สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบเตือนภัยล่วงหน้าด้วยการตรวจวัดและวิเคราะห์ Pre-Wave

PRE-WAVE MEASUREMENT AND ANALYSIS FOR WARNING SYSTEM

นายโอม ราญมีชัย

ปพ.
ว9795
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....72224
วัน,เดือน,ปี.....12 มิ.ย. 2550

.b.....11765318
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRE-WAVE MEASUREMENT AND ANALYSIS FOR WARNING SYSTEM

OHM RANMICHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTTATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ระบบเตือนภัยล่วงหน้าด้วยการตรวจวัดและวิเคราะห์ Pre-Wave PRE-WAVE MEASUREMENT AND ANALYSIS FOR WARNING SYSTEM
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายโอม ราญมีชัย รหัสนักศึกษา 46011003
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา	2549

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.พงษ์ชัย นิลาศ ผศ.เชื้อ นกอยู่	

ภาควิชารับรองแล้ว

(รศ.ประภาษ อุคคกิมาพันธุ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ระบบเตือนภัยล่วงหน้าด้วยการตรวจวัดและวิเคราะห์ Pre-Wave PRE-WAVE MEASUREMENT AND ANALYSIS FOR WARNING SYSTEM		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายโอม	ราญมีชัย	รหัสนักศึกษา 46011003
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พงษ์ชัย	นิลาศ	
	ผศ.เชื้อ	นกอยู่	
ปีการศึกษา	2549		

บทคัดย่อ

โครงงานการวัดและวิเคราะห์ระบบเตือนภัยล่วงหน้า เป็นการนำเอารูปแบบสัญญาณในตัวกลาง โดยใช้อุปกรณ์หยั่งสัญญาณความเร่ง (Accelerometer) ที่มีย่านการวัด $\pm 5g$ เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดความคลื่นที่เกิดจากการสั่นสะเทือนโดยทำการตรวจวัดสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ กระทำกับตัวกลางก็คือรางรถไฟ ในรูปแบบของคลื่น P-wave ซึ่งเป็นคลื่นที่บ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะของสิ่งที่เราจะทำการวัด เพื่อหาความแตกต่างและเปรียบเทียบสัญญาณในแต่ล่ะรูปแบบรถไฟ เช่น รถไฟโดยสาร รถไฟดีเซลราง รถไฟสปีนเตอร์ ซึ่งในการวัดสัญญาณอาศัยหลักการของเปียโซอิเล็กทริก คือ การเปรียบเทียบอัตราเร่งของความสั่นสะเทือนต่อค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และให้เอาท์พุตเป็นประจุไฟฟ้าออกมาตามอัตราส่วนแรงที่กระทำ แปลงค่าประจุเป็นแรงดัน 1-5 โวลท์ โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลท์ จำนวนสองช่องสัญญาณ และใช้ ดาต้าแอกควิซิชันการ์ด (Data Acquisition: DAQ) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตยูเอสบี (Port USB) ไปยังไมโครคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 8 ทำการเก็บข้อมูลและประมวลผลระดับความสั่นสะเทือนซึ่งจะทำการสุ่มตัวอย่าง 10000 ครั้งต่อวินาที สำหรับหาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่เป็น textfile มาแสดงหน้าจอกราฟฟิกเพื่อเปรียบเทียบและบอกถึงความแตกต่างของรถไฟแต่ละประเภท ตามทฤษฎีการเกิดคลื่น P-wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Pre-Wave Measurement and Analysis for Warning System
Authors	Mr. Ohm Ranmichai
Thesis Advisor	Dr. Phongchai Nilas
	Asst.Prof. Chuae Nokyoo
Year	2006

ABSTRACT

This Project Pre-Wave Measurement and Analysis for Waning Systems is to bring in the model of signal from media by using Accelerometer sensor which mearuring range is between $\pm 5g$ for to detect signal from the moving trains in the format of P-wave which indicates the characteristics of what to be evaluated to find out the difference and compare signal in some trains such as passengers train, diesel train or spinter. In evaluating the signals has depend on piezoelectric, that is to compare the speed of vibration to the gravity of the earth which output electricity as the radio of the force and to get output 1-5 volt by connected to power supply 5 volts for two channels of signals. And by using data acquisition card (DAQCard) to send data to port USB to a microcomputer with LabVIEW8.0 program to feedback and process some data at the level of vibration value for sampling rate 10k Hz for double of the highest and lowest. So that the textfile data can be showed in the graphic monitoring to compare and indicate the differences of some kinds of train as the theory of the appearing of P-wave.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาวิจัยจาก ดร.พงษ์ชัย นิลาศ และ ผศ.เชื้อ นกอยู่ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบพระคุณห้องสมุดและภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นแหล่งค้นคว้าข้อมูลและเป็นสถาบันที่ใช้ในการทำงานวิจัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือ พร้อมทั้งอนุเคราะห์เป็นสถานที่ใช้ทดสอบงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ที่สั่งสอนและอบรมให้เป็นคนดี รวมทั้งเป็นผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ในการศึกษาของข้าพเจ้า และให้กำลังใจตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จสมความตั้งใจ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญภาพ.....VIII

สารบัญตาราง.....XI

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....1

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....1

1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....2

บทที่ 2 ทฤษฎี.....3

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่น.....3

2.1.1 คลื่น.....3

2.1.2 การจำแนกลักษณะการเกิดคลื่น.....3

2.1.3 คุณสมบัติของคลื่น.....4

2.1.4 ส่วนประกอบของคลื่น.....5

2.1.5 สมการคลื่น.....5

2.2 การศึกษาคลื่นจากการไหวสะเทือน.....7

2.2.1 คลื่นปฐมภูมิ (P-wave).....7

2.2.2 คลื่นทุติยภูมิ (S-wave).....8

2.2.3 การนำความรู้ของคลื่น P-wave และ S-wave ไปใช้ประโยชน์.....9

2.2.3.1 Seismometer.....9

2.2.3.2 Seismograph.....9

2.2.3.3 การหาตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหว.....10

2.3 ทฤษฎีทรานสดิวเซอร์เปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer).....12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1 Vibrometer....16
2.3.2 เครื่องวัดความเร่ง....17
2.3.2.1 ความเป็นเร่งเชิงเส้น (LINEAR ACCELEROMETER)....18
2.3.2.2 การออกแบบที่แตกต่างกันที่ต้องพิจารณา....18
2.3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวของเซ็นเซอร์กับมวล ที่มีการสั่นไหว....19
2.3.3 Velometer....19
2.4 ความรู้พื้นดาต้าแอกควิซิชัน....20
2.4.1 ดาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition:DAQ)....20
2.4.2 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล....21
2.4.3 ตัวแปลงสัญญาณ....21
2.4.4 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ....21
2.4.5 บอร์ด DAQ....23
2.4.5.1 อนาลอกอินพุต....24
2.4.5.2 อนาลอกเอาท์พุต....24
2.4.5.3 สัญญาณทริกเกอร์....29
2.4.5.4 การทำงานแบบเรียลไทม์....30
2.4.5.5 ดิจิตอลอินพุต และดิจิตอลเอาต์พุต....30
2.4.5.6 วงจรควบคุมเวลา....30
2.4.6 ซอฟแวร์....31
2.4.6.1 ไดรเวอร์ (driver)....31
2.4.6.2 แอพพลิเคชันซอฟแวร์ (application software)....31

บทที่ 3 การออกแบบและหลักการทำงาน....32
3.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์วัดสัญญาณ....32
3.2 หลักการทำงานทั่วไป....32
3.2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์วัดสัญญาณจากการสั่นสะเทือน....33
3.2.1.1 อุปกรณ์หยั่งสัญญาณความเร่ง (Acceleration Sensor)....33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1.1.1 การทำงาน ลักษณะของตัวเซ็นเซอร์.....34

3.2.1.1.2 การติดตั้ง.....35

3.2.1.2 สายสัญญาณ.....37

3.2.1.3 Power Supply.....37

3.2.1.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ.....38

3.2.1.5 โปรแกรมวิเคราะห์ และ แสดงผลทางกราฟฟิก.....42

บทที่ 4 การประมวลสัญญาณ.....45

4.1 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเวลาต่อเนื่องในโดเมนเวลา.....45

4.4.1 ตัวแปรอนาลอกเป็นดิจิตอล.....45

4.1.2 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณอนาลอก.....47

4.1.3 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Theorem).....49

4.2 โดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain).....51

4.2.1 สเปคตรัม (Spectrum).....51

4.2.2 โดเมนเวลา (Time Domain).....51

4.2.3 โดเมนความถี่ (Frequency Domain).....52

4.3 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเวลาเป็นช่วงในโดเมนความถี่.....52

4.3.1 การสุ่มตัวอย่างและการสร้างใหม่สัญญาณเวลาเป็นช่วงในโดเมนความถี่..53

4.3.2 การแปลงฟูเรียร์เป็นช่วง (DFT).....56

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง DFT กับการแปลงอื่นๆ.....57

4.3.4 การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณโดยใช้ DFT.....58

4.4 การออกแบบโดยใช้อนุกรมฟูริเยอร์.....61

4.4.1 การใช้อนุกรมฟูริเยอร์จำนวนพจน์คงตัว.....61

4.4.2 การลดลูกคลื่นโดยใช้ซิกมาแฟกเตอร์.....65

บทที่ 5 การทดลองและการประมวลผลการทดลอง.....68

5.1 การทดสอบการรับค่า.....68

5.2 การทดลองวัดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ผลการทดลองวัดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของรถไฟแต่ละประเภท.....75

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....86

5.1 สรุปผล.....86

5.2 ปัญหาในการทดลอง.....87

5.3 ข้อเสนอแนะ.....87

บรรณานุกรม.....88

ภาคผนวก.....89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 แสดงลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของคลื่น....4
2.2 แสดงลักษณะของคลื่น P-wave....7
2.3 แสดงลักษณะของคลื่น S-wave....8
2.4 Seismographs และ Seismograms....9
2.5 แสดงกราฟข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว....10
2.6 แสดงตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหว....11
2.7 Piezoelectric transducer....13
2.8 Accelerometer....14
2.9 Seismic Instrument....15
2.10 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ DAQ....20
2.11 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ SCXI ต่อกับบอร์ด DAQ....22
2.12 แสดงการแปลงคลื่นซายน์เป็นดิจิตอลโดยใช้ความละเอียดขนาด 3 บิต....25
2.13 การวัดค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ของบอร์ด DAQ....27
2.14 ตัวอย่างอินพุตของวงจรขยายสัญญาณ เป็นสัญญาณที่ได้จากการรวมกัน....28
2.15 กราฟสัญญาณรบกวนในบอร์ด DAQ....29
3.1 แสดงทิศทางที่เซ็นเซอร์สามารถวัดได้....33
3.2 ลักษณะของตัวแปลงสัญญาณและแบบจำลองวงจรสมูลภายในตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง....34
3.3 บล็อคไดอะแกรมฟังก์ชันการทำงานของตัวหยั่งสัญญาณ MMA1205D....34
3.4 Micromachined Accelerometer และการต่อใช้ร่วมกับ PCB....35
3.5 แสดงตัวอุปกรณ์ วงจร และตำแหน่งขาของ Accelerometer Sensor....36
3.6 สายชิลด์ และ หัวต่อไมโครโฟน 3 ขา....37
3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ 5Vdc 37....37
3.8 แสดง กล่อง อินพุต และ เอาต์พุท I/O Box จำนวนสองช่องสัญญาณ....38
3.9 Data Acquisition:DAQ USB-6008....38
3.10 DAQ USB-6008 Block Diagram....39
3.11 แสดงหน้าต่างแรกของโปรแกรม LabView 8....42
3.12 แสดงบล็อคไดอะแกรมโปรแกรมเพื่อการรับสัญญาณและทำการเก็บบันทึกข้อมูล....43
3.13 แสดง Front Panel ที่เป็นส่วนแสดงผลของโปรแกรม....43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.13 แสดง Front Panel ที่เป็นส่วนแสดงผลของโปรแกรม....43

3.14 บล็อคไดอะแกรมของชุดโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์สัญญาณ....44

4.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวแปลง A/D....46

4.2 การสุ่มสัญญาณอนาลอกในลักษณะซ้ำคาบ....46

4.3 แสดงการกำเนิดสัญญาณสุ่ม....47

4.4ก) สัญญาณจำกัดแถบความถี่....50

4.4ข) สเปคตรัมเมื่อสุ่มตัวอย่างด้วย $T < \frac{\pi}{\omega_M}$ 50

4.4ค) สเปคตรัมเมื่อสุ่มตัวอย่างด้วย $T < \frac{\pi}{\omega_M}$ 50

4.5ง) การเหลื่อมของสเปคตรัมทำให้สัญญาณที่ได้ผิดเพี้ยน....50

4.5 สัญญาณรูปซายน์....51

4.6 ความสัมพันธ์เฟสของสัญญาณรูปซายน์....52

4.7 การแปลงฟูเรียร์ของการสุ่มตัวอย่างในโดเมนความถี่....53

4.8 แสดงสัญญาณไม่คาบ x(n) ที่ยาว L และการขยายจนเป็นสัญญาณซ้ำคาบ....56

4.9 สเปคตรัมขนาดซึ่งแสดงถึงการเกิดการรั่ว....60

4.10 สเปคตรัมขนาดสัญญาณจาก (4.3.28) เมื่อมองผ่านหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า....61

4.11 ผลตอบสนองแอมพลิจูดอุดมคติ....62

4.12 ผลตอบสนองแอมพลิจูดสำหรับตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลข....64

5.1 การเรียกใช้คำสั่ง daqscope จาก Launch Pad....68

5.2 โปรแกรมติดต่อ DAQ USB-6008....69

5.3 การตั้งค่าและรับค่าจาก DAQ USB-6008 เมื่อ Duration = 0.01....70

5.4 ผลจากการตั้งค่า DAQ USB-6008....70

5.5 ผลจากการรับค่า เมื่อ Duration = 0.01....71

5.6 การตั้งค่าและรับค่าจาก DAQ USB-6008 เมื่อ Duration = 0.1....71

5.7 ผลจากการตั้งค่า DAQ USB-6008....72

5.8 ผลการรับค่า เมื่อ Duration = 0.1....72

5.9 แสดงการวางตำแหน่งการติดตั้ง....74

5.10 แสดงการติดตั้งตัวเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการวัด....74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

5.11 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect1.lvm).....76
5.12 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect1.lvm).....76
5.13 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect2.lvm).....77
5.14 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect2.lvm).....77
5.15 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect3.lvm).....78
5.16 Acceleration spectrum(ซึ่งเป็นไฟล์ detect3.lvm).....78
5.17 แสดงสัญญาณจากจรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect4.lvm).....79
5.18 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect4.lvm).....79
5.19 แสดงสัญญาณจากจรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect5.lvm).....80
5.20 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect5.lvm).....80
5.21 แสดงสัญญาณจากรถไฟดีเซลราง 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect6.lvm).....81
5.22 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect6.lvm).....81
5.23 แสดงสัญญาณจากรถไฟดีเซลราง 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect7.lvm).....82
5.24 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect7.lvm).....82
5.25 แสดงสัญญาณจากรถไฟสปินเตอร์ 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect8.lvm).....83
5.26 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect8.lvm).....83
5.27 แสดงสัญญาณจากรถไฟสปินเตอร์ 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect9.lvm).....84
5.28 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect9.lvm).....84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 การ Set ค่า Input Mode....40

3.2 Absolute accuracy at full scale, single ended....40

3.3 Absolute accuracy at full scale differential....41

4.1 สัมประสิทธิ์ของตัวกรองจากตัวอย่าง 4.1....67

5.1 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 1....76

5.2 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 2....77

5.3 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 3....78

5.4 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 4....79

5.5 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 5....80

5.7 แสดงข้อมูลของรถไฟดีเซลราง 6....81

5.7 แสดงข้อมูลของรถไฟดีเซลราง 7....82

5.8 แสดงข้อมูลของรถไฟสปีนเตอร์ 8....83

5.8 แสดงข้อมูลของรถไฟสปีนเตอร์ 9....84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

ปัจจุบันโลกเราได้เกิดเหตุการณ์ต่างๆ ขึ้นมากมายที่มีผลต่อมนุษย์ทั้งที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติและมนุษย์กระทำขึ้น ซึ่งมีผลกระทบมากน้อยต่อเราและโลก ยกตัวอย่างเช่น กัยธรรมชาติจากแผ่นดินไหว โลกร้อน น้ำท่วม หรือเหตุการณ์คลื่นยัก สึนามิ เป็นต้น ทำให้ผู้วิจัยเกิดความคิดว่าเรากำลังจะตกอยู่ในสภาวะที่ไม่ปกติมากขึ้น ดังนั้นมนุษย์เราจึงต้องคิดค้นและหาวิธีป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ขึ้นอีก

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยเกิดความสงสัยและได้มีโอกาสได้ศึกษาเรื่อง P-wave ที่เป็นพื้นฐานของคลื่นรูปแบบหนึ่ง ปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการวัดและวิเคราะห์คลื่น ได้มีการคิดค้นและศึกษาพัฒนาอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการศึกษาคลื่น P-wave สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจวัดแผ่นดินไหวเพื่อหาตำแหน่งของแผ่นดินไหว หรือการวัด P-wave จากคลื่นหัวใจเพื่อศึกษาถึงอาการของคนไข้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้วิจัยทำการศึกษาคลื่น P-wave โดยการทำการทดลองจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ ลักษณะคลื่น P-wave เป็นคลื่นอย่างหนึ่งที่แสดงถึงแรงที่เกิดจากการอัดตัวเป็นลักษณะเฉพาะของสิ่งที่เราจะทำการตรวจวัดคลื่นนั้นๆ ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาคลื่นชนิดนี้

การเตือนกัยเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับยุคต์สมัยนี้เพื่อเป็นการบอกให้ทราบล่วงหน้าถึงวิธีป้องกันและแก้ไขที่ดี จึงได้มีการศึกษาวิธีป้องกันกัยล่วงหน้าตามแล้วแต่ประเภทนั้นๆ ซึ่งจากปริญญานิพนธ์ทางด้านวิศวกรรมนี้ เป็นการศึกษาการเกิดคลื่นและอุปกรณ์พื้นฐานในการตรวจวัดการสั่นสะเทือน และคิดค้นทำการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ และออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อนำผลที่ได้มาใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการเกิดคลื่น P-wave
2. ทำการทดสอบทฤษฎีการเกิดคลื่น P-wave โดยการทำการทดลองกับรถไฟประเภทต่างๆ
3. สามารถออกแบบและเลือกใช้ อุปกรณ์วัดสัญญาณที่เกิดจากการสั่นสะเทือนได้
4. ศึกษาระบบดาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition) เพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณ
5. สามารถวิเคราะห์และบอกความแตกต่างของรถไฟแต่ละประเภท จากทฤษฎีการเกิดคลื่น P-wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการเกิด คลื่น P-wave และ S-wave และสมารถนำไปใช้ประโยชน์

2. ศึกษาและเลือกใช้ อุปกรณ์วัดคลื่นจากการสั่นสะเทือนในด้วกลาง เช่น Piezoelectric Accelerometer, Seismometer และ Geophone เป็นต้น

3. ศึกษาระบบดาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition) และพื้นฐานการประมวลสัญญาณที่ใช้ในอุตสาหกรรมการวัดคุม

4. เขียนโปรแกรมติดต่อกับระบบดาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition) โดยใช้โปรแกรม LabView8 เพื่อแสดงผลกราฟฟิกและเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์ผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fast Fourier transform (FFT) เพื่อแปลงการตอบสนองในรูปแบบ time domain ไปเป็นการตอบสนองที่อยู่ในรูปของ frequency domain ได้

5. ทำทดลองวัดสัญญาณจาก รถไฟแต่ละประเภท ก็คือ รถไฟธรรมดา รถไฟดีเซลราง และ รถไฟสปีนเตอร์ เพื่อทดสอบทฤษฎีของ คลื่น P-wave

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

การทำปริญญานิพนธ์นี้เริ่มจากการศึกษาคลื่นชนิดต่าง ลักษณะของคลื่น p-wave และทำการเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ Accelerometer Sensor อุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณ (ดาต้าแอกควิซิชันการ์ด) ทำการเก็บข้อมูล สัญญาณที่ได้จากการวัด โดยใช้โปรแกรม LabView 8 เพื่อนำไปวิเคราะห์ ข้อมูลเพื่อหาความแตกต่างของรถไฟแต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นตามยาว (Longitudinal wave) เป็นคลื่นที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไปมาในแนวเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างของคลื่นตามยาวได้แก่ คลื่นเสียง

2.1.2.3 จำแนกตามลักษณะการเกิดคลื่น

คลื่นดล (Pulse wave) เป็นคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดถูกรบกวนเพียงครั้งเดียว

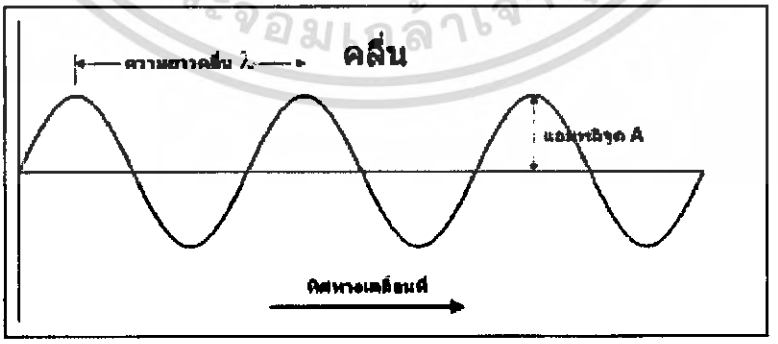
คลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave) เป็นคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดถูกรบกวนเป็นจังหวะต่อเนื่อง

2.1.3 คุณสมบัติของคลื่น

คลื่นทุกประเภทจะมีพฤติกรรมร่วมที่เหมือนกันภายใต้สภาวะปกติ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

- การสะท้อน (reflection) คลื่นเปลี่ยนทิศทางโดยการสะท้อนเมื่อตกกระทบพื้นผิว
- การหักเห (refraction) คลื่นเปลี่ยนทิศทางเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง
- การกระเจิง (diffraction) คลื่นเคลื่อนที่ขยายวงออกเรื่อยๆ เช่น ลำคลื่นที่วิ่งผ่านออกจากช่องแคบๆ จะมีลักษณะขยายขนาดลำออก
- การแทรกสอด (inference) เกิดจากการซ้อนทับกันของคลื่น เมื่อวิ่งมาตัดกัน
- การกระจาย (dispersion) องค์ประกอบที่ความถี่ต่างกันของคลื่น จะมีการแยกตัวออกห่างจากกัน
- การแผ่เชิงเส้นตรง (rectilinear propagation) การเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นเส้นตรง

ลักษณะทางกายภาพของคลื่น



ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ส่วนประกอบของคลื่น

ค่าที่ใช้ในการระบุรูปร่างของคลื่น คือ ความถี่ ความยาวคลื่น แอมพลิจูด คาบ ดังภาพที่ 2.1

- **ความยาวคลื่น** (Wavelength) เป็นความยาวของคลื่นหนึ่งลูกมีค่าเท่ากับระยะระหว่างสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่อยู่ถัดกัน ความยาวคลื่นแทนด้วยสัญลักษณ์ λ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

- **ความถี่** (Frequency) หมายถึง จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใด ๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา

- **แอมพลิจูด** (Amplitude) A นั้นวัดจากขนาดของการรบกวนตัวกลาง ที่มากที่สุดในช่วงหนึ่งคาบ โดยมีหน่วยของการวัดขึ้นกับประเภทของคลื่น เช่น คลื่นในเส้นเชือกมีหน่วยการวัดเป็นระยะทาง (เช่น เมตร) ส่วนคลื่นเสียงมีหน่วยการวัดเป็นความดัน (เช่น ปาสกาล) และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยการวัดเป็นค่าตามขนาดสนามไฟฟ้า (โวลต์/เมตร) ค่าแอมพลิจูดนั้นอาจมีค่าเป็นคงที่ A_0 เรียกคลื่นประเภทนี้ว่า คลื่นต่อเนื่อง (continuous wave) ย่อ c.w. หรือ อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา และ ตำแหน่ง A(t , z) (หากคลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทาง z) การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด เรียกว่า ซอง (envelope) ของคลื่น

- **คาบ** (Period) T เป็นช่วงเวลาที่คลื่นใช้ในการวนครบรอบในการกวัดแกว่ง ความถี่ f คือ จำนวนรอบที่คลื่นกวัดแกว่งครบรอบ ในหนึ่งหน่วยเวลา (เช่น ใน 1 วินาที) และมีหน่วยของการวัดเป็น เฮิรตซ์ โดยมีความสัมพันธ์

$$f = \frac{1}{T}$$

บางครั้งสมการทางคณิตศาสตร์ของคลื่นอาจอยู่ในรูปของ ความถี่เชิงมุม (angular frequency) นิยมใช้สัญลักษณ์ ω และมีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที และมีความสัมพันธ์กับ f ดังต่อไปนี้

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

2.1.5 สมการคลื่น

คลื่นมีลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นแบบฮาร์โมนิก ดังนั้นการกระจัดของอนุภาค y จะมีรูปแบบเหมือนสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกด้วย ดังนั้นถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นโดยให้เฟสเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นหรือเรียกว่า ฟังค์ชันคลื่น ซึ่งก็คือฟังค์ชันที่แสดงตำแหน่งของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งบนคลื่นเป็นดังนี้

$$y = A\sin\omega t$$

โดยที่ A แทนอัมปลิจูดของคลื่น หรือการกระจัดสูงสุดของคลื่น

ω แทนความถี่เชิงมุม (angular frequency) โดยที่ $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = A\sin 2\pi ft = A\sin\frac{2\pi t}{T}$$

ขณะที่เวลาผ่านไปเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็วเฟส v ได้ระยะ x จะได้ $t = \frac{x}{v}$ เขียนฟังก์ชันคลื่นเป็นดังนี้

$$y = A\sin 2\pi f(t - \frac{x}{v})$$

$$= A\sin(2\pi f - \frac{2\pi x}{\lambda})$$

ถ้าให้ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ แทนค่าคงตัวของการแผ่ (propagation constant) หรือเลขคลื่น (Wave Number) มีหน่วยเป็น m^{-1} จะได้

คลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวา $y = A\sin(\omega t - kx)$

คลื่นเคลื่อนที่ไปทางซ้าย $y = A\sin(\omega t + kx)$

ในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในตัวกลางทุกๆ อนุภาคในเชือกจะเคลื่อนที่ขึ้นลงในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังนั้นสามารถหาความเร็วและความเร่งของอนุภาคในเชือกได้ ดังนี้ความเร็วของอนุภาคในเชือกที่เคลื่อนที่ทางขวาคำนวณได้จาก

$$v = \frac{\partial y}{\partial t} = \omega A\cos(\omega t - kx)$$

ความเร่งของอนุภาคในเชือกที่เคลื่อนที่ทางขวา คำนวณได้จาก

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$a = -\omega^2 A\sin(\omega t - kx) = -\omega^2 y$$

สมการคลื่นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยใช้จำลองพฤษติกรรมของคลื่นฮาร์มอนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง สมการคลื่นมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการส่งผ่านของคลื่นและคุณสมบัติของตัวกลาง ตัวคลื่นก็มีรูปร่างหลากหลาย ไม่จำเป็นจะต้องเป็นคลื่นรูปไซน์เสมอไป

สมการคลื่นในรูปทั่วไป คือ

$\nabla^2\phi = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}$ และใน มิติตามแนวแกน x คือ $\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}$

และคำตอบในรูปทั่วไป (กรณี 1 มิติ ในแนวแกน x) ซึ่งค้นพบโดยดาเลมแบร์ คือ

$$\phi(x,t) = F(x - ct) + G(x + ct)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

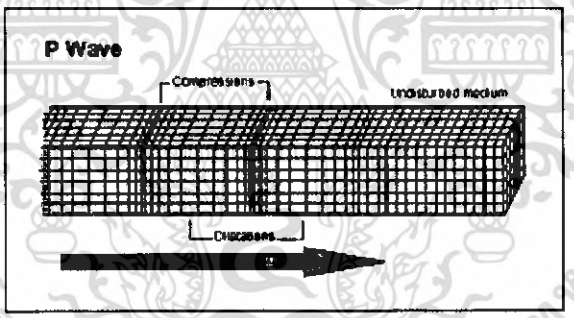
ใช้หมายถึงรูปร่างของคลื่น 2 ลูก โดยที่ F เคลื่อนที่เป็นในทิศทาง + X และ G เคลื่อนที่ไปในทิศทาง –X

นอกจากสมการคลื่น ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีสมการคลื่นชนิดอื่นๆ รวมถึงสมการไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการเคลื่อนมวลสารได้ด้วย เช่น สมการเชรอดิงเจอร์ (Schrodinger - equation) ซึ่งใช้ในการจำลองพฤติกรรมเชิงคลื่นของอนุภาคในกลศาสตร์ควอนตัม โดยมีคำตอบของสมการเป็นฟังก์ชันคลื่น ที่บ่งบอกถึงความน่าจะเป็นของอนุภาคการจำแนกประเภทของคลื่น

2.2 การศึกษาคลื่นจากการไหวสะเทือน

2.2.1 คลื่นปฐมภูมิ (P - wave)

เป็นคลื่นตามยาวที่เกิดจากความไหวสะเทือนในตัวกลาง โดยอนุภาคของตัวกลางนั้นเกิดการเคลื่อนไหวแบบอัดขยายในแนวเดียวกับที่คลื่นส่งผ่านไป คลื่นนี้สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เป็นคลื่นที่สถานีวัดแรงสั่นสะเทือนสามารถรับได้ก่อนชนิดอื่น โดยมีความเร็วประมาณ 6 – 8 กิโลเมตร/วินาที คลื่นปฐมภูมิทำให้เกิดการอัดหรือขยายตัวของชั้นหิน ดังภาพที่



ภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะของคลื่น P-wave

ซึ่งจะมีสมการคลื่นเป็น $s(z,t) = s_0 \cos(kz - \omega t + \phi)$

s_0 คือ แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่

k คือ เลขคลื่น (Wave Number)

z คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ตามแกน z

ϕ คือ มุมเฟสชดเชย

และจากข้อกำหนดของ บัค มอดูลัส จะได้

$$K = -V\frac{dP}{dV}$$

K คือ ค่า บัค มอดูลัส

V คือ ปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

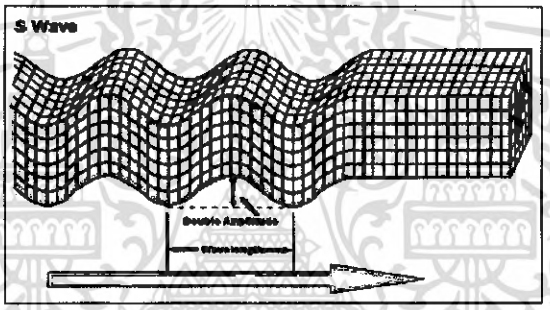
P คือ แรงดัน

ดังนั้นจะได้ ค่าแรงดันของ คลื่น เท่ากับ

$$P = -K\frac{dV}{V} = -K\frac{A[s(z-\Delta z)-s(z)]}{A\Delta z}$$
$$= -K\frac{s(z+\Delta z)-s(z)}{\Delta z} = -K\frac{\partial s}{\partial z}$$

2.2.2 คลื่นทุติยภูมิ (S-wave)

เป็นคลื่นตามขวางที่เกิดจากความไหวสะเทือนในตัวกลาง โดยอนุภาคของตัวกลางเคลื่อนไหวตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นผ่าน มีทั้งแนวตั้งและแนวนอน คลื่นชนิดนี้ผ่านได้เฉพาะตัวกลางที่เป็นของแข็งเท่านั้น ไม่สามารถเดินทางผ่านของเหลว คลื่นทุติยภูมิมีความเร็วประมาณ 3 – 4 กิโลเมตร/วินาที คลื่นทุติยภูมิทำให้ชั้นหินเกิดการคดโค้ง



ภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะของคลื่น S-wave

ซึ่งจะมีสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla \cdot u = 0$$

ให้ u เป็นระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

จะได้ความเร็วของคลื่น เป็น $v_s = \sqrt{\frac{u}{\rho}}$

v_s ความเร็วของคลื่น

u เชียร์ มอดูลัส

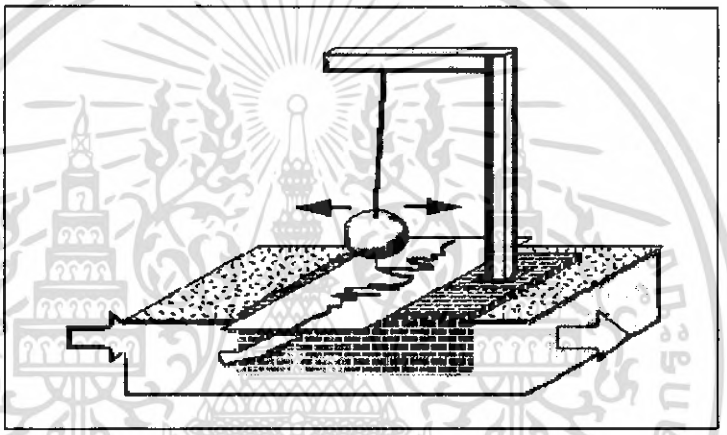
ρ ความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การนำความรู้ของคลื่น P-wave และ S-wave ไปใช้ประโยชน์

2.2.3.1 Seismometer

Seismometer คือ เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหวเรียกว่า โดยวัดปริมาณความสั่นสะเทือนของพื้นดิน และยังสามารถใช้หาตำแหน่งของศูนย์เกิดแผ่นดินไหวได้ เครื่องมือไซสโมมิเตอร์ธรรมดาไม่สามารถบันทึกการคลื่นไหวได้จึงมีการพัฒนาเครื่องมือนี้ขึ้นเพื่อให้บันทึกข้อมูลได้เรียกว่าเครื่องวัดความไหวสะเทือน (Seismograph) อันเป็นเครื่องมือที่บันทึกการเคลื่อนไหวของพื้นดินได้โดยออกมาในรูปเส้นหยักๆที่เขียนบนแถบกระดาษที่เรียกว่า ไซสโมแกรม (Seismorgram)



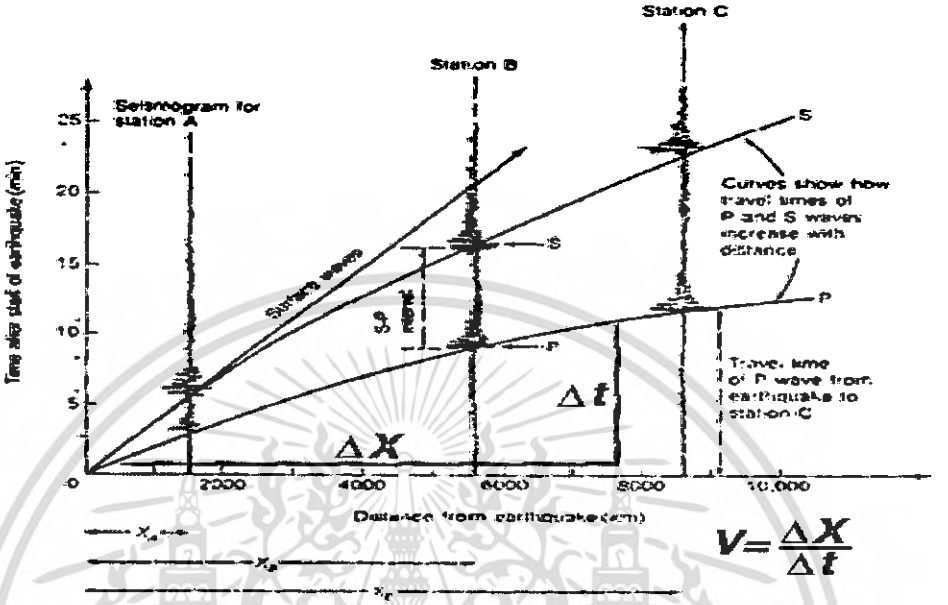
ภาพที่ 2.4 Seismographs และ Seismograms

2.2.3.2 Seismograph

Seismograph ที่มีความไวในการตรวจจับคือเครื่องมือหลักที่นักวิทยาศาสตร์ใช้ในการศึกษาแผ่นดินไหวมีสถานี Seismograph นับพันแห่งทั่วโลกที่ดำเนินการอยู่และยังมีการตรวจวัดที่ดวงจันทร์, ดาวอังคาร, และดาวศุกร์ด้วย โดยหลักการแล้ว Seismograph ก็คือลูกตุ้มนั่นเอง เมื่อพื้นดินไหวตัวฐานและโครงของอุปกรณ์จะเคลื่อนที่ไปกับพื้นดินแต่แรงเฉื่อยจะทำให้ลูกตุ้มอยู่กับที่ จากนั้นก็จะเคลื่อนที่สัมพัทธ์กับพื้นดินที่ไหวตัว ในขณะที่ลูกตุ้มเคลื่อนที่ก็จะบันทึกระยะการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มกับเวลาไว้ด้วย ข้อมูลที่บันทึกได้นี้เรียกว่า Seismogram ที่สถานีตรวจวัดหนึ่งจะมีลูกตุ้มที่ตรวจวัดการเคลื่อนที่ของพื้นดินในแนวเหนือ – ใต้, ตะวันออก – ตะวันตก และในแนวดิ่ง ซึ่งจะให้ข้อมูลที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์ประมาณระยะทาง, ทิศทาง, ขนาดตามมาตรริคเตอร์, และชนิดของรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวได้ผู้เชี่ยวชาญด้านแผ่นดินไหวจะใช้โครงข่ายของสถานีตรวจวัดเพื่อหาตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหว และเพื่อประมาณค่าอื่นๆ ให้แม่นยำยิ่งขึ้น บ่อยครั้งที่ข้อมูลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นอนจะได้จากการตรวจสอบกับ Seismogram ที่บันทึกไว้ที่ระยะทางต่างๆ ห่างจากจุดเกิดแผ่นดินไหว



