RMS ของระบบอ้างอิง แล้วจึงเก็บข้อมูลความเร่งการสั่นสะเทือน RMS ของระบบอ้างอิงลงในฐานข้อมูล ส่วนระบบทดสอบก็จะมีข้อมูลการสั่นสะเทือนในรูปแบบไทม์โดเมน (Time domain) เก็บไว้ในฐานข้อมูล จึงเป็นอันเสร็จสิ้นการทดสอบ 1 ครั้ง ซึ่งในแต่ละกรณีจะทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง



ภาพประกอบ 4-8 ขั้นตอนการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ

4.1.2.1 ผลการทดสอบ

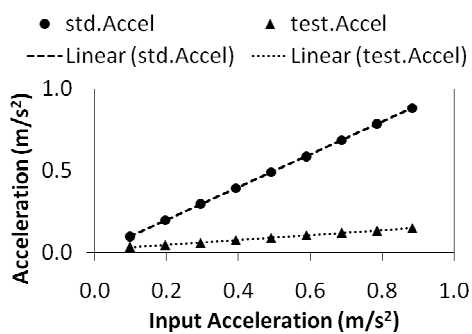
จากการทดสอบข้างต้น จะได้ความเร่งการสั่นสะเทือน RMS ของเซนเซอร์สั่นสะเทือนอ้างอิง และคลื่นการสั่นสะเทือนที่อยู่ในไทม์โดเมนของเซนเซอร์สั่นสะเทือนทดสอบ ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์คลื่นการสั่นสะเทือนเพื่อหาความเร่งของการสั่นสะเทือนก่อนจะนำมาเปรียบเทียบกับความเร่งการสั่นสะเทือนอ้างอิง ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือนแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-9



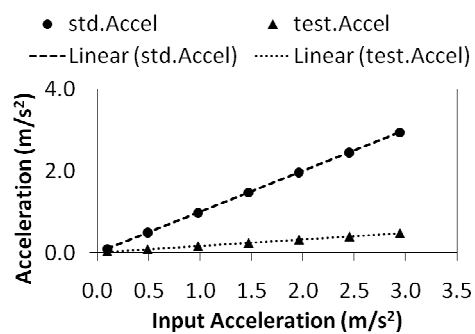
ภาพประกอบ 4-9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเร่งของการสั่นสะเทือน

เนื่องจากข้อมูลคลื่นการสั่นสะเทือนที่เก็บได้จะสูญหายไปบางส่วน ทำให้ช่วงเวลาระหว่างข้อมูล 2 ตัวอย่างไม่เท่ากัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ความถี่ของคลื่นการสั่นสะเทือน จึงต้องคำนวณอัตราสุ่มเก็บสัญญาณเฉลี่ยจากข้อมูลการสั่นสะเทือนที่เก็บได้ก่อน แล้วจึงนำอัตราสุ่มเก็บสัญญาณที่คำนวณได้ไปใช้ในกรองสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อตัดสัญญาณรบกวน จากนั้นจึงคำนวณค่าแอมพลิจูดสัญญาณ DC ที่เกิดจากวงจรของบอร์ดปรับค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้วิเคราะห์ความเร่งการสั่นสะเทือนผิดพลาด จึงต้องลบสัญญาณ DC นี้ออกจากสัญญาณจริง แล้วจึงคำนวณหาความเร่งการสั่นสะเทือน RMS ที่ระบบสั่นสะเทือนทดสอบวัดได้

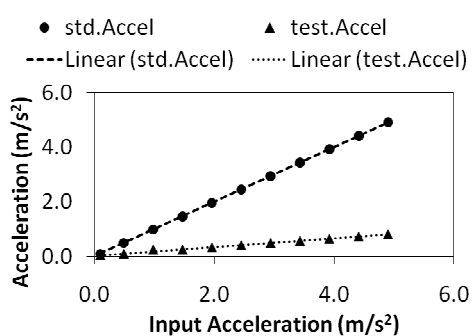
จากการวิเคราะห์ความเร่งการสั่นสะเทือนของคลื่นการสั่นสะเทือน จะได้ความเร่งการสั่นสะเทือนที่ระบบทดสอบสามารถวัดได้ในแต่ละการทดสอบ จากนั้นจึงคำนวณหาค่ามัธยฐานของความเร่งการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณี ซึ่งแต่ละกรณีจะมีการทดสอบ 5 ครั้ง เมื่อนำค่ามัธยฐานของความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบทดสอบมาเปรียบเทียบกับความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบอ้างอิง จะได้กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบ (Linearity of Acceleration) ดังภาพประกอบ 4-10 – 4-12 โดยมีค่า R-squared ดังตาราง 4-6 – 4.8



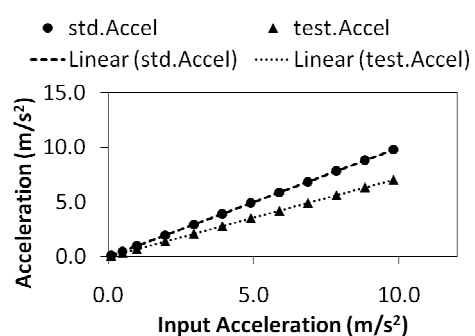
(ก) ความถี่ 0.8 เฮิรตซ์



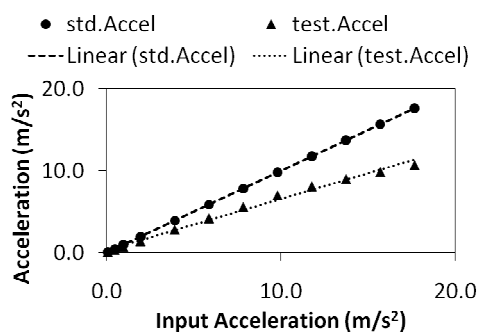
(ข) ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์



(ค) ความถี่ 3.2 เฮิรตซ์



(ง) ความถี่ 6.0 เฮิรตซ์

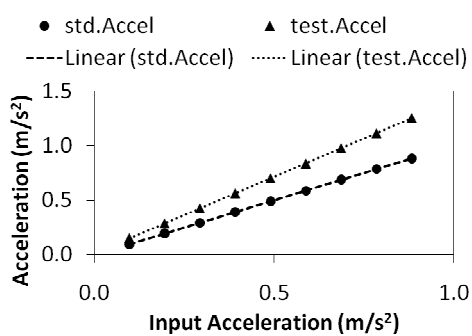


(จ) ความถี่ 10.0 เฮิรตซ์

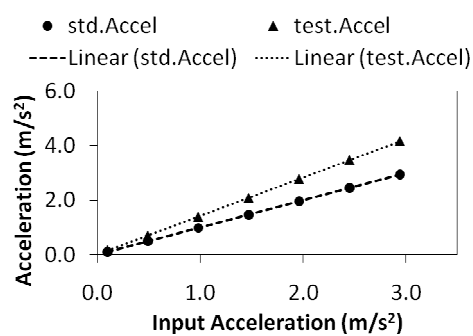
ภาพประกอบ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของระบบในแกน X ที่ความถี่ค่าต่างๆ

ตาราง 4-6 ค่า R-squared ของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน X

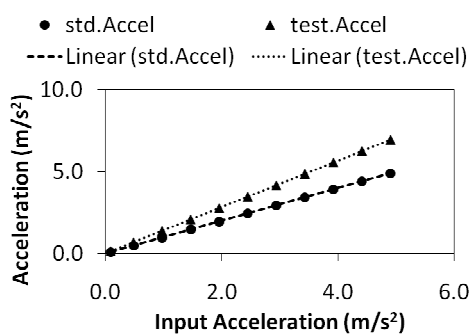
ความถี่ (เฮิรตซ์)	R-squared std.	R-squared test
0.8	1	0.9983
2.0	1	0.9994
3.2	1	0.9926
6.0	1	0.9999
10.0	1	0.9992



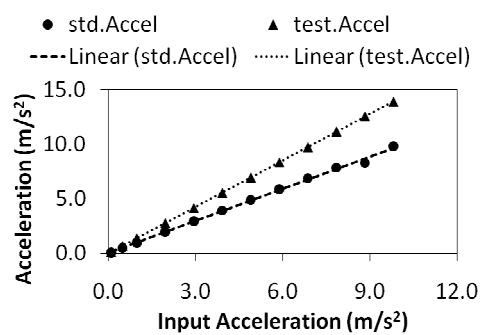
(ก) ความถี่ 0.8 เฮิรตซ์



(ข) ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์

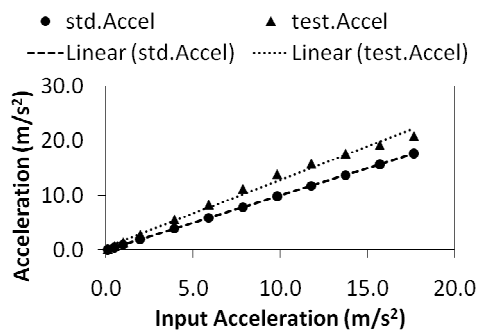


(ค) ความถี่ 3.2 เฮิรตซ์



(ง) ความถี่ 6.0 เฮิรตซ์

ภาพประกอบ 4-11 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y ที่ความถี่ค่าต่างๆ

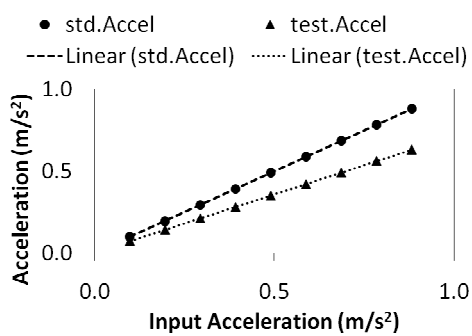


(จ) ความถี่ 10.0 เฮิรตซ์

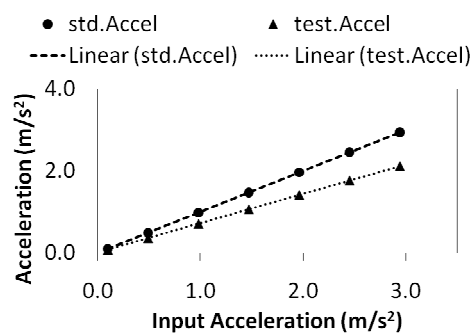
ภาพประกอบ 4-11 (ต่อ) กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y ที่ความถี่ค่าต่างๆ

ตาราง 4-7 ค่า R-squared ของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y

ความถี่ (เฮิรตซ์)	R-squared std.	R-squared test
0.8	1	1
2.0	1	1
3.2	1	1
6.0	0.9981	1
10.0	1	0.9898