ภาพที่ 2.5 แสดงกราฟข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว

2.2.3.3 การหาตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหว

ประโยชน์หลักๆ ของโครงข่าย Seismograph ก็คือการตรวจหาตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหว ถึงแม้ว่าจะสามารถระบุตำแหน่งโดยทั่วไปของแผ่นดินไหวได้จากข้อมูลที่ได้จากสถานีเพียงแห่งเดียวก็ตาม แต่เราจะได้ตำแหน่งที่แม่นยำยิ่งขึ้นเมื่อใช้ข้อมูลจากสถานีสามแห่งหรือมากกว่านี้ การระบุตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหวมีความสำคัญในการประเมินความเสียหายที่อาจเกิดจากแผ่นดินไหว และเพื่อระบุความเกี่ยวข้องของแผ่นดินไหวกับสภาพทางธรณีวิทยา

จากข้อมูล Seismogram ที่ได้จากสถานีตรวจวัดแห่งเดียวจะได้ผลต่างเวลา S – P และจะคำนวณระยะทางระหว่างสถานีกับจุดเกิดแผ่นดินไหวได้ เมื่อคูณเวลา S – P ที่เป็นวินาทีด้วย 8 กิโลเมตร/วินาทีแล้วก็จะได้ระยะทางเป็นกิโลเมตร วาดวงกลมลงบนแผนที่ให้มีรัศมีเท่ากับระยะทางนี้โดยมีจุดศูนย์กลางที่สถานีตรวจวัดก็จะทราบตำแหน่งของแผ่นดินไหวที่เป็นไปได้ทั้งหมด และจากข้อมูลเวลา S – P จากสถานีอีกแห่งหนึ่ง ก็สามารถวาดวงกลมได้อีกวงซึ่งจะทำให้ตำแหน่งแผ่นดินไหวที่เป็นไปได้แคบลงเหลือเพียงสองตำแหน่ง และจากข้อมูลเวลา S – P จากสถานีตรวจวัดแห่งที่สามเท่านั้นเราก็จะวาดวงกลมวงที่สามได้และทราบแน่นอนว่าตำแหน่งสองตำแหน่งที่ได้ก่อนหน้านี้ตำแหน่งไหนที่เป็นตำแหน่งที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยธรรมชาติคลื่นอัดตัวจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในทิศทางเดียวกันกับที่คลื่นเคลื่อนที่ไป ส่วนคลื่นเฉือนจะทำให้พื้นดินสั่นสะเทือนในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ถึงแม้ว่าความเร็วของคลื่นแผ่นดินไหวจะต่างกันมากถึง 10 เท่า แต่อัตราส่วนระหว่างความเร็วของคลื่นอัดตัวกับความเร็วของคลื่นเฉือนค่อนข้างคงที่ ฉะนั้นนักวิทยาศาสตร์ด้านแผ่นดินไหวจึงสามารถคำนวณหาระยะทางถึงจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวได้โดยเอาเวลาที่คลื่นเฉือนมาถึง ลบด้วยเวลาที่คลื่นอัดตัวมาถึง (เวลาเป็นวินาที) คูณด้วยแฟกเตอร์ 8 จะได้ระยะทางโดยประมาณเป็นกิโลเมตร

$$(S - P) \times 8$$

S คือ เวลาที่คลื่นเฉือนเคลื่อนที่มาถึง

P คือ เวลาที่คลื่นอัดตัวเคลื่อนที่มาถึง

คลื่นแผ่นดินไหวจะเคลื่อนที่ไปรอบโลก ฉะนั้นหากเรามีเครื่องมือที่ละเอียดเพียงพอก็สามารถวัดการเกิดแผ่นดินไหวจากที่ไหนก็ได้บนโลก หลักการนี้ได้นำมาใช้ในการตรวจจับเรื่องการทดลองอาวุธปรมาณู เทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถตรวจจับ การระเบิดของอาวุธปรมาณูที่ก่อให้เกิดการ สั่นสะเทือนเทียบเท่ากับแผ่นดินไหวขนาด 3.5 ตามมาตราริกเตอร์

ภาพที่ 2.6 แสดงตำแหน่งการเกิดแผ่นดินไหว

ตัวอย่างที่นำมาให้ดูนี้ใช้ข้อมูลจากสถานีที่ Boston, Edinborough และ Manaus จากระยะทางที่ได้ วงกลมทั้งสามตัดกันที่ตำแหน่งเพียงตำแหน่งเดียวที่สันเปลือกโลกกลางมหาสมุทรแอตแลนติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีทรานสดิวเซอร์เปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer)

เมื่อใดก็ตามที่วัตถุของแข็งที่มีรูปร่างแน่นอนถูกทำให้เสียรูปไปภายในตัวมันก็จะเกิดประจุไฟฟ้าหากมีการนำไปใช้จะมีผลกระทบย้อนกลับนั่นคือวัตถุจะเสียรูปเชิงกลเป็นผลตอบสนองการกระทำนี้ให้ชื่อว่าปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)หนักการสำคัญของการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเชิงกล (Electro mechanical) คือการนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ทั้ง 2 ทิศทาง คือ ถ้าอินพุตเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกลแล้วใช้สัญญาณไฟฟ้าเป็นเอาท์พุทก็จะเป็นพื้นฐานของเครื่องมือทั่วๆ ไปที่ใช้กับการวัดความเร่ง ความเร็ว ความดัน สามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในการกำเนิดกำลังไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงกระแสต่ำ เช่น การใช้งานในการเริ่มจุดระเบิดเครื่องยนต์ (Spark-ignition) และการกรองฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic dust filter) ในทางกลับกันถ้าอินพุตเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วให้การเปลี่ยนแปลงทางกลเป็นเอาท์พุทจะใช้ในการวัดค่าความสั่นสะเทือนที่มีค่าน้อยๆ (small vibration shaker) ระบบโซนาร์สำหรับเสียง (sonar system for acoustic ranging) ตัวตรวจจับทิศทาง อุปกรณ์การตรวจสอบอุลตราโซนิคโดยไม่ทำลาย (ultrasonic nondestructive) และอื่นๆ อีกมากมาย

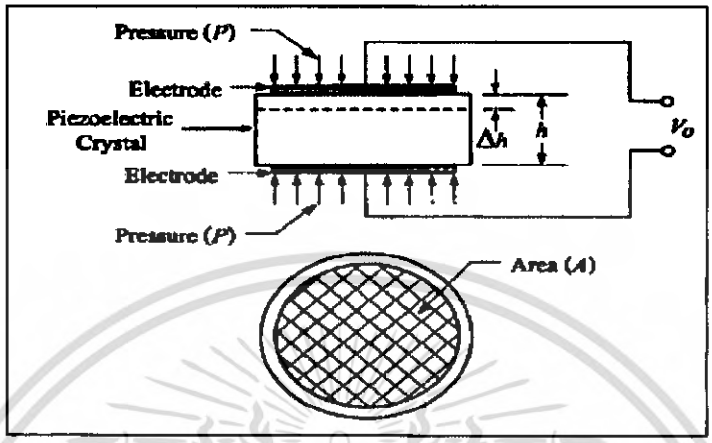
วัสดุที่แสดงออกถึงลักษณะความสำคัญ และผลกระทำของเปียโซอิเล็กทริก แบ่งได้ เป็น 3 กลุ่มตามธรรมชาติ คือ

- ควอร์ต (quartz)
- ดีเกลือ (Rochelle salt)
- คริสตัลสังเคราะห์ (tithium sulfer,sulfer,ammonium dihydogen phophase)

โดยการแยกขั่วเซรามิกที่เป็นไฟฟ้า (ferro electric) เช่น barium titnate และแผ่นฟิลม์โพลิเมอร์ที่มีรูปร่างแน่นอน เหตุเพราะโครงสร้างที่ไม่สมมารตตามธรรมชาติวัตถุที่เป็นผลึกจะแสดงปฏิกริยาออกมาถึงแม้จะไม่มีกระบวนการใดๆ สำหรับเซรามิกซ์ที่เป็นไฟฟ้าจะต้องถูกแยกขั่วเทียมโดยวิธีใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข็มมากๆ ให้กับวัตถุ(ขณะที่ถูกให้ความร้อนสูงๆ มีอุณหภูมิเหนือจุดกูรี (curie pointของวัสดุนั้น) และทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ขณะที่ยังมีสนามนั้นอยู่เมื่อสนามภายนอกถูกนำออกไปจากวัสดุที่เย็นแล้วการโพลาไรซ์ที่ยังคงเหลือจะถูกเก็บไว้ภายใน และวัสดุนั้นจะแสดงผลของเปียโซอิเล็กทริก ผลของพิโซอิเล็กทริกสามารถถูกทำให้เกิดผลตอบสนองหรือเป็นสาเหตุ การเสียรูปเชิงกลของวัสดุในโหมดต่างๆ กัน เช่น การขยายออกของความหนาตามขวางแรงเฉือนตามความหนาแรงเฉือนที่ผิวจุดกูรีคืออุณหภูมิเหนือจุดที่วัสดุนั้นสูญเสียความเป็นไฟฟ้ามันถูกจำกัดอุณหภูมิที่สูงที่สุด ที่วัสดุนั้นจะสามารถถูกใช้ได้ในโหมดของผลจากการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างและการหาทิศทางของตัววัตถุซึ่งสัมพันธ์กับแกนผลึกและตำแหน่งของ อิเล็กโทรด (electrode) อิเล็กโทรดที่เป็นโลหะ จะถูกทำให้เป็นแผ่นวางบนผิวหน้าของวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่เลือกไว้ เพื่อที่จะนำสายสัญญาณซึ่งสามารถใช้ติดกับแผ่นโลหะ สำหรับการนำประจุไฟฟ้าเข้าหรือออกเริ่มจากการที่วัสดุเปียโซอิเล็กทริกใช้สำหรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่ทางกลไปเป็นสัญญาณทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าดังนั้นอาจจะคิดได้ว่าเป็นการกำเนิดประจุไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ การเสียรูปเชิงกลทำให้เกิดประจุ ประจุนี้เป็นผลทำให้ปรากฏแรงดันค่าหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งเป็นไปตามกฎของแรงดันจำกัด ขณะที่มีการกดอัดในด้านตรงข้ามกันดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 Piezoelectric transducer

ระบบการวัดการสั่นจะมีองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบและขั้นตอนการวัดการสั่นขั้น แรกจะเป็นขั้นของเซนเซอร์ทรานสดิวเซอร์อุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณทางกลเช่นการขจัดความเร็วความเร่งหรือแรงกระทำให้กลายเป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้เช่นกระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในขั้นต่อมาเนื่องจากการรับสัญญาณไฟฟ้าจากทรานสดิวเซอร์มักจะเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กหรืออาจมีสัญญาณรบกวน ทำให้มีสัญญาณอื่นนอกเหนือจากสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการสั่นรวมกับสัญญาณที่รับเข้ามาสู่ระบบการวัด ดังนั้นเราอาจต้องมีการปรับสัญญาณให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณ

เมื่อสัญญาณได้รับการปรับสภาพที่เหมาะสมแล้ว ขั้นต่อไปสัญญาณก็จะเข้าสู่การแปลงค่าสัญญาณจากลักษณะที่เป็นอนาลอกให้เป็นสัญญาณในลักษณะของดิจิตอลเพื่อนำเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป และทรานสดิวเซอร์ที่ใช้หลักการและวัสดุเหล่านี้เราเรียกว่าทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กตริก (Piezoelectric Transducer) โดยรากศัพท์ Piezo มีความหมายว่า บีบหรือเค้นสำหรับปริมาณ ประจุไฟฟ้าที่ได้เมื่อมีแรง F_x กระทำจะมีค่าเป็น

$$Q_x = kF_x = kAp_x \tag{2.1}$$

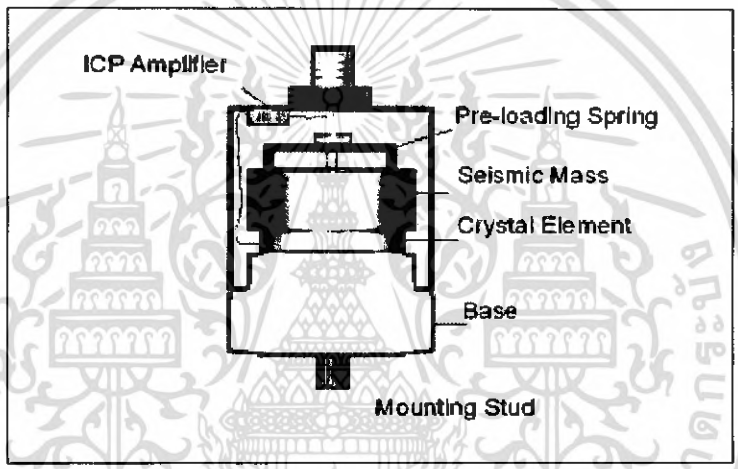
เมื่อ k เป็นค่าคงทีทางเปียโซอิเล็คตริกของวัสดุ เป็นพื้นที่หน้าตัดที่แรง F_x กระทำ และ p_x เป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่อันเกิดจากแรง F_x และความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และประจุไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุนี้จะเป็น

$$E = vtp_x \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v จะเป็นค่าความไวของวัสดุ (Voltage Sensitivity) และ t เป็นความหนาของวัสดุสำหรับ quartz จะมีค่าคงที่เปียโซอิเล็คตริกเท่ากับ 2.25 x 10^{-12} Coulomb/Newton และค่าความไวเป็น 0.055 volt-meter/Newton ค่าเหล่านี้จะถูกต้องเฉพาะในทิศตั้งฉากกับด้านที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งในรูปก็คือทิศทางตามแนวแกน x ของผลึก ค่าประจุไฟฟ้าและความต่างศักย์และความแตกต่างไปจากนี้ถ้าหากมีแรงกระทำในแนวอื่นของผลึก

ทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กตริกที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปจะแสดงในภาพที่ 2.7 ภาพนี้จะมีมวลขนาดเล็กจะถูกกดอยู่บนผลึกเปียโซอิเล็กทริก เมื่อฐานเกิดการเคลื่อนที่แรงกกระทำต่อผลึกจะเปลี่ยนไปตามความเร่งที่เกิดขึ้นซึ่งก็จะทำให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเร่งของมวลนั้นดังนั้นอุปกรณ์ในภาพที่ 2.7 นี้จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้การวัดความเร่ง (Accelerometer)

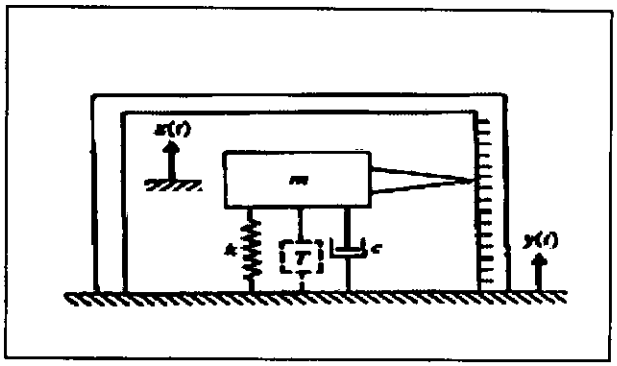


ภาพที่ 2.8 Accelerometer

ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์วัดความเร่งแบบ Piezoelectric นี้ คือมีความไวต่อการกระตุ้นและไวต่อ การตรวจวัดสูง และใช้ได้ในช่วงความถี่ที่กว้าง

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดการสั่นนั้นมีหลายแบบตามลักษณะของปริมาณที่จะวัดสำหรับทรานสดิวเซอร์เมื่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์ใดๆก็ตาม เพื่อใช้วัดการสั่นนิยมที่จะเรียกอุปกรณ์นั้นว่าอุปกรณ์ตรวจจับการสั่น (Vibration Pickup) โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการสั่นนิยมใช้ประเภท seismic instrument โดยอุปกรณ์ seismic นี้จะประกอบด้วยระบบ มวล-สปริง-ตัวหน่วง ติดตั้งบนส่วนที่เกิดการสั่น จากนั้นการขจัดความเร็วหรือความเร่งของชิ้นส่วนที่เครื่องวัดนี้ติดตั้งอยู่จะสามารถหาได้จากการวัด การขจัดของมวลที่อยู่ภายในสัมพัทธ์กับฐานที่อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 Seismic Instrument

ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดนี้ประกอบด้วยมวล m สปริง k และตัวหน่วง c ภายในกล่องบรรจุ ซึ่งติดเข้ากับส่วนที่ต้องการวัดการสั่น ด้วยวิธีการติดตั้งเช่นนี้ฐานของสปริงและตัวหน่วงจะมีการเคลื่อนที่ไปพร้อมกับชิ้นส่วนที่อุปกรณ์นี้ติดตั้งอยู่ ซึ่งเป็นค่าที่เราต้องการวัด ซึ่งก็คือค่า y ที่แสดงในภาพที่ 2.9 และการเคลื่อนที่ของฐานนี้จะทำให้มวล m เกิดการเคลื่อนที่ดังนั้นการขจัดสัมพัทธ์ของมวล m ซึ่งเทียบต่อฐานจะมีค่าเป็น z = x - y เมื่อ x เป็นการขจัดสัมบูรณ์ของมวล m โดยค่าการขจัดสัมพัทธ์ z นี่เราสามารถจะทำการวัดได้ ไม่ว่าจะใช้วิธีการวัดโดยตรง หรือวัดโดยอ้อม เช่น เปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าก็ได้ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของมวล m นี้ก็จะมีสมการการเคลื่อนที่เหมือนกับการเคลื่อนที่ของมวลตามการกระตุ้นของฐานเหมือนกับที่เราได้ศึกษามาแล้ว เพื่อสะดวกในการพิจารณา ในขั้นนี้เราจะสมมุติให้การเคลื่อนที่ของฐานเป็นแบบฮาร์โมนิกส์ คือ

$$y = Y\sin\omega t \tag{2.3}$$

สมการการเคลื่อนที่ของมวล m จะสามารถเขียนได้ในรูป

$$m\ddot{x} + c(x-y) + k(x-y) = 0 \tag{2.4}$$

และหากเราใช้การขจัดสัมพัทธ์ของมวลกับฐานเป็น

$$z = x - y \tag{2.5}$$

เราสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อเราแทนค่า y จะทำให้ได้

$$mz + cz + kz = m\omega^2 Y \sin \omega t \tag{2.7}$$

ในที่นี้หากเราพิจารณาเฉพาะการตอบสนองอย่างคงตัวเท่านั้น เราจะได้ว่าการตอบสนองนี้เป็นการตอบสนองแบบฮาร์โมนิกส์ นั่นคือให้

$$z(t) = Z \sin(\omega t - \phi) \tag{2.8}$$

จากที่ได้ศึกษามาแล้ว จะได้ว่าขนาดของการตอบสนองจะเป็น

$$Z = \frac{Y\omega^2}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{2.9}$$

$$Z = \frac{r^2 Y}{[(1 - r^2) + (2\zeta r)^2]^{1/2}} \tag{2.10}$$

สำหรับเครื่องมือวัดการสั่นแบบต่างๆ ที่ใช้หลักการของอุปกรณ์ Seismic มีดังต่อไปนี้

2.3.1 Vibrometer

Vibrometer หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Seismometer เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดการขจัดของวัตถุที่เกิดการสั่นว่าค่า $\frac{Z}{Y} \approx 1$ ก็ต่อเมื่อ $\frac{\omega}{\omega_n} \geq 3$ ดังนั้นการขจัดสัมพัทธ์ระหว่างมวลและฐานซึ่งรับความรู้สึกผ่านเซ็นเซอร์ จะมีค่าประมาณการขจัดของฐาน(ซึ่งไม่ได้หมายความว่าการขจัดสัมบูรณ์ของ x ต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เพราะแม้ว่า z = x-y แต่ $Z \neq X - Y$ แต่เนื่องจากความแตกต่างของมุมเฟส) สำหรับการวิเคราะห์เราสามารถเริ่มจากการพิจารณาสมการ(2.10)โดยกำหนดให้

$$Z(t) \approx Y \sin(\omega t - \phi) \tag{2.11}$$

ถ้าหากว่า

$$\frac{r^2}{[(1-r)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2}} \approx 1 \tag{2.12}$$

เปรียบเทียบสมการ (2.14) กับค่า $z(t) = Z \sin \omega t$ จะแสดงให้เห็นว่า z(t) จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เหมือนกับ y(t) ยกเว้นจะมีเพสช้ากว่าอยู่ ϕ และความช้าของเพสนี้จะเท่ากับ 180° ถ้าหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\zeta = 0$ ดังนั้นการขจัดที่วัดได้ z(t) จะมีค่าตามการขจัดของฐานที่เราต้องการวัด y(t) อยู่ด้วยเวลา $t' = \frac{\phi}{\omega}$ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของเพสนี้จะไม่มีผลเท่าไหร่นัก หากฐาน y(t) เคลื่อนที่กายใต้ภายใต้ฮาร์โมนิกส์เดียว

เนื่องจาก $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ จำเป็นต้องมีค่ามากแต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของฐาน ω ภายใต้สภาพการสั่นหนึ่ง จะเป็นค่าที่แน่นอน ดังนั้นในการออกแบบค่าความถี่ธรรมชาติของ Seismometer หรือ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ จำเป็นต้องให้มีค่าน้อย กล่าวคือ ต้องให้มวล m มีค่ามากและความแข็งสปริง k ต้องมีค่าน้อย ทำให้อุปกรณ์ประเภทนี้จะมีขนาดใหญ่และอ่อนไหวมาก ซึ่งอาจไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานหลายแบบ ดังนั้นในทางปฏิบัติเราอาจไม่สามารถออกแบบให้ r มีค่ามากตามทฤษฎีได้ ซึ่งทำให้ค่า Z และ Y อาจมีความแตกต่างกันในกรณีนี้ค่าที่แค้จริงของ Y อาจมีค่าแตกต่างกันไปบ้างจำเป็นต้องคำนวณเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

2.3.2 อุปกรณ์วัดความเร่ง

เครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) คือเครื่องมือที่ใช้วัดความเร่งที่เกิดจากการสั่นของวัตถุ เครื่องมือวัดความเร่งนี้มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางในการวัดความสั่น รวมถึงการวัดค่าแผ่นดินไหว ด้วย เมื่อเราใช้เครื่องวัดความเร่งนี้วัดและบันทึกค่าความเร่งที่เกิดขึ้นได้แล้วเราสามารถหาค่าความเร็วและ การขจัดได้จากการหาปริพันธ์ของค่าที่วัดได้อันดับแรกในการวิเคราะห์เราจะหาอนุพันธ์ของสมการ (2.3) ซึ่งสามารถเขียนได้รูป

$$-z(t)\omega^2{}_n = \frac{1}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2}}\{-Y\omega^2 \sin(\omega t - \phi)\} \tag{2.13}$$

ซึ่งถ้าเราออกแบบให้

$$\frac{1}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2}} \approx 1 \tag{2.14}$$

สมการจะมีรูปเป็น

$$-z(t)\omega^2{}_n \approx -Y\omega^2 \sin(\omega t - \phi) \tag{2.15}$$

เมื่อเราเทียบค่าสมการ (2.15) กับ $y = Y \sin \omega t$ หรือ $\ddot{y} = -\omega^2 Y \sin \omega t$ เราจะได้ว่าค่า $z(t)\omega_n^2$ นี้จะเป็นค่าของความเร่งของฐาน ยกเว้นว่าจะเกิดความแตกต่างของเฟส ϕ ดังนั้นอุปกรณ์นี้จะเป็นการบันทึกค่าโดยตรงของความเร่ง $\ddot{y} = z(t)\omega_n^2$ ในขณะที่เวลาในการบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

72224

ความเร่งจะเป็น $t' = \frac{\phi}{\omega}$ และโดยทั่วไปถ้าหากว่า y นี้เป็นการเคลื่อนที่ภายใต้ฮาร์โมนิกส์เดียว ค่าการแตกต่างของเพสจะไม่เป็นเรื่องสำคัญสำหรับการวัด

จากสมการ (2.14) การที่จะให้ ω_n มีค่ามากมากมวล m จะต้องมีค่าน้อยและ k มีค่ามาก หรือสปริงจะมีขนาดสั้น และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ขนาดของเครื่องมือมีขนาดเล็ก การที่มีขนาดเล็กทำให้อุปกรณ์ประเภทนี้เป็นที่นิยมในการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง อย่าวไรก็ตามในทางปฏิบัติเราอาจไม่สามารถทำให้สมการ (2.14) นี้เป็นจริงอย่างแท้จริงนั่นคือด้านซ้ายของสมการอาจไม่เท่ากับ 1 พอดี และทำให้ด้านซ้ายมือของสมการ (2.14) คือ

$$\frac{1}{[(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2]^{1/2}}$$

อาจจะต้องมีการปรับค่าและคำนวณใหม่ให้ถูกต้องเพื่อที่จะได้วัดค่าความเร่งของระบบที่ต้องการวัดได้อย่างถูกต้อง

2.3.2.1 ความเป็นเร่งเชิงเส้น (LINEAR ACCELEROMETER)

อาศัยหลักการของนิวตันจะได้สมการคือ

$$F = m \times a \Longrightarrow a = \frac{F}{m}$$

แสดงว่าตัวเซ็นเซอร์วัดความเร่งสามารถจะทำเป็นทรานสดิวเซอร์ของแรงภายใต้ความเร่งมวลที่เกิดการสันไหว m ที่ถูกทำบนผลึกคริสตัลและประจุที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเร่ง นี่คือหลักการของการอัดตัวของทรานสดิวเซอร์

2.3.2.2 การออกแบบที่แตกต่างกันที่ต้องพิจารณา

ตัวเซ็นเซอร์วัดความเร่งใช้กับโครงสร้างที่มี 1 แกนหรือ 3 เพื่อวัดส่วนประกอบที่มีความเร่งพร้อมกันในระบบพิกัดฉากเซ็นเซอร์เปียโซอิเล็กทริกเป็นทั้งระบบที่มีอิมพิแดนซ์สูงกับเอาท์พุทที่มีสัญญาณประจุและระบบที่มีอิมพิแดนซ์ต่ำ ซึ่งจะมีตัวเปลี่ยนสัญญาณประจุเป็นสัญญาณแรงดันอยู่ภายใน การออกแบบระบบที่มีอิมพิแดนซ์ต่ำมีข้อดีคือเมื่อทรานสดิวเซอร์ถูกใช้ในการวัดที่มีย่านคงที่ตัวอย่างเช่นการมอนิเตอร์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรในห้องทดลองที่มีย่านการเคลื่อนที่สูงๆ ของประจุที่ใช้บ่อยๆ น่าจะถูกเลือกใช้เพราะการวัดในย่านนี้สะดวกที่จะเลือกการขยายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวของเซ็นเซอร์กับมวลที่มีการสั่นไหว

ความไวของหัวเซอร์วัดความเร่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับมวลที่มีการสั่นไหวที่มากขึ้นของเซ็นเซอร์เป็นพฤติกรรมของมวล ไม่สามารถยอมรับได้กับการใช้งานทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการวัดโครงสร้างที่เบาการเพิ่มขึ้นของมวลจะมีความสัมพันธ์กับเซ็นเซอร์ที่หนักขึ้นซึ่งจะทำให้มันเปลี่ยนคุณสมบัติทางไดนามิกส์ของโครงสร้างที่พิจารณาการเพิ่มขึ้นของมวล จะทำให้ความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนและคุณสมบัติในการแดมปิ้ง (Dampling) เปลี่ยนไปด้วยรูปแบบทางคณิต-ศาสตร์ที่ค่อนข้างจะยุ่งยากจึงทำให้เกิดการลดมวลโครงสร้างของเซ็นเซอร์ที่เพิ่มขึ้นลง ความยุ่งยากที่สำคัญคือการเพิ่มมวลจะทำให้เกิดโหลดที่คงที่และไม่เป็นการกระจายโหลดให้ทั่วโครง สร้างการวัดพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของโครงสร้างที่เบาตัวเซ็นเซอร์จำเป็นต้องมีความแม่นยำและมีความไวสูงในการใช้งานกับโครงสร้างที่มีการสั่นเพียงเล็กน้อยและระยะการเคลื่อนที่น้อยดังนั้นความเร่งที่ได้ก็ต้องน้อยด้วย

2.3.3 Velometer

Velemeter คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วของวัตถุที่เกิดการสั่น จากสมการ (2.3) เราจะได้ความเร็วของวัตถุเป็น

$$\dot{y}(t) = \omega Y \cos \omega t \tag{2.16}$$

และจากสมการ (2.14) จะได้ว่า

$$\dot{z}(t) = \frac{r^2 \omega Y}{[(1-r^2)+(2\zeta r)^2]^{1/2}} \cos(\omega t - \phi) \tag{2.17}$$

ถ้าเรากำหนดให้

$$\frac{r^2}{[(1-r)^2+(2\zeta r)^2]^{1/2}} \approx 1 \tag{2.18}$$

เราจะได้

$$\dot{z}(t) \approx \omega Y \cos(\omega t - \phi) \tag{2.19}$$

ถ้าหากว่าสมการ (2.18) เป็นจริง เปรียบเทียบสมการ (2.19) กับสมการ (2.16) เราจะพบว่า

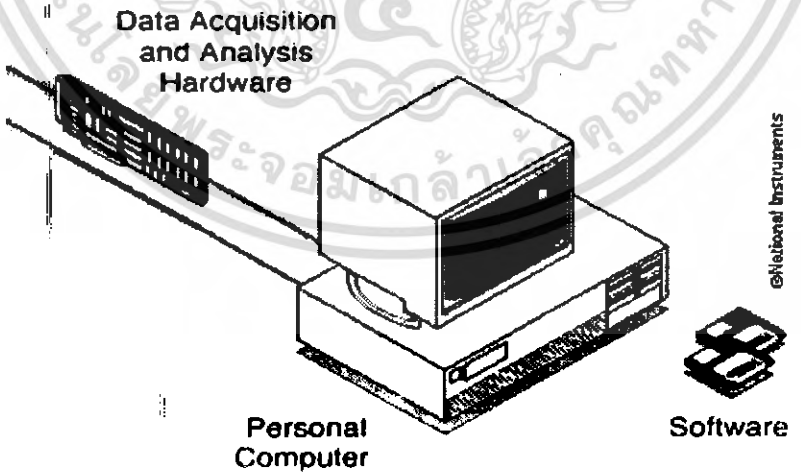
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\dot{z}(t)$ จะเป็นความเร็วของฐานที่เราต้องการทราบค่า ยกเว้นแต่อาจจะมีความแตกต่างของมุมเพส ϕ อยู่ในการที่จะให้สมการ (2.18) เป็นจริง ค่าอัตราส่วนความถี่ r จะต้องมีค่ามาก ถ้าหากสมการ (2.18) ไม่เป็นจริง เราจะต้องหาความเร็วของวัตถุที่เราต้องการวัดโดยการใช้สมการ (2.17)

2.4 ความรู้พื้นดาต้าแอกควิซิชัน

2.4.1 ดาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition:DAQ)

ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวัด รวบรวม บันทึก วิเคราะห์สัญญาณ และแสดงผลแบบครบวงจร หรือที่ เรียกโดยรวมว่า ระบบ ดาต้า แอกควิซิชัน (Data Acquisition) หรือ DAQ เป็นการประยุกต์ใช้พอร์ตต่างๆ ของคอมพิวเตอร์ อาทิเช่น ISA, EISA, PCI, PIX, PCMCIA, USB, IEEE 1394 และพอร์ตขนาน/อนุกรม ตลอดจนพอร์ต NuBus ของแมคอินทอช เพื่ออินเตอร์เฟสกับอุปกรณ์ภายนอกที่ทำหน้าที่วัดสัญญาณและแปลงผลที่ได้เป็นดิจิตอลส่งไปวิเคราะห์และแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ระบบ DAQ มีหลายแบบ บ้างก็ทำเป็นการ์ดใช้เสียบเข้ากับสล็อตต่างๆ บนพีซี ทำหน้าที่รวบรวมและส่งข้อมูลเข้าไปในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์โดยตรง อีกแบบหนึ่งคือทำเป็นบอร์ด DAQ ต่อออกมาจากพีซีผ่านพอร์ตขนานหรือพอร์ตอนุกรม ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ DAQ จะมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆ ดังภาพที่ 2.10 ได้แก่ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC), ตัวแปลงสัญญาณ (Transducers), อุปกรณ์ปรับสัญญาณ (Signal Conditioning)
บอร์ด DAQ และซอฟต์แวร์



ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ DAQ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

คอมพิวเตอร์ถือเป็นหัวใจหลักของระบบ DAQ ประสิทธิภาพหรือความเร็วในการทำงานขึ้นอยู่กับขีด ความสามารถของซีพียูและพอร์ตที่ใช้ ปัจจุบันซีพียูรุ่นต่ำๆก็เป็นแพนเทียม (PenTium) หรือ เพาเวอร์พีซี (PowerPC) ทำงานร่วมกับพอร์ตความเร็วสูงอย่าง PCI, PXI และ IEEE 1394 หรือพอร์ตมาตรฐานดั้งเดิม อย่าง ISA/EISA หรือ NUBus ของเครื่องแมคอินทอช ระบบ DAQ แบบพกพาจะใช้คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊คและพอร์ต PCMCIA สำหรับการวัดและวิเคราะห์สัญญาณระยะไกลเราสามารถใช้พอร์ต RS232 หรือ RS485 ซึ่งเป็นมาตรฐานในการสื่อสารข้อมูลระยะไกลแบบอนุกรมแต่มีข้อจำกัดในด้านความเร็วของการรับส่งข้อมูลความเร็วในการรับส่งข้อมูลขอคอม-พิวเตอร์มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ DAQ การรับส่งข้อมูลผ่าน พอร์ต I/O ที่กำหนดไว้หรือโดยการอินเตอร์รัปต์ (interrupt transfer) ใช้ได้กับพีซีทั่วไป ส่วนการรับส่งข้อมูลอีกแบบหนึ่งเรียกว่า DAM เป็นการใช้วงจรพิเศษ ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลผ่านหน่วยความจำโดยตรง (direct memory) แต่ใช้ได้กับพีซีบางรุ่นเท่านั้น เป็นวิธีที่ช่วยแบ่งเบาภาระของซีพียู โดยแยกหน้าที่การรับส่งข้อมูลออกไป ทำให้ซีพียูมีเวลาทำงานอย่างอื่นที่ซับซ้อนกว่าได้

2.4.3 ตัวแปลงสัญญาณ

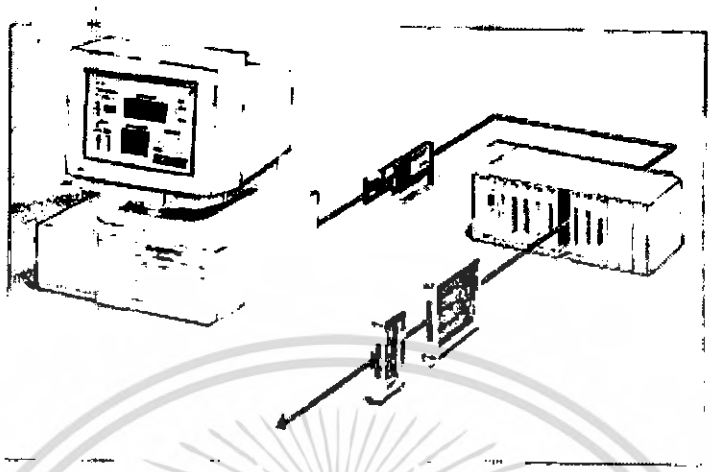
ตัวแปลงสัญญาณหรือทรานสดิวเซอร์ ทำหน้าที่แปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุที่ต้องการวัดให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยระดับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามคุณสมบัติที่ต้องการวัดดังกล่าว ตัวอย่างตัวแปลงสัญญาณต่างๆ เช่น แผ่นวัดอุณหภูมิ (thermocouple) ตัววัดอุณหภูมิด้วยค่าความต้านทาน (resistance temperature detector RTD) ตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ (thermistor) และเซนเซอร์ อื่นๆ ซึ่งจะเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นสัญญาณไฟฟ้า (อนาลอก) และส่งผลไปยังวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็น ดิจิตอล หรือวงจร ADC (analog to digital converter) บนบอร์ด DAQ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลอีกทีหนึ่ง ตัวแปลงสัญญาณอื่นๆ เช่น มาตรวัดความเครียดบนวัตถุ มาตรวัดการไหลของของเหลว และมาตรวัด ความดัน เป็นต้น

2.4.4 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ

สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณอาจไม่เหมาะที่จะส่งเข้าบอร์ด DAQ ได้ทันที อุปกรณ์ปรับสภาพ สัญญาณจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการปรับสัญญาณไฟฟ้าที่ว่านี้ โดยสัญญาณต่ำจะถูกขยาย และกรองเอา สัญญาณรบกวนออกไปเสียก่อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ นอกจากนี้อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณยังทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันหรือกระแสภายนอกให้กับตัวแปลงสัญญาณบางชนิดซึ่งต้องใช้ การกระตุ้นจากภายนอกเพื่อให้เกิดเอาท์พุต เรียกว่า การทำเอกไซเตชัน (excitation) จากภาพที่ 2.11 เป็น ตัวอย่างโครงสร้างของระบบ DAQ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณรุ่น SCXI จากบริษัท เนชันแนล อินสทรูเมนต์ (National Instument, NI)



ภาพที่ 2.11 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ SCXI ต่อกับบอร์ด DAQ

เราสามารถแบ่งหน้าที่ของอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณออกเป็นดังต่อไปนี้

2.4.4.1 การขยายสัญญาณ (amplification)

สัญญาณอ่อนๆ จากแผ่นวัดอุณหภูมิจะถูกขยายพร้อมกับกำจัดสัญญาณรบกวนออกไป เพื่อให้ผลการวัดถูกต้องที่สุด แรงดันสูงสุดของสัญญาณที่ผ่านการขยายแล้วควรมีค่าเท่ากับระดับอินพุตสูงสุดของวงจร ADC (วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล)

2.4.4.2 การแยกวงจร (isolation)

เป็นการแยกสัญญาณไฟฟ้าของตัวแปลงสัญญาณออกจากพีซี ด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัย เพราะสัญญาณไฟฟ้าที่วัดอาจมีแรงดันสูงมากจนทำให้พีซีเสียหายได้อีกเหตุผลหนึ่งเพื่อลดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ต่างชนิดกัน เมื่ออินพุตของบอร์ด DAQ และสัญญาณที่วัดใช้กราวด์คนละชนิดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นทำให้มีกระแสไหลวนระหว่างกราวด์ (ground loop) ทำให้สัญญาณที่วัดเกิดความ ผิดพลาด หรือถ้าเป็นกระแสแรงสูงอาจ ทำให้บอร์ด DAQ เสียหายได้

2.4.4.3 การรวมสัญญาณ (multiplexing)

เป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถวัดสัญญาณหลายๆ ช่องพร้อมกัน โดยทั่วไปอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ รวมสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงต่อเนื่องอย่างช้าๆ หลายช่องเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.4 การกรองสัญญาณ (filtering)

มีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ออกจากสัญญาณที่เราต้องการวัด การวัดสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสัญญาณตรง (DC) เช่น อุณหภูมิ จำเป็นต้องกรองเอาสัญญาณความถี่สูงที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนออกเสียก่อน โดยใช้ฟิลเตอร์ในขณะเดียวกันสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสัญญาณสลับ (AC) เช่น ความสั่นสะเทือนจะใช้ตัวกรองสัญญาณอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า แอนตีอะไลชิง ฟิลเตอร์ (antialiasing filter) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนแบบแรกคือ ยอมให้เฉพาะความถี่ต่ำผ่านเท่านั้นแต่มีการตัดสัญญาณที่แม่นยำกว่า ดังนั้นจึงกำจัดสัญญาณความถี่สูงที่ไม่ต้องการได้เกือบทั้งหมด ทั้งนี้หากความถี่สูงสามารถเล็ดลอดเข้าไปในวงจรได้จะทำให้ผลการวัดเกิดความคลาดเคลื่อน

2.4.4.5 การกระตุ้นหรือเอกซ์ไซเตชัน (excitation)

จำเป็นสำหรับตัวแปลงสัญญาณบางชนิด เช่น มาตรวัดความเครียดบนวัตถุ (strain-gauge) เทอร์ มิสเตอร์ และ RTD เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสสีฟ (passive-element) จึงต้องใช้แรงดัน หรือกระแสจากภายนอกเพื่อสร้างเอาท์พุตที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การวัดค่า RTD นั้นต้องใช้แหล่งจ่ายกระแส ภายนอกป้อนเข้าสู่ตัว RTD เพื่อแปลงความต้านทานให้เป็นแรงดันที่สามารถวัดได้ หรือมาตรวัดความเครียด เป็นอุปกรณ์ที่มีความต้านทานต่ำมาก ในการใช้งานส่วนใหญ่จะต่อแบบวีตสโตนบริดจ์ (wheatstone- bridge) ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันภายนอกเป็นต้น

2.4.4.6 การปรับคุณสมบัติแบบเชิงเส้น (linearization)

มีความสำคัญในระบบ DAQ เนื่องจากตัวแปลงสัญญาณหลายชนิดมีคุณสมบัติการตอบสนองความเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากไดรเวอร์ซอฟแวร์หรือโปรแกรมต่างๆ เช่น NI-DAQ, LabVIEW, Measurement Studio และ VirtualBench ที่สามารถปรับค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มาตรวัด ความเครียดบนวัตถุ เทอร์มิสเตอร์ หรือ RTD ด้วยซอฟแวร์แล้วในทางด้านฮาร์ดแวร์เราอาจใช้อุปกรณ์ปรับ สภาพสัญญาณได้เช่นกัน

ในการวัดสัญญาณต่างๆ จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติโดยธรรมชาติของสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการวัดลักษณะและวิธีการวัดรวมทั้งผลข้างเคียงจากปัจจัยแวดล้อมซึ่งข้อมูลเหล่านี้ช่วยในการตัดสินใจว่าต้องใช้ อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณชนิดใดจึงเหมาะกับระบบ DAQ ที่ต้องการ

2.4.5 บอร์ด DAQ

หลังจากที่ค่าหรือปริมาณของสิ่งที่ต้องการวัดถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยทรานสดิเซอร์และปรับสภาพสัญญาณให้เหมาะสมแล้ว อุปกรณ์ตัวถัดไปในระบบ DAQ ที่เป็นตัวแปลงสัญญาณที่วัดได้ ซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอกไปเป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอลเพื่อประมวลผล วิเคราะห์หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บข้อมูลต่อไปนั้นก็คือ บอร์ด DAQ ซึ่งนับเป็นอุปกรณ์ส่วนที่สำคัญในระบบ DAQ ที่เป็นส่วนเชื่อมโยงโลกของอนาลอกและดิจิตอล เข้าด้วยกัน ส่วนประกอบต่างๆ ของบอร์ด DAQ ได้แก่

2.4.5.1 อนาลอกอินพุต

ข้อกำหนดในการทำงานหรือสเปกของอนาลอกอินพุตที่กำหนดไว้ จะบอกถึงคุณสมบัติความสามารถและความมีประสิทธิภาพของอุปกรณ์ DAQ คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาสำหรับอนาลอกอินพุตโดยทั่วไปได้แก่ จำนวนช่องสัญญาณที่วัดได้ อัตราการวัด ความละเอียด/แม่นยำในการวัด และช่วงอินพุตที่วัด ได้ มีรายละเอียดดังนี้

2.4.5.1.1 จำนวนช่องสัญญาณ (Number of channel)

ช่องวัดสัญญาณของอนาลอกอินพุตมี 2 แบบ คือแบบกราวด์ร่วม (singleended-inputs) และแยกกราวด์กัน (differential inputs) อินพุตแบบกราวด์ร่วมจะใช้กราวด์อ้างอิงร่วมกัน อินพุตแบบนี้โดยทั่วไปใช้ในกรณีที่สัญญาณอินพุตมีขนาดใหญ่ (สูงกว่า 1 โวลต์) แหล่งกำเนิดสัญญาณกับอินพุตอยู่ใกล้กัน (ไม่เกิน 15 ฟุต) และสัญญาณอินพุตทั้งหมดมีกราวด์ร่วมกัน แต่ถ้าสัญญาณอินพุตไม่เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้นจะต้องใช้ ช่องสัญญาณอินพุตแบบแยกกราวด์ ซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนได้มากกว่า

2.4.5.1.2 อัตราการสุ่มค่าสัญญาณ (sampling rate)

เป็นคุณสมบัติที่บอกว่าระบบ DAQ นี้สามารถแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลได้เร็วเพียงใด อัตราการสุ่มค่าสัญญาณที่สูงกว่าหมายถึงจำนวนค่าที่เก็บได้มากกว่าในเวลาที่เท่ากัน ซึ่งทำให้ข้อมูลดิจิตอลที่ได้ ใช้แทนสัญญาณดั้งเดิมแบบอะนาลอกได้ดีกว่ายกตัวอย่างเช่น ไมโครโฟนที่ทำหน้าที่แปลงเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าความถี่ประมาณ20 กิโลเฮิรตซ์ ถ้าจะนำสัญญาณนี้มา วิเคราะห์จะต้องทำการสุ่มค่าสัญญาณ ณ จุดต่างๆ เพื่อแปลงเป็นค่าดิจิตอลตามทฤษฎีการสุ่มค่าสัญญาณของไนควิสต์ (Nyquist) กล่าวไว้ว่า อัตราการสุ่มค่าสัญญาณจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของความถี่สัญญาณเสียงที่ต้องการแปลง ดังนั้นสัญญาณเสียงที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ จะต้องใช้อัตราการสุ่มค่าสัญญาณมากกว่า 40 กิโลแซมเปิลต่อวินาที (kS/s)

2.4.5.1.3 การรวมสัญญาณ หรือมัลติเพล็กซิง (multiplexing)

เป็นเทคนิคที่ช่วยให้วัดสัญญาณได้หลายๆ ช่องพร้อมกันโดยใช้วงจร ADC เพียงชุดเดียวโดยวงจร ADC จะทำการสุ่มค่าสัญญาณจากช่องที่หนึ่งแล้วเปลี่ยนไปสุ่มค่าสัญญาณช่องที่สอง ช่องที่สาม และช่องถัดๆ ไปจนครบทุกช่อง แล้วจึงย้อนกลับมาที่ช่องที่หนึ่งอีกครั้งเนื่องจากวงจร ADC มีการสุ่มค่าสัญญาณหลายๆ ช่องต่อเนื่องกันทำให้อัตราเร็วในการสุ่มค่าสัญญาณต่อช่องลดลง

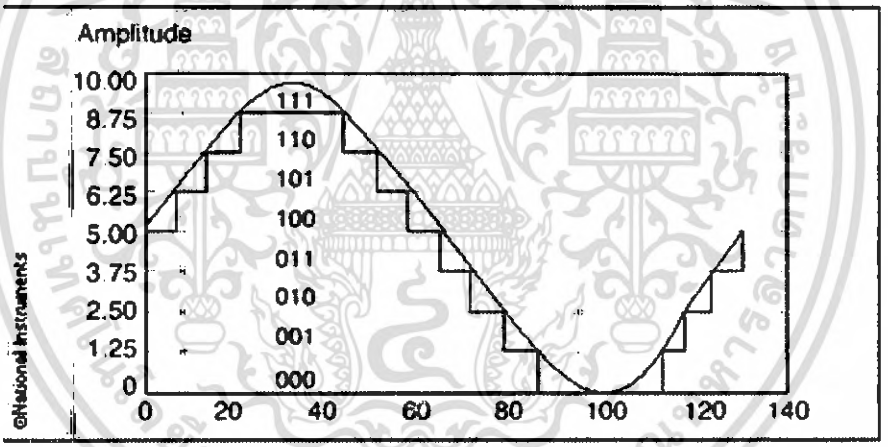
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปฏิภาคผกผันกับจำนวนช่องสัญญาณที่ เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น บอร์ดที่มีอัตราการสุ่มค่าสัญญาณเท่ากับ 1 เมกะแซมเปิลต่อวินาที (MS/s)

$$\frac{1MS/S}{10} = 100\text{kS/s}$$

2.4.5.1.4 ความละเอียด หรือเรโซรูชัน (resolution)

คือ จำนวนบิตของข้อมูลอดิจิตอลที่ใช้แทนค่าสัญญาณอนาลอกที่สุ่มวัด ยิ่งมีความละเอียดเท่าไรยิ่งทำให้สามารถตรวจจับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงได้ละเอียดขึ้นเท่านั้นภาพที่2.12 แสดงคลื่นรูปซายน์และข้อมูลดิจิตอลที่ได้จากการแปลงคลื่นรูปซายน์นี้โดยใช้วงจร ADC ขนาด 3 บิต ซึ่งสามารถแบ่งสัญญาณอะนาลอก ออกเป็น $2^3 = 8$ ระดับ เมื่อแปลงเป็นเลขฐานสองจะมีค่า ระหว่าง 000 ถึง 111 จากภาพเห็นได้ชัดว่าสัญญาณ ดิจิตอลที่ได้เป็นตัวแทนสัญญาณอนาลอกไม่ดีนัก แต่เมื่อความละเอียดเป็น 16 บิต จำนวนระดับที่แบ่งได้จะเพิ่มจาก 8 เป็น 65,536 ระดับ ทำให้สัญญาณดิจิตอลที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณอนาลอกเดิมอย่างมาก



ภาพที่ 2.12 แสดงการแปลงคลื่นซายน์เป็นดิจิตอลโดยใช้ความละเอียดขนาด 3 บิต

2.4.5.1.5 ช่วงสัญญาณ หรือเรนจ์ (range)

คือช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดของสัญญาณอะนาลอกที่วงจร ADC สามารถรับได้ ในการวัดสัญญาณจำเป็นที่จะต้องปรับช่วงสัญญาณของช่องวัดสัญญาณให้เหมาะสมกับสัญญาณที่วัด อย่างเช่น ในกรณีที่สัญญาณมีขนาดเล็กจะต้องปรับช่วงสัญญาณให้เล็กลงเพื่อเพิ่มความละเอียดของวงจร ADC ทำให้วิเคราะห์ สัญญาณได้ละเอียดมากขึ้น

2.4.5.1.6 ความกว้างของรหัส (codewidth)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานของวงจร ADC นั้นช่วงสัญญาณความละเอียด และอัตราขยายของวงจร ADC เป็นตัว แปรสำคัญ ซึ่งกำหนดระดับแรงดันต่ำสุดที่วงจร ADC สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงได้ ค่าต่ำสุดนี้เรียกว่า ความกว้างของรหัสมีค่าเท่ากับ 1 LSB (least significant bit) ความกว้างของรหัสตามทฤษฎีคำนวณได้จากค่าช่วงสัญญาณหารด้วยผลคูณของอัตราขยายกับ 2 ยกกำลังจำนวนบิตของความละเอียดตัวอย่างเช่น บอร์ด DAQ ที่มีความละเอียดเท่ากับ 16 บิต โดยเลือกช่วงสัญญาณ ระหว่าง 0 ถึง 10 โวลต์ และอัตราขยาย 100 เท่า ความกว้างของรหัสจะเท่ากับ

$$\frac{10}{100 \times 2^{16}} = 1.5\mu V$$

นั่นคือระดับแรงดันต่ำสุดของสัญญาณที่สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงได้ หรือระดับ 1 LSB มีค่า เท่ากับ 1.5 ไมโครโวลต์

แม้สเปกของบอร์ด DAQ จะระบุว่ามีความละเอียดเป็น 16 บิต มีอัตราการสุ่มค่าสัญญาณ 100 กิโล แซมเปิลต่อวินาทีก็ตาม แต่ในทางปฏิบัติเมื่อจำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น ความละเอียดในการวัดจะลดลง ตัวอย่างเช่น บอร์ด DAQ ตามสเปกระบุว่ามีขนาด 16 บิต แต่เวลาใช้งานจริงกลับใช้ได้เพียง 12 บิต เท่านั้น เมื่อมีการสุ่มค่าสัญญาณ 16 ช่องพร้อมกันการทำงานของวงจร ADC ตามทฤษฎี เมื่อแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นข้อมูลดิจิตอลที่แปลงออกมาจะเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ ถ้าหากนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสัญญาณอินพุตอนาลอกกับข้อมูลเอาท์พุตดิจิตอลควรจะได้กราฟเส้นตรงแต่ในทางปฏิบัติกราฟที่ได้มักไม่เป็นเส้นตรงค่าเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรงนี้เรียกว่า ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity)

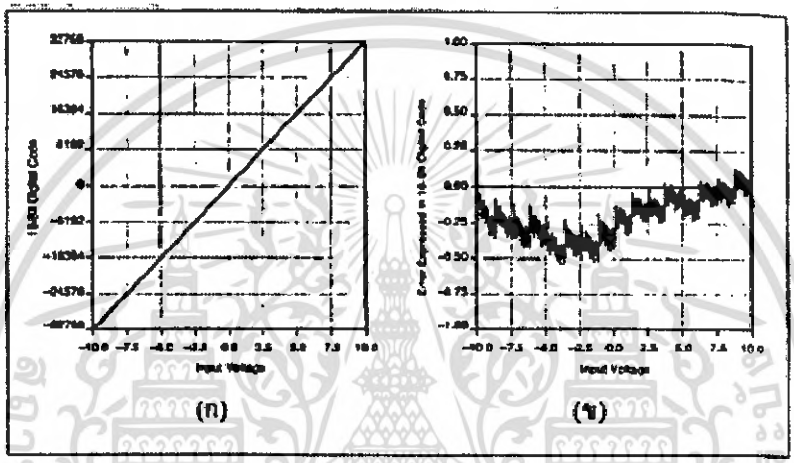
2.4.5.1.7 ความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากความผิดพลาด หรือ DNL (differential nonlinearity)

เป็นค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดของความกว้างของรหัสที่แตกต่างไปจากค่าตามทฤษฎี (1 LSB) ค่า DNL มีหน่วยเป็น LSB ในทางทฤษฎีบอร์ด DAQ ที่ดีที่สุด เท่ากับ 0 LSB แต่ในทางปฏิบัติบอร์ด DAQ ที่ดีจะมีค่า DNL ไม่เกิน 0.5 LSB สำหรับบอร์ดที่มีคุณภาพต่ำอาจมีค่า DNL มากจนทำให้ความกว้างของรหัส ณ แรงดันช่วงใดช่วงหนึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ ผลที่ตามมาก็คือวงจร ADC ไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในช่วงดังกล่าวได้ เราเรียกช่วงแรงดันดังกล่าวว่าช่วงที่รหัสหายไปหรือมิสซิงโค้ด (missing code) ตัวอย่างเช่น บอร์ด DAQ ที่มีความกว้างของรหัสเท่ากับ 1.5 ไมโครโวลต์ และมีมิสซิงโค้ดที่ระดับสัญญาณสูงกว่า 500 ไมโครโวลต์เล็กน้อย เมื่อแรงดันปรับขึ้นเป็น 502 ไมโครโวลต์ บอร์ด DAQ จึง ตรวจจับความเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ได้ จนกว่าจะเพิ่มแรงดันไปอีก 1 LSB นั่นคือมากกว่า 503 ไมโครโวลต์ ถึงจะมีการเปลี่ยนแปลงรหัสดิจิตอลที่ได้เป็นค่าใหม่ จากตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่า DNL เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความละเอียดของบอร์ด DAQ ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.1.8 ความแม่นยำสัมพัทธ์ (relative accuracy)

เป็นวิธีการวัดความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร ADC มีหน่วยเป็น LSB เช่นกันวิธีการวัดค่าความแม่นยำสัมพัทธ์เริ่มต้นโดยการป้อนแรงดันต่ำสุดเข้าไปในวงจร ADC แล้วอ่านค่าดิจิตอลที่ออกมา จากนั้นค่อยๆ เพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยจนถึงค่าสูงสุด เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตจะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงภาพที่ 2.13ก หาผลต่างระหว่างเส้นกราฟตามทฤษฎีกับกราฟที่ได้ในภาพที่ 2.13.ก จุดต่อจุด เมื่อนำผลต่างดังกล่าวมาเขียนกราฟจะได้กราฟดังภาพที่ 2.13ข เราเรียกความเบี่ยงเบนหรือผลต่างสูงสุดที่ได้จากกราฟว่า ความ แม่นยำสัมพัทธ์



รูปที่ 2.13 การวัดค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ของบอร์ด DAQ
(ก) กราฟเส้นตรงที่ได้จากการวัดเอาท์พุตเมื่อปรับอินพุตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
(ข) ผลต่างระหว่างกราฟเส้นตรงตามทฤษฎีและกราฟที่ได้จากการวัดจริง รูป ก

ในการวิเคราะห์สัญญาณซอฟต์แวร์ไดรเวอร์ของบอร์ด DAQ จะแปลงรหัสดิจิตอลที่ได้จากวงจร ADC กลับไปเป็นระดับแรงดันของสัญญาณอีกครั้ง โดยการคูณรหัสดิจิตอลนั้นด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จะ ถูกต้องเพียงใดขึ้นกับความแม่นยำสัมพัทธ์ของอะนาลอกอินพุตซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบวงจร ADC และ วงจรอะนาลอกอื่นๆ บนบอร์ด DAQ

2.4.5.1.9 ช่วงเวลาเข้าที่ หรือเซตตลิ้งไทม์ (settling time)

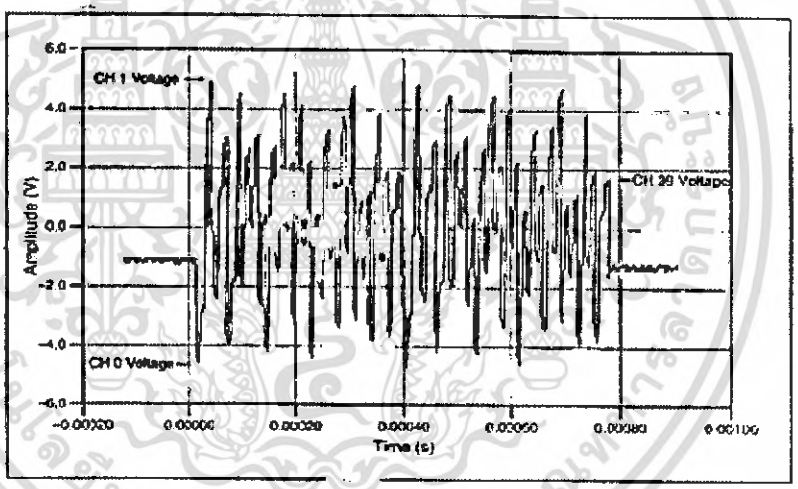
คือระยะเวลาก่อนที่วงจรขยายสัญญาณจะเริ่มทำงานได้อย่างถูกต้อง หลักการทำงานของบอร์ด DAQ เริ่มต้นจากวงจร ADC สุ่มค่าสัญญาณอนาลอกของแต่ละช่องสัญญาณส่งไปขยายขนาดด้วยวงจรขยายสัญญาณก่อนจะแปลงเป็นรหัสดิจิตอล การสุ่มค่าสัญญาณยิ่งเร็วเมื่อใช้วงจรขยายสัญญาณที่แยกแยะสัญญาณของแต่ละช่องได้เร็วเพื่อขยายสัญญาณได้อย่างถูกต้อง เราเรียกช่วงเวลาที่ใช้ระหว่างเปลี่ยนช่องสัญญาณดังกล่าวว่า ช่วงเวลาเข้าที่ ช่วงเวลาเข้าที่นี้ยิ่งสั้นยิ่งดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ายาวเกินไปอาจทำให้แปลงรหัสผิดพลาดได้ ความผิดพลาดเนื่องจากเวลาเข้าที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราขยายและอัตราการสุ่มค่าสัญญาณเพิ่มขึ้น และเนื่องจากความผิดพลาดนี้เกิดขึ้นในช่วงที่ยังเป็นสัญญาณอนาลอกอยู่ดังนั้นบอร์ด DAQ จึงไม่สามารถส่งสัญญาณไปบอก คอมพิวเตอร์ให้หยุดรอในระหว่างที่วงจรขยายยังไม่เข้าที่ได

2.4.5.1.10 สัญญาณรบกวน (noise)

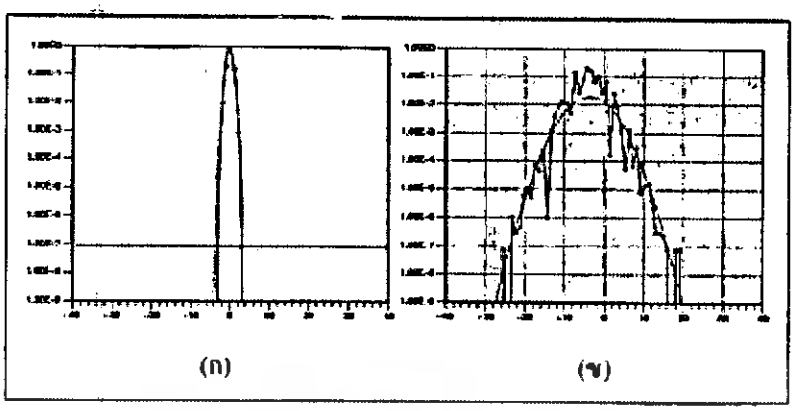
คือสัญญาณไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นระหว่างการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล เนื่องจากในคอมพิวเตอร์มีสัญญาณรบกวนมากมายดังนั้นการออกแบบบอร์ด DAQ จึงเน้นที่การสร้างความต้านทานต่อ สัญญาณรบกวนเหล่านี้ การจัดวางวงจรต่างๆ เช่นวงจรDC วงจรขยายและวงจรอินเตอร์เฟสอื่นๆ อยู่บนแผ่นวงจรที่มีลายทองแดงหลายชั้นและมีชีลด์ป้องกัน โดยทำเป็นแผ่นโลหะครอบวงจรอะนาลอกไว้เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ลายทองแดงขนาดใหญ่ที่เป็นกราวด์ของวงจรในแต่ละชั้นทำหน้าที่เป็นชีลด์อีกชั้นหนึ่ง



ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างอินพุตของวงจรขยายสัญญาณ เป็นสัญญาณที่ได้จากการรวมกันของสัญญาณไฟตรง (DC) 40 ช่อง ปรากฏเป็นลักษณะเหมือนญาณไฟสลับ (AC) ความถี่สูง

ภาพที่ 2.14 เป็นกราฟสัญญาณรบกวนในบอร์ด DAQ จาก 2 บริษัท โดยทั้งคู่ใช้วงจร ADC แบบเดียวกัน คุณภาพของบอร์ด DAQ ดูได้จากกราฟสัญญาณรบกวน ซึ่งประกอบด้วยระดับและลักษณะการกระจายของ สัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 กราฟสัญญาณรบกวนในบอร์ด DAQ
(ก) สัญญาณรบกวนมีการไม่กระจายตัว มีค่าสูงสุดไม่เกิน 3LSB
(ข) สัญญาณรบกวนกระจายไปทั่ว มีค่าสูงสุดมากกว่า 20LSB

2.4.5.2 อะนาลอกเอาท์พุต

อนาลอกเอาท์พุตบนบอร์ต DAQ ประกอบด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็น - อนาลอก หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า วงจร DAC (digital to analog converter) โดยคุณสมบัติของวงจร DAC ที่เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของสัญญาณเอาท์พุตได้แก่ ช่วงเวลาเข้าที่ (sampling rate) อัตราการสลูว์ (slew rate) และความละเอียด (resolution) ช่วงเวลาเข้าที่และอัตราการสลูว์จะใช้กำหนดอัตราเร็วที่แรงดันเอาท์พุตเปลี่ยนจากระดับหนึ่งไปเป็นอีกระดับหนึ่งโดยช่วงเวลาเข้าที่คือระยะเวลาที่เอาท์พุตจะให้ค่าที่ถูกต้อง ส่วนอัตราการสลูว์คืออัตราเร็วสูงสุดในการผลิตสัญญาณเอาท์พุตของวงจร DAC ดังนั้นวงจร DAC ที่สร้างเอาท์พุตความถี่สูงได้จะต้องมีช่วงเวลาเข้าที่สั้น และมีอัตราการสลูว์ที่สูง ยกตัวอย่างเช่นบอร์ด DAQ ที่ใช้สร้างออดิโอจะต้องใช้วงจร DAC ที่มีคุณสมบัติคือ มีอัตราการสลูว์สูงและช่วงเวลาเข้าที่สั้นจึงจะได้เสียงที่มีทั้งความถี่สูงและต่ำครอบคลุมช่วงความถี่เสียงทั้งหมด การใช้งานบางอย่างที่ไม่ต้องการความเร็วสูง เช่น วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าในเครื่องทำความร้อนเพราะเครื่องทำความร้อนไม่สามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่รวดเร็วได้ จึงไม่จำเป็นต้องใช้วงจร DAC ที่มีอัตราเร็วสูง มาก

2.4.5.3 สัญญาณทริกเกอร์

การประยุกต์ใช้ระบบ DAQ บางครั้งอาจมีการรับคำสั่งเริ่มหรือหยุดทำงานจากอุปกรณ์ภายนอกในระบบดิจิตอลเราใช้วงจรทริกเกอร์ (trigger)ทำหน้าที่ควบคุมการบันทึกสัญญาณและภารจ่ายแรงดันให้สอดคล้องกับสัญญาณกระตุ้จากภายนอก ส่วนระบบอนาลอกนั้นการสั่งเริ่มและหยุดทำงานจะใช้ระดับของสัญญาณอินพุตที่กำหนดไว้เป็นตัวอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.4 การทำงานแบบเรียลไทม์

บริษัท เนชันแนล อินสทรูเมนต์ ได้พัฒนาระบบรับส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ หรือ RTSI (real-time integration) สำหรับบอร์ด DAQ ขึ้นโดยการรับส่งข้อมูลแบบ RTSI นี้ทำงานโดยอาศัยเกต (gate) หลายๆ ตัวเรียงเป็นแถวเรียกว่า เกตอาร์เรย์ (gate array) และสายริบบอนเคเบิล (ribbon cable) เพื่อส่งสัญญาณควบคุมเวลาและสัญญาณทริกเกอร์ระหว่างวงจรต่างๆ บนบอร์ด DAQ เดียวกันหรือต่างบอร์ดกัน ระบบ RTSI ทำให้วงจรต่างๆ เช่นวงจร ADC, วงจร DAC, ดิจิตอลอินพุท, ดิจิตอลเอาต์พุต และเคาเตอร์/ไทม์เมอร์ทำงานได้สอดคล้องกันตัวอย่างเช่น ขณะที่อินพุตกำลังรับสัญญาณพร้อมๆ กัน 2 ช่อง เอาต์พุตก็สร้างสัญญาณเอาต์พุตที่สอดคล้องกับอัตราการสุ่ม ค่าสัญญาณอินพุตตามไปด้วย

2.4.5.5 ดิจิตอลอินพุต และดิจิตอลเอาต์พุต

เราใช้พอร์ต DIO (digital input/output) สำหรับควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ สร้างสัญญาณ เพื่อทดสอบ (test pattern) และติดต่อกับอุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ เราไม่ต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงนักเพราะอุปกรณ์เหล่านี้ตอบสนองการสั่งงานได้ช้าอยู่แล้ว ส่วนจำนวนพอร์ตนั้นต้องมีเพียงพอกับการใช้งานและประการสุดท้ายคือ รู้ว่าขับเคลื่อนอุปกรณ์ไฟฟ้าอะไร ใช้แรงดันและกระแสเท่าไร และบอร์ด DAQ สามารถจ่ายกระแสได้เท่าไร เป็นต้น

หน้าที่โดยทั่วไปของพอร์ต DIO คือการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่อง บันทึกข้อมูล, ตัวประมวลผล และเครื่องพิมพ์เป็นต้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้รับส่งข้อมูลทีละ 1 ไบท์ หรือ เท่ากับ 8 บิต ดังนั้นพอร์ต DIO บนบอร์ด DAQ จึงถูกแบ่งออกเป็นชุดๆ ละ 8 ช่อง

2.4.5.6 วงจรควบคุมเวลา

วงจรนับจำนวนหรือเคาเตอร์ (counter) และวงจรตั้งเวลาไทเมอร์ (timer) มีประโยชน์หลายอย่างอาทิ เช่น ใช้นับเหตุการณ์ทางดิจิตอล, ใช้สร้างสัญญาณเวลาในลักษณะคลื่นรูปสี่เหลี่ยมและพัลส์ต่างๆ เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานทั้งหลายทั้งปวงจะใช้สัญญาณเคาเตอร์/ไทเมอร์ อยู่ 3 แบบเท่านั้นได้แก่

2.4.5.6.1 เกต (gate) เป็นดิจิตอลอินพุตที่ใช้ในการปิด-เปิดวงจรเคาเตอร์

2.4.5.6.2 ซอร์ส (source) เป็นดิจิตอลอินพุตอีกชนิดหนึ่ง ทุกครั้งที่วงจรเคาเตอร์ได้รับสัญญาณนี้จะนับ เพิ่มขึ้น/ลดลงไปหนึ่งจำนวน

2.4.5.6.3 เอาท์พุต (output) ทำหน้าที่สร้างคลื่นรูปสี่เหลี่ยมและพัลส์ต่างๆ ข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดในการทำงานที่สำคัญของวงจรเคาเตอร์/ไทเมอร์ก็คือความละเอียดและความถี่ความละเอียดคือจำนวนบิตที่วงจรเคาเตอร์ใช้นับจำนวนความละเอียดยิ่งสูงเท่าไรวงจรเคาเตอร์ยิ่งนับจำนวนได้มากขึ้นเท่านั้น ส่วนความถี่เป็นตัวกำหนดความเร็วในการทำงานของเคาเตอร์ เมื่อความถี่สูงขึ้นเคาเตอร์จะนับได้เร็วขึ้นทำให้รับสัญญาณที่มีความถี่สูงได้มากขึ้น และสร้างพัลส์หรือคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่สูงได้มากขึ้นเช่นกัน

2.4.6 ซอฟแวร์

ซอฟแวร์ถือเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้ส่วนประกอบต่างๆ ทำงานรวมกันเป็นระบบ DAQ ที่สมบรูณ์ บอร์ด DAQ จะทำงานไม่ได้หากปราศจากซอฟแวร์ที่ดี ซอฟแวร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ไดรเวอร์และแอพพลิเคชัน ซอฟแวร์

2.4.6.1 ไดรเวอร์ (driver)

เป็นซอฟแวร์ที่ใช้ควบคุมและเข้าถึงการทำงานของฮาร์ดแวร์โดยตรงในระดับรีส-สเตอร์ควบคุมการทำงานของฮาร์ดแวร์ เป็นตัวเชื่อมต่อการทำงานระหว่างบอร์ด DAQ กับส่วนต่างๆ ของคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานสามารถติดต่อหรือควบคุมฮาร์แวร์ของบอร์ด DAQได้โดยไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดการทำงานที่ซับซ้อนของบอร์ด DAQ เพียงแค่รู้คำสั่งที่ใช้กับไดรเวอร์นั้นๆ ก็พอซึ่งทำความเข้าใจได้ไม่ยาก เนื่องจากไดร เวอร์จะจัดการงานที่เหลือให้เอง

2.4.6.2 แอพพลิเคชันซอฟแวร์ (application software)

เป็นซอฟแวร์อีกส่วนหนึ่งที่ใช้ควบคุมการทำงานของบอร์ด DAQ ผ่านไดรเวอร์ต่างๆ ทำหน้าที่ในส่วนของการวิเคราะห์สัญญาณ การแสดงผลและการควบคุมบอร์ด DAQ ผ่านพอร์ตต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและหลักการทำงาน

3.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์วัดสัญญาณ

การวัดคลื่นจากการสั่นสะเทือนนั้นสามารถแบ่งการวัดได้เป็นสองแบบ คือการวัดรวมและวัดวิเคราะห์ค่าที่ความถี่ต่างๆ กัน ตัวอย่างการวัดการสั่นสะเทือนแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ อย่างแรกการสั่นสะเทือนไม่ต่อเนื่องจะเกิดชั่วขณะ เช่น เกิดแผ่นดินไหวใช้เครื่องมือ Siesmograph จะต้องทำการวัดอยู่ตลอดเวลาเพื่อสังเกตและตรวจสอบการเกิดแผ่นดินไหว อย่างที่สองเป็นการสั่นสะเทือนต่อเนื่องสม่ำเสมอได้แก่ การสั่นของเครื่องจักรต่างๆ สามารถวัดเพื่อดูค่าระดับเมื่อใดก็ได้ เครื่องมือที่ใช้ในการคือ Vibration meter หรือ Accelerometer

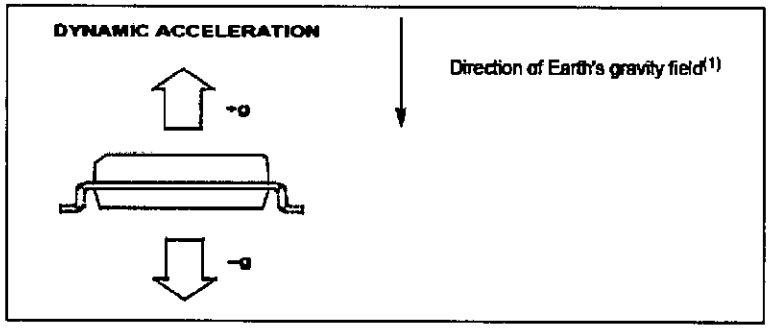
ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงการวัดการสั่นสะเทือนแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นการวัดเพื่อบอกถึงระดับการสั่นสะเทือนของตัวอย่างที่นำมาวัดคือ การเคลื่อนที่ของรถไฟแต่ละประเภท เช่น รถไฟดีเซลราง รถไฟสปีนเตอร์ และรถไฟธรรมดา โดยใช้ตัวหยั่งสัญญาณความเร่งเป็นตัวตรวจจับสัญญาณ ผ่านการ์ดดาต้าแอกควิซิชัน (DAQ) เพื่อทำการอินต่อเฟสผ่านพอร์ต USB 2.0 ส่งไปวิเคราะห์และแสดงผล บนจอคอมพิวเตอร์