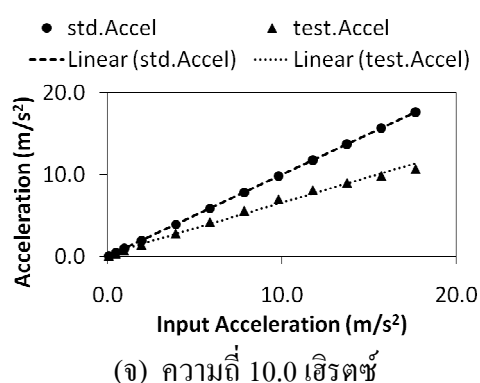
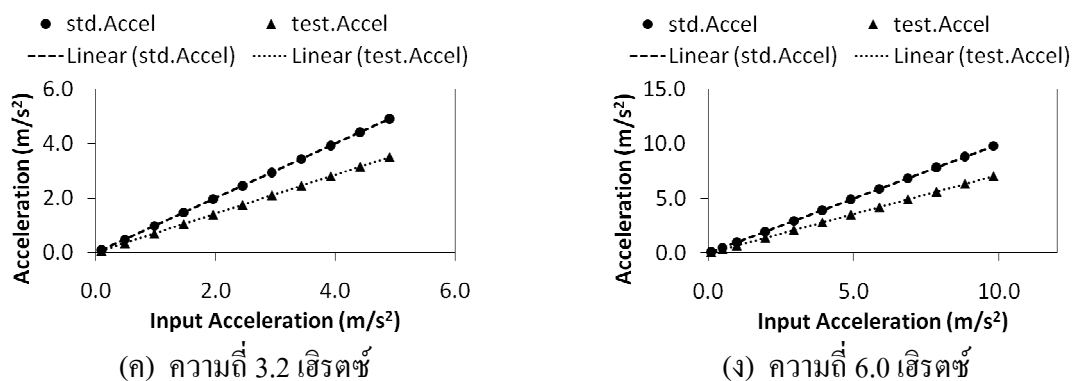


(ก) ความถี่ 0.8 เฮิรตซ์



(ข) ความถี่ 2.0 เฮิรตซ์

ภาพประกอบ 4-12 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z ที่ความถี่ค่าต่างๆ



ภาพประกอบ 4-12 (ต่อ) กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z ที่ความถี่ค่าต่างๆ

ตาราง 4-8 ค่า R-squared ของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z

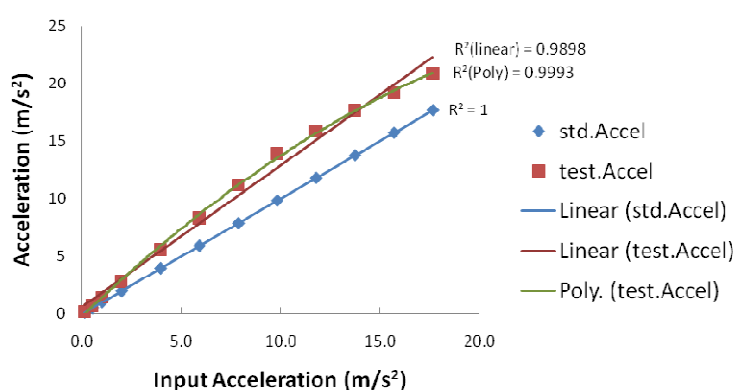
ความถี่ (เฮิรตซ์)	R-squared std.	R-squared test
0.8	1	1
2.0	1	1
3.2	1	1
6.0	1	1
10.0	1	0.9918

จากภาพประกอบ 4-10 – 4-12 จะเห็นว่าระบบสั่นสะเทือนอ้างอิงสามารถวัดความเร่งการสั่นสะเทือนได้ถูกต้องเทียบเท่ากับความเร่งการสั่นสะเทือนจริงที่กำหนดจากโปรแกรม SPEKTRA CS18 ทั้งแกน X, Y, Z ในขณะที่ระบบสั่นสะเทือนทดสอบไม่สามารถวัดความเร่งการสั่นสะเทือนได้ถูกต้อง แต่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นซึ่งจะช่วยให้สามารถแก้ไขความถูกต้องของการวัด

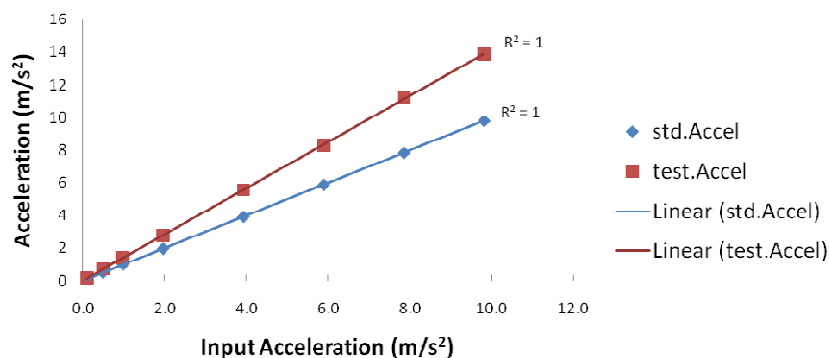
ได้จากการคูณด้วยค่าชดเชยความเร่งการสั่นสะเทือนของแต่ละแกน โดยความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน X มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 17.6580 m/s² ส่วนความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน Y และแกน Z มีความเป็นเชิงเส้นในช่วงในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 9.8100 m/s²

4.1.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

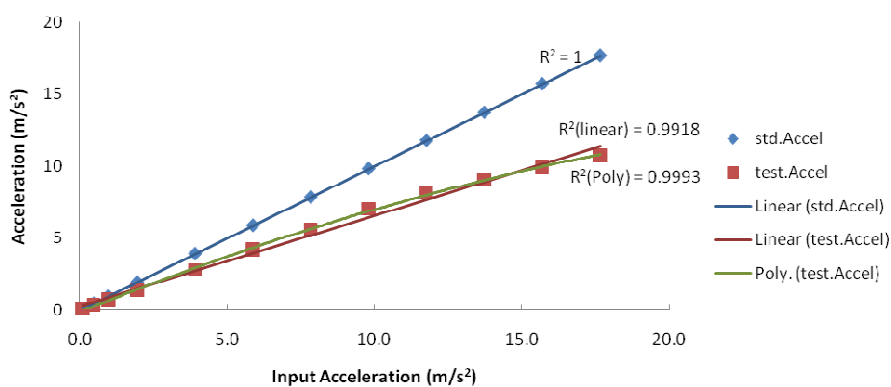
จากกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบ ซึ่งได้ทำการทดสอบในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 17.6580 m/s² โดยวัดความเร่งการสั่นสะเทือนเป็นค่า RMS พบว่าระบบในแกน X มีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ ส่วนระบบในแกน Y และแกน Z จะมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 9.8100 m/s² โดยการทดสอบที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 17.6580 m/s² พบว่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ระบบวัดได้จะมีความเป็นเชิงเส้นในช่วงความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 9.8100 m/s² ดังภาพประกอบ 4-13 ถึง 4-16 เนื่องจากระบบสั่นสะเทือนทดสอบมีความเป็นเชิงเส้นเฉพาะช่วงหนึ่งซึ่งแตกต่างกันในแต่ละแกน แต่การวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนในระบบเฟ้าระวางการสั่นสะเทือนจริงต้องใช้ความเร่งการสั่นสะเทือนของทั้ง 3 แกน ดังนั้นระบบสั่นสะเทือนทดสอบจึงสามารถนำไปใช้วัดความเร่งการสั่นสะเทือนในงานจริงได้อย่างถูกต้องในช่วงความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981– 9.8100 m/s²



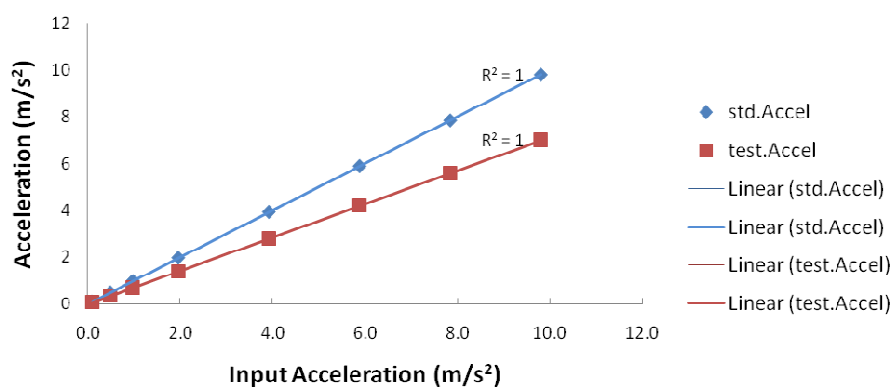
ภาพประกอบ 4-13 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y ที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 17.52 m/s²



ภาพประกอบ 4-14 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Y ที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 9.8100 m/s²



ภาพประกอบ 4-15 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z ที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 17.52 m/s²



ภาพประกอบ 4-16 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบในแกน Z ที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 – 9.8100 m/s²

จากภาพประกอบ 4 -10 ถึง 4 – 12 ยังพบอีกว่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้ทั้งแกน X, Y, Z ไม่สอดคล้องกับความเร่งของการสั่นสะเทือนจริงและไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยความเร่งของการสั่นสะเทือนที่วัดได้ในแกน X และแกน Z จะมีค่าน้อยกว่าความเร่งของการสั่นสะเทือนจริง แต่ความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้ในแกน Y มีค่ามากกว่าความเร่งสั่นสะเทือนจริง

เหตุผลที่ผลการทดสอบเป็นเชิงเส้นของระบบของทั้งสามแกนไม่สอดคล้องกับความเร่งการสั่นสะเทือนจริงอาจเกิดได้จาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกอาจเนื่องมาจากโครงสร้าง รูปแบบ และขนาด ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับเซนเซอร์สั่นสะเทือนที่ใช้ทดสอบและเซนเซอร์สั่นสะเทือนอ้างอิง ดังภาพประกอบ 4-2 โดยน้ำหนักของอุปกรณ์ยึดจับที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้ไม่สอดคล้องกับความเร่งการสั่นสะเทือนจริง ซึ่งความไม่สอดคล้องที่เกิดจากปัจจัยนี้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