การวัดการเคลื่อนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนนั้นสามารถนำไปใช้งานได้นั้นจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลเอาไว้และนำมาเปรียบเทียบได้ เพื่อจะพิจารณาถึงความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การศึกษาวิจัย หรือการพัฒนาในขั้นต่อไป

3.2 หลักการทำงานทั่วไป

โครงงานนี้เป็นการวัดคลื่นจากการสั่นสะเทือนของผลึกเปียโซอิเล็กทริกแบบ 1 แกน กล่าวคือ เป็นอุปกรณ์หยั่งสัญญาณความเร่ง โดยเป็นตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งสามารถวัดค่าได้ในหน่วย g (gravity :1g = 9.80665 m/s^2) มีช่วงการวัด $\pm 5g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 แสดงทิศทางที่เซ็นเซอร์สามารถวัดได้

เมื่อเซ็นเซอร์ Accelerometer ได้รับแรงกระทำหรือมีแรงกดต่อตัวเซ็นเซอร์ก็ให้ค่าประจุออกมามากน้อยขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำในทิศทางขึ้นลง ประจุที่ได้จะผ่านวงจรเพื่อให้แปลงเป็นโวลเตจออกมา โวลเตจที่ได้นี้จะมี ค่าอยู่ในช่วง 1-5 V ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ 5 โวล หลังจากนั้นจะส่งผ่านไปให้ดาต้าแอกควิซิชันการ์ด (DAQ card) เพื่อทำการแปลงสัญญาณจากอานาลอกเป็นดิจิตอลและทำการส่งข้อมูลผ่านพอร์ต USB 2.0 ไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการโปรแกรมโดยคอมพิวเตอร์รับค่าข้อมูลนั้นและนำค่ามาประมวลผลสัญญาณและทำการเก็บข้อมูลและการเปรียบเทียบข้อมูล

สาเหตุที่เลือกใช้การส่งข้อมูลผ่านพอร์ต USB 2.0 เพราะว่าในการนำเครื่องวัดการสั่นสะเทือนไปใช้ในงานจริงในภาคสนาม จำเป็นจะต้องใช้คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค ที่มีการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ผ่านพอร์ต USB 2.0

3.2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์วัดสัญญาณจากการสั่นสะเทือน

3.2.1.1 อุปกรณ์หยั่งสัญญาณความเร่ง (Acceleration Sensor)

Acceleration Sensor ที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Micromachined Accelerometer รุ่น MMA1250D $\pm 5g$ ลักษณะเป็น ชิปขนาด 16 พิน ขนาดเล็กกระทัดรัด สามารถวัดได้พร้อมกัน 1 แกน ซึ่งมีความสำคัญในการวัดการสันสะเทือน และการเปลี่ยนแปลงทางกล เป็น Acceleration sensor ที่มีความไวสูงและมีการขยายประจุภายในเอาท์พุต แบบอิมพิแดนซ์ต่ำเหมาะสำหรับการนำไปวัดและวิเคราะห์สัญญาณ เพราะมีความไวสูงถึง 400 mV/g ทั้งที่มีขนาดเล็ก วิธีการติดตั้งตัว Acceleration Sensor สามารถติดกับวัตถุที่ต้องการวัดได้โดยตรง

หน่วยในการวัดค่าความสั่นสะเทือนคือค่า g (gravity)

$$1g = 9.80665\ m/s^2$$

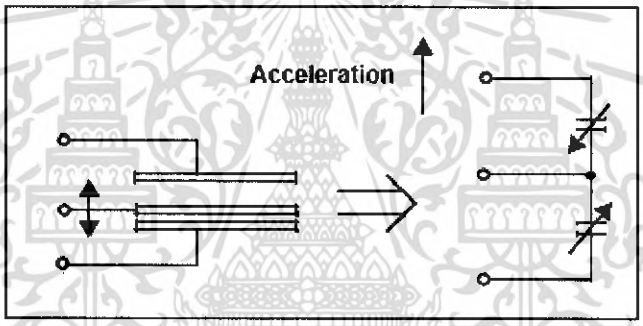
หรือ $1\ ms^{-2} = 0.1019\ g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

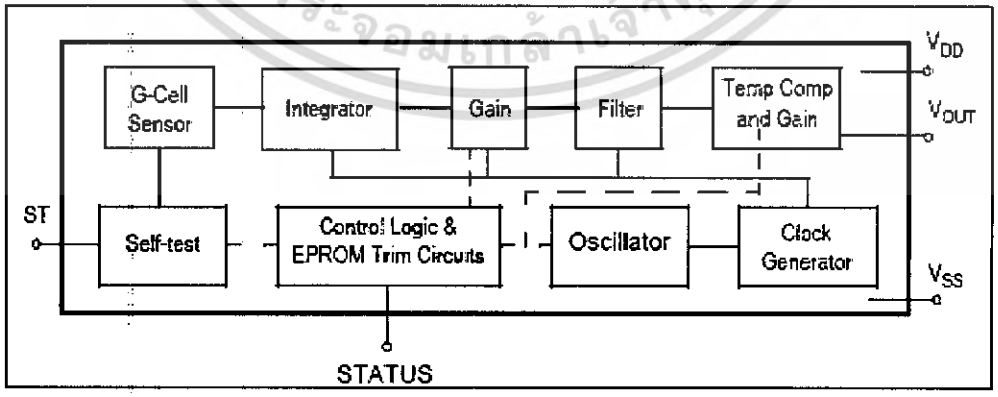
3.2.1.1.1 การทำงาน ลักษณะของตัวเซ็นเซอร์

แรงสั่นสะเทือนที่ถูกทำให้เกิดขึ้น ในแนวตั้งฉากกับ Accelerometer ที่ตั้งอยู่กับฐานนั้นจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณประจุ ที่เป็นสัดส่วนกันโดยวัสดุที่เป็นแผ่นสำหรับตรวจจับ และสัญญาณประจุนี้จะถูกเปลี่ยนแปลงภายในให้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก Micromachined Accelerometer รุ่น MMA1250D มีน้ำหนักเบา โครงสร้างเล็ก ความไวสูง จึงเหมาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์และ ทดสอบในโครงสร้างทางกล

ตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง Micromachined Accelerometer รุ่น MMA1250D เป็นตัวเซ็นเซอร์ขนาดเล็กที่มีแผ่น ซิลิคอล คาปาซิทีฟ ขนาดกันที่จะเป็นผลให้เซ็นเซอร์สามารถตอบสนองต่อความเร่งแบบคงที่ (DC) ได้ซึ่งหมายถึงสามารถวัดค่าความเร่งต่ำหรือวัดการเคลื่อนที่ได้ดี และทนการกระแทกได้สูง และมีวงจรกรองสัญญาณ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระบบสามารถชดเชยอุณหภูมิ ปรับ zero offset ภายในตัว ดังภาพที่ 3.2 และ ภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของตัวแปลงสัญญาณและแบบจำลองวงจรสมูลภายในตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง



ภาพที่ 3.3 บล็อคไดอะแกรมฟังก์ชันการทำงานของตัวหยั่งสัญญาณ MMA1205D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโดยทั่วไป

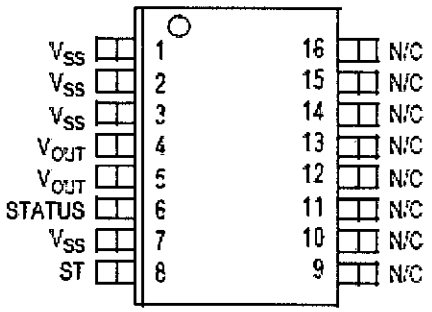
- น้ำหนักเบา
- ความไวสูง
- ให้ค่าถูกต้อง
- ความไวต่อความเค้นที่ฐานต่ำ
- ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

ภาพที่ 3.4 Micromachined Accelerometer และการต่อใช้ร่วมกับ PCB

3.2.1.1.2 การติดตั้ง

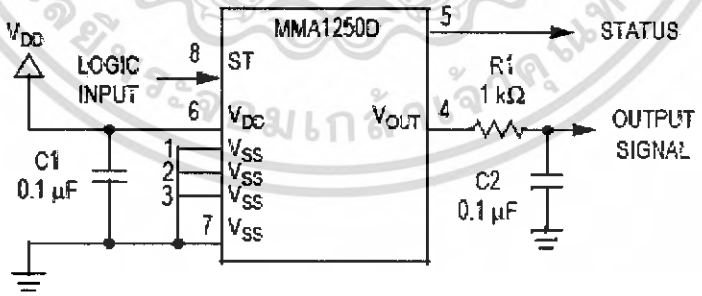
การติดตั้ง ตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง Micromachined Accelerometer รุ่น MMA1250D นั้นจะติดตั้งบนวัสดุที่เป็นเหล็กก็คือ รางรถไฟ โดยจะอยู่ระหว่างหมอนรองรางรถไฟ ซึ่งจะเป็นจุดที่สามารถเกิดการสั่นได้ดี ค่าที่วัดได้อาจจะได้รับผลกระทบจากผิวที่ทำการวัดที่ขรุขระ ดังนั้นในการติดตั้งจึงต้องมีการตรวจเช็คโดยดูผลหลายๆ ครั้ง โดยรับแรงกระทำสภาวะเหมือนกัน จนออกมาใกล้เคียงกัน ควรใช้กับผิวที่แบนราบที่สุดในจุดที่ติดกับรางรถไฟ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ยึดติดก็คือ กาวสองหน้าชนิดบางหรือ อาจจะเป็นกาว อีพ๊อกซี่ (epoxy) และระวัง Micromachined Accelerometer หล่นลงมาได้ เพราะจะทำให้ค่าที่วัดออกมาผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pin Descriptions

Pin No.	Pin Name	Description
1 thru 3	V_{SS}	Redundant connections to the internal V_{SS} and may be left unconnected.
4	V_{OUT}	Output voltage of the accelerometer.
5	STATUS	Logic output pin to indicate fault.
6	V_{DD}	The power supply input.
7	V_{SS}	The power supply ground.
8	ST	Logic input pin used to initiate self-test.
9 thru 13	Trim pins	Used for factory trim. Leave unconnected.
14 thru 16	—	No internal connection. Leave unconnected.



ภาพที่ 3.5 แสดงตัวอุปกรณ์ วงจร และตำแหน่งขาของ Accelerometer Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

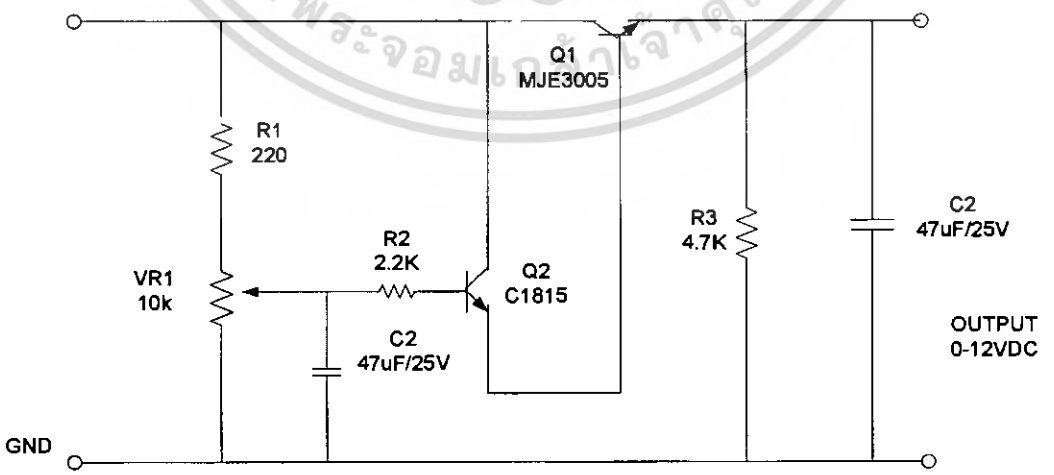
3.2.1.2 สายสัญญาณ

ทำการเลือกใช้สายชิลด์ ภายในมีสายไฟจำนวน 3 เส้น ประยุกต์ใช้หัวต่อแบบไมโครโฟน 3 ขา ต่อเข้ากับสายสัญญาณและ ใช้ขั้วไมค์ตัวเมีย 3 ขา ต่อเข้ากับ Supply input, Output และ Ground เข้ากับสายเคเบิ้ล และต่อกับ Power Supply 5Vdc Box จำนวน 2 ช่องสัญญาณ ที่ทำขึ้นมา

ภาพที่ 3.6 สายชิลด์ และ หัวต่อไมโครโฟน 3 ขา

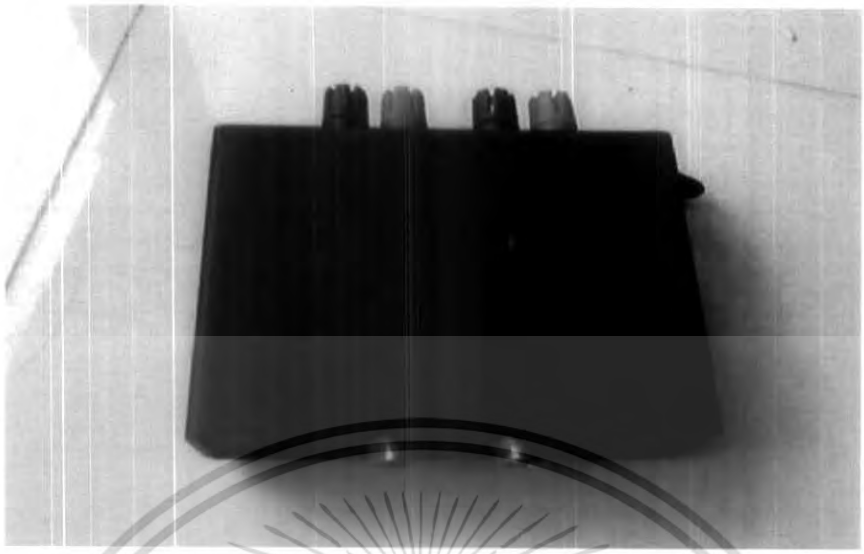
3.2.1.3 Power Supply

เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่จ่ายให้กับตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง ซึ่งปรับแรงดันให้อยู่ที่ 5V จ่ายกระแสได้สูงสุดที่ 1A ซึ่งต่อเข้ากับ connector ขั้วต่อไมค์ตัวเมีย 3 ขา คือ Power Supply input(Vdd) , Power Supply ground (Vss) และ Output Voltage signal (Vout) ซึ่งเป็นกล่อง Power Supply ที่มีจำนวน 2 อินพุต และ 2 เอาต์พุท เพื่อสะดวกในการต่อสัญญาณให้กับ DAQ-Card



ภาพที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ 5Vdc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 แสดง กล่อง อินพุต และ เอาต์พุท I/O Box จำนวนสองช่องสัญญาณ

3.2.1.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ

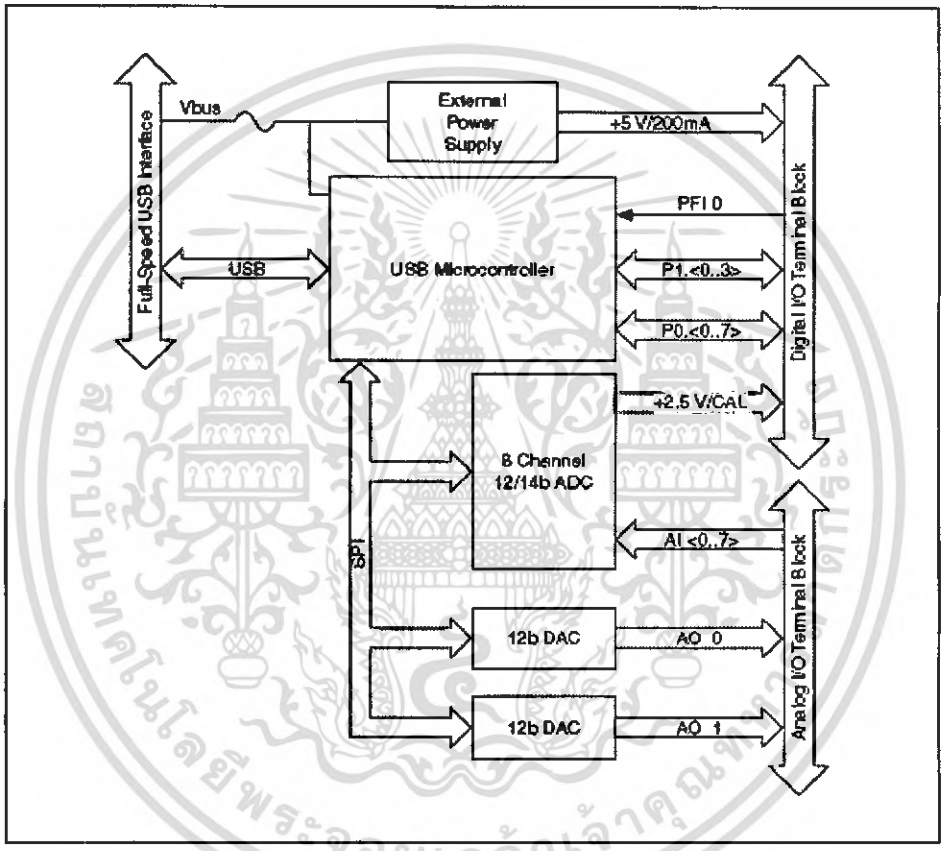
ในโครงงานนี้ใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณที่เรียกว่า ดาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition:DAQ) ดังภาพที่ 3.9

ภาพที่ 3.9 Data Acquisition:DAQ USB-6008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.4.1 อะนาลอก/ดิจิตอลบอร์ด (A/D Board:DAQ NI USB-6008)

ในโครงงานนี้ใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณที่เรียกว่า คาต้าแอกควิซิชัน (Data Acquisition:DAQ) ในการติดต่อระหว่าง Transducer และ Sensor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เราต้องการทำการวัดเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อ ใช้เก็บข้อมูล จะต้องผ่านอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณอะนาลอกจากอุปกรณ์เครื่องวัด มาเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อ เก็บไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อนำผลที่ได้รับมาไปเก็บ และประมวลผลต่อไป ดังนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียด คุณสมบัติทั่วไปของ A/D Board (DAQ USB-6008) เพื่อสามารถที่จะได้นำไปใช้งาน



ภาพที่ 3.10 DAQ USB-6008 Block Diagram

3.2.1.4.2 อะนาลอกอินพุต (Analog Input)

อินพุตโหมด (Input Mode) สามารถกำหนดได้ 2 รูปแบบ คือ Referenced Single-Ended (RSE), Differential (DIFF) และมีอินพุตทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ ถ้าเป็นการ set แบบ DIFF จะมีอินพุตเพียง 4 ช่องสัญญาณ Input Mode นั้นเราสามารถ set แต่ละช่องสัญญาณได้ ซึ่งก็คือเราอาจจะเซ็ต Input Mode ไม่เหมือนกันทุก ช่องสัญญาณก็ได้ เช่น ถ้าเราใช้แค่ 12 ช่องสัญญาณ เราอาจจะ เซ็ตเป็น DIFF 4 ช่องสัญญาณ และ set เป็น RSE 8 ช่องสัญญาณก็ได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การ Set ค่า Input Mode

Configuration	Description
DIFF	ช่องสัญญาณที่ SET เป็น DIFF Mode จะใช้สัญญาณอะนาลอกอินพุต 2 เส้น ซึ่ง 1 เส้นต่อกับอินพุตบวกใน programable gain instument amplifier (PGIA) และอีก 1 เส้นจะต่อกับอินพุตลบของ PGIA
RSE	ช่องสัญญาณที่ SET เป็น RSE Mode จะใช้สัญญาณอะนาลอกอินพุต 1 เส้นซึ่ง 1 เส้นต่อกับอินพุตบวกใน PGIA และอีก 1 เส้นจะต่อกับอินพุตลบ ของ PGIA จะต่อกับอะนาลอกกราวด์ (AIGND)

3.2.1.4.3 อินพุตเรนจ์ (Input Range)

รับ Input ได้ทั้งช่วงบวกและลบ เพื่อแปลงจากอะนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 12 บิต

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า Input Range

ตารางที่ 3.2 Absolute accuracy at full scale, single ended

Range	Typical at 25 ^{0}C	Maximum over Temperature
±10	14.7	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 Absolute accuracy at full scale differential

Range	Typical at 25 $^{\circ}C$ (mV)	Maximum over Temperature (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	38.9
±1	1.53	37.5

3.2.1.4.4 อะนาลอกเอาท์พุต

อุปกรณ์ตัวนี้มีช่องสัญญาณ อะนาลอกเอาท์พุตทั้งหมด 2 ช่อง และช่วงการทำงานคงที่คือ 5 V ซึ่ง ข้อมูลที่จะถูกเปลี่ยนจากดิจิตอลเป็นอะนาลอกนั้น จะถูกแปลงไปอยู่ในรูป 2's Complement

3.2.1.4.5 ดิจิตอล อินพุต/เอาท์พุต (Digital I/O)

อุปกรณ์ตัวนี้จะมี 12 ช่องสัญญาณซึ่งที่ พอร์ต 0 จะใช้เส่นที่ (DIO<0..7>)และพอร์ต 1 จะใช้เส่นที่ (DIO<0..3>) อินพุตแรงดันต่ำจะอยู่ ระหว่าง -0.3V และ 0.8V อินพุตแรงดันสูงอยู่ที่ระหว่าง 2.0V และ +5.8V เอาท์พุตแรงดันต่ำอยู่ที่ 0.8 V เอาท์พุตแรงดันสูงจะมากกว่า 2V

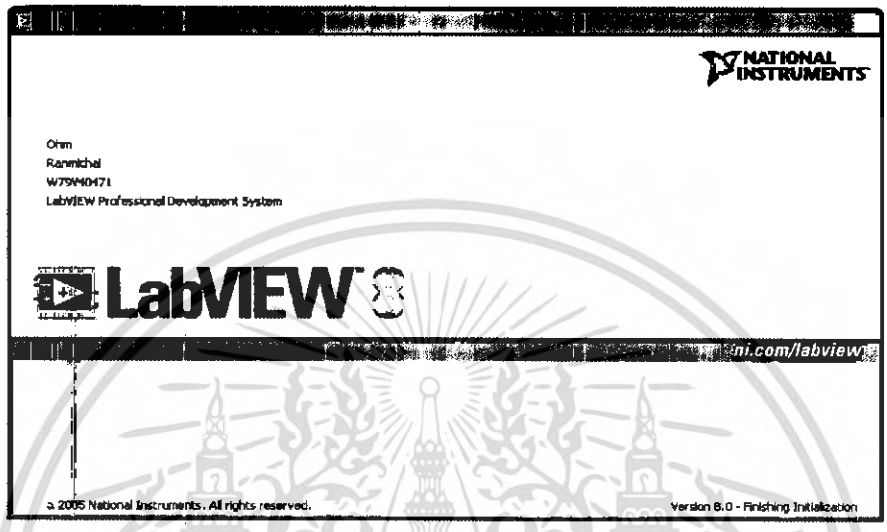
3.2.1.4.6 ข้อมูลทั่วไป

- อัตราการ sampling 10KS/s
- เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB 2.0
- ใช้แหล่งจ่ายไฟ ผ่านสาย USB (4.10 ถึง 5.25 VDC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.5 โปรแกรมวิเคราะห์ และ แสดงผลทางกราฟฟิก

ในโครงงานนี้ใช้โปรแกรม LabView8 และโปรแกรม Matlab7 ในการเขียนโปรแกรมแสดงผลกราฟฟิกแล้วทำการเก็บข้อมูลการควบคุมการเลือกช่องสัญญาณและการประมวลผล



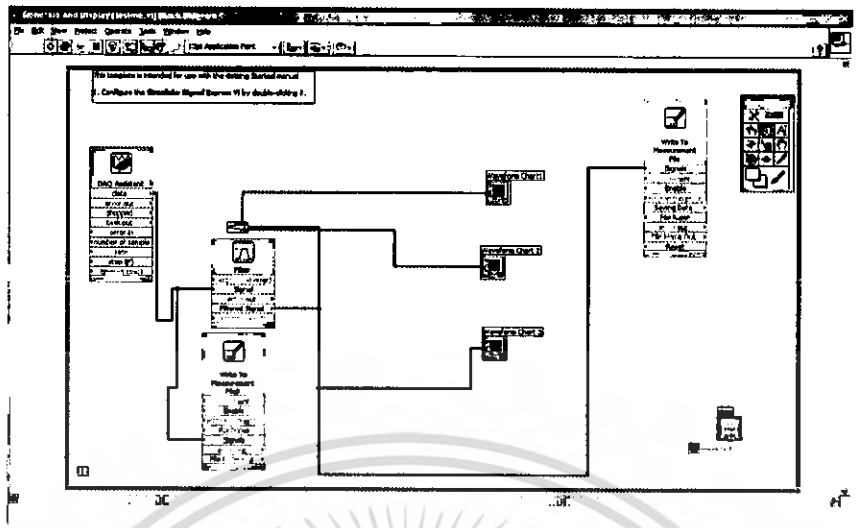
ภาพที่ 3.11 แสดงหน้าต่างแรกของโปรแกรม LabView 8

ในโครงงานนี้ ได้ทำการเขียนโปรแกรมโดยแบ่งโปรแกรมเป็นสองชุด คือ

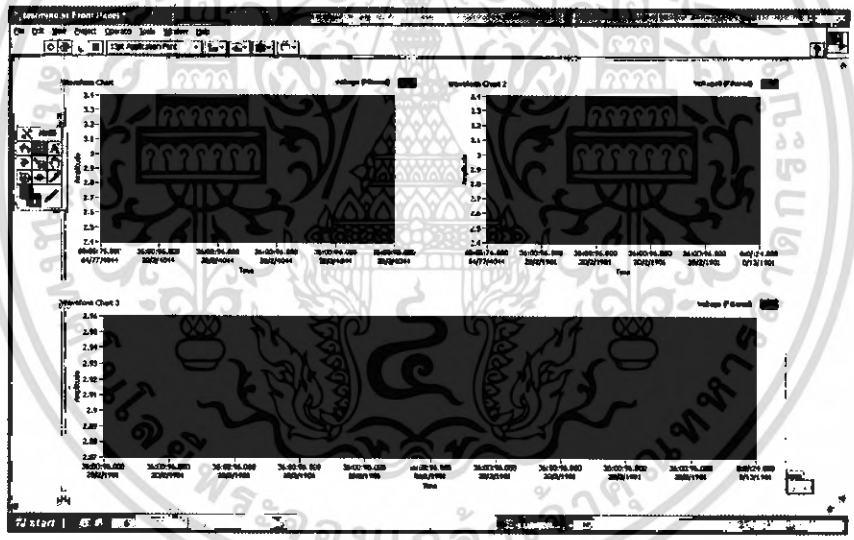
1. ชุดการเขียนโปรแกรมเพื่อการรับสัญญาณและทำการเก็บบันทึกข้อมูลซึ่งจะประกอบด้วยบล็อคไดอะแกรมที่จะแสดงการต่อใช้งานฟังก์ชันหลักๆ ดังต่อไปนี้คือ

- ฟังก์ชันอินพุต DAQ Assistant มีหน้าที่เชื่อต่อกับอินพุตโดยมี NI-DAQmx เป็น driver เชื่อมต่อระหว่างตัว DAQ USB-6008 และ โปรแกรม LabVIEW 8 ซึ่งจะทำการรับอินพุตเข้ามา 2 ช่องสัญญาณ
- ฟังก์ชัน Filter เพื่อทำการปรับแต่งและกรองสัญญาณ
- ฟังก์ชัน write เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมเพื่อทำการเก็บบันทึกข้อมูล เพื่อนำไปวิเคราะห์หรือโปรแกรมต่อไป
- ส่วนของการแสดงผลของสัญญาณที่รับเข้ามา ซึ่งจะแสดงผลแบบ real time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 แสดงบล็อคไดอะแกรมโปรแกรมเพื่อการรับสัญญาณและทำการเก็บบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 3.13 แสดง Front Panel ที่เป็นส่วนแสดงผลของโปรแกรม

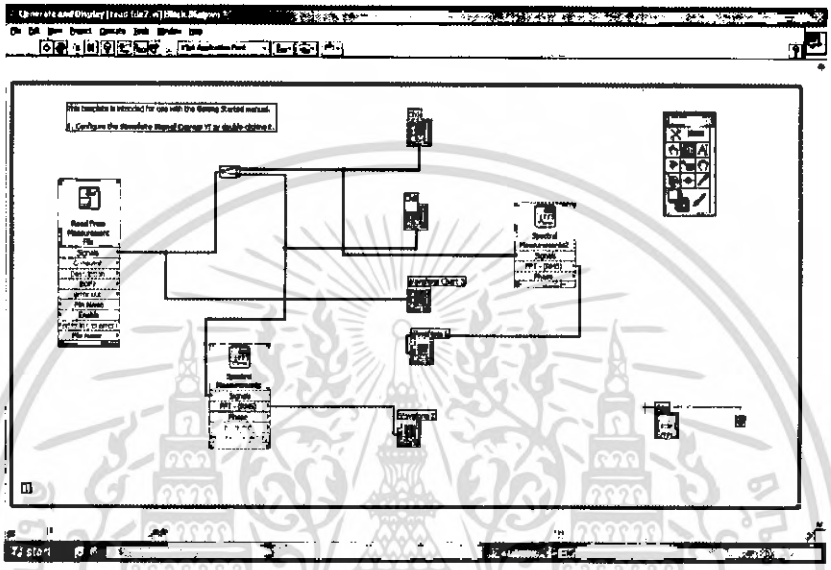
2. ชุดโปรแกรมเพื่อการเพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่รับเข้ามา จากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกเอาไว้แล้วในโปรแกรมชุดที่แรก จากบล็อคไดอะแกรมจะมีฟังก์ชันการทำงานดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชัน Read file เป็นการนำข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกทำเป็นอินพุตข้อมูลเพื่อนำไปแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฟังก์ชัน Fourier analysis เป็นส่วนของโปรแกรมที่จะทำการตรวจสอบข้อมูลจากฟังก์ชัน Read file และทำการวิเคราะห์ Spectum เพื่อหาผลตอบสนองของความถี่จากรถไฟแต่ละประเภท

- ฟังก์ชันการแสดงผล เป็นส่วนที่ทำการแสดงผลโดยสามารถควบคุม ผ่านทาง Front Panel



ภาพที่ 3.14 บล็อคไดอะแกรมของชุดโปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การประมวลสัญญาณ

การสุ่มตัวอย่าง (sampling) เป็นกระบวนการแปลงสัญญาณซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรต่อเนื่องเป็นสัญญาณซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรไม่ต่อเนื่องในบทนี้จะกล่าวถึงการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเวลาต่อเนื่องและแสดงให้เห็นว่าถ้าสัญญาณเป็นแบบความถี่จำกัด (band limited) เราสามารถสร้างสัญญาณต้นกำเนิดขึ้นมาใหม่จากตัวอย่างที่สุ่มถ้าเราทำการสุ่มด้วยอัตราอย่างน้อยสองเท่าของความถี่สูงสุด ที่บรรจุอยู่ในสัญญาณนั้นเมื่อเราต้องเปลี่ยนสัญญาณเวลาต่อเนื่องเป็นสัญญาณเวลาเป็นช่วงเพื่อให้สามารถประมวลโดยระบบอุปกรณ์สำคัญก็คือตัวแปรอนาลอกเป็นดิจิตอล และแปลงดิจิตอลเป็นอนาลอก ได้กล่าวถึงการจำลอง (Simulation) ระบบอนาลอก โดยใช้ระบบดิจิตอลหรือระบบสุ่ม (sampled system) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่การสุ่มตัวอย่างสเปคตรัมของสัญญาณเวลาเป็นช่วงในโดเมนความถี่เราได้แสดงว่าการอะเลียส(aliasing) ในโดเมนเวลาเป็นช่วงเป็นผลเนื่องมาจากการสุ่มตัวอย่างในโดเมนความถี่ ซึ่งนำไปสู่การแปลงฟูเรียร์เป็นช่วง (discrete fourier transform (DFT)) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญมากในงานประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

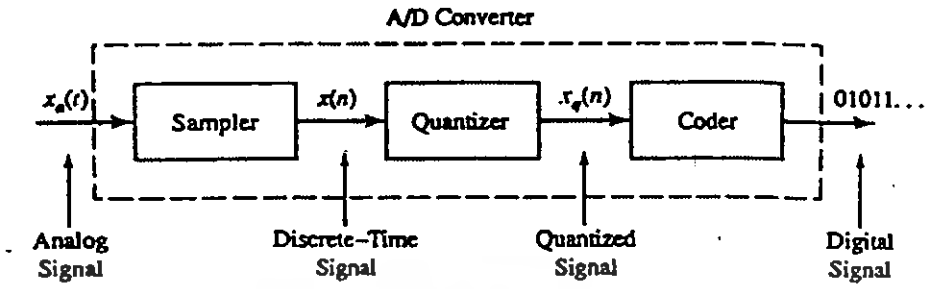
4.1 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเวลาต่อเนื่องในโดเมนเวลา

4.4.1 ตัวแปรอนาลอกเป็นดิจิตอล

เป้าหมายของการศึกษาเกี่ยวกับระบบรวมถึงการวิเคราะห์และออกแบบระบบก็เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการประมวลสัญญาณ แต่เนื่องจากสัญญาณเกือบทั้งหมดที่เราสนใจเป็นสัญญาณอนาลอก ในกรณีที่นำเอาระบบเวลาเป็นช่วงมาใช้แทนระบบเวลาต่อเนื่อง หรือต้องการเพียงเลียนแบบระบบให้สามารถทำงานประมวลสัญญาณได้เหมือนกัน ก่อนอื่นเราจำเป็นต้องเปลี่ยนสัญญาณเหล่านี้ให้อยู่ในรูปดิจิตอลคือแปลงให้มันอยู่ในรูปซีเควนซ์ของตัวเลขที่มีความละเอียดที่จำกัด ขั้นตอนการดำเนินการนี้เรียกว่า การแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล (analog to digital (A/D) convention) โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวแปลง A/D (A/D converter (ADC))

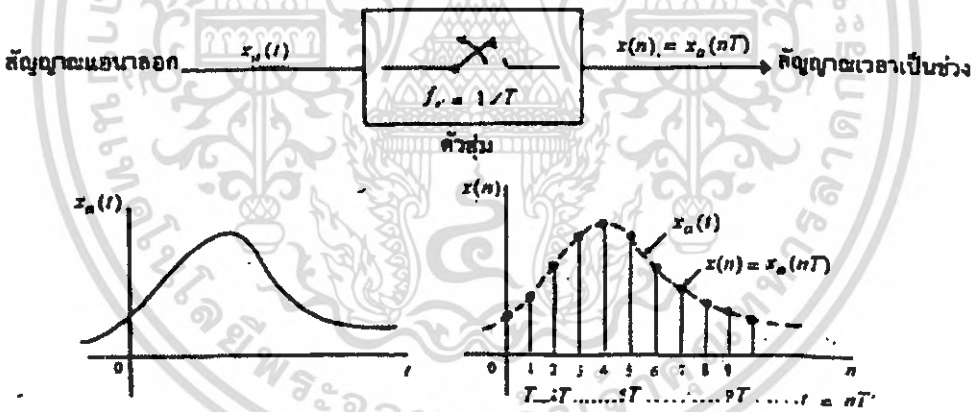
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการแปลง A/D จะประกอบด้วยกระบวนการ 3 ขั้น ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวแปลง A/D

ก. การสุ่มตัวอย่าง (Sampling) เป็นการแปลงสัญญาณเวลาต่อเนื่อง เป็นสัญญาณเวลาเป็นช่วงโดยดังตัวอย่าง (sample) ของสัญญาณเวลาเป็นช่างที่เวลาที่เท่ากัน ถ้า Xa(nT)=X(n) เมื่อ T คือคาบการสุ่มตัวอย่าง (sampling period) ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การสุ่มสัญญาณอนาลอกในลักษณะซ้ำคาบ

ข. การควันไทซ์ (quantization) เป็นการเปลี่ยนจากสัญญาณเวลาต่อเนื่องซึ่งจะเรียกว่าสัญญาณสุ่ม (sampled signal) เป็นสัญญาณเวลาเป็นช่วงขนาดเป็นช่วง ดิจิตอล ค่าของแต่ละตัวอย่างอย่างของสัญญาณจะถูกแทน โดยค่าที่เลือกจากเซทของค่าที่เป็นไปได้ที่จำกัดความแตกต่างระหว่างตัวอย่างทียังไม่ถูกควันไทซ์ X(n) กับเอาท์พุทที่ถูกควันไทซ์แล้ว Xq(n) จะเรียกว่าความผิดพลาดของการควันไทซ์ (quantization error)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. การทำเป็นรหัส (coding) แต่ละค่าของ Xq(n) จะถูกแทนด้วยซีเควนซ์ของเลขฐานสอง จำนวน n บิท

4.1.2 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณอนาลอก

จะมีหลายวิธีในการสุ่มตัวอย่างจากสัญญาณอนาลอก แต่เราจะจำกัดการพิจารณาเพียงการสุ่มตัวอย่างซ้ำคาบหรือสม่ำเสมอ (periodic or uniform) ซึ่งการสุ่มตัวอย่างแบบนี้เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในทางปฏิบัติ ซึ่งการสุ่มตัวอย่างสามารถอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์ (จากบล็อคแรกภาพที่ 4.1)