อีกปัจจัยหนึ่งอาจเนื่องมาจากค่าการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนของเซนเซอร์สั่นสะเทือนที่ใช้ทดสอบ โดยในการทดลองนี้ใช้ค่าการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนจากคู่มือการใช้งานเซนเซอร์ทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 1000 มิลลิโวลต์ต่อความเร่งการสั่นสะเทือน 9.8100 m/s^2 เท่ากันทั้งสามแกน [21] ในการคำนวณความเร่งการสั่นสะเทือนจากสัญญาณที่ระบบวัดได้ ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องมาจากเซนเซอร์สั่นสะเทือนแบบ 3 แกนซึ่งใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ประกอบไปด้วยเซนเซอร์สั่นสะเทือน 3 ตัว โดยแต่ละตัวจะทำหน้าที่วัดความเร่งการสั่นสะเทือน 1 แกน และถึงแม้ว่าเซนเซอร์สั่นสะเทือนแต่ละตัวจะเป็นโมเดลเดียวกัน แต่ค่าการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนของแต่ละตัวอาจมีค่าไม่เท่ากัน

ด้วยปัจจัยทั้งสองนี้จึงทำให้ความเร่งการสั่นสะเทือนที่ระบบสั่นสะเทือนทดสอบวัดได้ ไม่สอดคล้องกับความเร่งการสั่นสะเทือนจริงและไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งสามแกน แต่เมื่อพิจารณาความเร่งการสั่นสะเทือนของแต่ละแกนในช่วงการสั่นสะเทือนที่จะนำระบบสั่นสะเทือนทดสอบไปใช้งานจริงที่ความถี่ 0.8 – 10 เฮิรตซ์ ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 m/s^2 ถึง 9.8100 m/s^2 จะพบว่าความคลาดเคลื่อนของความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้ในแต่ละแกนมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขความถูกต้องของการวัดได้โดยการคูณด้วยค่าชดเชยความเร่งการสั่นสะเทือนของแต่ละแกนซึ่งจะทำให้ความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบทดสอบมีค่าเท่ากับความเร่งการสั่นสะเทือนของระบบอ้างอิง จากการคำนวณความชันของกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของระบบสั่นสะเทือนทดสอบเทียบกับระบบสั่นสะเทือนอ้างอิง จะได้ค่าชดเชยความเร่งการสั่นสะเทือนของแกน X, Y, Z เป็น 5.8377, 0.7055 และ 1.4015 ตามลำดับ และมีค่าความผิดพลาดของการวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน X ไม่เกิน เป็น 0.74% โดยคำนวณจากสมการ (4.1)

และสามารถวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน Y และ Z ได้ถูกต้องตามค่าจริงโดยไม่มี ความผิดพลาดใดๆ

4.1.2.3 สรุปผลการทดสอบ

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคารที่ได้ ออกแบบไว้สามารถวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในช่วง $0.0981 - 9.8100 \text{ m/s}^2$ ที่ความถี่ $0.8 - 10$ เฮิรตซ์ได้ถูกต้องทั้งสามแกน โดยมีค่าความผิดพลาดของการวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน x ไม่เกิน 0.74% และสามารถวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน Y และ Z สามารถวัดได้ถูกต้องตาม ค่าจริงโดยไม่มี ความผิดพลาด ความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะต้องนำมาคูณกับค่าชดเชย ความเร่งการสั่นสะเทือนของแกน X, Y, Z ที่มีค่าเป็น 5.8377, 0.7055 และ 1.4015 ตามลำดับก่อนจึง จะได้ค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ถูกต้อง

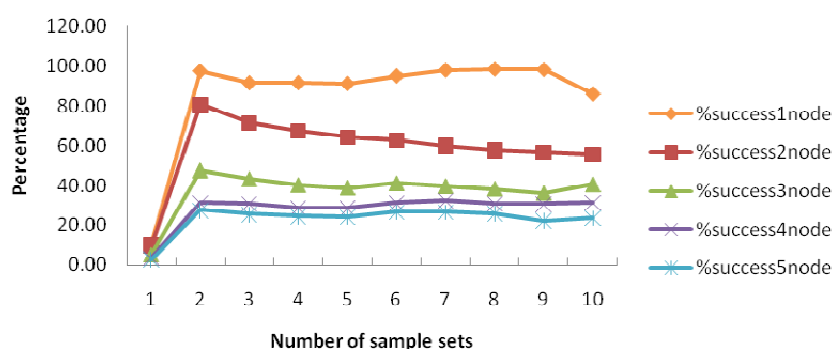
4.2 การทดสอบหาจำนวนชุดข้อมูลที่เหมาะสมต่อหนึ่งแพ็กเก็ต

จากการออกแบบแพ็กเก็ตในบทที่ 3 แพ็กเก็ตขนาดเล็กที่สุดของเซนเซอร์โหนด มี ขนาด 22 ไบต์ซึ่งประกอบด้วย ส่วนหัวของแพ็กเก็ต (header) ขนาด 10 ไบต์ ส่วนท้ายของแพ็กเก็ต (footer) ขนาด 2 ไบต์ [19] และข้อมูลขนาด 10 ไบต์ ดังแสดงในตาราง 3-1 โดยแพ็กเก็ตจะถูกสร้าง และส่งออกทุก 1 มิลลิวินาที แต่หากเก็บข้อมูลไว้เป็นชุดจำนวนหนึ่งแล้วจึงส่งออก จะทำให้ สามารถลดการสูญเสียแบนด์วิดท์จากจำนวนของส่วนหัวและส่วนท้ายของแพ็กเก็ตที่ต้องส่งออก ไปพร้อมกับข้อมูลทุกชุด และคาบของการส่งจะขยายออกไป 1 มิลลิวินาทีต่อขนาดข้อมูลที่เพิ่มขึ้น 10 ไบต์ ซึ่งน่าจะทำให้สถานีฐานสามารถรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากขึ้น ในขณะที่เมื่อขนาดข้อมูล เพิ่มขึ้นจะให้การสูญหายของแพ็กเก็ตมากขึ้นด้วยเนื่องจากเมื่อแพ็กเก็ตสูญหายทั้งชุดข้อมูล นอกจากนี้อาจเกิดปัญหาการชนกันของข้อมูลได้

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาจำนวนชุดข้อมูลต่อการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งครั้ง ที่ทำให้สถานีฐานสามารถรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากที่สุด โดยในการทดสอบจะใช้จำนวนชุดตั้งแต่ 1 - 10 ชุด ข้อมูลแต่ละชุดมีขนาด 10 ไบต์ โดยมีเซนเซอร์โหนดในระบบตั้งแต่ 1 - 5 ตัว เชื่อมต่อ เป็นเครือข่ายแบบดาวกระจาย และเซนเซอร์โหนดแต่ละตัวอยู่ห่างจากสถานีฐาน 0.6 - 2 เมตร ในแต่ละกรณีของการทดสอบจะเก็บข้อมูลเป็นเวลา 1 นาทีและทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง

4.2.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า การเก็บข้อมูลไว้เป็นชุดจำนวนหนึ่งก่อนส่งออกไปในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ทำให้มีโอกาสส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าการส่งข้อมูลออกไปในทันทีเมื่อได้รับข้อมูลแรงส่งต่อเนื่องจากเซนเซอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 4-17 จำนวนชุดข้อมูลที่ทำให้สถานีฐานรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากที่สุดสามารถแสดงได้ดังตาราง 4-9



ภาพประกอบ 4-17 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ต

ตาราง 4-9 จำนวนชุดข้อมูลที่ทำให้สถานีฐานรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากที่สุด

จำนวนเซนเซอร์โหนดในระบบ	จำนวนชุดข้อมูล	%การส่งสำเร็จ
1	8	98.36%
2	2	80.55%
3	2	47.60%
4	7	32.28%
5	2	27.71%

4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาลักษณะของการส่งแพ็กเก็ตสำหรับใช้งานในระบบเฟิร์มแวร์การส่งต่อเนื่อง พบว่าในการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูล จะทำให้ขนาดของข้อมูลต่อแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันก็จะทำให้ช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ต (Interval time) มากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดสอบตามลักษณะของเครือข่ายขนาดใหญ่ (Large Scale Network) โดยพิจารณาแยกเป็นสองกรณีคือ เมื่อเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลขึ้นในขณะที่ช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตคงที่ และเมื่อเพิ่มช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตขึ้นในขณะที่จำนวนชุดข้อมูลคงที่ จะ

พบว่าในกรณีแรก เมื่อเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลขึ้น และช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตคงที่ จะทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตลดลง เนื่องจากหากเกิดการชนกันของแพ็กเก็ต (Collision) ก็จะทำให้แพ็กเก็ตสูญหายเป็นจำนวนมากขึ้น ในขณะที่กรณีที่สอง คือ เพิ่มช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตขึ้น โดยจำนวนชุดข้อมูลคงที่ จะทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตมากขึ้น เนื่องจากแพ็กเก็ตเกิดการชนกันลดลง ดังนั้นจากการทดสอบนี้ ซึ่งเพิ่มขนาดของแพ็กเก็ตและเพิ่มช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตไปพร้อมกัน จึงทำให้ในช่วงแรกเปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อจำนวนแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตลดลง เนื่องจากขนาดของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนแพ็กเก็ตขึ้นอีก จะพบว่าการเพิ่มขนาดของแพ็กเก็ตและช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตไม่มีผลต่อการเปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตแล้ว จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตคงที่

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบเมื่อจำนวนเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเพิ่มขึ้น โดยเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายแบบดาวกระจาย จะพบว่าเมื่อจำนวนเซนเซอร์โหนดในระบบเพิ่มขึ้น จะทำให้จำนวนข้อมูลที่ส่งไปยังสถานีฐานมากขึ้นตามจำนวนเซนเซอร์โหนดที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนด 1 โหนด สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.2)

$$TR = (H + (P \times N) + T) \times 8000 \quad (4.2)$$

เมื่อ

- TR คือ อัตราการส่งข้อมูลของเซนเซอร์โหนด 1 โหนด
มีหน่วยเป็นกิโลบิตต่อวินาที (kbps)
- H คือ ขนาดของแพ็กเก็ตส่วนหัวของ CC2420 10 ไบต์
- P คือ ขนาดของข้อมูล 1 ชุด ซึ่งมีขนาด 10 ไบต์
- N คือ จำนวนชุดข้อมูล
- T คือ ขนาดของแพ็กเก็ตส่วนท้ายของ CC2420 2 ไบต์

จากสมการ (4.2) จะได้ว่าหากเซนเซอร์โหนดส่งข้อมูลจำนวน 2 ชุด จะทำให้อัตราการส่งข้อมูลเป็น 256 kbps แต่สถานีฐานมีอัตราการรับข้อมูล 250 kbps [16] เนื่องจากใช้ชิปรับส่งข้อมูล CC2420 ดังนั้นเมื่อจำนวนเซนเซอร์โหนดเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปัญหาคอขวดที่สถานีฐาน ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตลดลง

4.2.3 สรุปผลการทดสอบ

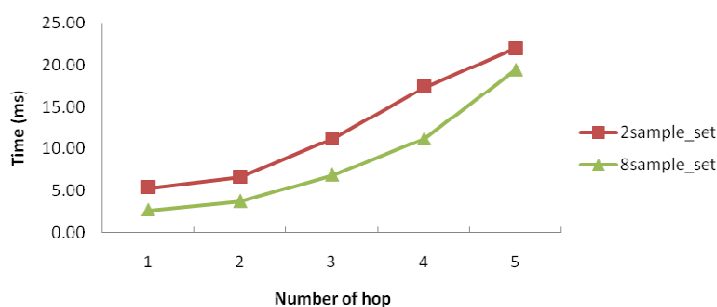
การส่งแพ็กเก็ตที่มีข้อมูลจำนวน 2 ชุดหรือมีขนาด 32 ไบต์ต่อแพ็กเก็ตเมื่อรวมกับแพ็กเก็ตส่วนหัวและแพ็กเก็ตส่วนท้าย จะทำให้สถานีฐานมีโอกาสรับแพ็กเก็ตได้สำเร็จสูงสุด โดยเมื่อจำนวนโหนดในระบบซึ่งเชื่อมต่อกันแบบดาวกระจายเพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตของสถานีฐานลดลง

4.3 การทดสอบหาเวลาตอบสนองของระบบ

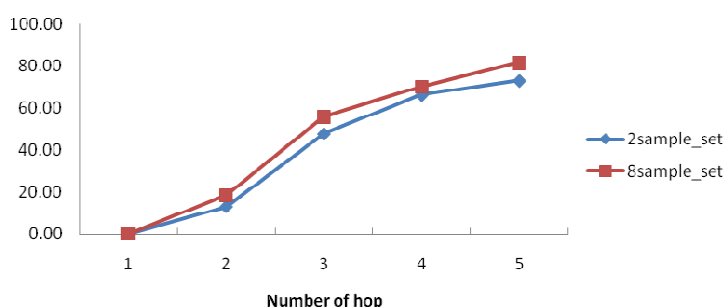
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาเวลาตอบสนองของระบบในการส่งข้อมูลหนึ่งแพ็กเก็ตจากเซนเซอร์โหนดต้นทางไปยังสถานีฐาน (End-to-end delay) เมื่อเพิ่มจำนวน hop ของการส่งแพ็กเก็ตและจำนวนชุดข้อมูลต่อแพ็กเก็ต ระยะเวลาของการส่งข้อมูลจะเริ่มนับจากคำสั่งส่งข้อมูลถูกส่งออกไปจนกระทั่งข้อมูลถูกเก็บลงในฐานข้อมูล การกำหนดจำนวนชุดข้อมูลในการทดสอบนี้จะสัมพันธ์กับการทดลองก่อนหน้านี้ ซึ่งจำนวนชุดที่กำหนดในการทดสอบนี้เป็นจำนวนชุดข้อมูลที่ทำให้สถานีฐานมีเปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตสูงสุด คือ 2 ชุด และ 8 ชุด ซึ่งมีขนาดต่างกัน 4 เท่าเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ ข้อมูลแต่ละชุดมีขนาด 10 ไบต์ ในการทดสอบนี้ใช้จำนวน hop ตั้งแต่ 1 – 5 hop โดยเซนเซอร์โหนดแต่ละตัวอยู่ห่างกัน 1.6 เมตรและวางอยู่บนโต๊ะซึ่งสูงจากพื้น 74.5 เซนติเมตร การทดสอบในแต่ละกรณีจะเก็บข้อมูลเป็นเวลา 1 นาทีและทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง

4.3.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่า เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาตอบสนองของระบบเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 4-18 แต่เมื่อจำนวนชุดข้อมูลต่อแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาตอบสนองของระบบลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การสูญหายของแพ็กเก็ตแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-19 เวลาตอบสนองของระบบและเปอร์เซ็นต์การสูญหายของแพ็กเก็ตสามารถแสดงได้ดังตาราง 4-10



ภาพประกอบ 4-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนองของระบบกับจำนวน hop



ภาพประกอบ 4-19 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์สูญหายของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้น

ตาราง 4-10 ระยะเวลาในการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดต้นทางไปยังสถานีฐาน

จำนวน hop	เวลาตอบสนองของระบบ (ms)		เปอร์เซ็นต์การสูญหายของแพ็กเก็ต	
	ข้อมูล 20 ไบต์	ข้อมูล 80 ไบต์	ข้อมูล 20 ไบต์	ข้อมูล 80 ไบต์
1	5.37	2.69	0.00%	0.00%
2	6.61	3.75	13.03%	18.42%
3	11.24	6.89	47.74%	55.84%
4	17.37	11.17	66.11%	70.22%
5	22.03	19.42	73.10%	81.69%

หมายเหตุ ขนาดของแพ็กเก็ตจริงที่ส่งออกทางเครือข่ายไร้สายจะต้องรวมกับขนาดของแพ็กเก็ตส่วนหัวและแพ็กเก็ตส่วนท้าย 12 ไบต์ด้วย

4.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณาลักษณะของการส่งแพ็กเก็ต พบว่าการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูล จะทำให้ขนาดของข้อมูลต่อแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้อัตราการส่งแพ็กเก็ตลดลง ซึ่งเวลาตอบสนองของระบบจะขึ้นอยู่กับอัตราการส่งแพ็กเก็ต โดยไม่ขึ้นกับขนาดของข้อมูลต่อแพ็กเก็ต

จากการทดสอบพบว่า เมื่อจำนวน hop ในการส่งเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะทางในการส่งแพ็กเก็ตจากโหนดต้นทางมายังสถานีฐานเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบต้องใช้เวลาในการส่งข้อมูลมายังสถานีฐานเพิ่มขึ้น จึงทำให้เวลาตอบสนองของระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในการส่งแพ็กเก็ตของแต่ละ hop จะต้องมีการวนการของ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ก่อนการส่งข้อมูลจริง โดยก่อนการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เซนเซอร์โหนดจะต้องส่งสัญญาณ RTS (Request To Send) ไปยังโหนดปลายทางก่อนและขณะเดียวกันก็จะเตือนเซนเซอร์โหนดทั้งหมดที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงให้หยุดรอชั่วขณะหนึ่ง เมื่อโหนดปลายทางได้รับสัญญาณ

RTS แล้วก็จะส่งสัญญาณ CTS (Clear To Send) กลับไปยังเซนเซอร์โหนดที่ต้องการส่งข้อมูล เมื่อกระบวนการนี้เสร็จสิ้นจึงจะมีการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล ซึ่งในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้เมื่อโหนดปลายทางได้รับข้อมูลครบถ้วนแล้วจะไม่ส่งสัญญาณตอบรับ ACK (Acknowledge) กลับไป เพื่อลดการใช้แบนด์วิดท์และปัญหาการชนกันของแพ็กเก็ตที่เกิดจากสัญญาณ ACK จากกระบวนการส่งแพ็กเก็ตนี้ จะเห็นว่า การส่งแพ็กเก็ตแต่ละครั้งจะเสียเวลาในการรอการส่งข้อมูลสูง ดังนั้นเมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบต้องทำกระบวนการของ CSMA/CA เพิ่มขึ้นจำนวน hop ดังนั้นเวลาการตอบสนองของระบบจึงเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์ของการสูญหายของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการส่งข้อมูลหลายครั้งขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่จำนวนชุดข้อมูลต่อแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น จะพบว่าเวลาตอบสนองของระบบน้อยลง เนื่องจากเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะเข้าถึงระบบเครือข่ายด้วยวิธี CSMA/CA ทำให้การส่งแพ็กเก็ตแต่ละครั้งต้องเสียเวลาในการรอการส่งข้อมูลสูง หากแพ็กเก็ตมีจำนวนชุดข้อมูลสูงจะทำให้อัตราการส่งแพ็กเก็ตลดลง เมื่อระบบมีการส่งแพ็กเก็ตเป็นจำนวนครั้งลดลง เวลาในการรอการส่งข้อมูลจึงน้อยลง ดังนั้นเวลาตอบสนองของระบบจึงลดลง ในขณะที่เมื่อจำนวนชุดข้อมูลเพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์ของการสูญหายของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลที่สูญหายมากกว่า

4.3.3 สรุปผลการทดสอบ

เมื่อจำนวน hop ในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาตอบสนองของระบบและเปอร์เซ็นต์สูญหายของแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น โดยการส่งข้อมูลจำนวน 8 ชุดหรือ 92 ไบต์ต่อแพ็กเก็ต จะทำให้ใช้เวลาตอบสนองต่อระบบน้อยที่สุด แต่จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์สูญหายของแพ็กเก็ตมาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคาร เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาและเป็นแนวทางในการพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคารต่อไป

5.1 สรุปผล

ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนที่ออกแบบไว้สามารถใช้งานจริงได้ในความถี่ช่วง 0.8 – 10 เฮิรตซ์ ที่ความเร่งการสั่นสะเทือน 0.0981 m/s^2 ถึง 9.8100 m/s^2 โดยการวัดความถี่ของการสั่นสะเทือนในแกน X, Y, Z จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.13% 0.14% และ 0.06% ตามลำดับ ส่วนการวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน X จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.74% และสามารถวัดความเร่งการสั่นสะเทือนในแกน Y และแกน Z ได้ตรงกับค่าจริงโดยไม่มีความผิดพลาด ความเร่งการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะต้องนำมาคูณกับค่าชดเชยความเร่งการสั่นสะเทือนของแกน X, Y, Z ที่มีค่าเป็น 5.8377, 0.7055 และ 1.4015 ตามลำดับก่อนจึงจะได้ค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ถูกต้อง ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูลโดยผู้ใช้สามารถดูข้อมูลการสั่นสะเทือนตามเวลาจริงในรูปแบบกราฟผ่านเว็บแอปพลิเคชันได้

ในการนำระบบไปใช้งานจริง พบว่าการส่งข้อมูลจำนวน 2 ชุดหรือ 32 ไบต์ต่อแพ็กเก็ตจะทำให้สถานีฐานมีเปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตมากที่สุด แต่เมื่อจำนวนโหนดในระบบซึ่งเชื่อมต่อกันแบบดาวกระจายเพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การได้รับแพ็กเก็ตของสถานีฐานลดลง ในส่วนการทดสอบหาเวลาตอบสนองของระบบ พบว่าหากระบบส่งข้อมูลจำนวน 8 ชุดหรือ 92 ไบต์ต่อแพ็กเก็ตจะทำให้ใช้เวลาตอบสนองต่อระบบที่สุด แต่จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์สูญหายของแพ็กเก็ตมาก