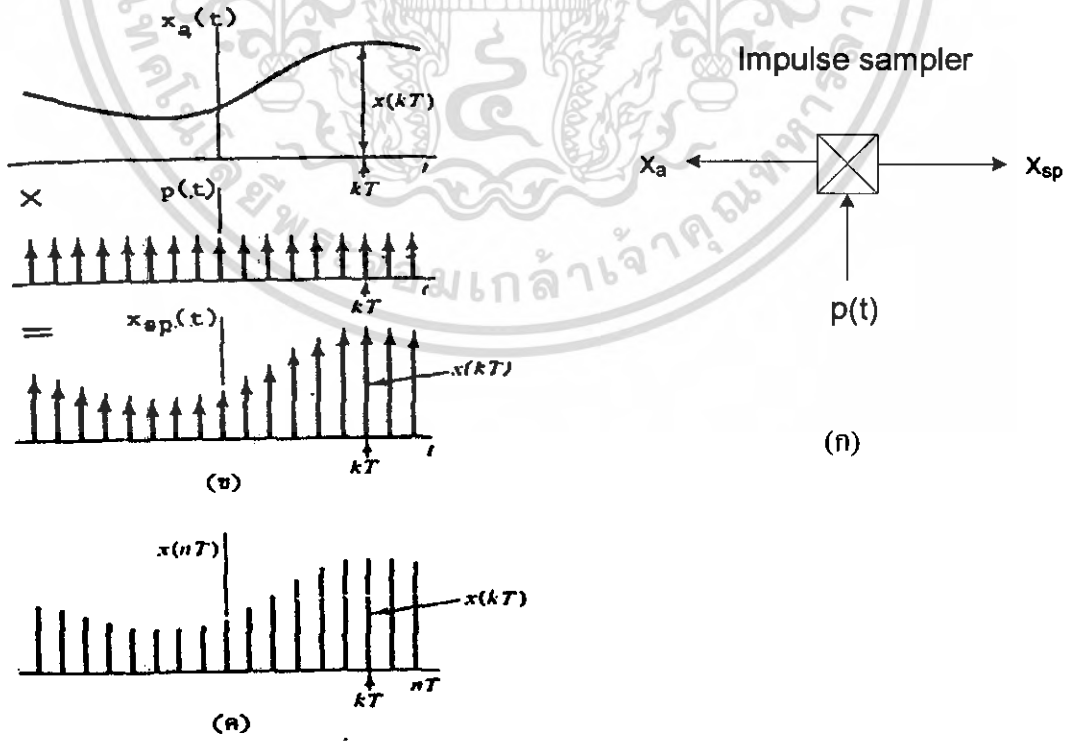
$$-\infty < n < \infty \tag{4.1.1}$$

เมื่อ $X(n)$ เป็นสัญญาณเวลาเป็นช่วงที่ได้จากดึงตัวอย่าง สัญญาณอนาลอก $Xa(t)$ ทุกๆ T วินาที ช่วงเวลา T หว่างตัวอย่างที่ติดกันจะเรียกว่าคาบของการ (sampling period or sample interval) และส่วนกลับของมัน $1/T = fs$ จะเรียกว่า อัตราการสุ่ม (sampling rate, เป็นจำนวนตัวอย่างต่อวินาที) หรือความถี่การสุ่ม (sampling frequency เป็นเฮิรตซ์)

เราอาจเขียนสมการ 4.1.1. ในรูป

$$X_{sp}(t) = X_a(t)p(t) \tag{4.1.2}$$

โดยจะเรียก $X_{sp}(t)$ ว่าเป็นสัญญาณสุ่ม (sampling signal) ซึ่งได้จากการสุ่ม $Xa(t)$ โดยใช้ตัวสุ่ม อิมพัลส์ในอุดมติ (ideal impulse sampling) ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงการกำเนิดสัญญาณสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะนี้ P(t) จะกำเนิดในรูป

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \tag{4.1.3}$$

ดังนั้น แทน P(t) จาก (4.1.3) ลงในสมการ (4.1.2) จะได้

$$X_{sp}(t) = Xa(t)p(t) = Xa(t)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t-nt)$$
$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_a(t)\delta(t-nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_a(nT)\delta(t-nT) \tag{4.1.4}$$

ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ขณะนี้สัญญาณ $X_{SP}(t)$ จะประกอบด้วย กระบวนการอิมพัลส์ที่มีระยะทางเท่ากันและพื้นที่เกิดขึ้นที่ขณะใดขณะหนึ่ง $t = nT$ จะเท่ากับค่าของ $Xa(t)$ ที่ขณะนั้นเราสามารถหาสเปคตรัม $X_{sp}(\omega)$ ของ $X_{sp}(t)$ โดยการคำนวณการแปลงฟูเรียร์ของสมการ 4..1.4 ถ้าการแปลง ฟูเรียร์ $X(\omega)$ ของ $X(t)$ สามารถเขียนในรูป

$$X(t) \rightarrow X(t)$$

เนื่องจาก $X_p(t)$ ถูกแสดงในรูปผลคูณของสองฟังก์ชันของเวลา โดยคำนวนการแปลงฟูเรียร์ จะได้การแปลงฟูเรียร์ $X_{p(t)}$

$$x_{sp}(\omega) = x_a(t)P(t) \rightarrow x_{sp}(\omega) = \frac{1}{2}\pi x_a(\omega) * P(\omega) \tag{4.1.5}$$

และการแปลงฟูเรียร์ของ $P(t)$ คือ $P(\omega)$

$$P(t) = \sum_{n=\infty}^{\infty}\delta(t-nT) \rightarrow P(\omega) = \frac{2\pi}{T}\sum_{n=\infty}^{\infty}\delta(\omega - k\omega_s) \tag{4.1.6}$$

ดังนั้น

$$x_{sp}(\omega) = \frac{1}{2}\pi x_a(\omega) * \frac{2\pi}{T}\sum_{n=\infty}^{\infty} x_a(\omega - 2k\frac{\pi}{T})$$
$$= \frac{1}{T}\sum_{n=\infty}^{\infty} x_a(\omega - 2k\frac{\pi}{T}) \tag{4.1.7}$$

สมการที่ 4.1.7 แสดงให้เห็นว่า $X_{sp}(\omega)$ ประกอบด้วยซีเควนซ์ของ $X_a(t)$ ที่ถูกสเกลขนาดด้วย $1/T$ และเกิดซ้ำกันที่ $k(k = \pm 1, \pm 2, ...)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Theorem)

เมื่อเราสุ่มตัวอย่างสัญญาณเวลาต่อเนื่อง $X_a(t)$ ยังคงอยู่ในชุดของตัวอย่างที่เราสุ่มออกมา เราจะแน่ใจได้ว่าสาระทั้งหมดยังอยู่ครบถ้วนถ้าเราสามารถสร้าง (recover) สัญญาณเวลาต่อเนื่องขึ้นมาใหม่ที่เหมือนกับ $X_a(t)$ จากชุดของตัวอย่างที่สุ่มมาได้ ในสมการ (4.1.7) ความถี่ของการสุ่มตัวอย่างจะเป็นตัวแปรสำคัญในการหาเงื่อนไขซึ่งจะทำให้ไม่มีการสูญเสียสาระดังกล่าว โดยให้พิจารณา $X_a(t)$ ว่าเป็นสัญญาณที่มีสเปคตรัมแบบจำกัดแถบความถี่ (band limited) นั่นคือ

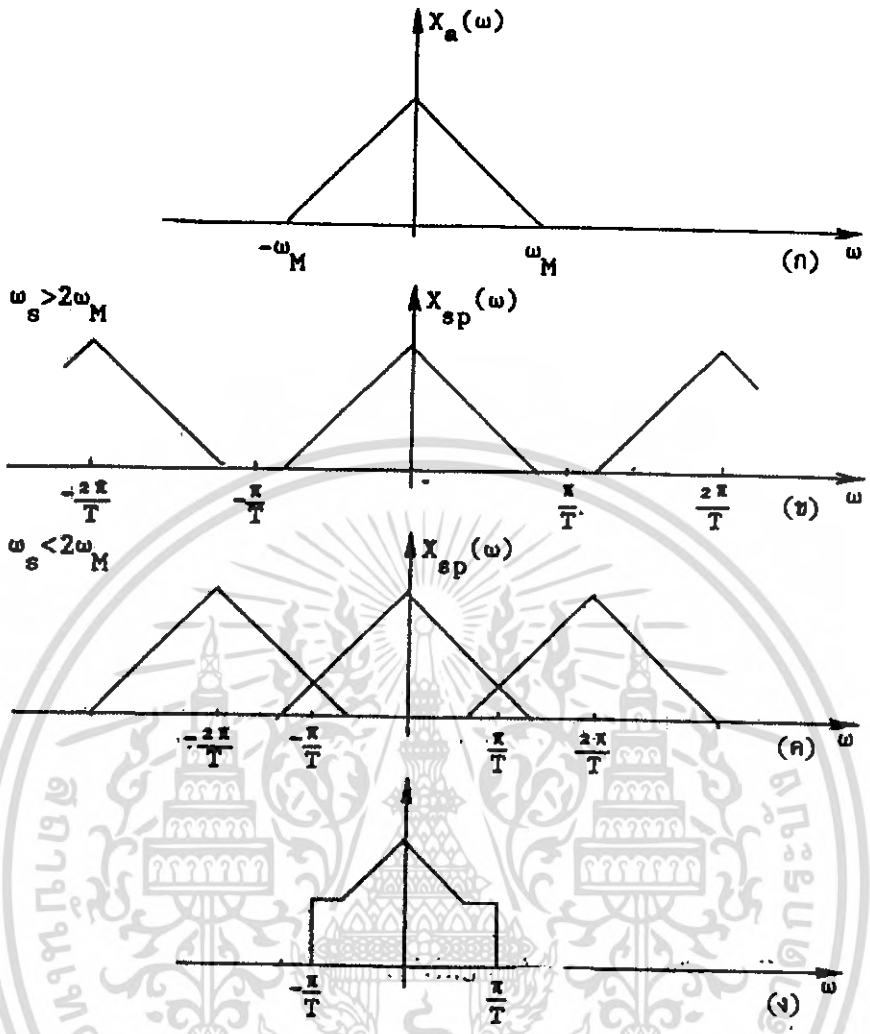
$$x_a = 0 \text{ สำหรับ } |\omega| > \omega_M \tag{4.1.8}$$

ดังแสดงในภาพที่ (4.4ก) ซึ่งหมายถึงจะไม่มีองค์ประกอบความถี่ ที่ความถี่สูงกว่า ω_M เมื่อ $X_a(t)$ ถูกสุ่มตัวอย่างด้วยคาบของการสุ่ม T ดังนั้นสเปคตรัม $X_{sp}(\omega)$ ในช่วงความถี่จาก $-\frac{\pi}{T}$ ถึง $\frac{\pi}{T}$ จะเหมือนกับ $X_a(\omega)$ ถ้า

$$\frac{\omega_s}{2} = \frac{\pi}{T} > \omega_M \text{ หรือ } T > \frac{\pi}{\omega_M} \tag{4.1.9}$$

ในกรณีนี้จะไม่เกิดการเหลื่อมขององค์ประกอบสเปคตรัม ที่ติดกัน (ภาพที่ 4.4ข) และเราสามารถนำ $X_a(\omega)$ ออกจาก $X_{sp}(\omega)$ อย่างแน่นอนโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำที่มีการตอบสนองขนาดที่เหมาะสม เช่น $|H(\omega)| =$ เมื่อ $|\omega| \le \frac{\pi}{T}$ และ $|H(\omega)| = 0$ เมื่อ $|\omega| > \frac{\pi}{T}$ แต่ถ้าเลือก T มากกว่าจะเกิดการเหลื่อมล้ำ(ดังภาพที่4.1.ง) การเหลื่อมล้ำนี้เนื่องจากการสุ่มด้วยอัตราที่ต่ำเกินไปทำให้รูปร่างของสเปคตรัมผิดไป ในลักษณะนี้จะไม่สามารถนำสัญญาณเดิมกลับคืนมาได้ ซึ่งเราเรียกว่าเกิดการแปรความหมายผิดหรือการอะเลียสซิง (aliasing) เพื่อป้องกันการผิดพลาดนี้ คาบของการสุ่มตัวอย่าง T ต้องสอดคล้องกับสมการเงื่อนไข (4.1.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ก) สัญญาณจำกัดแถบความถี่

ข) สเปคตรัมเมื่อสุ่มตัวอย่างด้วย $T < \frac{\pi}{\omega_M}$

ค) สเปคตรัมเมื่อสุ่มตัวอย่างด้วย $T < \frac{\pi}{\omega_M}$

ง) การเหลื่อมของสเปคตรัมทำให้สัญญาณที่ได้ผิดเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

4.2.1 สเปคตรัม (Spectrum)

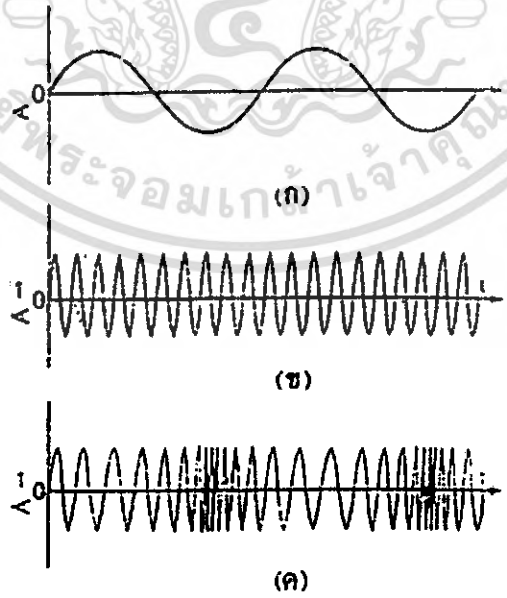
การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณจะเกี่ยวข้องกับการแยกสัญญาณออกเป็นองค์ประกอบความถี่ (รูปซายน์) ของมันรูปคลื่นของสัญญาณจะเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) และการแปลงฟูเรียร์(Fourier transform) จะนำมาวิเคราะห์สัญญาณ

4.2.2 โดเมนเวลา (Time Domain)

ลักษณะจำเพาะของสัญญาณไฟฟ้า ก็คือ ขนาดของสัญญาณ (กระแส, แรงดันหรือกำลัง) และรูปร่าง (Shape) ของมัน รูปร่างของสัญญาณสามารถอธิบายได้ 2 วิธี หนึ่งคือการกำหนดรายละเอียดลักษณะจำเพาะของมันในโดเมนเวลาซึ่งจะเน้นขนาดของสัญญาณเป็นฟังก์ชันของเวลา และสองคือกำหนดรายละเอียดลักษณะจำเพาะของมันในโดเมนความถี่ ซึ่งจะเน้นรายละเอียดของขนาดและเฟส ของสัญญาณ ซึ่งพบที่ความถี่ต่างๆ ในสเปคตรัมของสัญญาณที่กำลังพิจารณา

การวัดในโดเมนเวลา จะเน้นลักษณะจำเพาะเหล่านี้

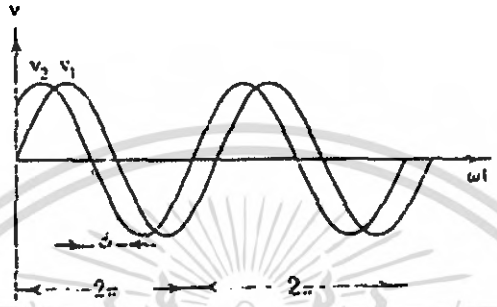
ก) ความถี่ (frequency) คือ อัตราที่รูปสัญญาณเกิดซ้ำในเวลาความถี่จะกำหนดในรูปจำนวนการซ้ำที่เกิดขึ้นในหนึ่งวินาทีและใช้หน่วยว่า เฮิรตซ์ จะเห็นว่าความถี่ของสัญญาณในภาพที่ 4.5ก และ สัญญาณในภาพที่ 4.5ค จะมีความถี่ที่แปรตามเวลา



ภาพที่ 4.5 สัญญาณรูปซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) เฟส (phase) แง่หนึ่งในการเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณ ซึ่งมีความถี่และรูปร่างเหมือนกัน คือ พิจารณาว่าการซ้ำของสัญญาณเกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน หรือ สัญญาณหนึ่งห่างจากอีกสัญญาณหนึ่ง ตามแนวแกนเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.6 การห่างกันจะแสดงเป็นส่วนของคาบ (period) ของสัญญาณ ส่วนของคาบนี้จะแสดงเป็นเรเดียนหรือองศา เมื่อคาบเต็มของการห่างกันคือ 2π เรเดียน หรือ 360 องศาตามลำดับ



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์เฟสของสัญญาณรูปซายน์

ค) รูปคลื่น (waveform) สำหรับช่วงเวลาซึ่งแทนคาบซึ่งสัญญาณไม่ซ้ำสิ่งที่น่าสนใจคือวิธีที่สัญญาณแปรไป ถ้าการแปรสามารถแสดงโดยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ทั่วไป เช่น สัญญาณซายน์ ดังนั้นเราจะได้รายละเอียดที่พอเพียงเกี่ยวกับรูปร่างของสัญญาณในช่วงเวลานั้นถ้าเราไม่สามารถกำหนดลักษณะจำเพาะอย่างง่ายดังกล่าว เราจำเป็นต้องอธิบายการแปรของขนาดเป็นฟังก์ชันของเวลาในรายละเอียดเพิ่มขึ้น

4.2.3 โดเมนความถี่ (Frequency Domain)

ลักษณะจำเพาะของสัญญาณในโดเมนความถี่จะแสดงในรูปของสัญญาณซายน์ ซึ่งเมื่อบวกกันจะให้สัญญาณจำเพาะในโดเมนเวลา เหมือนกันกับสัญญาณที่เรากำลังศึกษา

4.3 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเวลาเป็นช่วงในโดเมนความถี่

การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณเวลาเป็นช่วงโดยปกติและเป็นวิธีที่สะดวกที่สุด จะกระทำโดยใช้ตัวประมวลสัญญาณดิจิตอล (digital signal processor) ซึ่งอาจจะเป็นคอมพิวเตอร์เอนกประสงค์เอนกประสงค์หรือฮาร์ดแวร์ดิจิตอลที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษการทำการวิเคราะห์ความถี่ต่อสัญญาณเวลาเป็นช่วง $\{x(n)\}$ เราจะแปลงซีเควนซ์ในโดเมนเวลาไปเป็นการแทนในโดเมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่สมมูลกันซึ่งทำโดยการใช้การแปลงฟูเรียร์ $X(\Omega)$ ของซีเควนซ์ $\{x(n)\}$ อย่างไรก็ตาม $H(\Omega)$ จะเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องของเวลาดังนั้นจะไม่สะดวกในการคำนวนค่า

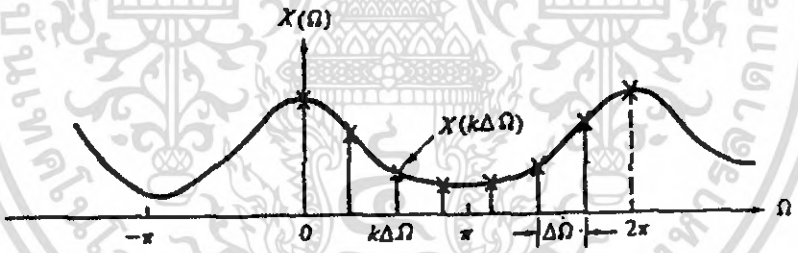
ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาการแทน ซีเควนซ์ $\{x(n)\}$ โดยตัวอย่างของ $X(\Omega)$ การแทนลักษณะนี้ จะนำไปสู่ การแปลงฟูเรียร์เป็นช่วง (discrete transform (DFT))

4.3.1 การสุ่มตัวอย่างและการสร้างใหม่สัญญาณเวลาเป็นช่วงในโดเมนความถี่

เราคงจำได้ว่า สัญญาณไม่ซ้ำคาบพลังงานจำกัดจะมีสเปคตรัมที่ต่อเนื่อง สัญญาณดังกล่าวจะมีการแปลงฟูเรียร์

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\Omega n} \tag{4.3.1}$$

สมมติว่าเราสุ่มตัวอย่าง $X(\Omega)$ อย่างซ้ำคาบในความถี่ที่ความถี่ห่างกัน $\Delta\Omega$ เรเดียนระหว่างคู่ตัวอย่างที่ติดกันเพราะว่า $X(\Omega)$ ซ้ำคาบโดยมีคาบ 2π ดังนั้นตัวอย่างในช่วงความถี่พื้นฐานเท่านั้นที่จำเป็น เพื่อความสะดวก เราเลือกตัวอย่างจำนวน N ที่ห่างเท่าๆ กันในช่วง $0 \le \Omega \le 2\pi$ โดยห่างกัน $\Delta\Omega = 2\pi / N$ ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 การแปลงฟูเรียร์ของการสุ่มตัวอย่างในโดเมนความถี่

ถ้าเราหาค่าสมการ (4.3.1) ที่ $\Omega = 2\pi k / N$ จะได้

$$x\left[\frac{2\pi k}{N}\right] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j2\pi nk/N} \quad ,\text{k=0,1,...,N-1} \tag{4.3.2}$$

เราสามารถแบ่งผลบวกในสมการ (4.3.2) เป็นผลบวกย่อยจำนวนอนันต์โดยแต่ละผลบวกย่อยประกอบด้วย N เทอม

$$x\left[\frac{2\pi k}{N}\right] = \ldots + \sum_{n=-N}^{-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N} + \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+\sum_{m=N}^{2N-1} x(n)e^{-j2\pi k/N} + \ldots$$

$$= \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=lN}^{lN+N-1} x(n)e^{-j2\pi k/N}$$

ถ้าเราเปลี่ยนดัชนีในผลบวกด้านในจาก n เป็น n-lN และสลับที่อันดับของการบวกจะได้

$$x\left[\frac{2\pi k}{N}\right] = \sum_{n=0}^{N-1}\left[\sum_{l=-\infty}^{\infty} x(n-lN)\right]e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \tag{4.3.3}$$

สำหรับ k = 0,1,…,N-1 สัญญาณ

$$x_p(n) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} x(n-lN) \tag{4.3.4}$$

จะได้จาก x(n) ที่ซ้ำคาบทุกๆ N ตัวอย่าง ดังนั้น $x_p(n)$ จะซ้ำคาบโดยมีคาบพื้นฐาน N ผลที่ตามมาคือ เราสามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์

$$x_p(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, n = 0,1,\ldots,N-i \tag{4.3.5}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์

$$c_k = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x_p(n)e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, k = 0,1,\ldots,N-1 \tag{4.3.6}$$

โดยการเปรียบเทียบ สมการ (4.3.3) กับ (4.3.6) เราสรุปได้ว่า

$$c_k = \frac{1}{N}X\left(\frac{2\pi}{N}k\right), k = 0,1,\ldots,N-1 \tag{4.3.7}$$

ดังนั้น

$$c_k = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X\left(\frac{2\pi}{N}k\right)e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, n = 0,1,\ldots,N-1 \tag{4.3.8}$$

ความสัมพันธ์ในสมการ (4.3.8) ทำให้สามารถสร้างใหม่ สัญญาณซ้ำคาบ $x_p(n)$ จากตัวอย่างสเปคตรัม $X(\Omega)$ อย่างไรก็ตามนี่ไม่ได้หมายความว่า เราสามารถทำกลับ $X(\Omega)$ หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x(n)$ จากตัวอย่างดังกล่าวเพื่อให้เห็นจริง เราจะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $x_p(n)$ และ $x(n)$

เพราะ $x_p(n)$ ก็คือ การขยาย x(n) ในลักษณะซ้ำคาบตามสมการ (4.3.3) จะเห็นว่าสามารถนำ x(n) กลับมาจาก $x_p(n)$ ได้ ถ้าหากไม่มีการอะเลียสในโดเมนเวลานั้นคือถ้า $x(n)$ เป็นเวลาจำกัด (time-limited) ถึงน้อยกว่าคาบ N ของ $x_p(n)$ ดังกาพที่ 4.8 ซึ่งเราพิจารณาซีเควนซ์ที่มีช่วงเวลาจำกัด $x(n)$ ซึ่งไม่เป็นศูนย์ในช่วง $0 \le n \le L-1$ จะสังเกตเห็นว่า เมื่อ $N \ge L$

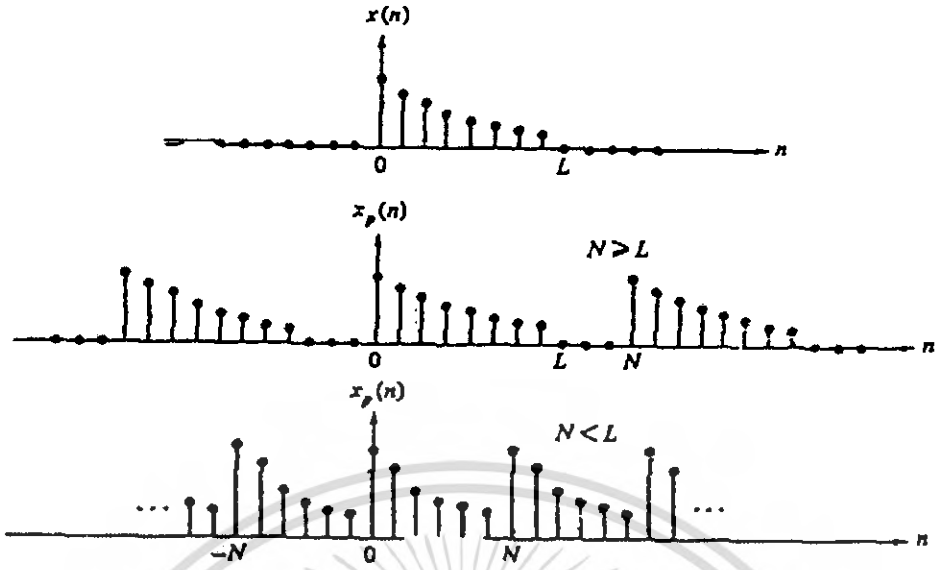
$$x(n) = x_p(n) \qquad 0 \le n \le N-1$$

ในกรณีนี้เราสามารถนำ $x(n)$ กลับมาจาก $x_p(n)$ ได้อย่างไม่กำกวม แต่ถ้า $N < L$ เราจะไม่สามารถนำ $x(n)$ กลับมา จากการขยายซ้ำคาบของมันเนื่องจากเกิดการอะเลียสในโดเมนเวลา ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าสเปคตรัมของสัญญาณไม่ซ้ำคาบและมีช่วงเวลาจำกัด L สามารถถูกนำกลับมาจากตัวอย่างของมันที่ความถี่ $\Omega_k = \frac{2\pi}{N}k$ ถ้า $N \ge L$ ขั้นตอนดำเนินการก็คือ ทำการคำนวณ $x_p(n)$, n = 0,1,...,N-1 จากสมการ (4.3.8) ดังนั้น

$$x(n) = \begin{cases} x_p(n), 0 \le n \le N-1 \\ 0 \end{cases} \qquad (4.3.9)$$

และสุดท้าย เราสามารถคำนวณ $X(\Omega)$ จากสมการ (4.3.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 แสดงสัญญาณไม่คาบ x(n) ที่ยาว L และการขยายจนเป็นสัญญาณซ้ำคาบ

4.3.2 การแปลงฟูเรียร์เป็นช่วง (DFT)

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราเกี่ยวข้องกับการสุ่มตัวอย่างในโดเมนความถี่ของสัญญาณไม่ซ้ำคาบพลังงานจำกัด $x(n)$ โดยทั่วไปตัวอย่างความถี่ที่ห่างเท่ากัน $X\left(\frac{2\pi}{N}k\right), k=0,1,...,N-1$ จะสามารถแทนสัญญาณต้นกำเนิด $x(n)$ ได้มากมายเมื่อ $x(n)$ มีช่วงเวลาไม่จำกัดเพราะตัวอย่างความถี่ $X\left(\frac{2\pi}{N}k\right)$ จะหมายถึงซีเควนซ์ซ้ำคาบ $x_p(n)$ ที่มีคาบ N เมื่อ $x_p(n)$ เป็นภาพของ $x(n)$ ที่ถูกอะเลียส ดังได้แสดงโดยความสัมพันธ์สมการ (4.3.4) นั้นคือ

$$x_p(n)=\sum_{l=-\infty}^{\infty}x(n-lN) \tag{4.3.10}$$

เมื่อซีเควนซ์ x(n) มีช่วงเวลาจำกัด คือมีความยาว $L\le N$ ดังนั้น $x_p(n)$ ก็คือ การซ้ำคาบของ $x_p(n)$ ใน 1 คาบ กำหนดโดย

$$x_p(n)=\begin{cases}x(n), 0\le n\le L-1\\ 0 \quad , L\le n\le N-1\end{cases} \tag{4.3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่สำคัญที่ต้องย้ำคือ การเติมศูนย์ (zero padding) ไม่ได้ทำให้เกิดสาระเกี่ยวกับสเปคตรัม $X(\Omega)$ ของซีเควนซ์ $\{x(n)\}$ และทำการคำนวณ N จุด DFT ของซีเควนซ์ $x(n)$ ว่าคือการหาค่าตัวอย่างความถี่ที่ห่างเท่าๆ กัน N ของการแปลงฟูเรียร์ $X(\Omega)$

$$X(k) = X\left(\frac{2\pi}{N}k\right) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad , k = 0,1,...,N-1 \tag{4.3.12}$$

และเรานิยาม N-จุด IDFT (inverse)

$$x(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \quad , n = 0,1,...,N-1 \tag{4.3.13}$$

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง DFT กับการแปลงอื่นๆ

ก) ความสัมพันธ์กับการแปลงฟูเรียร์ของซีเควนซ์ไม่ซ้ำคาบ

เราได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ถ้า x(n) เป็นซีเควนซ์ไม่ซ้ำคาบพลังงานจำกัด ที่มีการแปลงฟูเรียร์ $X(\Omega)$ ซึ่งถูกสุ่มที่ N ความถี่ที่เท่าๆ กัน $\Omega_k = \frac{2\pi k}{N}$, k=0,1,...,N-1 องค์ประกอบสเปคตรัม

$$\mathrm{X(k)=X}(\Omega)\Big|_{\Omega=\frac{2\pi k}{N}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad , k = 0,1,...,N-1 \tag{4.3.14}$$

จะเป็นสัมประสิทธิ์ DFT ของซีเควนซ์ซ้ำคาบที่มีคาบ N กำหนดโดย

$$x_p(n) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} x(n-lN) \tag{4.3.15}$$

เราสามารถหา $x_p(n)$ โดยการอะเลียส {x(n)} ในช่วง $0 \le n \le N-1$ ซีเควนซ์ช่วงเวลาจำกัด

$$x(n) = \begin{cases} x_p(n) \ , 0 \le n \le N-1 \\ 0 \end{cases} \tag{4.3.16}$$

จะไม่เหมือนกับซีเควนซ์ต้นกำเนิด {x(n)} นอกเสียจากว่า x(n) มีช่วงเวลาจำกัด และมีความยาว $L \le N$ ซึ่งถ้าเป็นอย่างนี้

$$x(n) = \overset{A}{x}(n) \ , 0 \le n \le N-1 \tag{4.3.17}$$

เพียงกรณีนี้เท่านี้เท่านั้นที่ IDFT ของ {X(k)} จะให้ซีเควนซ์ต้นกำเนิด {x(n)}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) ความสัมพันธ์กับสัมประสิทธ์อนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณเวลาต่อเนื่องสมมติว่า เรามี $x_a(t)$ เป็นสัญญาณเวลาต่อเนื่องซ้ำคาบโดยมีคาบพื้นฐาน

$T_p = \frac{1}{f_0}$ เราสามารถแสดงสัญญาณนี้ในรูปอนุกรมฟูเรียร์

$$x_a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{-j2\pi k f_0 t} \tag{4.3.18}$$

เมื่อ $\{c_k\}$ เป็นสัมประสิทธ์ฟูเรียร์ ถ้าเราสุ่มตัวอย่าง $x_a(t)$ ด้วยอัตราสม่ำเสมอ $f_s = \frac{N}{T_p} = \frac{1}{T}$ จะได้ซีเควนซ์เวลาเป็นช่วง

$$\begin{aligned} x(n) \equiv x_a(nT) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{j2\pi k f_0 nT} \\ &= \sum_{k=-\infty}^{N-1} \left[\sum_{l=-\infty}^{\infty} c_{k-lN} \right] e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \end{aligned} \tag{4.3.19}$$

จะเห็นได้ชัดว่าสมการ (4.3.19) อยู่ในรูป IDFT เมื่อ

$$X(k) = N \sum_{l=-\infty}^{\infty} c_{k-lN} = N c_k \tag{4.3.20}$$

และ

$$c_k = \sum_{l=-\infty}^{\infty} c_{k-lN}$$

เมื่อซีเควนซ์ $\{\tilde{c_k}\}$ เป็น $\{c_k\}$ ที่อะเลียส

4.3.4 การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณโดยใช้ DFT

ในการคำนวณสเปคตรัมของสัญญาณเวลาต่อเนื่อง หรือเวลาเป็นช่วงเราต้องการค่าของสัญญาณที่ทุกเวลา อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราสามารถสังเกตสัญญาณได้เพียงช่วงเวลาจำกัดผลที่ตามมาคือ เราเพียงได้แต่ค่าประมาณของสเปคตรัมจากข้อมูลการบันทึกที่จำกัด

ถ้าสัญญาณที่เราต้องการวิเคราะห์ เป็นสัญญาณอนาลอก เริ่มแรกจะต้อง ป้อนสัญญาณผ่านวงจรกรอง antialiasing จากนั้นจึงสุ่มตัวอย่างด้วยอัตรา $f_s > 2B$ เมื่อ B เป็นแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกกรอง ดังนั้นความถี่สูงสุดที่บรรจุในสัญญาณที่ถูกสุ่มคือ $\frac{f_s}{2}$ สุดท้าย ด้วยวัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติเราจะจำกัดช่วงเวลาของสัญญาณอยู่ในช่วง $T_0 = LT$ เมื่อ L เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนตัวอย่างและ T เป็นช่วงเวลาการสุ่มเราจะได้พบเห็นว่าการที่เราเอาสัญญาณมาพิจารณาเพียงช่วงเวลาจำกัด ก่อให้เกิดข้อจำกัดต่อการแยกชัดของความถี่ (frequency resolution) นั้นคือ มันจะจำกัดความสามารถในการแยกชัดสององค์ประกอบความถี่ที่แยกกันโดยความถี่น้อยกว่า $\frac{1}{T_0}=\frac{1}{LT}$ ให้ $\{x(n)\}$ แสดงซีเควนซ์ที่ต้องการวิเคราะห์การจำกัดช่วงเวลาของซีเควนซ์เพียง L ตัวอย่าง ในช่วงเวลา $0\le n\le L-1$ จะสมมูลกับการคูณ $\{x(n)\}$ ด้วยหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular window) w(n) ที่มีความยาว L

นั้นคือ

$$\hat{x}(n)=x(n)w(n) \tag{4.3.2.1}$$

เมื่อ

$$w(n)=\begin{cases}1\,,\ 0\le n\le L-1\\ 0\end{cases} \tag{4.3.22}$$

ขณะนี้สมมติว่า ซีเควนซ์ $x(n)$ ประกอบด้วยรูปชายน์ความถี่เดียว

$$x(n)=\cos\Omega_0 n \tag{4.3.23}$$

ดังนั้นการแปลงฟูเรียร์ของซีเควนซ์เวลาจำกัด $\{x(n)\}$ สามารถแสดงโดย

$$\hat{X}(\Omega)=\frac{1}{2}[W(\Omega-\Omega_0)+W(\Omega+\Omega_0)] \tag{4.3.24}$$

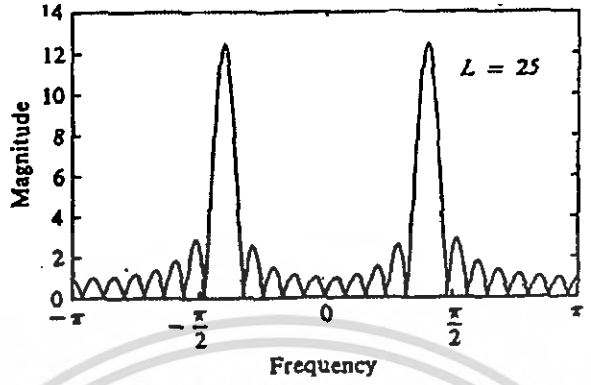
เมื่อ $W(\Omega)$ เป็นการแปลงฟูเรียร์ของซีเควนซ์หน้าต่าง ซึ่งเป็น

$$W(\Omega)=\frac{\sin\left(\frac{\Omega L}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Omega}{2}\right)}e^{\frac{-j\Omega(L-1)}{2}} \tag{4.3.25}$$

ในการคำนวณ $\hat{X}(\Omega)$ เราใช้ DFT โดยเติมศูนย์เข้ากับ $\hat{x}(n)$ จำนวน $N-L$ เราสามารถคำนวณ N จุด DFT ของซีเควนซ์ $\{\hat{x}(n)\}$ ที่ถูกตัดเพียง L จุด รูปที่ 4.8 แสดงสเปคตรัมขนาด เมื่อ L = 25 และ N = 2048 จะเห็นว่าสเปคตรัมที่ถูกใส่หน้าต่าง $\hat{X}(\Omega)$ จะไม่อยู่เฉพาะที่ที่ความถี่เดียว แต่จะกระจายเนื่องจากตัวหน้าต่างไปตลอดพิสัยความถี่ ดังนั้นกำลังของซีเควนซ์ต้นกำเนิด $\{\hat{x}(n)\}$ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมอยู่ที่ความถี่เดียวได้กระจายโดยหน้าต่างไปสู่ตลอดพิสัยความถี่ เราบอกว่ากำลังของมันรั่วออก (leaked out) เข้าสู่ตลอดพิสัยความถี่ ปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า การรั่วซึม (leakage)