5.2 ปัญหา

1. องค์กรความรู้และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับเฝ้าระวังการสั่นสะเทือนของอาคาร เป็นการนำองค์ความรู้ทางด้านต่างๆ มาประยุกต์รวมกัน ซึ่งทำให้เกิดความยากในสืบค้นข้อมูลเนื่องจากข้อมูลมีอยู่หลายแหล่ง มีองค์ความรู้หลายด้านทำให้เกิดความยากในการทำความเข้าใจและส่งผลให้ใช้เวลาในการทำการศึกษานาน

5.3 ข้อเสนอแนะ

แนวทางในการศึกษาระบบเครือข่ายไร้สายสำหรับต่อเฟิร์มแวร์การสันสะเทือนของอาคาร ควรทดสอบเพิ่มเติมในเรื่องต่อไปนี้

1. ทดสอบเรื่องความถูกต้องของการอ่านค่า ควรทดสอบระบบที่ออกแบบไว้ซึ่งเชื่อมต่อผ่านการสื่อสารไร้สายเปรียบเทียบกับระบบที่เชื่อมต่อผ่านการสื่อสารแบบมีสาย
2. ทดสอบเรื่องการใช้พลังงานของระบบ
3. ทดสอบผลของการเพิ่มขนาดของข้อมูลต่อแพ็กเก็ต เมื่อช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ตคงที่
4. ทดสอบผลของการเพิ่มช่วงเวลาระหว่างการส่งแพ็กเก็ต (Interval time) เมื่อขนาดของข้อมูลต่อแพ็กเก็ตคงที่

บรรณานุกรม

- [1] S. Kim, “*Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring*”, Master’s Thesis, University of California Berkeley, USA, 2005.
- [2] J. Paek et al., “A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring: Performance and Experience”, in *Proceedings of the 2nd IEEE workshop on Embedded Networked Sensors (EmNet’05)*, 2005, pp. 1-9.
- [3] S. Kim et al., “Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks”, in *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, Cambridge, Massachusetts, USA, 2007, pp. 254–263.
- [4] A. Woo, T. Tong, and D. Culler, “Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks”, in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, Los Angeles, California, USA, 2003, pp. 14-27.
- [5] M. Mar’oti et al., “The Flooding Time Synchronization Protocol”, in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, Baltimore, Maryland, USA, 2004, pp. 39-49.
- [6] N. Xu et al., “A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring”, in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. Baltimore, Maryland, USA, November 2004, pp. 13-24.
- [7] P. Phompheephak and C. Khunboa, “Performance Analysis of Wireless Sensor Networks”, in *Proceedings of the 11th Graduate Research Conference*, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand. 2010, pp. 468-473.
- [8] I. Aldasouqi and A. Shaout, “Earthquake Monitoring System Using Ranger Seismometer Sensor”, *International Journal of Geology*, vol. 3, no. 3, pp. 55-59, 2009.
- [9] Burin Wechbunthung, “Fundamental Seismology”, *Publication of Seismological Bureau*, Meteorological Department, Thailand, [n.d.].
- [10] M. Castillo-Effer et al., “Wireless sensor networks for flash-flood alerting”, in *Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, pp. 142-146, November 2004.

- [11] N. Kotamäki et al., "Wireless *in-situ* Sensor Network for Agriculture and Water Monitoring on a River Basin Scale in Southern Finland: Evaluation from a Data User's Perspective", in *Sensors*, vol. 9, no. 4, 2009, pp. 2862-2883.
- [12] M. Tubaishat et al. "Wireless Sensor-Based Traffic Light Control", in *IEEE Consumer Communications and Networking Conference 2008 (CCNC' 2008)*, Las Vegas, NV, Jan 2008, pp. 702 – 706.
- [13] T. Gao, et al. "Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network", in *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference (IEEE-EMBS 2005)*, pp. 102-105, 2005.
- [14] K. Lorincz et al., "Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 16-23, 2004.
- [15] D. P. Leach. *Discrete and Integrated Circuit Electronics*. Harcourt Brace College Publishers, 1992.
- [16] Chipcon AS SmartRF®, CC2420 Preliminary Datasheet (rev 1.2), 2004.
- [17] J. Hill et al., "System Architecture Directions for Networked Sensors", In *Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, 2000, pp. 93–104.
- [18] D. Moss et al., "CC2420 Radio Stack,"
<http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep126.html>, 2007 [May 2, 2011].
- [19] B. Greenstein and P. Levis, "Serial Communication",
<http://www.tinyos.net/teps/doc/html/tep113.html>, 2007 [May 2, 2011].
- [20] Kistler Instrument Corporation, "K-Beam 8393B datasheet", September, 2005.
- [21] D. Gay, et al., "The nesC language: A holistic approach to networked embedded systems", in *Proceedings of the ACM SIGPLAN 2003 conference on Programming language design and implementation*, San Diego, California, USA, 2003, pp. 1-11.
- [22] PCB Peizotronics®, "301A10 ICP datasheet", June 26, 2006.
- [23] SPEKTRA, "APS113-AB ELECTRO-SEIS® datasheet", June 2009.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
รายละเอียดเกี่ยวกับ Unode

รายละเอียดเกี่ยวกับ Unode

Product Description

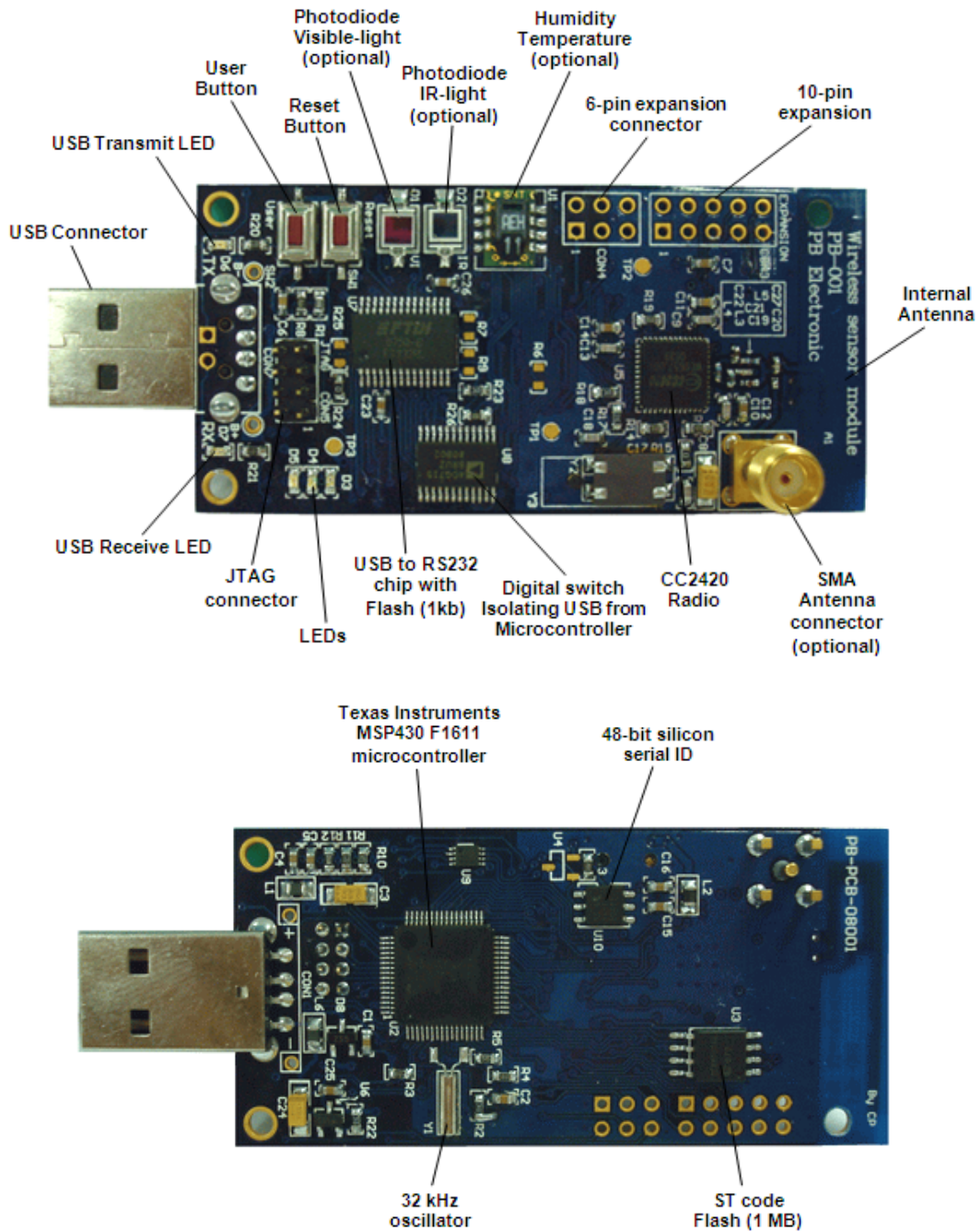
Unode เป็นเซนเซอร์โหนดที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยซึ่งใช้สำหรับเครือข่ายไร้สาย แอปพลิเคชันที่ใช้สำหรับดูแลหรือตรวจสอบระบบ และแอปพลิเคชันที่ใช้สำหรับสร้างต้นแบบ อุปกรณ์ตัวนี้ใช้มาตรฐานที่ใช้ทั่วไปในงานอุตสาหกรรม เช่น USB และ IEEE 802.15.4 ซึ่งสามารถใช้ตรวจวัดความชื้น อุณหภูมิ และแสงได้ในกรณีที่มีเซนเซอร์ รวมทั้งยังช่วยจัดการการติดต่อภายในกับอุปกรณ์ต่อพ่วงให้มีความยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังเพิ่มความสามารถในการทำงาน และหน้าที่ในการทำงานได้ ระบบปฏิบัติการที่ใช้คือระบบปฏิบัติการ TinyOS ซึ่งใช้โพรโทคอลไร้สายและซอฟต์แวร์จะเป็นแบบโอเพนซอร์ส (Open Source) ในตัวอุปกรณ์จะมีเซนเซอร์ซึ่งถูกฝังลงบนบอร์ดเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถให้กับตัวอุปกรณ์

Key Features

- โมดูลสื่อสารไร้สาย Chipcon 2.4 GHz มาตรฐาน IEEE 802.15.4 อัตราการรับส่งข้อมูล 250kbps
- สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้
- 8 MHz Texas Instruments ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430 (หน่วยความจำแรม ขนาด 10kB และหน่วยความจำแฟลชขนาด 48 kB)
- สนับสนุน ADC, DAC, Supply Voltage Supervisor และ DMA Controller
- ระยะการเชื่อมต่อระหว่างโหนดภายในอาคาร 50 เมตร และภายนอกอาคาร 125 เมตร
- มีเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้น อุณหภูมิ และแสง
- ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยมาก
- ใช้เวลาเปลี่ยนจากสถานะหลับเป็นสถานะทำงานน้อยกว่า 6 ไมโครวินาที
- มีการเข้ารหัสและระบุตัวตนด้วยฮาร์ดแวร์ในระดับ link-layer
- ลงโปรแกรมให้กับตัวอุปกรณ์ผ่านทางพอร์ต USB
- มีขา 16 ขาที่สามารถใช้งานเพิ่มเติมได้ และมีตัวเชื่อมต่อทางอากาศหรือคลื่นแบบ SMA
- ระบบปฏิบัติการ TinyOS สนับสนุนการใช้งานเครือข่ายแบบ Mesh และสนับสนุนการพัฒนาในรูปแบบการสื่อสาร

Module Description

ลักษณะภายนอกของ Unode และการจัดวางอุปกรณ์บนบอร์ดแสดงดังภาพประกอบ ก-1



ภาพประกอบ ก-1 ด้านหน้าและด้านหลังของ Unode

Power

Unode เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด AA จำนวน 2 ก้อน สามารถใช้งานได้ถึง 1 ปี แรงดันที่ใช้อยู่ในช่วง 2.1 - 3.6 โวลต์ DC โดยในขณะที่ทำการโปรแกรมลงบนหน่วยความจำแฟลชของไมโครคอนโทรลเลอร์หรือหน่วยความจำแฟลชภายนอก ต้องใช้แรงดันอย่างน้อย 2.7 โวลต์

เมื่อนำ Unode ต่อเข้ากับพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์ Unode จะใช้พลังงานจากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์แทนพลังงานจากแบตเตอรี่ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 3.3 โวลต์

Microprocessor Description

Unode ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430F1611 ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผล ไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430 F1611 เป็นสถาปัตยกรรมแบบ RISC ขนาด 16 บิต มีหน่วยความจำแรมขนาด 10kB หน่วยความจำแฟลชขนาด 48kB และเนื้อที่สำหรับเก็บข้อมูล 128B การทำงานของ Unode ประกอบด้วย 2 โหมด คือ โหมด sleep และโหมด active โดย Digital Controlled Oscillator (DCO) ความถี่ 8MHz ใน MSP430 จะใช้เวลา 6 ไมโครวินาทีในการออกจาก sleep mode และเมื่อ DCO ถูกปิดหรือไม่ได้ใช้งาน MSP430 ก็จะทำการปิดการใช้งาน external 32768Hz watch crystal นอกจากนี้ยังสามารถเทียบมาตรฐานค่าต่าง ๆ ที่วัดได้โดยใช้ออสซิลเลเตอร์ 32kHz

MSP430F1611 มีพอร์ต ADC ภายนอกจำนวน 8 พอร์ต และมีพอร์ต ADC ภายในจำนวน 8 พอร์ต พอร์ต ADC ภายในสามารถนำมาใช้อ่านค่า internal thermistor หรือใช้ในการเฝ้าดูแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ อุปกรณ์ต่อพ่วงที่สามารถต่อเข้ากับพอร์ตเหล่านี้ได้ประกอบด้วย SPI, UART, พอร์ตดิจิทัลอินพุต-เอาต์พุต, Watchdog timer และ Timer โดยสามารถรับค่าและเปรียบเทียบข้อมูลตามหน้าที่ที่ต้องการได้ MSP430F1611 ประกอบด้วย DCA module จำนวน 2 พอร์ต ขนาด 12 บิต Supply Voltage Supervisor และ DMA controller จำนวน 3 พอร์ต

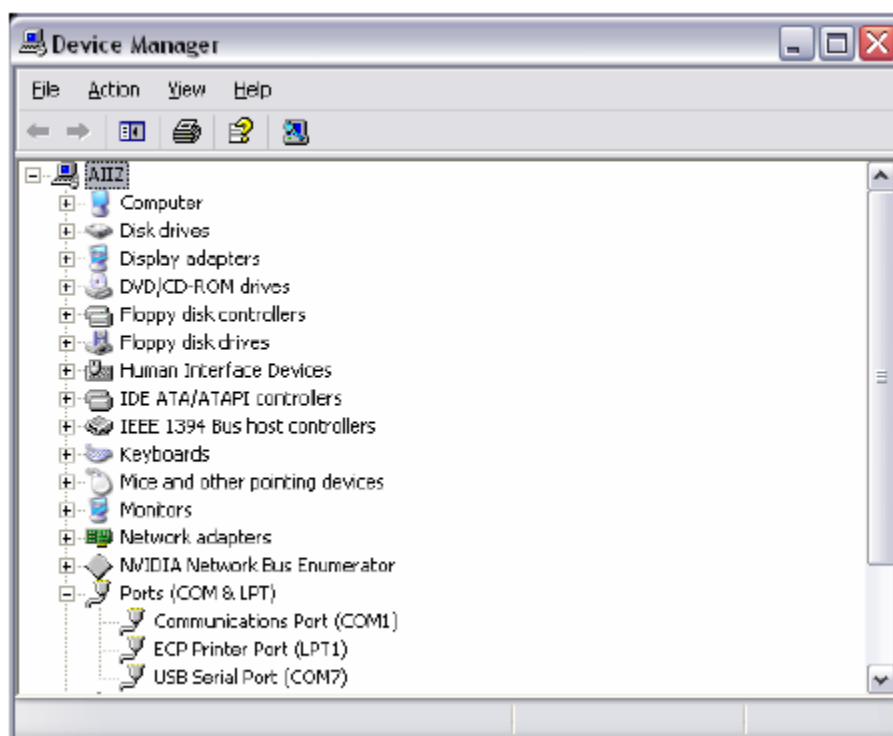
รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติของ MSP430F1611 ได้กล่าวไว้ใน Texas Instruments MSP430x1xx Family User's Guide สามารถดูได้ที่ <http://ti.com/msp430>

PC Communication

Unode ใช้ USB controller ของ FTDI ในการติดต่อสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโฮสต์ การที่จะติดต่อสื่อสารกับโหนดได้ต้องติดตั้งไดรเวอร์ FTDI ที่เครื่องโฮสต์ก่อน

โดยไดร์เวอร์อยู่ในแผ่น Moteiv การใช้งานบนวินโดวส์ต้องติดตั้งไดร์เวอร์ Virtual Com Port (VCP) ด้วย ไดร์เวอร์ดังกล่าวสามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://www.ftdichip.com/>

การเชื่อมต่อของ Unode จะแสดงเป็น COM port ใน Windows's device manager ดังแสดงในภาพประกอบ ก-2 (หรือ device ใน /dev บนระบบปฏิบัติการ Linux, OSX และ BSD) Unode หลายตัวสามารถติดต่อกับเครื่องโฮสต์เครื่องเดียวกันผ่านพอร์ต USB ในเวลาเดียวกันได้ โดยโหนดแต่ละตัวจะถูกอ้างอิงจาก COM port ที่โหนดเชื่อมต่ออยู่ Unode ติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโฮสต์ผ่าน USART1 บนไมโครคอนโทรลเลอร์ MSP430



ภาพประกอบ ก-2 การเชื่อมต่อของ Unode แสดงที่ COM port

Radio Description

Unode มีคุณลักษณะการติดต่อไร้สายด้วยคลื่นวิทยุตามข้อกำหนดของ Chipcon CC2420 โดย CC2420 มีหน้าที่การทำงานในส่วนของ PHY และบางส่วนของ MAC ตรงตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 CC2420 มีความไวในการรับสัญญาณมากกว่าที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และใช้พลังงานต่ำ การติดต่อสื่อสารแบบไร้สายด้วยมาตรฐาน CC2420 มีความน่าเชื่อถือมากแต่การกำหนดค่าต่างๆ ก่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นในการใช้งานทั่วไปจึงกำหนดค่า

เบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE802.15.4 คุณลักษณะและการใช้งานสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ที่คู่มือการใช้งานของ Chipcon (<http://www.chipcon.com>)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ TI MSP430 ควบคุมการทำงานของ CC2420 ผ่านพอร์ต SPI กลุ่มของอินเทอร์รัพท์และ digital I/O line โดยในระหว่างรอบของการทำงานจะหยุดการทำงานเพื่อประหยัดพลังงาน

Antenna

สายอากาศภายในของ Unode มีรูปแบบเป็น Inverted-F ซึ่งออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นยาวขนาดเล็กที่อยู่ที่ส่วนปลายของบอร์ดทางด้านตรงข้ามกับที่ใส่แบตเตอรี่ สายอากาศ Inverted-F บนบอร์ด Unode สามารถส่งสัญญาณได้ในระยะ 50 เมตรภายในตัวอาคาร และ 125 เมตรภายนอกอาคาร

External Flash

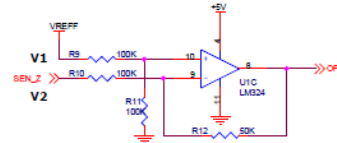
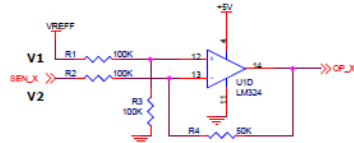
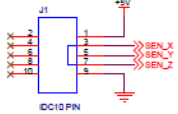
Unode ใช้ ST M25P80 40 MHZ serial code flash สำหรับเก็บข้อมูลและโปรแกรมภายนอกแฟลชมีขนาด 1024 kB ซึ่งแบ่งเป็น 16 เซกเมนต์แต่ละเซกเมนต์มีขนาด 16 kB หน่วยความจำแฟลชใช้ SPI communication line ร่วมกันกับโมดูล CC2420 ดังนั้นในการอ่านหรือเขียนข้อมูลบนแฟลชจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ

ภาคผนวก ข

แผนผังวงจร Voltage adjustable board

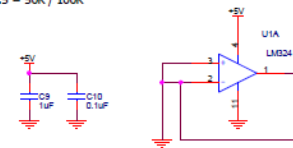
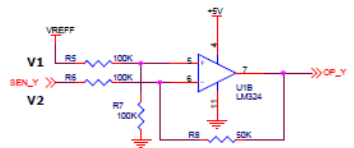
Level Adder Circuit