ภาพที่ 4.9 สเปคตรัมขนาดซึ่งแสดงถึงการเกิดการรั่ว

การใส่หน้าต่างไม่แต่เพียงทำให้การประมาณสเปคตรัมผิดเพี้ยน เนื่องจากผลการรั่วซึมมันยังคงลดการแยกชัดสเปคตรัม (spectral resolution) ด้วยเพื่อแสดงถึงปัญหานี้ลองพิจารณาซีเควนซ์ที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบความถี่

$$x(n) = \cos\Omega_1 n + \cos\Omega_2 n \tag{4.3.26}$$

เมื่อตัดซีเควนซ์ L ตัวอย่างในพิสัย $0 \le n \le L-1$ สเปคตรัมหลังจากการใส่หน้าต่างคือ

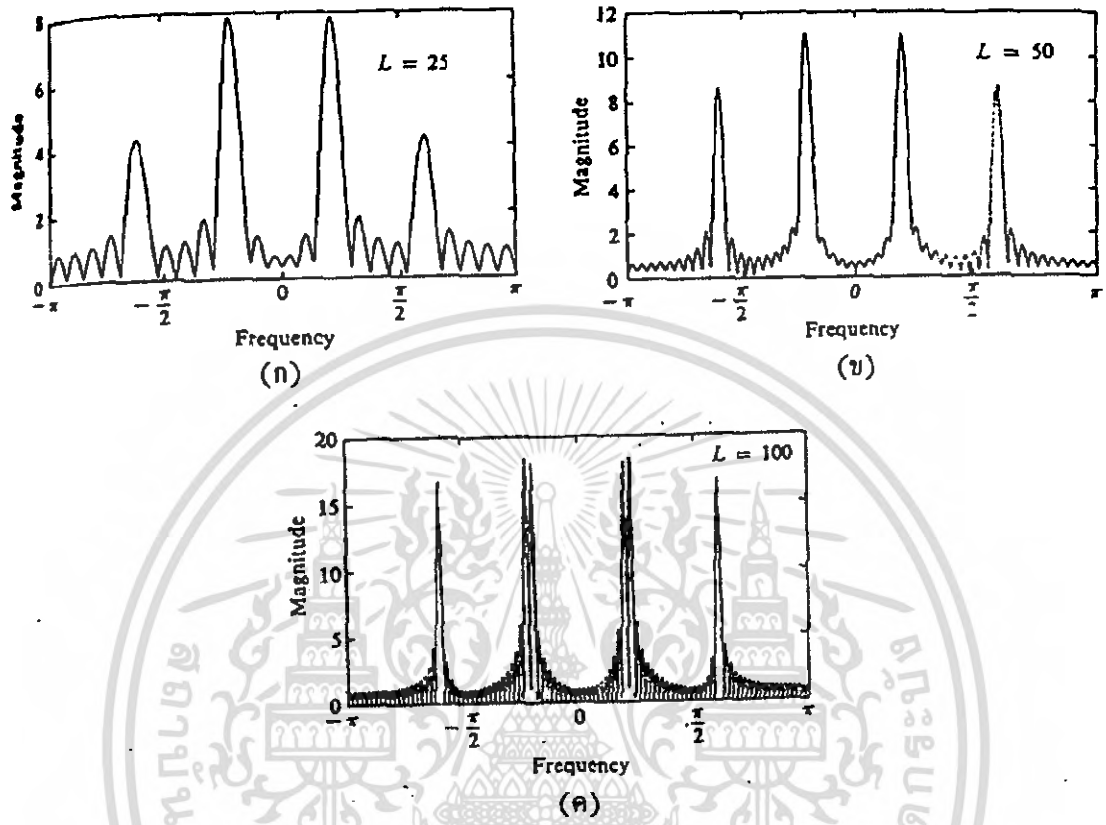
$$\hat{X}(\Omega) = \frac{1}{2}\left[W(\Omega-\Omega_1)+W(\Omega+\Omega_2)+W(\Omega+\Omega_1)+W(\Omega+\Omega_2)\right] \tag{4.3.27}$$

สเปคตรัม (Ω) ของซีเควนซ์หน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะมีจุดข้ามศูนย์ (zero crossing) แรกที่ $\Omega = \frac{2\pi}{L}$ ขณะที่ถ้า $|\Omega_1 - \Omega_2| < \frac{2\pi}{L}$ สองฟังก์ชันหน้าต่าง $(\Omega-\Omega_1)$ และ $(\Omega-\Omega_2)$ จะเหลื่อมกัน ผลที่ตามมาก็คือ สองเส้นสเปคตรัมใน $x(n)$ จะไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ถ้า $|\Omega_1 - \Omega_2| \ge \frac{2\pi}{L}$ เราจะเห็น 2 ยอด (lobe) แยกจากกันในสเปคตรัม $\hat{X}(\Omega)$ ดังนั้นความสามารถในการแยกชัดเส้นสเปคตรัมของความถี่ที่แตกต่างกันจะถูกจำกัดโดยความกว้างของยอดสูงสุดของหน้าต่าง ภาพที่ 4.9 แสดงสเปคตรัมขนาด $\left|\hat{X}(\Omega)\right|$ ที่คำนวณโดยใช้ DFT สำหรับซีเควนซ์

$$x(n) = \cos\Omega_0 n + \cos\Omega_1 n + \cos\Omega_2 n \tag{4.3.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\Omega_0 = 0.2\pi, \Omega_1 = 0.02\pi$ และ $\Omega_2 = 0.6\pi$ ความยาวของหน้าต่างที่เลือก คือ $L = 25.5$ และ 100 จะเห็นว่าเราสามารถแยกเห็นความถี่ Ω_0 และ Ω_1 ได้เมื่อ $L = 100$ เพียงกรณีเดียว



ภาพที่ 4.10 สเปคตรัมขนาดสัญญาณจาก (4.3.28) เมื่อมองผ่านหน้าต่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า

4.4 การออกแบบโดยใช้อนุกรมฟูริเยอร์

4.4.1 การใช้อนุกรมฟูริเยอร์จำนวนพจน์คงตัว

ตัวกรองไม่ป้อนกลับนี้สามารถเขียนได้ตามสมการทั่วไป (4.4.1) ซึ่งจะเห็นว่าความยาวของตัวกรองจำกัด หรือ ชีพรีจีสเตอร์ มีจำนวนจำกัด ถ้าให้ x(n) เป็นลำดับสัญญาณเข้าและให้ $y(n)$ เป็นลำดับสัญญาณออก เพราะฉะนั้นเขียนสมการผลต่างสือเนื่องได้

$$y(n) = \sum_{k=-1}^{+M} c_k \cdot x(n-k) \qquad (4.4.1)$$

$$= c_0 x(n) + \sum_{k=1}^{M} \{c_{-k} \cdot x(n+k) + c_k \cdot x(n-k)\}$$

โดยการเขียนเราสมมติให้ T = 1 และประยุกต์ใช้การแปลง แซด เพื่อเขียนฟังก์ชันถ่ายโดนได้

$$H(Z) = c_0 + \sum_{k=1}^{M} \{c_{-k} z^k + c_k z^{-k}\} = \sum_{k=-M}^{M} \{c_k z^{-k}\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$H(w) = c_0 + \sum_{k=1}^{M}\left\{c_{-k}e^{j\omega k} + c_k e^{-j\omega k}\right\} = \sum_{k=-M}^{M}\left\{c_k e^{-j\omega k}\right\}$$

ถ้าพิจารณากรณีตัวกรองแบบสมมาตรคู่ หรือ $c_k = c_{-k}$

$$H(w) = c_0 + \sum_{k=1}^{M} c_k(e^{j\omega k} + e^{-j\omega k}) \qquad (4.4.2a)$$

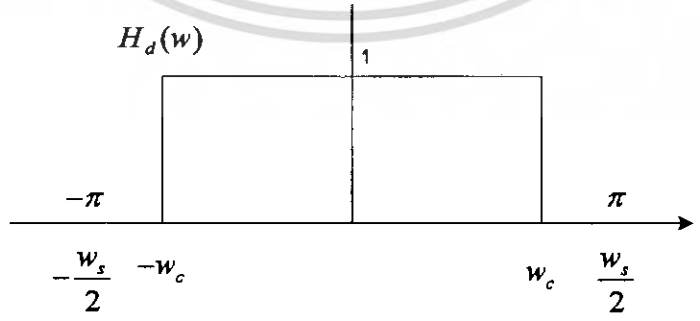
$$= c_0 + \sum_{k=1}^{M} 2c_k\left(\left\{e^{j\omega k} + e^{-j\omega k}\right\}/2\right) \qquad (4.4.2b)$$

$$H(w) = a_0 + \sum_{k=1}^{M} a_k \cos wk$$

โดยที่กำหนดให้ $a_0 = c_0$ และ $a_0 = 2c_k$ และ $k = \phi$

ผลที่ได้จากสมการ (4.4.2b) เห็นได้ชัดว่า ตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขชนิดสมมาตรคู่นั้น สามารถเขียนอธิบายได้โดยใช้ อนุกรมฟูริเยอร์ ที่ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์เฉพาะพจนโคซน์เท่านั้นและ ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยอร์ a_k ตามสมการ (4.4.2b) ก็จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์สมมาตรคู่สามารถเขียนแทนด้วย อนุกรมฟูริเยอร์ ที่มีเฉพาะพจน์ซายน์เท่านั้น และค่าสัมประสิทธิ์จะเป็นค่าจินตภาพ (imaginary) เสมอ

ที่นี้มาดูหลักการออกแบบโดยวิธีนี้ โดยปกติแล้วการออกแบบตัวกรองสัญญาณนั้นกระทำโดยการทำการประมาณการให้ตัวกรองที่ออกแบบมีผลตอบสนองความถี่ได้ใกล้เคียงกับ ผลตอบสนองอุดมคติ ภาพที่ 4.10 ให้มากที่สุด โดยตามรูป w_c เป็นค่าความถี่ตัด (cut off frequency) จากผลตอบสนองความถี่อุดมคติ $H_d(w)$ สามารถกระจายให้อยู่ในพจน์ของโดเมนเวลาโดยการประยุกต์ใช้การแปลงฟูริเยอร์ได้



ภาพที่ 4.11 ผลตอบสนองแอมพลิจูดอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_d(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_d(n) e^{-jwt} \tag{4.4.3}$$

โดยที่ในกรณีนี้ผลตอบสนองอิมพัลส์ $h_d(n)$ หาได้จาก

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-w/2}^{w/2} H_d(w) e^{jnwt} dw \tag{4.4.4}$$

แต่จากสมการ (4.4.2a) ผลตอบสนองความถี่ ของตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขเป็น

$$H(w) = \sum_{k=-M}^{M} c_k \cdot e^{-jkwT} \tag{4.4.5}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (4.4.3) และ (4.4.5) เห็นได้ว่า ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองจะใกล้เคียงผลตอบสนอง อุดมคติก็ต่อเมื่อ $M = \infty$ แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก จึงมีการ ตัดปลาย (truncare) อนุกรมฟูริเยอร์ให้เหลือเท่าที่จำเป็น และจัดให้

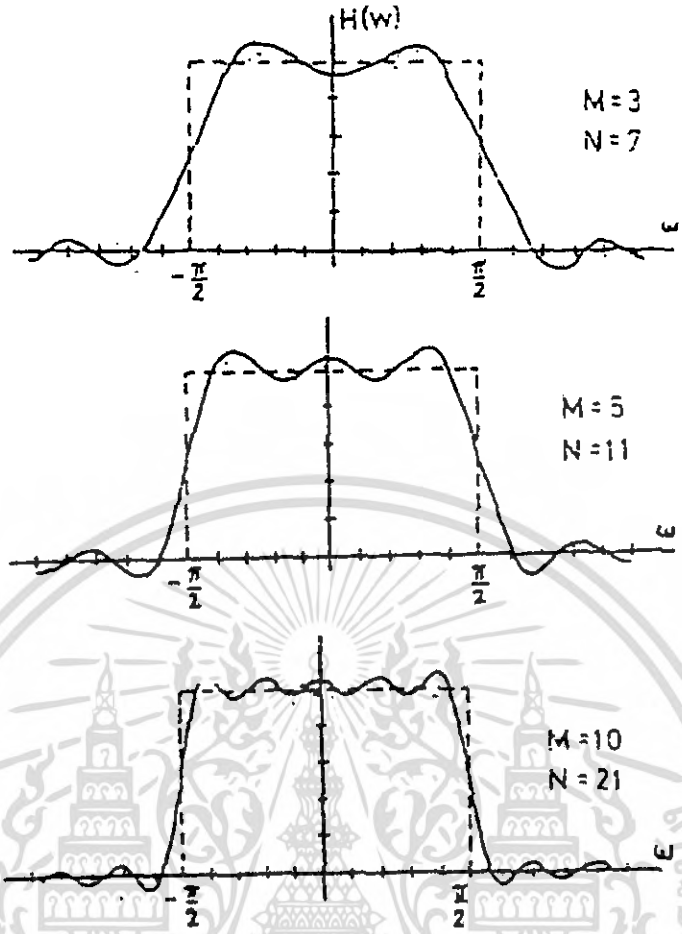
$$c_k = h_d(k) \tag{4.4.6}$$

โดยที่ $k = -M, \ldots, 0, \ldots, M$ ส่วนความยาวของตัวกรอง $N = (2M+1)$ ซึ่ง $M = \frac{(n-1)}{2}$

ภาพที่ 4.11 (a)-(c) ได้แสดงผลตอบสนองแอมพลิจูดเมื่อเปรียบเทียบกรณี M=3.5 และ 10 ตามลำดับ จากทั้ง 3 ผลตอบสนองแอมพลิจูดสังเกตเห็นว่า ถ้า M หรือ N มีค่ามากมีผลทำให้

1) ผลตอบสนองแอมพลิจูดใกล้เคียงผลตอบสนองอุดมคติมากขึ้น
2) จำนวนลูกคลื่น (ripple) มากขึ้น โดยที่คาบของลูกคลื่นลดลง
3) ผลตอบสนองแอมพลิจูดมีความคมมากขึ้น หรือ บริเวณความถี่ที่ผลตอบสนองเปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปเป็นค่าใกล้ศูนย์ หรือ เรียกว่า แถบสถานะ (Transition Band) แคบลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 ผลตอบสนองแอมพลิจูดสำหรับตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลข

ปรากฏการณ์ที่บริเวณใกล้จุดเปลี่ยนจากแอมพลิจูดหนึ่งเป็นศูนย์เกิดมีลูกคลื่นมีชื่อเรียกว่า ปรากฏการณ์กิบบ์ (Gibb's phenomena) ผลนี้เนื่องมาจากการที่ผลตอบสนองอุดมคติถูกแทนด้วยอนุกรมฟูริเยอร์จำนวนจำกัด ซึ่งหมายถึงถูกแทนด้วยเซ็ทของฟังก์ชันความถี่ของการแกว่ง (oscillation frequency) จำนวนจำกัดด้วยซึ่งจำนวนนี้ไม่เพียงพอที่ผลรวมจะแทนเส้นตรงได้ส่วนการที่ผลตอบสนองไม่เปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปศูนย์ทันทีทันใดเกิดแถบเปลี่ยนค่าขึ้นถ้าเพราะผลตอบสนองความถี่อนันต์ถูกเขียนแทนด้วยเซ็ทสัญญาณความถี่จำนวนจำกัดหรือ

$$H(w) = \sum_{k=-M}^{M} c_k (\cos kw - j \sin kw) \qquad (4.4.7)$$

ซึ่ง H(w) ประกอบขึ้นจากสัญญาณซายน์ และโคซายน์จำนวนจำกัดมารวมกัน ความถี่สูงสุดของสัญญาณจะเป็น M.w ดังนั้นสัญญาณในโดเมนเวลา ช่วงเวลา T_t ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณจะเปลี่ยนได้เร็วที่สุดเป็น

$$T_t = \frac{1}{(M.w)} \qquad (4.4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเห็นได้ว่าถ้า M มากขึ้น ช่วงเปลี่ยนค่าก็จะแคบลง

โดยทั่วไปในการออกแบบตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขเราต้องการ (ก) ลดจำนวนลูกคลื่นให้น้อยที่สุดและ (ข) ให้มีช่วงแถวเปลี่ยนค่าแคบ ซึ่งทั้งสองข้อนี้ไม่สามารถทำได้พร้อมกันคือ ถ้าลดจำนวนลูกคลื่น แถบเปลี่ยนค่ากว้างขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องเลือกอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งการลดผลทั้ง 2 ข้อนี้จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป สำหรับการออกแบบตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขโดยวิธีเขียนอนุกรมฟูริเยอร์ อาจสรุปเป็นขั้นตอนได้คือ

1) กำหนดผลตอบสนองอุดมคติที่ต้องการโดยกำหนดความถี่ตัด
2) ทำการอินทิเกรตผลตอบสนองอุดมคติเพื่อหา ลำดับผลตอบสนองอิมพัลส์ $h_d(k)$
3) เลือกให้สัมประสิทธิ์ $c_k = h_d(k)$

4.4.2 การลดลูกคลื่นโดยใช้ซิกมาแฟกเตอร์

เพื่อที่จะลดขนาดของลูกคลื่นบนผลตอบสนองความถี่ ของตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลข เราจำเป็นต้องดัดแปลงสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยอร์ที่ถูกตัดปลายเสียใหม่ หรือเรียกว่าทำการถ่วงน้ำหนัก (weighted) วิธีการลดลูกคลื่นวิธีหนึ่งทำได้โดยการหาค่าประมาณ หรือค่าเฉลี่ยของลูกคลื่นที่เกิดขึ้นถึง M ฮาร์มอนิกส์ (harmonic) ซึ่งก็เท่ากับเป็นการหาค่า

$$\ddot{A}(w) = (M/2\pi)\int_{w-\pi/M}^{w+\pi/M} H(w)dw \tag{4.4.9}$$

โดยที่ $H(w)$ เป็นผลตอบสนองความถี่ตามสมการ (4.4.2b) ดังนั้น

$$\begin{aligned} A(w) &= (M/2\pi)\left[a_0\right]\Big|_{w-\pi/M}^{w+\pi/M} + (M/2\pi)\sum_{k=1}^{M}\left[a_k \sin wk/k\right]\Big|_{w-\pi/M}^{w+\pi/M} \\ &= a_0 + (M/2\pi)\sum_{k=1}^{N}(a_k/k)\left\{\sin\left[\left(w-\pi/M\right)k\right] - \sin\left[\left(w-\pi/M\right)k\right]\right\} \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^{M}\left\{\left[\sin(\pi k/M\right]/\left(\pi k/M\right)\right\}\cdot a_k \cos wk \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^{M}\sigma(M,k)\cdot a_k \cos wk \end{aligned} \tag{4.4.10}$$

ซึ่งจะเห็นว่าผลที่ได้จากการเฉลี่ยค่าได้นี้ ก็คือ อนุกรมฟูริเยอร์ที่เทอมโคไซน์ถูกคูณด้วยซิกมาเฟคเตอร์ (sigma factor) (M,k) และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองสัญญาณกลายเป็น

$$c_0 = a_0 \tag{4.4.11}$$

$$c_k = (1/2)\sigma(N,k)\cdot a_k \tag{4.4.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ c_k และ c_0 เป็นอนุกรมฟูริเยอร์ ข้อสังเกตเทอม $(N,N)=(\sin\pi)/\pi=0$ เพราะฉะนั้นเทอมที่ N จะมีค่าเป็นศูนย์ ตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขตามสมการ (4.4.11) จึงมีเทอมสัมประสิทธิ์ $2(M-1)+1=2M-1$ เทอม หรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือ ต้องใช้ $(2M-1)$ ตัว วิธีการลดลูกคลื่นที่ได้กล่าวมานี้ เป็นวิธีการลดลูกคลื่นโดยใช้ วินโดว์ (window) แบบหนึ่งโดยวินโดว์นี้มีชื่อเรียกว่า Lanczos windowing[2]

ตัวอย่าง 4.1 ถ้าให้

$$H(f)=1 \quad ;0<|f|<0.2$$
$$=0 \quad ;0.2<|f|<0.5$$

ฟังก์ชันถ่ายโอน $H(f)$ นี้ถ้าวิเคราะห์ดูแล้วจะเป็นแบบสมมาตรคู่หรือ $a_k=a_{-k}$

$$a_k=(1/2\pi)\int_{-\pi}^{\pi}H(w)e^{jnwt}dw$$
$$=(2/2\pi)\int_{0}^{\pi}H(w)(\{e^{-jnk}+e^{-jnk}\}/2)dw$$
$$=(2/\pi)\int_{0}^{\pi}H(w)\cos kw.dlkw$$
$$=4\int_{0}^{1/2}H(f)\cos 2\pi kf.df$$
$$=(2/\pi k)\sin(0.4\pi k)$$

$$H(f)=0.4+2\left\{\sum_{k=1}^{\infty}\{\sin(0.4\pi k/\pi k\}\cos 2\pi kf\right\}$$

ถ้าเราตัดปลายเหลือแค่ 5 พจน์ และ คำนวณ (5,k) จะได้

$$(5,k)=\sin(\pi k/5)/\{\pi k/5\}$$

เพราะฉะนั้น

$$c_k=(1/2)\{2\sin(\pi k/5)/(\pi k/5)\}\cdot\{(\sin(0.4\pi k)/\pi k\}$$
$$=\{\sin(\pi k/5)/(\pi k/5)\}\cdot\{\sin(0.4\pi k)/\pi k\}$$

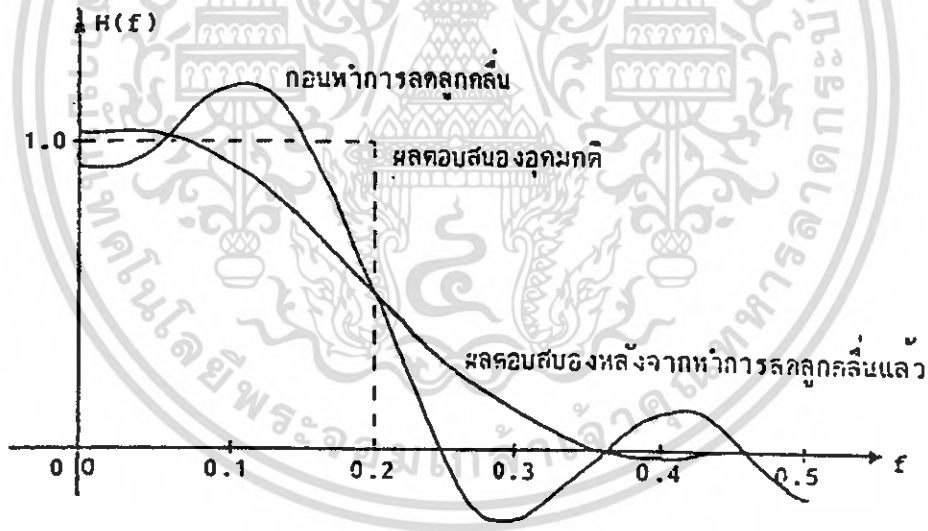
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ของตัวกรองจากตัวอย่าง 4.1

k	$\sin(\pi k/5)$	$\sin(0.4\pi k)/(\pi k)$	c_k
0	-	-	0.5
1	0.935	0.303	0.2833
2	0.757	0.093	0.0704
3	0.504	-0.062	-0.0312
4	0.234	-0.076	-0.0178

ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองเชิงตัวเลขที่ได้ก่อนที่จะทำการลดลูกคลื่น และหลังจากที่ได้ทำการลดลูกคลื่นได้แสดงไว้ในกาพ 4.12 ส่วนแผนภาพของตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขที่ให้ผลตอบสนองเพสเชิงเส้น และผลตอบสนองอิมพัลส์ได้แสดงไว้ในกาพ 4.12

ข้อสังเกต จะเห็นว่าลูกคลื่นน้อยลงเมื่อมีการถ่วงน้ำหนักอนุกรมฟูริเยอร์ที่ถูกตัดปลาย แต่อย่างไรก็ตามช่วงความถี่ที่ตอบสนองแอมพลิจูดเปลี่ยนจาก 1 ไปเป็น 0 มากขึ้นหรือแถบเปลี่ยนค่ากว้างมากขึ้นลำดับขั้นตอนในการออกแบบนี้สรุปได้ดังภาพ 4.13



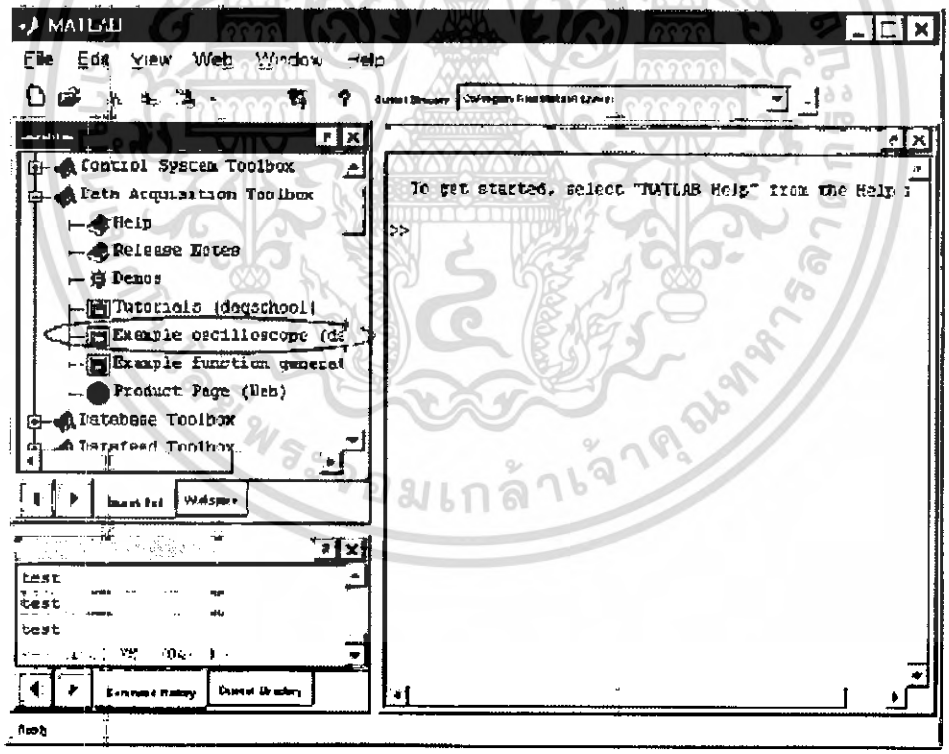
ภาพที่ 4.12 ผลตอบสนองความถี่เมื่อพจน์โคไซน์ของอนุกรมฟูริเยอร์ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยซิกมาแฟกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดลองและการประมวลผลการทดลอง

5.1 การทดสอบการรับค่า

ในการทดลองเก็บข้อมูลจาก Function generator เข้าสู่คอมพิวเตอร์นั้นทำได้โดยการรับสัญญาณผ่าน A/D card ซึ่งจากการทำโครงงานเราจึงนำทำการรับค่าผ่านทาง DAQ USB- 6008 ซึ่งการับสัญญาณเพื่อแสดงผลนั้น Matlab สามารถทำได้ 2 วิธีคือโดยการใช้คำสั่ง daqscope บน Command window ซึ่งคำสั่งจะเป็น Function สำเร็จรูปที่จะแสดงภาพเหมือนของหน้าจอ Oscilloscope สามารถแสดงรูปร่างของสัญญาณที่รับเข้ามาและปรับค่าต่างๆโดยประมาณได้ แต่ยังคงมีข้อเสียเล็กน้อย คือสัญญาณที่แสดงนั้น ไม่ได้เทียบกับเวลา แต่เป็นการเทียบกับจำนวนครั้งที่ทำการ Sampling เข้ามา ซึ่งโปรแกรมจะทำการ Sampling ทุกๆ 1 ms. ทำให้คำนวณค่าความถี่ได้แต่ค่อนข้างลำบาก ซึ่งเราสามารถใช้คำสั่งนี้อีกทางได้จาก Launch Pad ภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 การเรียกใช้คำสั่ง daqscope จาก Launch Pad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่สองคือ การเขียนโปรแกรมบน Command window โดยตรง ซึ่งจะยุ่งยากมากขึ้น แต่เราจะสามารถกำหนดค่าต่างๆ ได้มากว่า ทั้งรูปแบบการแสดงผล การรับค่า ซึ่งจะได้แสดงให้เห็นในการทดลองต่อไป

ผลจากการทดลอง DAQ USB-6008

ทำการทดลองโดยเขียน Command window ซึ่งการทดลองและผลการทดลองเป็นดังนี้

ตั้ง Function generator ให้จ่ายสัญญาณ Sine Wave ความถี่ 100 Hz ขนาด 5.2 Vp-p ให้แก่ DAQ USB-6008 ที่ขา 1 และ 2 ซึ่งเป็นขาของ Analog input ground และ Analog input channel 0 ตามลำดับ ในส่วนของโปรแกรมนั้น ช่วงแรกจะต้องทำการเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อกับ DAQ USB-6008 ก่อนจากนั้นจำทำการตั้งค่าต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้งาน ดังต่อไปนี้

```
>> AI = AnalogInput('NiDaq',dev1);
>> AddChannel(AI,0);
```

ภาพที่ 5.2 โปรแกรมติดต่อ DAQ USB-6008

จากโปรแกรม จะเป็นการติดต่อกับ DAQ USB-6008 (โปรแกรมเรียกว่า NiDaq) และใช้งานที่ channel 0 เพียงช่องเดียว

เมื่อติดต่อได้แล้ว ก็จะทำการทดลองรับสัญญาณที่ Function generator จ่ายให้กับ DAQ USB-6008 โดยการกำหนด Parameter ต่างๆ ได้แก่

SamplesPerTrigger : คือจำนวนครั้งของการ Sampling ต่อการ Trig 1 ครั้ง

TriggerType : คือรูปแบบของการ Trig เพื่อรับค่าเข้ามา

Actualrate, Samplerate,Duration : เป็นชื่อตัวแปรที่เรากำหนดขึ้นเอง เพื่อใช้ในการเก็บค่าข้อมูลโดยโปรแกรมที่ทำการทดลองเพื่ออ่านค่าจาก DAQCard0-6008 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
>> SampleRate = 2;
>> duration = 0.01;
>> AcctualRate=get(AI,'SampleRate');
>> Set(AI,SamplesPerTrigger',Duration*Actualrate);
>> set(AI,'TriggerType',Manual');
>> Blocksize=Get(AI,'SamplesPerTrigger');
>> Fs=ActualRate;
>> Start(AI);
>> Trigger(AI);
>> DATA=getData(AI);
>> Plot(Data)
```

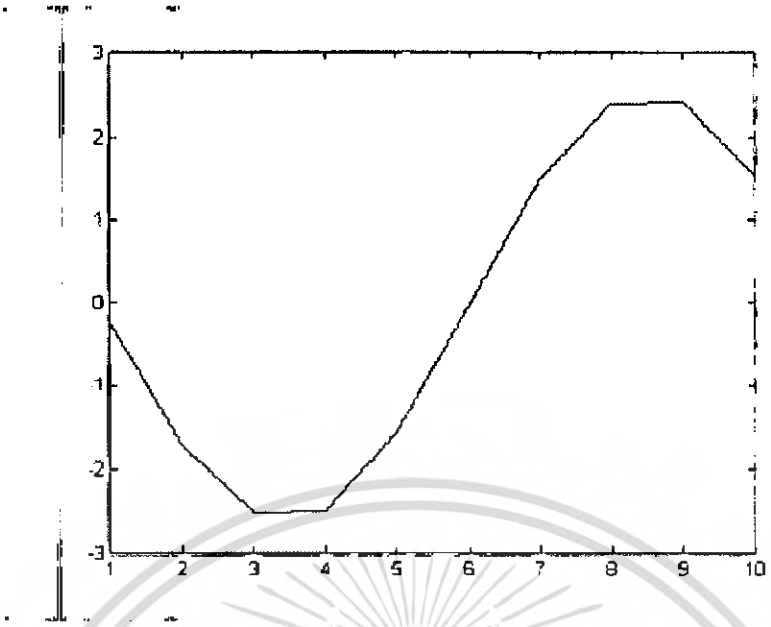
ภาพที่ 5.3 การตั้งค่าและรับค่าจาก DAQ USB-6008 เมื่อ Duration = 0.01

```
>> AI

Display Summary of Analog Input (AI) Object Using 'USB-6008'.
  Acquisition Parameters:  1000 samples per second on each channel.
                           10 samples per trigger on each channel.
                           0.01 sec. of data to be logged per trigger.
                           Log data to 'Memory' on trigger.
  Trigger Parameters:  1 'Manual' trigger(s) on TRIGGER.
        Engine status:  Waiting for START.
                           10 samples acquired since starting.
                           0 samples available for GETDATA.

AI object contains channel(s):
  Index:  ChannelName:  HwChannel:  InputRange:  SensorRange:  UnitsRange:  Units:
  1             ''            0        [-5 5]        [-5 5]        [-5 5]    'Volts'
```

ภาพที่ 5.4 ผลจากการตั้งค่า DAQ USB-6008

ผลจากการ Run โปรแกรมดังกล่าว จะได้ผลออกมา ภาพที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.5 ผลจากการรับค่า เมื่อ Duration = 0.01

จากภาพที่ 5.5 ที่ได้ จะเห็นว่ามีลักษณะที่ไม่ค่อยสวยงามเท่าไหร่ และมีความคลาดคลื่นจากสัญญาณจริงอยู่พอสมควรเนื่องจากเราทำการเลือกอัตราการสุ่ม (Sampler per trigger) มีค่าต่ำเกินไป ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยทำการเพิ่มค่า Samples per trigger ให้มากขึ้นกว่าเดิม

เมื่อทำการเขียนโปรแกรมขึ้นอีกหนึ่งโปรแกรม เพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างของสัญญาณที่ได้ ดังต่อไปนี้

```
>> SampleRate = 2;
>> Duration =  0.1;
>> ActualRate=get(AI,'SampleRate');
>> Set(AI,'SamplesPerTrigger',Duration*Actualrate);
>> Set(AI,'TriggerType','Manual');
>> Blocksize=Get(AI,'SamplesPerTrigger');
>> Fs=ActualRate;
>> Start(AI);
>> Trigger(AI);
>> Data=GetData(AI);
>> Plot(Data)
>> AI
```

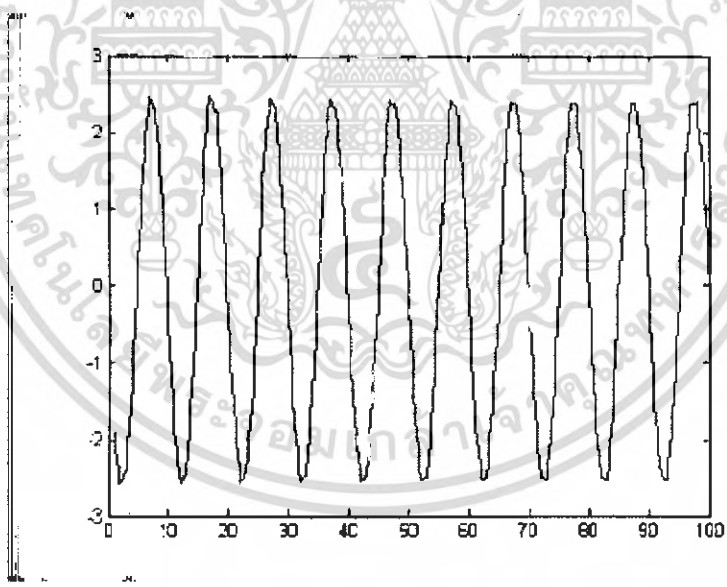
ภาพที่ 5.6 การตั้งค่าและรับค่าจาก DAQ USB-6008 เมื่อ Duration = 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Display Summary of Analog Input (AI) Object Using 'PCI-6024E'.
  Acquisition Parameters:  1000 samples per second on each channel.
                           100 samples per trigger on each channel.
                           0.1 sec. of data to be logged per trigger.
                           Log data to 'Memory' on trigger.
      Trigger Parameters:  1 'Manual' trigger(s) on TRIGGER.
          Engine status:  Waiting for START.
                           100 samples acquired since starting.
                           0 samples available for GETDATA.
AI object contains channel(s):
  Index:  ChannelName:  HwChannel:  InputRange:  SensorRange:  UnitsRange:  Units:
  1                ''           0       [-5 5]        [-5 5]        [-5 5]   'Volts'
```

ภาพที่ 5.7 ผลจากการตั้งค่า DAQ USB-6008

เมื่อโปรแกรม Run เสร็จแล้ว จะได้ผลออกมาดังภาพที่ 5.8



ภาพที่ 5.8 ผลการรับค่า เมื่อ Duration = 0.1

ข้อแตกต่างของโปรแกรมทั้งสองคือ โปรแกรมแรก เรากำหนดให้ Duration = 0.01 ซึ่งเมื่อโปรแกรม Run แล้ว จะเห็นว่าทำให้ได้ค่า Sample = 10 Samples per trigger แต่ในโปรแกรมที่สอง เรากำหนดให้ Duration = 0.1 ซึ่งเมื่อโปรแกรม Run แล้ว จะเห็นว่าทำให้ได้ค่า Sample = 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Samples per trigger ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการ Trig 1 ครั้งนั้นเท่ากับการแสดงผล 1 หน้าจอ ถ้าค่า Samples per trigger ยิ่งมากเท่าไรก็จะยิ่งเห็นรูปคลื่นมีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ความถี่ยังคงเท่าเดิม และเมื่อพิจารณาผลจากการทดลองหลายๆ ครั้ง จะได้ว่าโปรแกรมจะทำการ Sampling ทุกๆ 1 mS.

จากการทดลองที่ผ่านมาเห็นได้ว่าการใช้ DAQ USB-6008 เป็น A/D card นั้น ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ป้อนจาก Function generator มากทั้งแรงดันและความถี่ ซึ่งเราสามารถจะตั้ง Input voltage range, Gain และคุณสมบัติต่างๆ ได้อีกมากมาย ทำให้เราสามารถใช้งาน DAQ USB-6008 ได้หลากหลายมาก

จากการทดลองรับค่าทำให้เราสามารถประยุกต์ใช้งาน DAQ USB-6008 ในการรับค่าจาก Transducer ต่างๆ ที่ส่วนมากมี Output เป็นแรงดันได้ (กรณีที่ Output เป็นกระแสต้องทำการตั้งค่าใหม่เพื่อให้ DAQ USB-6008 รับค่า Input ที่เป็นกระแส) ซึ่งการทดลองในตอนนี้ได้ทดลองใช้ DAQ USB-6008 เพื่อ รับค่าจาก Transducer แทนการอ่านค่าบันทึกค่าและเขียนรูปด้วยผู้ทดลองเอง ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและมีความแม่นยำสูงกว่าอีกด้วยในการเขียนโปรแกรมเพื่อรับค่าจาก Transducer นั้น

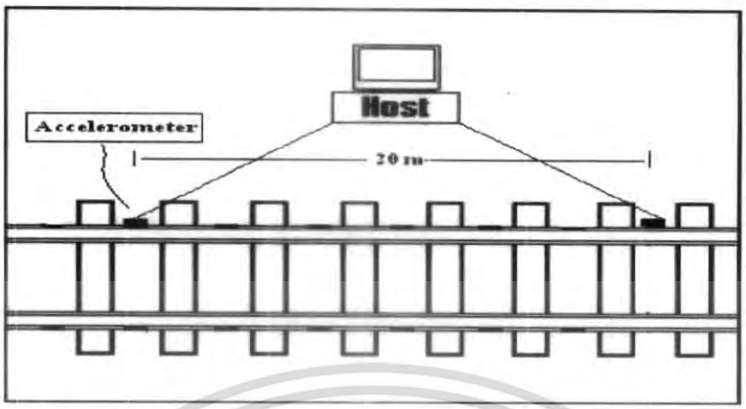
5.2 การทดลองวัดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ

5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เซ็นเซอร์ Micromachined Accelerometer
- สายสัญญาณใช้หัวต่อแบบ ไมโครโฟน 3 ขา จำสวนสองเส้น (มีความยาวเส้นละ 20 เมตร)
- แหล่งจ่ายไฟ 5Vdc ที่มีหัวต่อ แบบ 3 ขา จำนวนสองช่องสัญญาณ
- เครื่องคอมพิวเตอร์ (Notebook) ที่มีพอร์ต USB
- แผ่นโปรแกรม LabVIEW 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 สถานที่ทดลอง (จุดที่มีรถไฟวิ่งผ่าน) ดังภาพที่ 5.9 และ 5.10



ภาพที่ 5.9 แสดงการวางตำแหน่งการติดตั้ง

ภาพที่ 5.10 แสดงการติดตั้งตัวเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการวัด

การทดลองของโครงงงานนี้เป็นการทำการวัดสัญญาณที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของรถไฟ 3 ประเภท คือ

- เซลราง
- รถไฟธรรมดา
- รถสปรินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 ขั้นตอนในการเตรียมอุปกรณ์วัดสัญญาณจากการสั่นสะเทือน มีลำดับดังนี้

1. สถานที่ที่จะทำการทดลอง เตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ในการวัด และหาจุดที่เหมาะสมในการติดตั้ง อุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยทำความสะอาดพื้นผิวของส่วนที่จะวัดให้มีความสะอาดและห้อง การติดตั้งตัวเซ็นเซอร์นั้นจะทำการติดโดยใช้กาวสองหน้าชนิดบาง ติดไปบนรางรถไฟ โดยไม่มีผลกระทบต่อเส้นทางเดินของรถไฟ และทำการวางจุดที่วัดสัญญาณให้ห่างกัน 20 เมตรเพื่อ จำนวนสองช่องสัญญาณ เพื่อทำการวัดความเร็วรถไฟขบวนนั้นๆ

2. เสียบปลั๊กไฟให้กับชุดส่งสัญญาณ และเปิดสวิทช์ ต่อ เซ็นเซอร์เข้ากับ Power Supply จำนวน 2 ช่องสัญญาณ แล้วนำเอาท์พุต จำนวน 2 ช่องสัญญาณ ต่อเข้า DAQ USB-6008 แต่ทำการส่งข้อมูลผ่านพอร์ต USB เข้าคอมพิวเตอร์

3. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ (Notebook) ความละเอียด 1280*800 จุด และเรียกใช้โปรแกรม LabVIEW 8 ที่เขียนขึ้นมา เพื่อทำการใช้งานในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

4. สังเกตผลสัญญาณที่ทำการตรวจวัด

5. ทำการบันทึกข้อมูลจากสัญญาณการสั่นสะเทือน ของรถไฟ สามประเภท

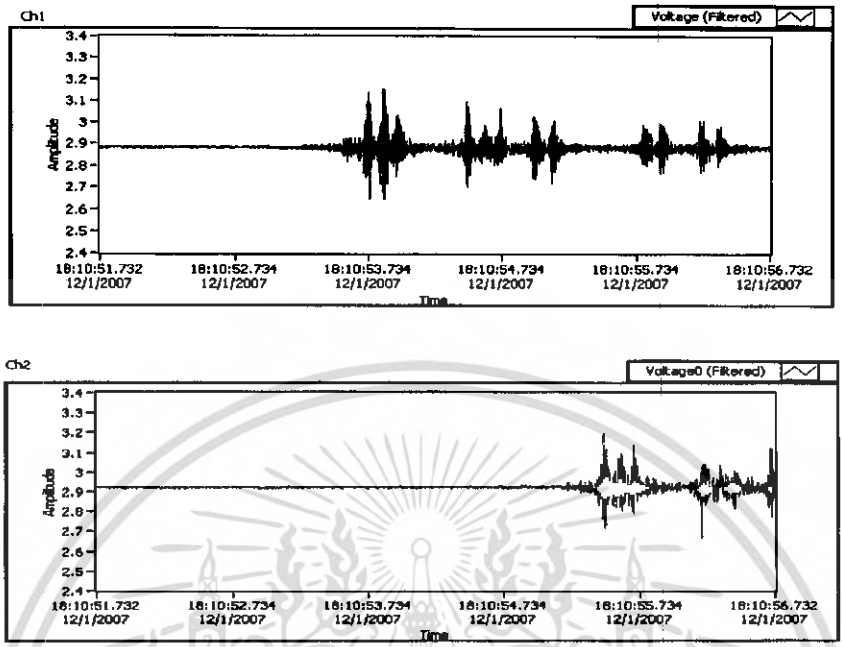
5.3 ผลการทดลองวัดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ

ในการศึกษาผลของรูปแบบของการสัญญาณการเคลื่อนที่ของรถไฟแบ่งเป็นการศึกษาประเภทรถไฟ แต่ละประเภทคือ รถไฟธรรมดา รถไฟดีเซลราง รถไฟสปินเตอร์โดยแต่ล่ะประเภทได้คำนึงถึงความเร็วของขบวนรถไฟ ซึ่งผลของการนำมาวิเคราะห์สามารถนำมาสรุปได้ดังนี้

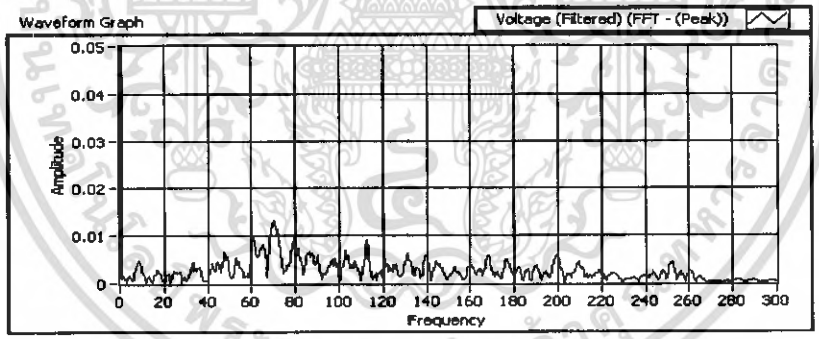
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบสัญญาณของรถไฟแต่ละประเภท

รถไฟธรรมดา 1



ภาพที่ 5.11 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่ง เป็นไฟล์ detect1.lvm)



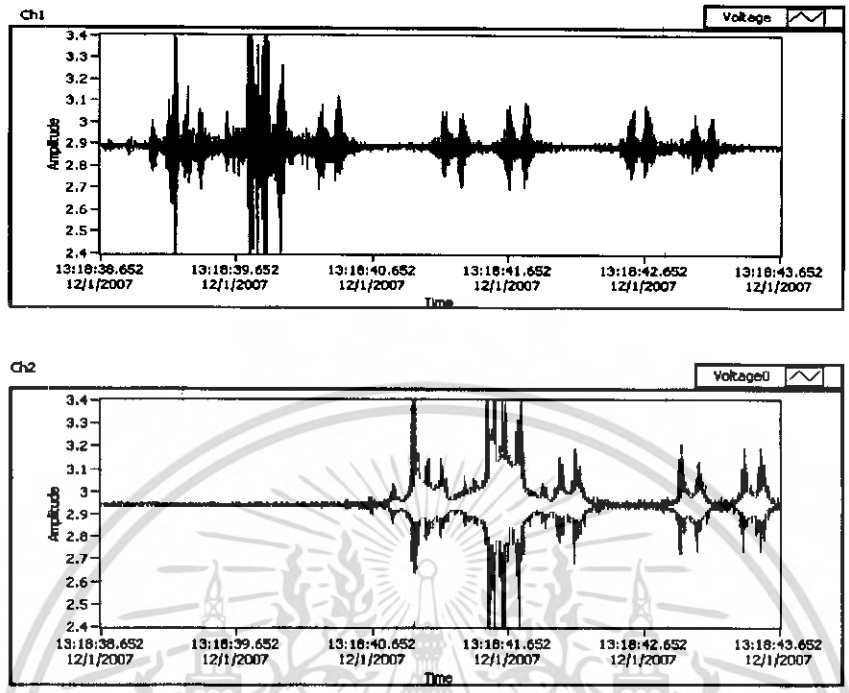
ภาพที่ 5.12 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect1.lvm)

ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 1

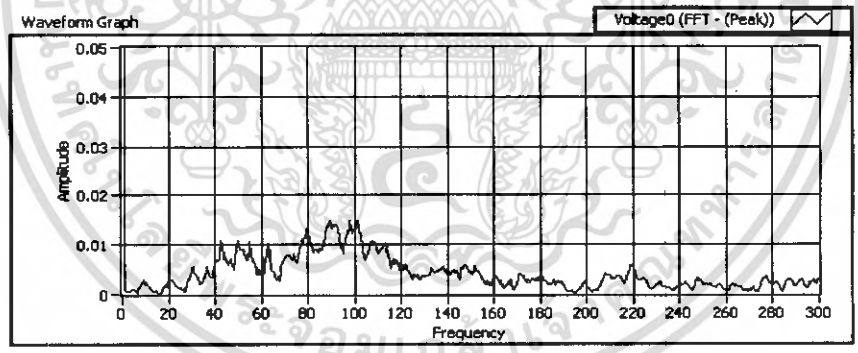
ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ธรรมดา (8-10)	47.31	2.00	0.013	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟธรรมดา 2



ภาพที่ 5.13 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่ง เป็นไฟล์ detect2.lvm)



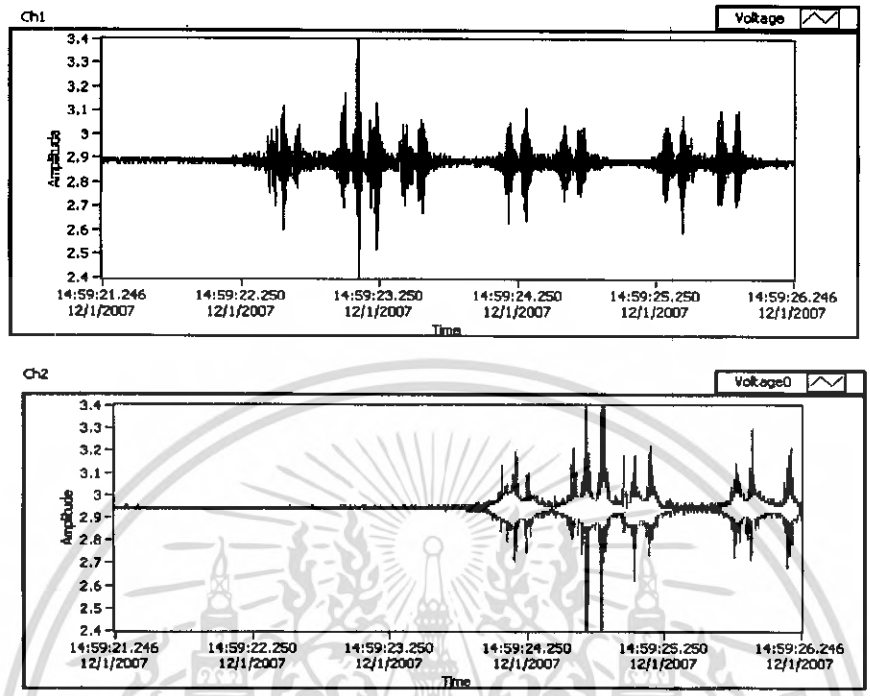
ภาพที่ 5.14 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect2.lvm)

ตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 2

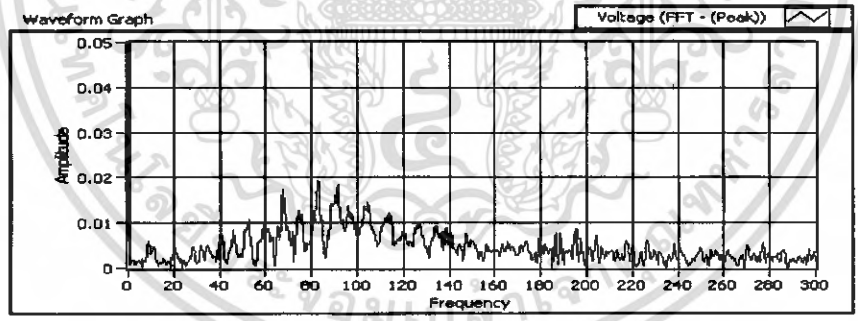
ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ธรรมดา (8-10)	46	2.75	0.015	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟธรรมดา 3



ภาพที่ 5.15 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect3.lvm)



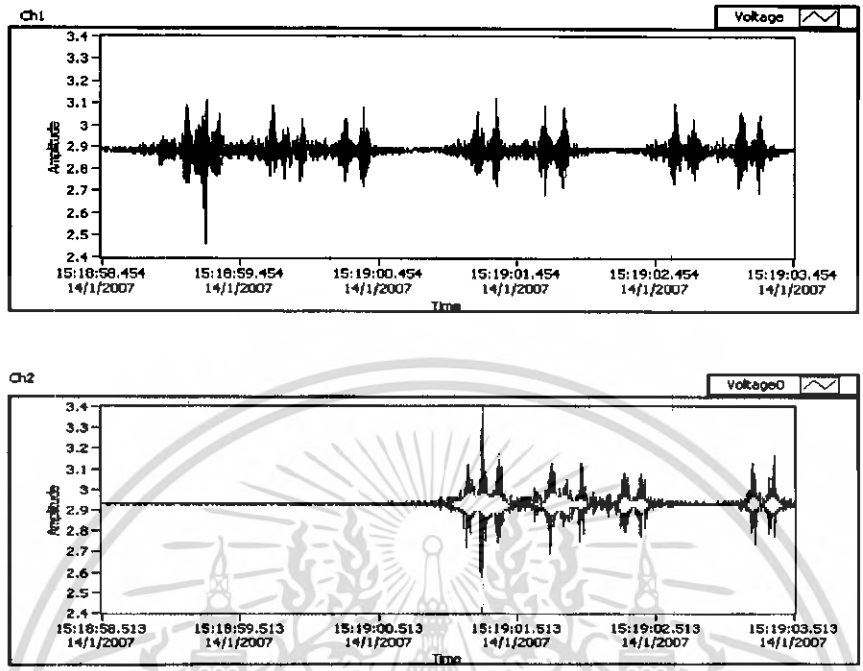
ภาพที่ 5.16 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect3.lvm)

ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 3

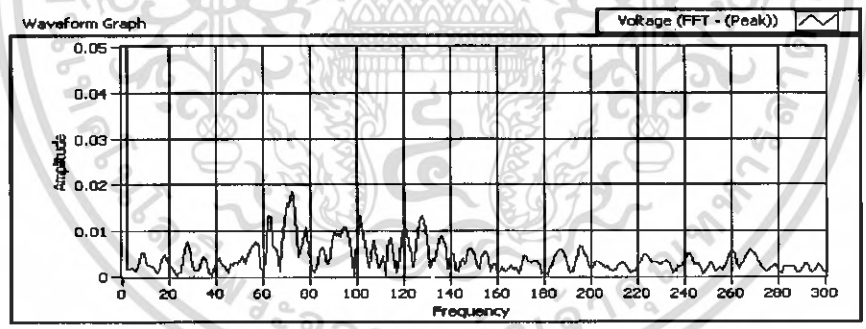
ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ธรรมดา (8-10)	48.70	2.91	0.02	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟธรรมดา 4



ภาพที่ 5.17 แสดงสัญญาณจากรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect4.lvm)



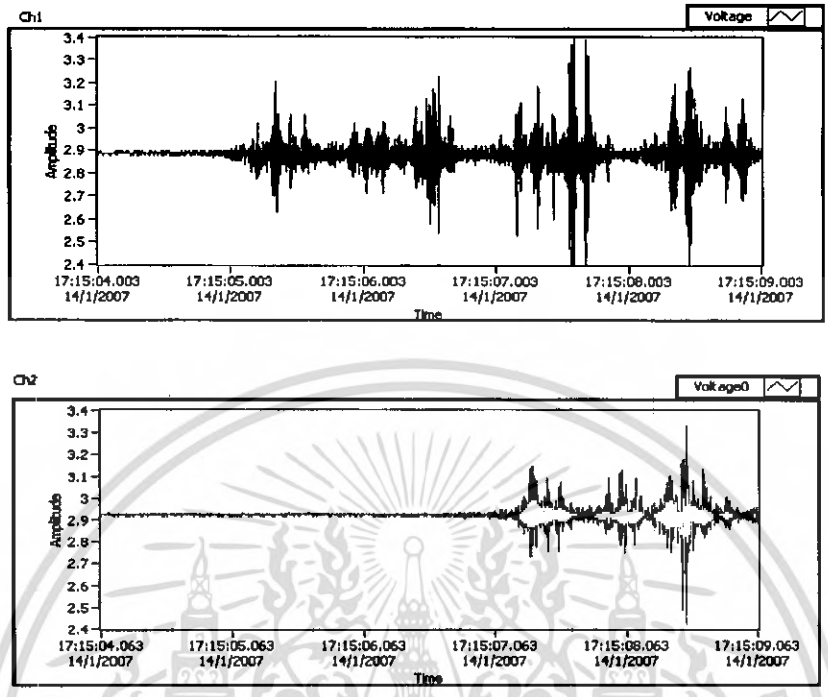
ภาพที่ 5.18 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect4.lvm)

ตารางที่ 5.4 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 4

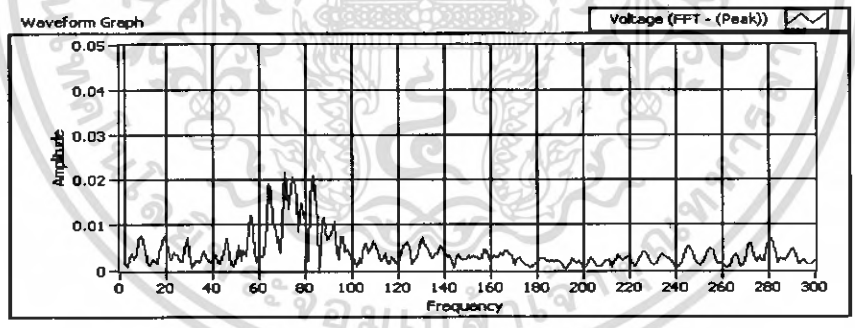
ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว km/hr	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ธรรมดา (8-10)	41.40	2.25	0.019	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟธรรมดา 5



ภาพที่ 5.19 แสดงสัญญาณจากจรถไฟธรรมดา 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect5.lvm)



ภาพที่ 5.20 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect5.lvm)

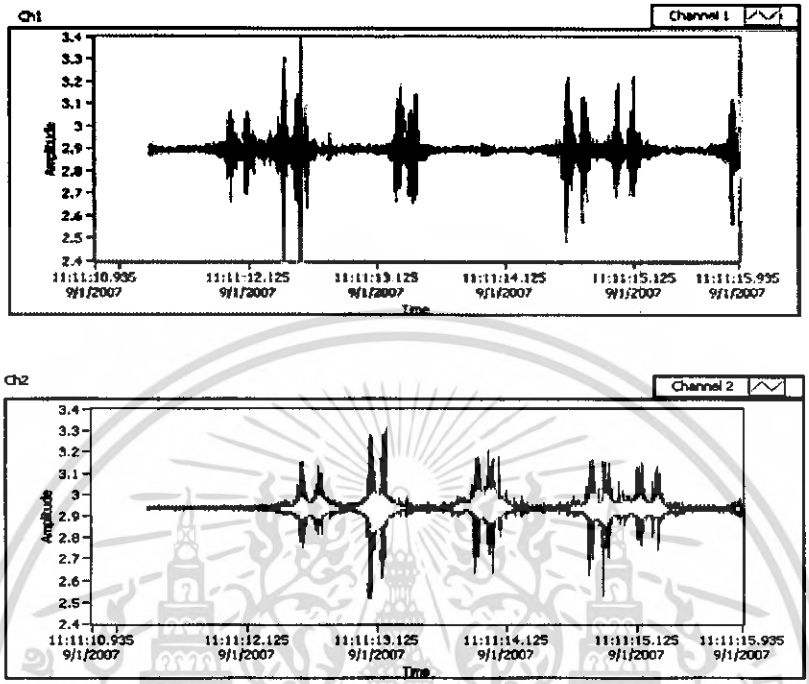
ตารางที่ 5.5 แสดงข้อมูลของรถไฟธรรมดา 5

ประเภท (คู่ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ธรรมดา (8-10)	43.57	2.00	0.021	70

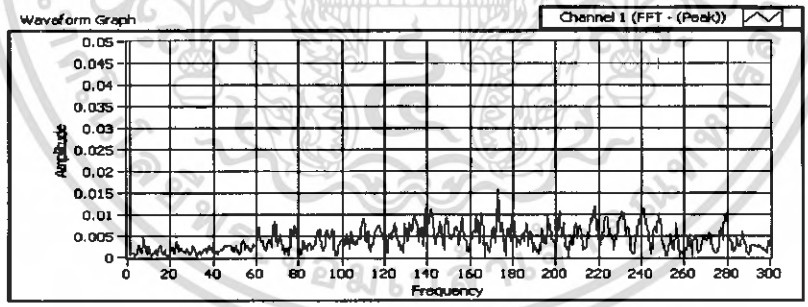
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงสัญญาณจากรถไฟดีเซลราง

รถไฟดีเซลราง 6



ภาพที่ 5.21 แสดงสัญญาณจากรถไฟดีเซลราง 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect6.lvm)



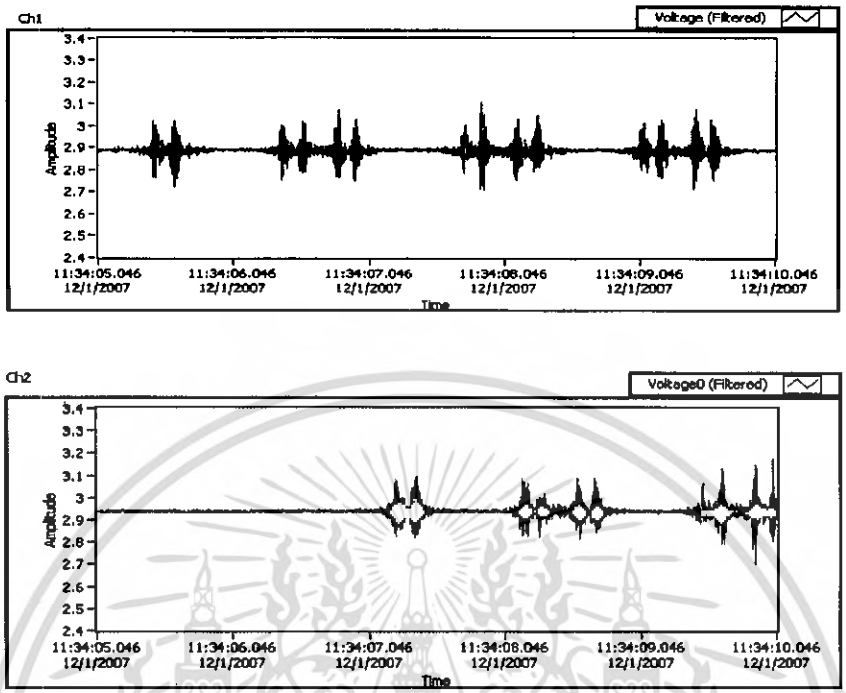
ภาพที่ 5.22 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect6.lvm)

ตารางที่ 5.6 แสดงข้อมูลของรถไฟดีเซลราง 6

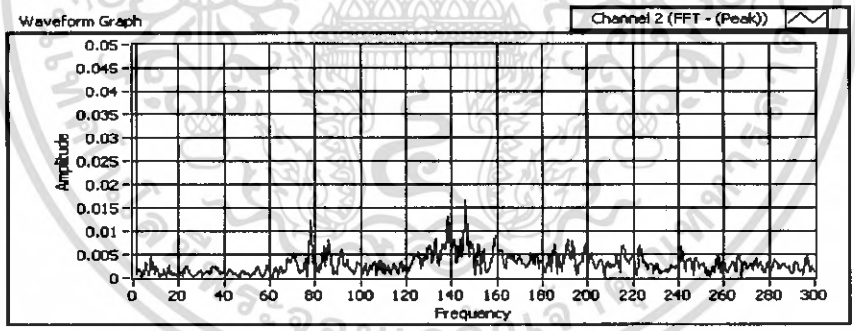
ประเภท (คู่ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ดีเซลราง (3-4)	70	2.25	0.016	170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟดีเซลราง 7



ภาพที่ 5.23 แสดงสัญญาณจากรถไฟดีเซลราง 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect7.lvm)



ภาพที่ 5.24 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect7.lvm)

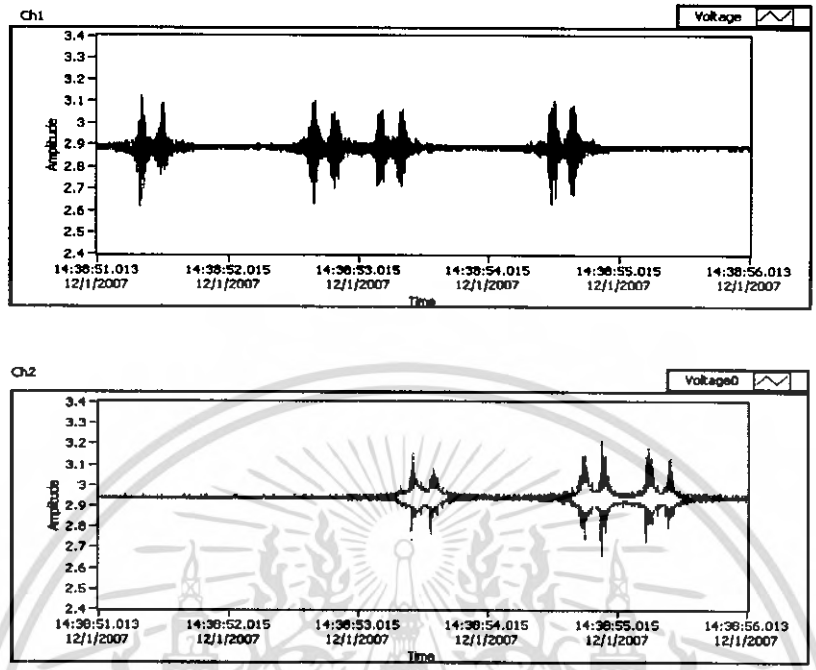
ตารางที่ 5.7 แสดงข้อมูลของรถไฟดีเซลราง 7

ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
ดีเซลราง (3-4)	50	1.75	0.016	150

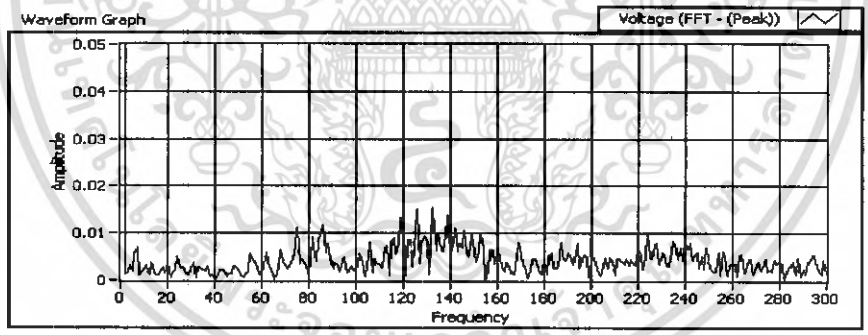
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงสัญญาณจากรถไฟสปินเตอร์

รถไฟสปินเตอร์ 8



ภาพที่ 5.25 แสดงสัญญาณจากรถไฟสปินเตอร์ 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect8.lvm)



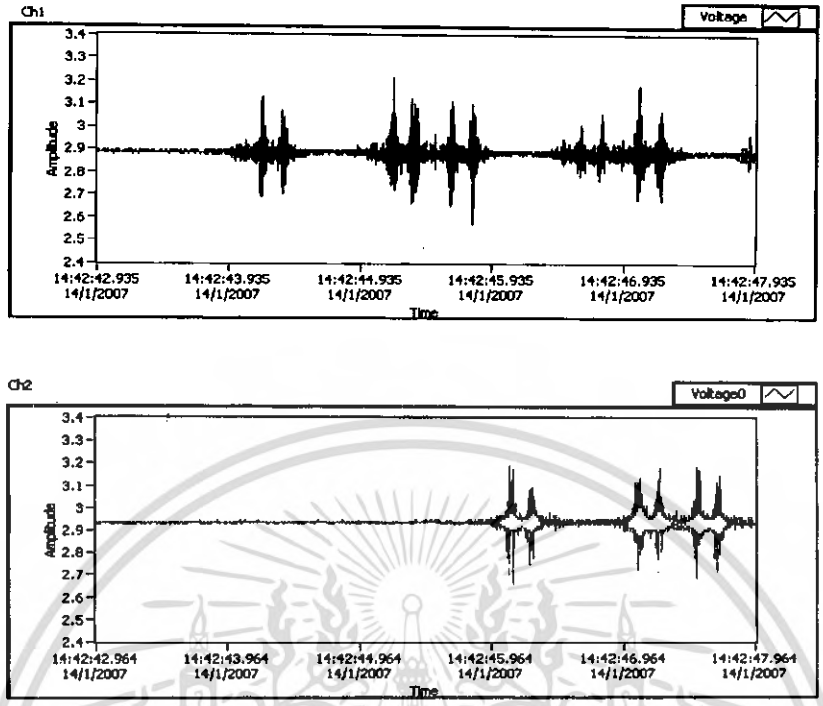
ภาพที่ 5.26 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect8.lvm)

ตารางที่ 5.8 แสดงข้อมูลของรถไฟสปินเตอร์ 8

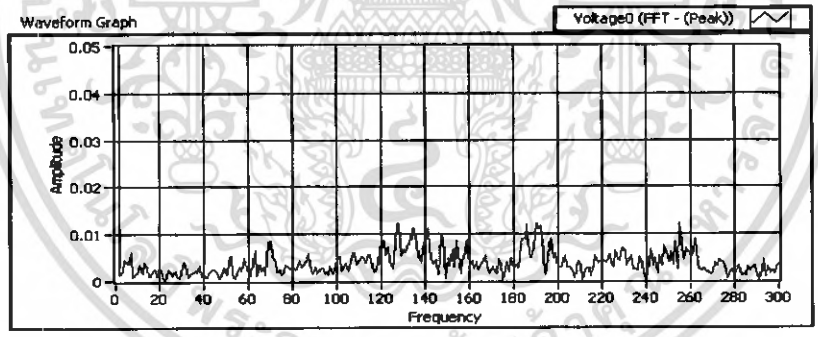
ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
สปินเตอร์ (3-4)	47	1.25	0.014	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟสปินเตอร์ 9



ภาพที่ 5.27 แสดงสัญญาณจากรถไฟสปินเตอร์ 2 ช่องสัญญาณ (ซึ่งเป็นไฟล์ detect9.lvm)



ภาพที่ 5.28 Acceleration spectrum (ซึ่งเป็นไฟล์ detect9.lvm)

ตารางที่ 5.9 แสดงข้อมูลของรถไฟสปินเตอร์ 9

ประเภท (ตู้ขบวน)	ความเร็ว (km/hr)	Max Acceleration (g)	Max Acceleration Spectrum (m/s^2)	Frequency (Hz)
สปินเตอร์ (3-4)	49.26	1.54	0.012	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพเป็นสัญญาณที่ได้จากการใช้ Accelerometer วัดโดยทำการวัดจำนวน 2 อินพุตเพื่อทำการหาค่าความเร็วของรถไฟแต่ละขบวน จากข้อมูลที่ได้จากการวัด สามารถนำมาวิเคราะห์ความถี่ของการตอบสนองของการสั่นสะเทือนของรางเหล็กที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของรถไฟแต่ละประเภทสามารถหาได้โดยอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fast Fourier transform (FFT) เพื่อแปลงการตอบสนอง ในรูปแบบ time domain ไปเป็นการตอบสนองที่อยู่ในรูปของ frequency domain หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Spectrum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

จากรูปแบบสัญญาณของแต่รถไฟแต่ละประเภท มีรูปแบบที่แสดงลักษณะของคลื่น P-wave ที่มีความแตกต่างกันซึ่งระดับคลื่นที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่แสดงในผลการทดลองในรถไฟธรรมดา แสดงให้เห็นว่า รถไฟธรรมดาแต่ละขบวนมีสัญญาณที่แสดง แอมพลิจูด ที่มีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากโครงสร้างของหัวรถจักรของรถไฟธรรมดา มีน้ำหนักและจำนวนล้อมากกว่ารถไฟดีเซลราง และรถไฟสปินเตอร์ ซึ่งเมื่อคิดที่ส่วนหัวของรถไฟธรรมดาจะมีแอมพลิจูด ที่เกิดขึ้นสูงสุดสามจุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกิดการบีบอัดระหว่างล้อ ที่กระทำกับรางรถไฟ ทำให้เกิดแอมพลิจูดสูงสุดขึ้นมา และจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่า Fast Fourier transform (FFT) เพื่อแปลงผลตอบสนอง ในรูปแบบ time domain เป็นผลตอบสนองที่อยู่ในรูปแบบ frequency domain จะพบว่าผลตอบสนองของความถี่ของรถไฟจะเกิดขึ้นที่หลายความถี่ในช่วง 0-300 Hz ซึ่งเกิดความถี่ที่ไม่สูงมากนักเพราะเป็นความถี่ทางกล แต่เมื่อคิดที่ส่วนหัวของรถจักรของรถไฟธรรมดา จะเกิดผลตอบสนองที่ความถี่ 80-100 Hz ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าคลื่นที่เกิดในตัวกลาง ช่วงนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยในเวลาชั่วขณะ แต่มีการสั่นที่เกิดแอมพลิจูดสูงมาก ในส่วนรถไฟดีเซลรางและรถไฟสปินเตอร์ ซึ่งมีจำนวน 3-4 ตู้ขบวน พบว่าสัญญาณที่ได้จากการวัดมีแอมพลิจูดต่ำกว่ารถไฟธรรมดา ซึ่งความเร็วของรถไฟแต่ละประเภทนั้นมีความเร็วใกล้เคียงกัน เมื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของรถไฟดีเซลรางและรถไฟ สปินเตอร์ จะมีผลตอบสนองที่หลายความถี่ตลอดทั้งขบวน ทั้งนี้เนื่องจากมีหลายแรงที่กระทำกับรางรถไฟและผลตอบความถี่ที่เกิดขึ้นของรถไฟดีเซลรางและรถไฟสปินเตอร์ ในส่วนหัวขบวนจะมีความถี่ที่สูงกว่ารถไฟธรรมดา เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เกิดจากปกติรถไฟดีเซลรางและรถไฟสปินเตอร์จะมีความเร็วมากกว่ารถไฟธรรมดาอยู่แล้ว ซึ่งความเร็วที่สูงกว่าทำให้เกิดความถี่ที่สูงเช่นกันจากสมการคลื่น $v = f\lambda$ ซึ่ง ความเร็วแปลผันตรงกับ ความถี่

เนื่องจากการศึกษาเรื่อง P-wave เป็นการศึกษาคลื่นผ่านตัวกลางเพื่อการวิเคราะห์และเตือนภัยล่วงหน้า ซึ่งผู้วิจัยมีความต้องการจะแยกความแตกและการทำนายระยะการเกิดคลื่นนั้นๆ จากการทดลองทำให้ผู้วิจัยสามารถวัดการเกิดคลื่นในตัวกลางที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากรถไฟแต่ละประเภท ได้ระยะที่ไม่ไกลมาก ประมาณ 10 เมตร ทั้งนี้เนื่องจาก การออกแบบโครงสร้างของรางรถไฟที่มีความเสถียรมาก ทำให้ไม่สามารถวัดคลื่นได้ในระยะที่ไกลออกไปมากๆ ได้และอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวเซ็นเซอร์มีความไวในการวัดสัญญาณจากระดับการสั่นสะเทือนของรางไม่เพียง พอที่จะสามารถวัดคลื่นได้ในระยะไกลๆ ซึ่งอุปกรณ์สามารถวัดได้คลื่นและสามารถทำนายระยะได้ดี โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้วัดคลื่นจากการสั่นไหว ก็คือ Seismometer หรือ Geophone ซึ่งมีประสิทธิภาพในการวัดที่สูงมาก และมีราคาแพง ดังนั้น การศึกษาเรื่อง P-wave ผู้วิจัยคิดว่าอุปกรณ์ที่กล่าวมามีความจำเป็นต่อการพัฒนาสำหรับผู้ที่สนใจเป็นอย่างยิ่ง

6.2 ปัญหาในการทดลอง

1. การทดลองอาจจะมีความลำบากเนื่องจากไม่สามารถควบคุมความเร็วของรถไฟ ได้และจำนวนเที่ยวรถไฟในแต่ละวันมีจำนวนน้อย จึงต้องใช้เวลาในการรอเพื่อทำการทดลอง

2. ตัวแปลงในการทดสองมีจำนวนมากและสามารถควบคุมได้ยาก

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความเร่งที่ได้จากการวัด สามารถนำมาวิเคราะห์ โครงสร้างในงานด้านโยธาและนำไปวิเคราะห์ออกแบบรางรถไฟหรือ หมอนรองรางรถไฟให้มีความเข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากเมื่อรู้ความเร่งก็สามารถ คำนวณหาแรงที่กระทำกับรางรถไฟนะจุดๆ นั้นได้

2. ระบบการวัดที่ออกแบบขึ้นมาโดยใช้ตัวเซ็นเซอร์ และดาต้าแอกควิซิชัน (Data - Acquisition:DAQ) สามารถนำไปใช้ประโยชน์กับการวิเคราะห์สัญญาณในงานต่างๆ เช่น การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักรโดยการวิเคราะห์สเปกตรัม หรือการวัดและวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว แต่จำเป็นที่จะต้อง ใช้ตัวเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ เช่น Geophone Accelerometer ที่สามารถใช้วัดแผ่นดินไหวโดยเฉพาะ

3. สภาพของรางรถไฟบางที่อาจจะไม่สมบูรณ์ เช่น มีสภาพพื้นดินที่ไม่ดีหรือหมอนรองรางรถไฟ ใช้การมานาน หรือ ถ้านำไปวัดสะพาน อาจจะได้สัญญาณที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] ผ.ศ.วิศรุต ศรีรัตนะ. "อุปการณ์ตรวจจับ-สัญญาณ และ การแปลงสภาวะสัญญาณ" เอกสารประกอบการสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวภรรมการวัดคุม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] สมพงษ์ ใจดี . "ฟิสิกส์แผนใหม่ คลื่น เสียง แสง". กรุงเทพฯ : กรุงสยามการพิมพ์, 2523.