Sensor Input

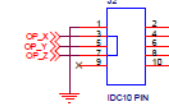


$$\text{Gain} = R_f / R_i$$

$$0.5 = 50K / 100K$$



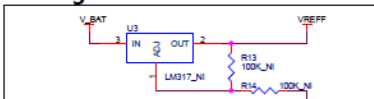
Node Output



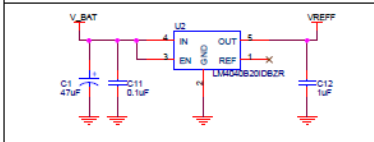
$$VO = (V1 - V2) * \text{Gain}$$

$$VO = (2.048V - (\text{Sensor Input})) * 0.5$$

Voltage Reference

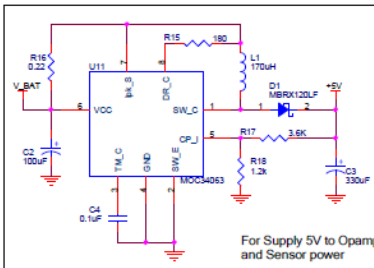


Optional



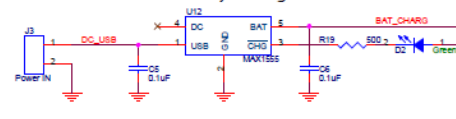
VREF = 2.048V ± 0.2%
For Reference voltage

Boost Converter 5V

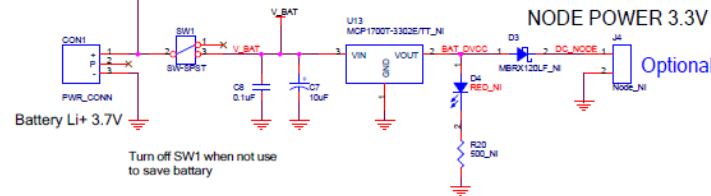


For Supply 5V to Opamp and Sensor power

Battery Charger



NODE POWER 3.3V



Battery Li+ 3.7V

Turn off SW1 when not use to save battery

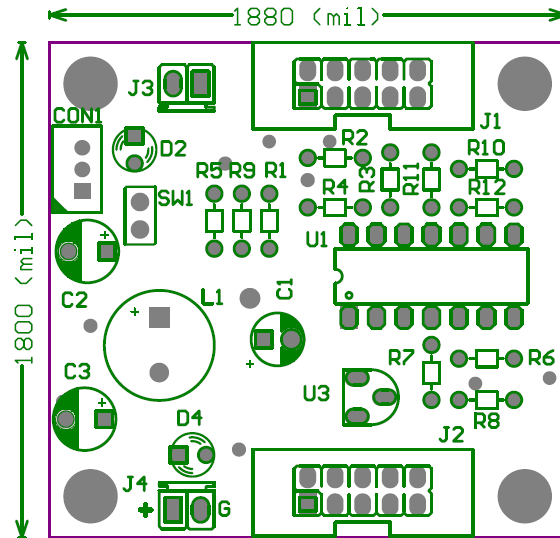
*"NI" mean Not Install

NODE PSU		
File	Level Adder Circuit	
Size	Document Number	Rev
A3	Main Page	A.0
Date	Saturday, April 23, 2011	Sheet 1 of 1

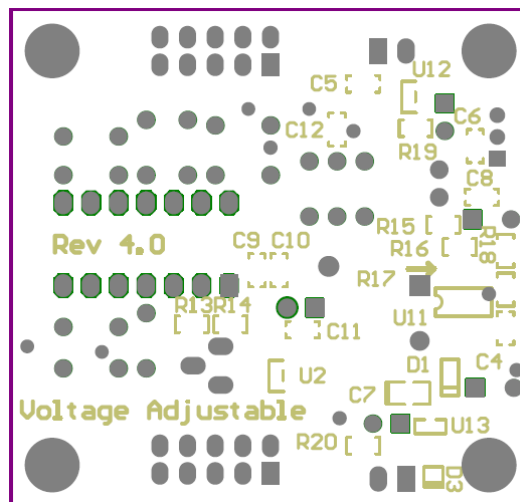
ภาคผนวก ค

ลายวงจร Voltage adjustable board

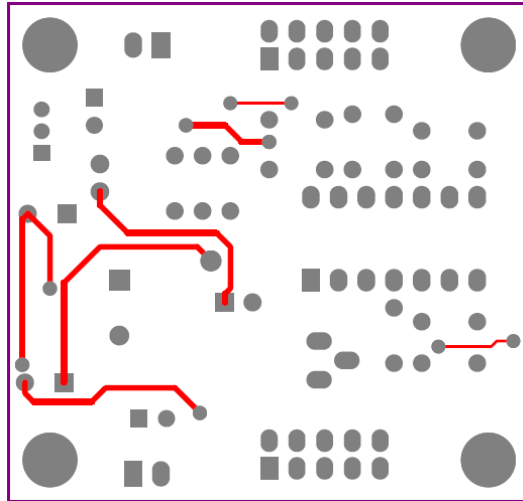
Top Silkscreen Overlay



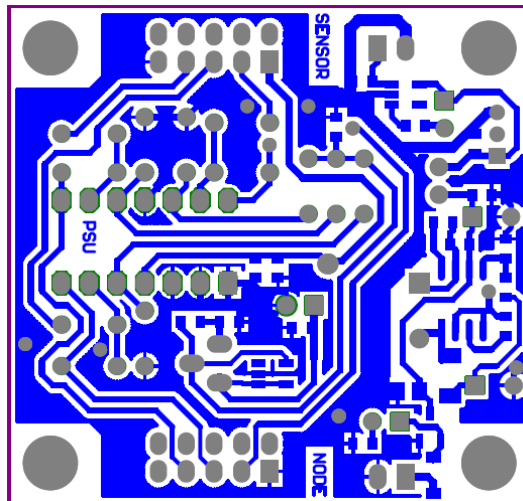
Bottom Silkscreen Overlay



Top Layer



Bottom Layer



ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



International Measurement Confederation 2010 (IMEKO2010)

TC3, TC5, TC22 Conferences

November 21 – 25, 2010 at Dusit Thani Pattaya hotel, Pattaya, Chonburi, Thailand

IMEKO

IMEKO 2010

TC3, TC5 and TC22 Conferences

IMEKO 2010
PATTAYA

Metrology in modern context 21–25 November 2010
Pattaya, Thailand

from macro to micro
from safety to greeny
from advanced technology to fundamental definition

Organised by National Institute of Metrology (Thailand)

IMEKO 2010 TC3, TC5 and TC22 Conferences
Metrology in Modern Context
November 22–25, 2010, Pattaya, Chonburi, Thailand

LOW FREQUENCY VIBRATION MONITORING SYSTEM USING WIRELESS SENSOR NETWORK

*N.Ruetaiworraseth*¹, *W.Suntiamorntul*², *B.Thummawut*³, *P. Rattanangkul*⁴

^{1,2} Department of Computer Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand,

^{3,4} National Institute of Metrology (Thailand), Bangkok, Thailand,

E-mail: t.nutthanun@gmail.com¹, wannarat@coe.psu.ac.th², benjawon@nimt.or.th³, pairroj@nimt.or.th⁴

Abstract – This paper presents a wireless sensor network technology for low frequency vibration monitoring system. Sensor node collects the data from accelerometer and transmits the data back to base station through wireless communication. The data has been computed and converted into acceleration information that is stored in database. Then users can monitor using a web application. The experiments were carried out by collecting the acceleration data from three-axis accelerometer. The data from each axis was measured and verified by vertically aligning with a Very Low Frequency Primary Calibration System. The experimental parameters are the vibration frequency between 0.4Hz and 10Hz and the amplitude between 0.0981m/s² and 17.6580m/s². The calibration results of the low frequency vibration monitoring system using wireless sensor network are conformed with the wire vibration monitoring system.

Keywords: Vibration Monitoring System, Wireless Sensor Network, Acceleration, Low Frequency

1. INTRODUCTION

Vibration monitoring system is widely used to monitor health of many structures such as building, bridge, machinery and dam. As soon as the vibration can be detected, the alarm system must report to administrator immediately. A real-time system such as wireless sensor network is considered to be applied.

Wireless Sensor network is an interesting technology that has been applied to various monitoring applications such as disaster warning systems. This system consists of a small device that collects vibration measurements from sensors. By using wireless, this can reduce cost of wiring and increase more location flexibility [1].

The proposed vibration monitoring system is designed for building. The system is tested frequency response in range of mostly frequency of ground shaking during earthquake [2] and tested linearity of the system in range that a shaker can be done at each frequency.

This paper is organized as follows. Section 2 describes the designed system. Section 3 describes the system calibration that the system is tested frequency response and linearity of the system and then shows the results in section 4. Conclusion of this paper is in section 5.

2. DESIGNED SYSTEM

The block diagram of designed system in this research is illustrated in Fig. 1. The designed system composed of 5 subsystems, sensor node, base station, computer server, database, and web application, which can be described as follows.

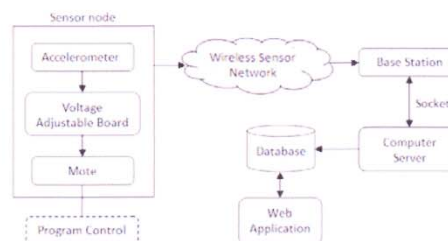


Fig. 1. The block diagram of designed system

2.1 Sensor node

Sensor node is used to capture the vibration signal from the physical environments and transmitted to base station via wireless communication. The sensor node consists of 3 hardware components and works properly under program control, which can be described as follows.

2.1.1 Accelerometer: K-Beam accelero-meter type 8393B2 [2] is used to measure vibration. It is designed as a low frequency vibration sensor. It can measure acceleration from range -19.62m/s² to 19.62m/s² with 1000mV per 9.81m/s² of sensitivity for 3 perpendicular axes between 0 and 250 Hz with maximum vibration effectiveness.

2.1.2 Mote: Mote was developed on MSP430F1611 microcontroller and cooperated with wireless transceiver model CC2420 which supported to IEEE 802.15.4 at 2.4 GHz. The advantage of this mote is an ultra low power wireless and supports 8 channels of 12-bit analog to digital converter (ADC). This platform is called Unode which is developed from Tmote Sky [3].

2.1.3 Voltage Adjustable Board: The voltage adjustable board provide availability connection between vibration

sensor and mote. It is used to convert voltage level of signal from vibration sensor to ADC compatible voltage vibration signal.

2.1.4 Program Control: Program control which is installed on sensor node is used to get the acceleration raw data from 3 channels of 12 bits ADC module. Then it makes the packet and sends to base station via wireless communication every 3 milliseconds. The program control procedure is shown in Fig. 2.

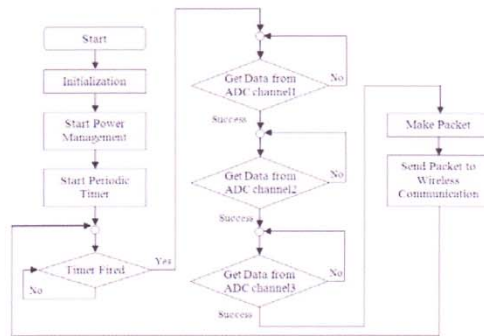


Fig. 2. Flow chart of the program control procedure

The packets which are sent to base station have a format as shown in Table 1.

Table 1. Sensor Node Packet Format

nodeID	seq	dataX	dataY	dataZ
--------	-----	-------	-------	-------

Sensor node packet format has 5 fields. "nodeID" is 16 bits ID number of mote that generates this packet. "seq" is 16 bits packet number that is increased by 1 every packet. "dataX", "dataY" and "dataZ" are 16 bits acceleration raw data at X-axis, Y-axis and Z-axis respectively.

The program control is developed by using NesC [4] (Network Embedded System C) language and TinyOS [5].

2.2 Base Station

Base station is used to collect data from sensor node, one or more sensor nodes, via wireless communication. It does connect the computer server via R232 serial communication. Base station used the same mote platform as sensor node.

2.3 Computer Server

Computer server is used to access and load the packet from base station when computer server connects to base station via socket service. The acceleration raw data is converted into acceleration information by using ADC converting formula of MSP4301611 microcontroller [6], but the vibration signal was adjusted voltage by voltage adjustable board. Therefore the ADC converting formula of MSP4301611 microcontroller has been accommodated to (1).

$$A = ((0.00061 \times N_{ADC}) - V_{cal}) \times \frac{4.905}{S} \quad (1)$$

when

A	Acceleration information
N_{ADC}	Acceleration raw data
V_{cal}	The voltage of vibration sensor when it does not motion.
S	Sensitivity of vibration sensor (Volts/g)

2.4 Database

Database is used to keep the results from computer server and other data of the packet.

2.5 Web Application

The users can monitor acceleration using a web application as shown in Fig. 3. A web application shows the acceleration raw data of 3 axes with graph. Users can change a time to update graph.



Fig. 3. Acceleration web interface

3. SYSTEM CALIBRATION

3.1 Equipments

The calibration setup as shown in Fig. 4 is consisting of computer server (1.66GHz Intel® Atom™ Processor N280 with 1GB of RAM), base station, sensor node, test accelerometer (Kistler K-Beam® accelerometer type 8393B2), a personal computer (3.2GHz Pentium with 512MB of RAM) running SPEKTRA CS18 program which is used to configure sine wave generator about frequency and acceleration, PCB Peizotronics® 301A10 ICP reference accelerometer with frequency range 0.3Hz-14kHz [7], a Very Low Frequency Primary Calibration System that consists of sine wave generator, power amplifier, shaker (ELECTRO-SEIS® APS113-AB [8] very low frequency and long stroke electro dynamic shaker with air bearings).

To prevent ripple effect, the test accelerometer must be attached to reference accelerometer as the same object. For this calibration, the test accelerometer setting is shown in Fig. 5.

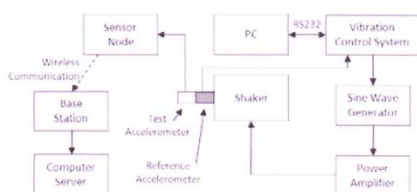


Fig. 4. Calibration Setup Block Diagram

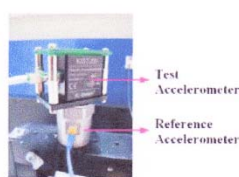


Fig. 5. The accelerometer setting,

3.2 Calibration procedure

The calibrations are performed on APS113-AB shaker with the 301A10 reference accelerometer to determine the performance of the system, frequency response and linearity of the system. The system is calibrated at frequency between 0.4Hz to 10Hz and the acceleration between 0.0981m/s^2 to 17.6580m/s^2 . At each case, it is iterated 5 times. The test accelerometer and the reference accelerometer are verified by vertically aligning with a Very Low Frequency Primary Calibration System.

The calibration procedure as shown in Fig. 6 is summarized as the following steps; SPEKTRA CS18 program running on PC assigns frequency and acceleration for sine wave generator. Sine wave generator generates the signal and sends it to the power amplifier for amplifying signal. Shaker receives signal from the power amplifier and then shake test accelerometer and reference accelerometer. Finally, the acceleration raw data from test accelerometer is kept into database and SPEKTRA CS18 program shows frequency and root mean square (rms) acceleration that measure from reference accelerometer.

3.3 Data Analysis

Data analysis compares the acceleration information from test accelerometer with the acceleration information from reference accelerometer in term of frequency and rms acceleration. The acceleration information from reference accelerometer is average frequency and rms acceleration which are computed by SPEKTRA CS18 program, but on the other hand the acceleration information from test accelerometer is the data series of acceleration in time domain. So it must be analyzed frequency and rms amplitude of acceleration before comparing. Data analysis program is programmed using MATLAB.

The data analysis procedure for each time of each case of calibration, as shown in Fig. 7, is summarized as the following steps. First, the data from database is calculated real sampling rate because some packets are lost from high sampling rate and wireless communication characteristic

when packets are transmitted to base station. Even though some packets are lost but it does not affect the waveforms. The approximately sampling rate is used as the important parameter to compute the frequency and amplitude of waveform.

Second, smooth the data signal for improving estimated results from the fast Fourier transform of the data. Next, transform the data in time domain to frequency domain for calculating frequency using fast Fourier transform. Then, calculate DC amplitude and subtract it from the data signal. The DC signal is effect of voltage adjustable board. Next, improve a frequency estimate using autocorrelation and then calculate the main frequency and rms acceleration.

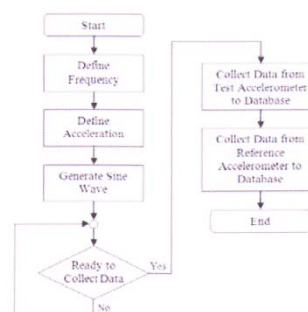


Fig. 6. Flow chart of calibration procedure

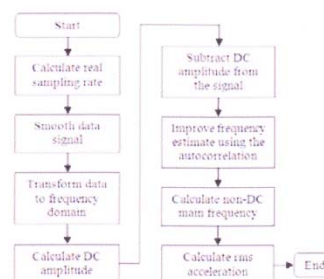


Fig. 7. Flow chart of data analysis procedure

4. RESULTS

As a system calibration, the frequency response for each acceleration(A) at X, Y, Z axis are shown in Fig. 8 – Fig. 10 and linearity for each frequency(f) at X, Y, Z axis are shown in Fig. 11 – Fig. 13.

The proposed system has excellent frequency response and excellent linearity except for 10Hz frequency at Y axis and Z axis, the system has linearity at acceleration between 0.0981m/s^2 to 9.8100m/s^2 . The results at Y axis have some error acceleration. It is greater than input that is set in SPEKTRA CS18 program. It is a result of physical characteristics of tri-axial accelerometer that is composed of three accelerometers which sensitivity of each is not equal, although there are the same models. Another factor is binding equipment, between test accelerometer and

reference accelerometer, which structure, format and size of equipment affects the linearity of system. This problem can be solved by programming.

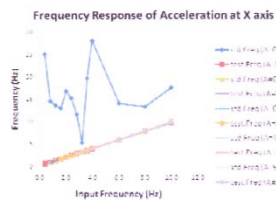


Fig. 8. Frequency response of acceleration at X axis

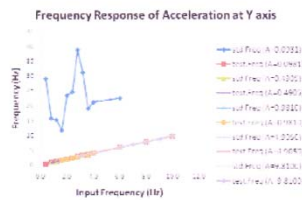


Fig. 9. Frequency response of acceleration at Y axis

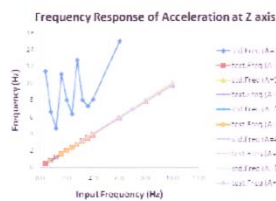


Fig. 10. Frequency response of acceleration at Z axis

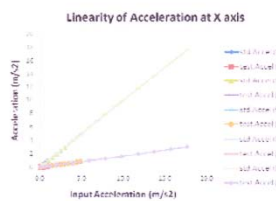


Fig. 11. Linearity of acceleration at X axis

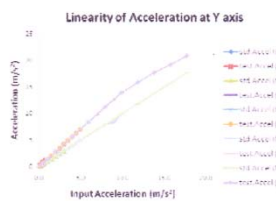


Fig. 12. Linearity of acceleration at Y axis

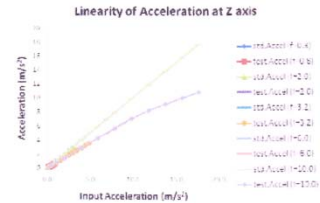


Fig. 13. Linearity of acceleration at Z axis

On the other hand, the reference system has an excellent linearity and excellent frequency response except for 0.0981 m/s² acceleration. The results of calibration show that our system is suitable for low frequency more than reference system.

5. CONCLUSIONS

In this paper, we presented the design of low frequency vibration monitoring system using wireless sensor network technology. Some packets are lost but it does not affect the waveforms. Frequency response and linearity are excellent results except for 10Hz frequency that the system has linearity at acceleration between 0.0981m/s² to 9.8100 m/s². The results of calibration show that our system is suitable for low frequency and low acceleration.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by grant in aid funded under "Cooperation Project for Production of Science and Technology Development Graduate of Ministry of Science and Technology through National Institute of Metrology (Thailand)".

REFERENCES

- [1] M. Cinque, D. Cotroneo, G. De Caro, M. Pelella, Reliability Requirements of Wireless Sensor Networks for Dynamic Structural Monitoring. International Workshop on Applied Software Reliability (WASR 2006) Philadelphia, USA, giugno 2006, pp. 8-13, *IEEE Computer Society Press*, Los Alamitos, CA (USA).
- [2] Thomas L. Pratt, "Frequencies, periods, and resonance", Earthquake shaking in the Puget Lowland of Washington State: Results from the SHIPS experiments and other studies, <http://earthquake.usgs.gov/learn/facts.php>, accessed in July 28th, 2010
- [3] Moteiv Team, "Tmote Sky datasheet", 2006.
- [4] David Gay, Phil Levis, Rob von Behren, Matt Welsh, Eric Brewer, and David Culler. The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. In *Proceedings of Programming Language Design and Implementation (PLDI) 2003*, June 2003.
- [5] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. E. Culler, and K. S. J. Pister. System Architecture Directions for Networked Sensors. In *Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pages 93-104, 2000.
- [6] Texas Instrument, "12-Bit ADC Core", *MSP430x1xx Family User's Guide*, pp. 17-1, 2006.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวณัฐนัน ฤทัยเศรษฐ์
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5110120043

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- N. Ruetaiworraseth, W. Suntiamorntut, B. Thummawut and P. Rattanangkul, "Low frequency vibration monitoring system using wireless sensor network", in *Proceedings of IMEKO 2010: TC3, TC5, TC22 Conferences, Pattaya, Chonburi, Thailand, November 2010*, pp. 233-236.