[3] Guo, Ruyan, ed 2003 Morphotropic phase boundary perovskites, high strain piezoelectrics and dielectric ceramics Ceramic transactions ; v.136

[4] ศักดิ์ดา ศรีสันติง "เครื่องวัดความสั่นสะเทือนแบบ 3 แกนด้วยผลึกพิโซอิเล็กตริก" ปริญญานิพนธ์ (วศ.บ (วิศวกรรมการวัดคุม))—สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2540.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Freescale Semiconductor
Technical Data

Document Number: MMA1250D
Rev 3, 03/2006

Low G Micromachined Accelerometer

MMA1250

The MMA series of silicon capacitive, micromachined accelerometers feature signal conditioning, a 2-pole low pass filter and temperature compensation. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

MMA1250D: Z AXIS SENSITIVITY MICROMACHINED ACCELEROMETER ±5g

Features

- Integral Signal Conditioning
- Linear Output
- 2nd Order Bessel Filter
- Calibrated Self-test
- EPROM Parity Check Status
- Transducer Hermetically Sealed at Wafer Level for Superior Reliability
- Robust Design, High Shock Survivability

D SUFFIX
EG SUFFIX (Pb-FREE)
16-LEAD SOIC
CASE 475-01

Typical Applications

- Vibration Monitoring and Recording
- Appliance Control
- Mechanical Bearing Monitoring
- Computer Hard Drive Protection
- Computer Mouse and Joysticks
- Virtual Reality Input Devices
- Sports Diagnostic Devices and Systems

ORDERING INFORMATION

Device Name	Temperature Range	Case No.	Package
MMA1250D	–40° to 125°C	475-01	SOIC-16
MMA1250EG	–40° to 125°C	475-01	SOIC-16
MMA1250EGR2	–40° to 125°C	475-01	SOIC-16

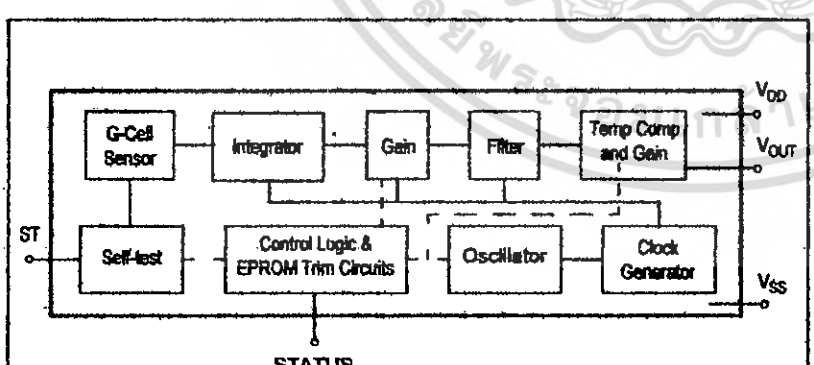


Figure 1. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

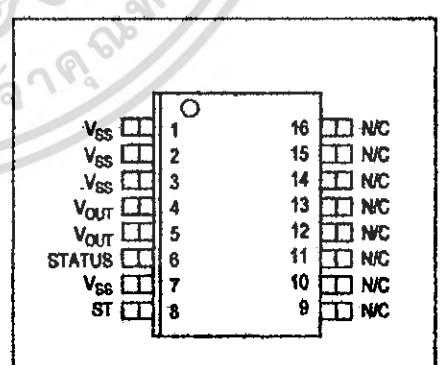


Figure 2. Pin Connections

© Freescale Semiconductor, Inc., 2006. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Maximum Ratings
(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Powered Acceleration (all axes)	G_{pd}	1500	g
Unpowered Acceleration (all axes)	G_{upd}	2000	g
Supply Voltage	V_{DD}	–0.3 to +7.0	V
Drop Test [1]	D_{drop}	1.2	m
Storage Temperature Range	T_{stg}	–40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.

Although the Freescale accelerometers contain internal 2kV ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can alter the performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Operating Characteristics

(Unless otherwise noted: –40°C ≤ T_A ≤ +105°C, 4.75 ≤ V_{DD} ≤ 5.25, Acceleration = 0g, Loaded output[1])

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range[2]					
Supply Voltage[3]	V_{DD}	4.75	5.00	5.25	V
Supply Current	I_{DD}	3.0	2.1	3.0	mA
Operating Temperature Range	T_A	–40	—	+105	°C
Acceleration Range	g_{FS}	—	5	—	g
Output Signal					
Zero g (T_A = 25°C, V_{DD} = 5.0 V)[4]	V_{OFF}	2.25	2.5	2.75	V
Zero g (V_{DD} = 5.0 V)	V_{OFF}	2.0	2.5	3.0	V
Sensitivity (T_A = 25°C, V_{DD} = 5.0 V)[5]	S	380	400	420	mV/g
Sensitivity (V_{DD} = 5.0 V)	S	370	400	430.1	mV/g/V
Bandwidth Response	f_{-3dB}	42.5	50	57.5	Hz
Nonlinearity	NL_{OUT}	–1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
RMS (0.1 Hz – 1.0 kHz)	n_{RMS}	—	2.0	4.0	mVrms
Spectral Density (RMS, 0.1 Hz – 1.0 KHz)[6]	n_{SD}	—	700	—	µg/√Hz
Self-Test					
Output Response (V_{DD} = 5.0 V)	ΔV_{ST}	1.0	1.25	1.5	V
Input Low	V_{IL}	V_{SS}	—	0.3 V_{DD}	V
Input High	V_{IH}	0.7 V_{DD}	—	V_{DD}	V
Input Loading[7]	I_{IN}	–50	–125	–300	µA
Response Time[8]	t_{ST}	—	2.0	25	ms
Status[9], [10]					
Output Low (I_{load} = 100 µA)	V_{OL}	—	—	0.4	V
Output High (I_{load} = 100 µA)	V_{OH}	V_{DD} –0.8	—	—	V
Output Stage Performance					
Electrical Saturation Recovery Time[11]	t_{DELAY}	—	—	2.0	ms
Full Scale Output Range (I_{OUT} = 200 µA)	V_{FSO}	V_{SS} + 0.25	—	V_{DD} – 0.25	V
Capacitive Load Drive[12]	C_L	—	—	100	pF
Output Impedance	Z_O	—	50	—	W
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity[13]	$V_{XZ,YZ}$	—	—	5.0	% FSO

1. For a loaded output the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1 kΩ resistor and a 0.01 µF capacitor to ground.
2. These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
3. Within the supply range of 4.75 and 5.25 volts, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
4. The device can measure both + and – acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above V_{DD}/2 and for negative acceleration the output will decrease below V_{DD}/2.
5. The device is calibrated at 5g.
6. At clock frequency ±70 kHz.
7. The digital input pin has an internal pull-down current source to prevent inadvertent self test initiation due to external board level leakages.
8. Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
9. The Status pin output is not valid following power-up until at least one rising edge has been applied to the self-test pin. The Status pin is high whenever the self-test input is high, as a means to check the connectivity of the self-test and Status pins in the application.
10. The Status pin output latches high if a Low Voltage Detection or Clock Frequency failure occurs, or the EPROM parity changes to odd. The Status pin can be reset low if the self-test pin is pulsed with a high input for at least 100 µs, unless a fault condition continues to exist.
11. Time for amplifiers to recover after an acceleration signal causes them to saturate.
12. Preserves phase margin (60°) to guarantee output amplifier stability.
13. A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90° from the true axis of sensitivity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a CMOS signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined "cap" wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as two stationary plates with a moveable plate in-between. The center plate can be deflected from its rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

When the center plate deflects, the distance from it to one fixed plate will increase by the same amount that the distance to the other plate decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell plates form two back-to-back capacitors (Figure 4). As the center plate moves with acceleration, the distance between the plates changes and each capacitor's value will change, ($C = A\varepsilon/D$). Where A is the area of the plate, ε is the dielectric constant, and D is the distance between the plates.

The CMOS ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

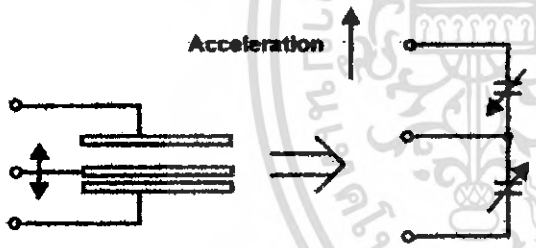


Figure 3. Transducer Physical Model

Figure 4. Equivalent Circuit Model

SPECIAL FEATURES

Filtering

The Freescale accelerometers contain an onboard 2-pole switched capacitor filter. A Bessel implementation is used because it provides a maximally flat delay response (linear phase) thus preserving pulse shape integrity. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

Self-Test

The sensor provides a self-test feature that allows the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation. This feature is critical in applications such as automotive airbag systems where system integrity must be ensured over the life of the vehicle. A fourth "plate" is used in the g-cell as a self-test plate. When the user applies a logic high input to the self-test pin, a calibrated potential is applied across the self-test plate and the moveable plate. The resulting electrostatic force ($Fe = {}^1/_2\, AV^2/d^2$) causes the center plate to deflect. The resultant deflection is measured by the accelerometer's control ASIC and a proportional output voltage results. This procedure assures that both the mechanical (g-cell) and electronic sections of the accelerometer are functioning.

Status

Freescale accelerometers include fault detection circuitry and a fault latch. The Status pin is an output from the fault latch, OR'd with self-test, and is set high whenever the following event occurs:

- Parity of the EPROM bits becomes odd in number.

The fault latch can be reset by a rising edge on the self-test input pin, unless one (or more) of the fault conditions continues to exist.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BASIC CONNECTIONS

Pinout Description

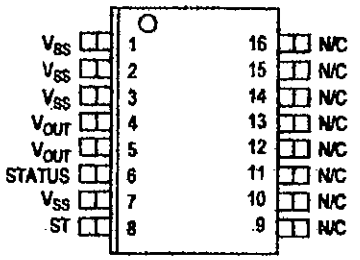


Table 3. Pin Descriptions

Pin No.	Pin Name	Description
1 thru 3	V_{SS}	Redundant connections to the internal V_{SS} and may be left unconnected.
4	V_{OUT}	Output voltage of the accelerometer.
5	STATUS	Logic output pin to indicate fault.
6	V_{DD}	The power supply input.
7	V_{SS}	The power supply ground.
8	ST	Logic input pin used to initiate self-test.
9 thru 13	Trim pins	Used for factory trim. Leave unconnected.
14 thru 16	—	No internal connection. Leave unconnected.

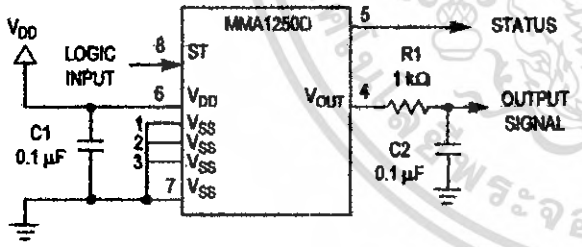


Figure 5. SOIC Accelerometer with Recommended Connection Diagram

PCB Layout

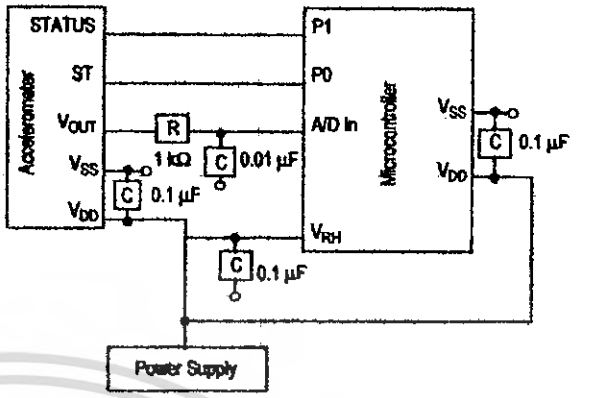


Figure 6. Recommended PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller

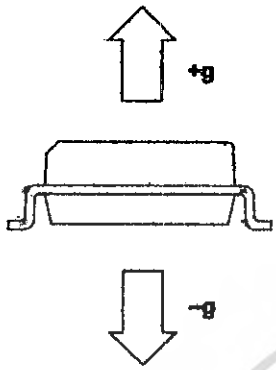
NOTES:

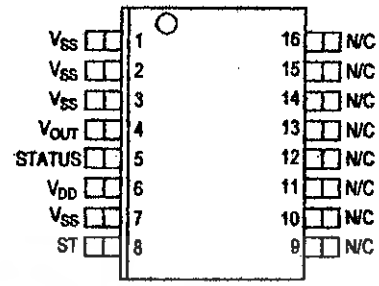
1. Use a 0.1 µF capacitor on V_{DD} to decouple the power source.
2. Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
3. Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in Figure 6 .
4. Use an RC filter of 1 kΩ and 0.01 µF on the output of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
5. PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
6. Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
7. A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency. This will prevent aliasing errors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACCELERATION SENSING DIRECTIONS

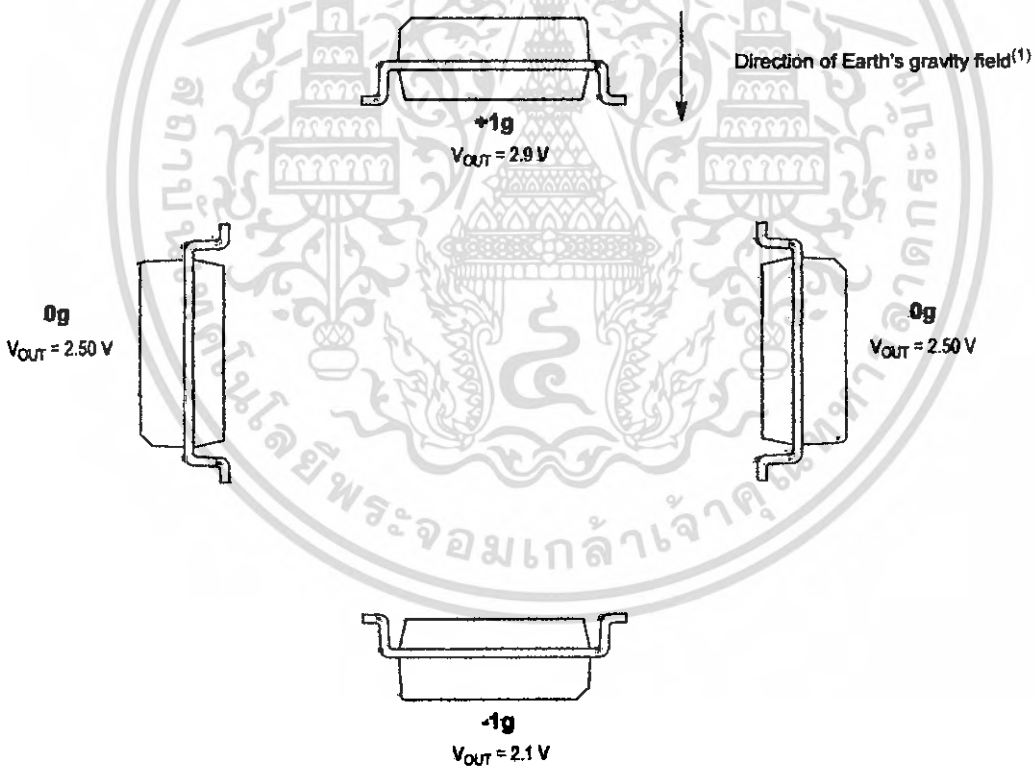
DYNAMIC ACCELERATION





16-Pin SOIC Package
N/C pins are recommended to be left FLOATING

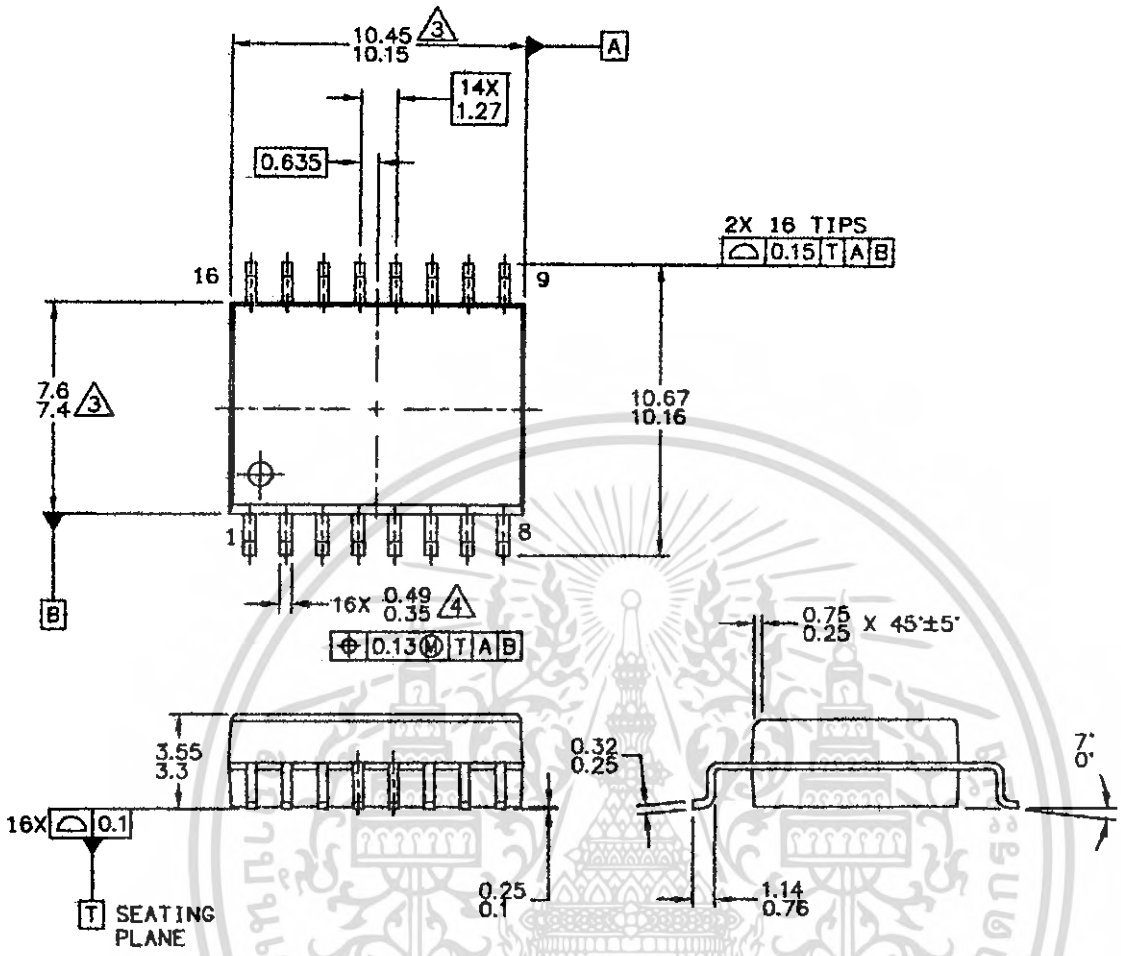
STATIC ACCELERATION



1. When positioned as shown, the Earth's gravity will result in a positive 1g output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	MECHANICAL OUTLINE	PRINT VERSION NOT TO SCALE
TITLE: 16 LEAD SOIC ACCELEROMETER	DOCUMENT NO: 98ASB16926C	REV: C
	CASE NUMBER: 475-01	17 MAR 2005
	STANDARD: NON-JEDEC	

PAGE 1 OF 2

CASE 475-01
ISSUE C
16-LEAD SOIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

NOTES:

1. ALL DIMENSONS ARE IN MILLIMETERS.
2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. THESE DIMENSIONS DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED 0.15 PER SIDE.
4. THIS DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. PROTRUSIONS SHALL NOT CAUSE THE LEAD WIDTH TO EXCEED 0.75

© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.

MECHANICAL OUTLINE	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE: 16 LEAD SOIC ACCELEROMETER	DOCUMENT NO: 98ASB16926C	REV: C
	CASE NUMBER: 475-01	17 MAR 2005
	STANDARD: NON-JEDEC	

PAGE 2 OF 2

CASE 475-01
ISSUE C
16-LEAD SOIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

How to Reach Us:

Home Page:
www.freescale.com

E-mail:
support@freescale.com

USA/Europe or Locations Not Listed:
Freescale Semiconductor
Technical Information Center, CH370
1300 N. Alma School Road
Chandler, Arizona 85224
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130
support@freescale.com

Europe, Middle East, and Africa:
Freescale Halbleiter Deutschland GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (English)
+46 8 52200080 (English)
+49 89 92103 559 (German)
+33 1 69 35 48 48 (French)
support@freescale.com

Japan:
Freescale Semiconductor Japan Ltd.
Headquarters
ARCO Tower 15F
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,
Tokyo 153-0064
Japan
0120 191014 or +81 3 5437 9125
support.japan@freescale.com

Asia/Pacific:
Freescale Semiconductor Hong Kong Ltd.
Technical Information Center
2 Dai King Street
Tai Po Industrial Estate
Tai Po, N.T., Hong Kong
+800 2666 8080
support.asia@freescale.com

For Literature Requests Only:
Freescale Semiconductor Literature Distribution Center
P.O. Box 5405
Denver, Colorado 80217
1-800-441-2447 or 303-675-2140
Fax: 303-675-2150
LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com

RoHS-compliant and/or Pb-free versions of Freescale products have the functionality and electrical characteristics of their non-RoHS-compliant and/or non-Pb-free counterparts. For further information, see http://www.freescale.com or contact your Freescale sales representative.

For information on Freescale's Environmental Products program, go to http://www.freescale.com/epp .

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Freescale Semiconductor, Inc., 2006. All rights reserved.

freescale™
semiconductor

MMA1250D
Rev. 3
09/2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low-Cost Multifunction DAQ for USB

NI USB-6008, NI USB-6009

- Small and portable
- 12 or 14-bit input resolution, at up to 48 kS/s
- Built-in, removable connectors for easier and more cost-effective connectivity
- 2 true DAC analog outputs for accurate output signals
- 12 digital I/O lines (TTL/LVTTL/CMOS)
- 32-bit event counter
- Student kits available
- OEM versions available

Operating Systems

- Windows 2000/XP
- Mac OS X[1]
- Linux®[1]
- Pocket PC
- Win CE

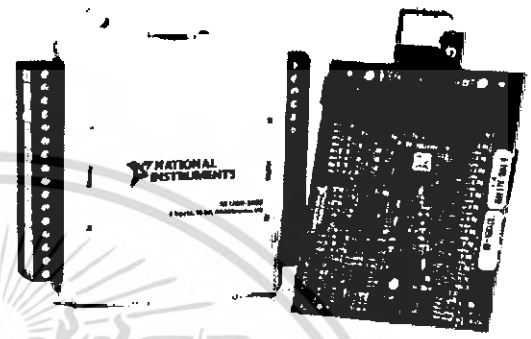
Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI

Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx
- Ready-to-run data logger

[1]Mac OS X and Linux users need to download NI-DAQmx Base



Product	Bus	Analog Inputs[1]	Input Resolution (bits)	Max Sampling Rate (kS/s)	Input Range (V)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Output Rate (Hz)	Output Range (V)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Trigger
USB-6009	USB	8 SE/4 DI	14	48	±1 to ±20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital
USB-6008	USB	8 SE/4 DI	12	10	±1 to ±20	2	12	150	0 to 5	12	1	Digital

[1]SE = single ended, DI = differential

Hardware Description

The National Instruments USB-6008 and USB-6009 multifunction data acquisition (DAQ) modules provide reliable data acquisition at a low price. With plug-and-play USB connectivity, these modules are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

Software Description

The NI USB-6008 and USB-6009 use NI-DAQmx high-performance, multithreaded driver software for interactive configuration and data acquisition on Windows OSs. All NI data acquisition devices shipped with NI-DAQmx also include VI Logger Lite, a configuration-based data-logging software package.

Mac OS X and Linux users can download NI-DAQmx Base, a multiplatform driver with a limited NI-DAQmx programming interface. You can use NI-DAQmx Base to develop customized data acquisition applications with National Instruments LabVIEW or C-based development environments. NI-DAQmx Base includes a ready-to-run data logger application that acquires and logs up to eight channels of analog data.

PDA users can download NI-DAQmx Base for Pocket PC and Win CE to develop customized handheld data acquisition applications.

Recommended Accessories

The USB-6008 and USB-6009 have removable screw terminals for easy signal connectivity. For extra flexibility when handling multiple wiring configurations, NI offers the USB-6008/09 Accessory Kit, which includes two extra sets of screw terminals, extra labels, and a screwdriver.

In addition, the USB-6008/09 Prototyping Accessory provides space for adding more circuitry to the inputs of the USB-6008 or USB-6009.

Common Applications

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for a number of applications where economy, small size, and simplicity are essential, such as:

- Data logging – Log environmental or voltage data quickly and easily.
- Academic lab use – The low price facilitates student ownership of DAQ hardware for completely interactive lab-based courses. (Academic pricing available. Visit **ni.com/academic** for details.)
- Embedded OEM applications.

NATIONAL INSTRUMENTS™

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Information for Student Ownership

To supplement simulation, measurement, and automation theory courses with practical experiments, NI has developed the USB-6008 and USB-6009 student kits, which include the LabVIEW Student Edition and a ready-to-run data logger application. These kits are exclusively for students, giving them a powerful, low-cost hands-on learning tool. Visit **ni.com/academic** for more details.

Information for OEM Customers

For information on special configurations and pricing, call (800) 813 3693 (U.S. only) or visit **ni.com/oem**. Go to the Ordering Information section for part numbers.

Ordering Information

NI USB-6008[1]	779051-01
NI USB-6009[1]	779026-01
NI USB-6008 OEM	193132-02
NI USB-6009 OEM	193132-01
NI USB-6008 Student Kit[1,2]	779320-22
NI USB-6009 Student Kit[1,2]	779321-22

[1] Includes NI-DAQmx software, NI ready-to-run data logger software, and a USB cable

[2] Includes LabVIEW Student Edition.

BUY NOW! Request product specifications, pricing, and accessory [illegible] Call 800 265 3[illegible] (U.S.) or go to ni.com/usb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specifications

Typical at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Absolute accuracy, single-ended

Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum (0 to 55 °C) (mV)
±10	14.7	138

Absolute accuracy at full scale, differential[1]

Range	Typical at 25 °C (mV)	Maximum (0 to 55 °C) (mV)
±20	14.7	138
±10	7.73	84.8
±5	4.28	58.4
±4	3.59	53.1
±2.5	2.56	45.1
±2	2.21	42.5
±1.25	1.70	38.9
±1	1.53	37.5

Number of channels ..... 8 single-ended/4 differential
Type of ADC ..... Successive approximation

ADC resolution (bits)

Module	Differential	Single-Ended
USB-6008	12	11
USB-6009	14	13

Maximum sampling rate (system dependent)

Module	Maximum Sampling Rate (kS/s)
USB-6008	10
USB-6009	48

Input range, single-ended ..... ±10 V
Input range, differential ..... ±20, ±10, ±5, ±4, ±2.5, ±2, ±1.25, ±1 V
Maximum working voltage ..... ±10 V
Overvoltage protection ..... ±35 V
FIFO buffer size ..... 512 B
Timing resolution ..... 41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy ..... 100 ppm of actual sample rate
Input impedance ..... 144 k
Trigger source ..... Software or external digital trigger
System noise ..... 0.3 LSB_{rms} (±10 V range)

Analog Output

Absolute accuracy (no load) ..... 7 mV typical, 36.4 mV maximum at full scale
Number of channels 2
Type of DAC ..... Successive approximation
DAC resolution ..... 12 bits
Maximum update rate ..... 150 Hz, software-timed
Output range ..... 0 to +5 V
Output impedance ..... 50 Ω
Output current drive ..... 5 mA
Power-on state ..... 0 V
Slew rate ..... 1 V/µs
Short-circuit current ..... 50 mA

Digital I/O

Number of channels ..... 12 total
8 (P0.<0..7>)
4 (P1.<0..3>)
Direction control ..... Each channel individually programmable as input or output
Output driver type
USB-6008 ..... Open-drain
USB-6009 ..... Each channel individually programmable as push-pull or open-drain
Compatibility ..... CMOS, TTL, LVTTL
Internal pull-up resistor ..... 4.7 kΩ to +5 V
Power-on state ..... Input (high impedance)
Absolute maximum voltage range ..... -0.5 to +5.8 V

Digital logic levels

Level	Min	Max	Units
Input low voltage	-0.3	0.8	V
Input high voltage	2.0	5.8	V
Input leakage current	–	50	µA
Output low voltage (I = 8.5 mA)	–	0.8	V
Output high voltage (push-pull, I = -8.5 mA)	2.0	3.5	V
Output high voltage (open-drain, I = -0.6 mA, nominal)	2.0	5.0	V
Output high voltage (open-drain, I = -8.5 mA, with external pull-up resistor)	2.0	–	V

Counter

Number of counters 1
Resolution ..... 32 bits
Counter measurements ..... Edge counting (falling edge)
Pull-up resistor ..... 4.7 kΩ to 5 V
Maximum input frequency ..... 5 MHz
Minimum high pulse width ..... 100 ns
Minimum low pulse width ..... 100 ns
Input high voltage ..... 2.0 V
Input low voltage ..... 0.8 V

Power available at I/O connector

+5 V output (200 mA maximum) ..... +5 V typical
+4.85 V minimum
+2.5 V output (1 mA maximum) ..... +2.5 V typical
+2.5 V output accuracy ..... 0.25% max
Voltage reference temperature drift ..... 50 ppm/°C max

[1]Input voltages may not exceed the working voltage range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Dimensions (without connectors)	6.35 by 8.51 by 2.31 cm (2.50 by 3.35 by 0.91 in.)
Dimensions (with connectors)	8.18 by 8.51 by 2.31 cm (3.22 by 3.35 by 0.91 in.)
Weight (without connectors)	59 g (2.1 oz)
Weight (with connectors)	84 g (3 oz)
I/O connectors	USB series B receptacle (2) 16-position (screw-terminal) plug headers
Screw-terminal wiring	16 to 28 AWG
Screw-terminal torque	0.22 to 0.25 N•m (2.0 to 2.2 lb•in.)

Power Requirement

USB (4.10 to 5.25 VDC)	80 mA typical 500 mA maximum
USB suspend	300 µA typical 500 µA maximum

Environmental

The USB-6008 and USB-6009 are intended for indoor use only.

Operating environment	
Ambient temperature range	0 to 55 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity range	10 to 90%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)
Storage environment	
Ambient temperature range	-40 to 85 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity range	5 to 90%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)
Maximum altitude	2,000 m (at 25 °C ambient temperature)
Pollution degree	2

Safety and Compliance

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CAN/CSA-C22.2 No. 61010-1

Note: For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit **ni.com/certification**, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 EMC requirements; Minimum Immunity
- EN 55011 Emissions; Group 1, Class A
- CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 Emissions; Class A

Note: For EMC compliance, operate this device according to product documentation.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 73/23/EEC; Low-Voltage Directive (safety)
- 89/336/EEC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Note: Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit **ni.com/certification**, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

EU Customers: At the end of their life cycle, all products must be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit **ni.com/environment/weee.htm**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NI Services and Support

NI has the services and support to meet your needs around the globe and through the application life cycle – from planning and development through deployment and ongoing maintenance. We offer services and service levels to meet customer requirements in research, design, validation, and manufacturing. Visit **ni.com/services**.

Training and Certification

NI training is the fastest, most certain route to productivity with our products. NI training can shorten your learning curve, save development time, and reduce maintenance costs over the application life cycle. We schedule instructor-led courses in cities worldwide, or we can hold a course at your facility. We also offer a professional certification program that identifies individuals who have high levels of skill and knowledge on using NI products. Visit **ni.com/training**.

Professional Services

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 600 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit **ni.com/alliance**.

NATIONAL INSTRUMENTS Certified Alliance Partner

OEM Support

We offer design-in consulting and product integration assistance if you want to use our products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit **ni.com/oem**.

Local Sales and Technical Support

In offices worldwide, our staff is local to the country, giving you access to engineers who speak your language. NI delivers industry-leading technical support through online knowledge bases, our applications engineers, and access to 14,000 measurement and automation professionals within NI Developer Exchange forums. Find immediate answers to your questions at **ni.com/support**.

We also offer service programs that provide automatic upgrades to your application development environment and higher levels of technical support. Visit **ni.com/ssp**.

Hardware Services

NI Factory Installation Services

NI Factory Installation Services (FIS) is the fastest and easiest way to use your PXI or PXI/SCXI combination systems right out of the box. Trained NI technicians install the software and hardware and configure the system to your specifications. NI extends the standard warranty by one year on hardware components (controllers, chassis, modules) purchased with FIS. To use FIS, simply configure your system online with **ni.com/pxiadvisor**.

Calibration Services

NI recognizes the need to maintain properly calibrated devices for high-accuracy measurements. We provide manual calibration procedures, services to recalibrate your products, and automated calibration software specifically designed for use by metrology laboratories. Visit **ni.com/calibration**.

Repair and Extended Warranty

NI provides complete repair services for our products. Express repair and advance replacement services are also available. We offer extended warranties to help you meet project life-cycle requirements. Visit **ni.com/services**.

NATIONAL INSTRUMENTS

ni.com • (800) 813 3693
National Instruments • info@ni.com

351378A-01 2006-7322-301-101-D

© 2006 National Instruments Corporation. All rights reserved. CVI, LabVIEW, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, and SCXI are trademarks of National Instruments. Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds in the U.S. and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from NI and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with NI.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้